

電力設備で生じる放電現象の電磁環境特性  
に関する研究

学籍番号：17834702

宮島 清富

指導教員                  宇野 亨                  教授

東京農工大学大学院    工学府

電子情報工学専攻    博士後期課程

2021 年 10 月    博士学位論文

## 要旨

本論文では、電力設備の高電圧や電力設備で発生する放電による電気・電磁現象に関する環境影響について、その特徴を明らかにする。さらに、高電圧による電界や放電現象が電子回路や放送、また、可聴騒音として人間の聴覚に及ぼす影響を実験的に解明し、影響因子の低減手法を述べる。

第1章では、研究の背景、研究の目的および本論文の構成について示す。

第2章では、超高圧の交流架空送電線について概要を述べ、送電線周辺の電界のレベルや分布を数値計算により明らかにする。さらに、送電線の電界により電子回路が誤動作する可能性があることを示し、実験により電子回路の誤動作発生条件を明らかにする。また、第2章では降雨時に送電線から発生するコロナ放電について、送電線の電線の表面改質にてコロナ放電が抑制できることを示し、電線表面の超撥水化や超親水化がコロナ騒音低減に有効であることを示す。さらに、風音対策用のスパイラル線を、酸化チタンによる溶射で超親水化した低騒音スパイラル線を開発し、送電線の実規模試験から、低騒音スパイラル線のコロナ騒音低減効果を明らかにする。

第3章では、我々の生活環境に密接する配電線について、配電線の不良がいしから発生する火花放電の特徴を示し、火花放電の発生メカニズムを実験と数値計算から明らかにする。そして、振幅確率分布 (APD) を用いた火花放電の放射電磁界の定量化について述べ、デジタル地上テレビ放送に影響する火花放電の放射電磁界の評価法の一例を示す。また、第3章では配電線、引込線に接続されている一般家庭のコンセントに雷過電圧が発生する事例を示し、その特徴を明らかにする。雷過電圧の発生メカニズムについては、電力会社が運用する落雷位置標定システムのデータと比較し、落雷時の雷電流による磁界の変化が関係することを示す。

第4章では、家電機器にも多く使用されている誘導性負荷を含む電気回路の電気接点を開いたときに、接点間に発生するシャワリングアークについて、その特徴を明らかにする。シャワリングアークの電圧波形は電気接点の表面状態によっても変化し、シャワリングアークが電子回路の誤動作を引き起こすとき、誤動作の様子は接点表面の状態によっても変化することを示す。

最後に第5章では、本研究のまとめを示す。本論文では、電力設備の高電圧や電力設備で発生する放電現象による電気・電磁現象に関する環境影響について研究を行った。

## Summary

In this paper, environmental effects of electromagnetic phenomena caused by high voltage of electric power facilities and several types of discharges generated on electric power equipment are described. Specifically, the effects of electronic circuit malfunction due to high electric field and showering arc discharge, audible noise of corona discharge, and immunity of digital terrestrial broadcasting against spark discharge are clarified experimentally, and the generation mechanism and reduction methods of influential factors will be described.

In Chapter 1, the background of the research, the purpose of the research, and the structure of this paper are shown.

In Chapter 2, the specifications of high voltage AC overhead transmission lines are explained, and the electric field level around transmission lines are clarified using numerical calculation. Then, it has been shown that the electronic circuit malfunctions due to the electric field of transmission lines, and the malfunction conditions of the electronic circuit will be clarified by high voltage experiments. And in Chapter 2, it is shown that the corona discharge generated from transmission lines during rainfall condition can be suppressed by making use of surface processing of the electric wire. It is clarified that the super-hydrophobic-surface and super-hydrophilic-surface of wires in reducing the audible noise of corona discharge. Furthermore, low-noise spiral wires that has super-hydrophilic-surface by thermal spraying of TiO<sub>2</sub> has been developed, and the audible noise of reduction effect of low-noise spiral wires will be clarified from a full-scale test of the transmission lines.

In chapter 3, it has been shown that the characteristics of spark discharge generated from faulty insulators of distribution lines, which are closely related to our daily life, and it has been clarified the generation mechanism of spark discharge from experiments and numerical calculations. Then, it has shown that the radiated electromagnetic field of spark discharge can be quantitatively using the amplitude probability distribution (APD), and it has shown an example of the evaluation method of the radiated electromagnetic field of spark discharge that affects digital terrestrial broadcasting. And in Chapter 3 has shown an example of lightning overvoltage occurring in the power supply line of consumers connected to distribution lines and service lines, and clarifies its characteristics. Then, it is shown by comparison with the data of the lightning location and protection system operated by electric power companies that the generation mechanism of the lightning overvoltage is related to the change of the magnetic field due to the current of lightning flash to earth.

In chapter 4, it has clarified characteristics of the showering arc generated between contacts when the electrical contact of the electric circuit including the inductive load are opened. The voltage waveform of the showering arc changes depending on the surface condition of the

contact, and when the showering arc causes a malfunction of the electronic circuit, it has been the state of the malfunction also changes depending on the surface condition of the contact.

In Chapter 5, the conclusion of this study is shown. In this paper, it is studied environmental effects of electromagnetic phenomena caused by high voltage of electric power facilities and several types of discharges generated on electric power equipment.



# 目次

第1章 緒言	1
1. 1 研究の背景	2
1. 2 電力設備と環境問題	3
1. 3 電力設備と電磁環境	3
1. 4 本論文の概要	6
第2章 交流架空送電線の電磁環境	8
2. 1 商用周波電界	12
2. 1. 1 架空送電線周辺の商用周波電界の特徴	13
2. 1. 2 商用周波電界による電子回路への影響	18
2. 2 コロナ放電	31
2. 2. 1 架空送電線から発生するコロナ放電の特徴	31
2. 2. 2 電線表面のぬれ性とコロナ騒音の関係	36
2. 2. 3 コロナ騒音の低減手法	48
第3章 配電線と引込線の電磁環境	59
3. 1 火花放電	61
3. 1. 1 配電線のがいしから発生する火花放電の特徴	62
3. 1. 2 火花放電の放射電磁界によるデジタル地上波テレビ放送への影響	77
3. 2 雷放電による雷過電圧	87
3. 2. 1 引込線に発生する雷過電圧の特徴	88
3. 2. 2 雷過電圧の広域調査	99
第4章 屋内配線の電磁環境	112
4. 1 シャワリングアーク	113
4. 1. 1 電気接点間に発生するシャワリングアークの特徴	115
4. 1. 2 電気接点の表面あらさとシャワリングアークの関係	126
4. 1. 3 シャワリングアークによる電子回路への影響	133
第5章 結言	137
謝辞	138
参考文献	139
研究業績	144

## 1. 緒言

我々の生活や産業活動において、電気は必要不可欠であり、安定した電力供給を目標に様々な研究や技術開発が進められてきた。1950 年頃より、電力需要が急速に増加しはじめ、大規模な発電所の建設が増加し、これに伴い効率的・経済的に電力を輸送する送電線や変電所の建設、配電線の建設が進められてきた。図 1.1 は発電所で発電された電気が一般家庭に届くまでの大まかな流れを示す。火力や水力、原子力、また近年では、風力や太陽光などの自然エネルギーで発電された電気は送電線を使用し、長距離輸送される。このとき、変電所で電圧の昇圧や降圧がなされる。送電線や変電所を経て、電気はネットワーク状に構築された配電線を使用し、各家庭に配られるが、一般家庭に届くときは 100V や 200V まで降圧されている。図 1.1 は交流の系統を示しているが、国内では設備数は極めて少ないが直流の系統も運用されている。直流系統の概要を図 1.2 に示す。直流送電線は海峡横断で活用されることと、国内の交流系統は西日本が 60Hz、東日本が 50Hz を使用しているため、西日本と東日本の系統連系に活用される。

最近ではバッテリー等を用いた電力の貯蔵技術も発展してきたが、基本的に電気は発電所で発電された電気がリアルタイムで一般家庭や工場等で使用される。それゆえ、発電所だけでなく、送電線や変電所、配電線などの電力設備に不具合が発生した場合、停電や電圧変動、周波数変動など電力品質が低下し、我々の生活や産業活動に影響を及ぼすことがある。

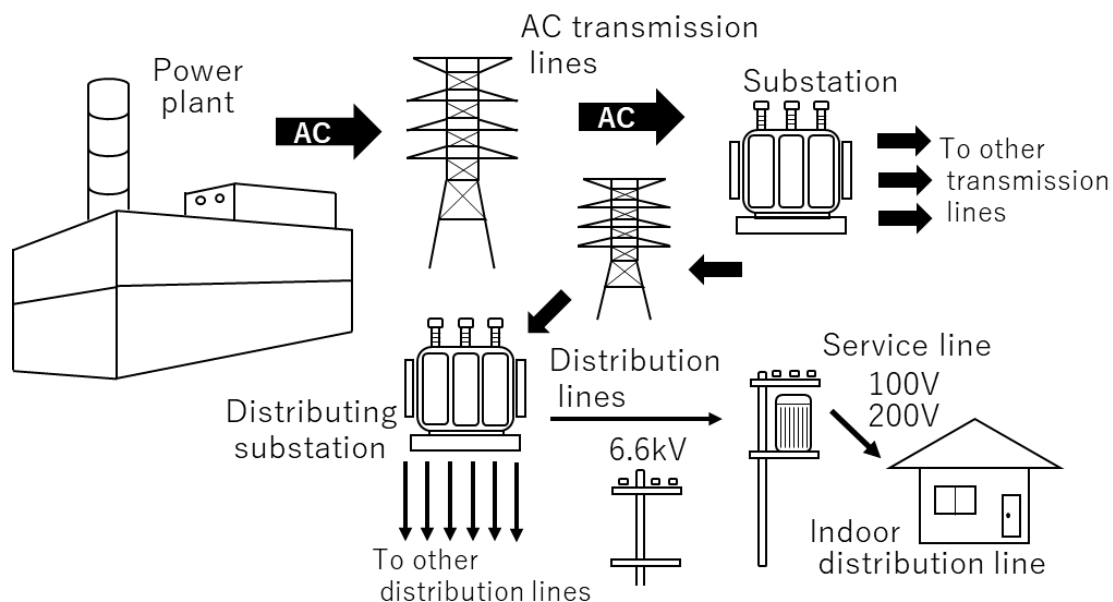


図 1.1 交流系統の概要

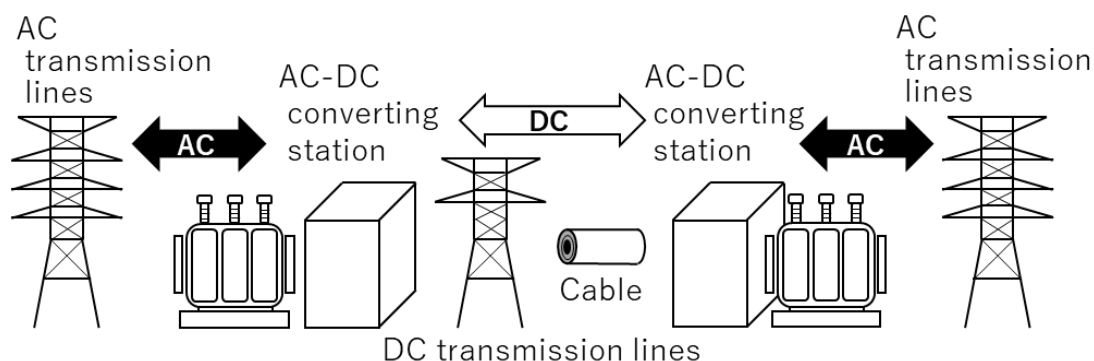


図 1.2 直流系統の概要

電力品質を表す主なものは、周波数、電圧、供給信頼度の3つであり、その他に高調波、電圧フリッカ、瞬時電圧低下などがある。周波数は、電力の需要と供給のアンバランスが生じると交流系統全体で等しい周波数変動が発生し、例えば、周波数の低下が系統崩壊（大規模停電）を引き起こすこともある。国内では 60Hz 系統、50Hz 系統いずれにおいても標準周波数に対しておおむね 0.1Hz 以内に収まるように需給調整が行われている[1]。電圧変動は無効電力バランスのずれによって発生するが、周波数変動と異なり、その影響がローカルな範囲にとどまる。そのため、電圧変動の発生が見られる地域において、局所的に無効電力を調整して対応することが多い[1]。最終需要家（一般家庭）に届けられる電圧の基準値は電気事業法施行規則第 44 条において、需要家に対して維持すべき電圧として  $101\text{V} \pm 6\text{V}$ 、 $202\text{V} \pm 20\text{V}$  と規定されている。これら以外にも電力会社では、電圧管理目標値を独自に定めて遵守するようにしている。供給信頼度は「停電の少なさ」を意味し、具体的には停電の発生頻度や停電時間により表現される。日本の停電時間は世界から見ると短い傾向にある。

## 1. 1 研究の背景

電力設備の性能評価としてはシステムも含め、高い電力品質を維持することが重要であるが、我々の生活環境にある発電所や変電所、送電線、また、最も身近にある配電線は環境問題にも意識を向ける必要がある。電力設備では高電圧に課電されたり、大電流を流したり、場合によっては放電現象が発生したりする。また、電力設備の多くが屋外に設置されているため、自然現象の影響を受ける。自然環境にさらされても高い電力品質を維持し、高電圧や大電流、放電現象による環境負荷も低く、我々の日常生活に影響の少ない電力設備の建設や運用を実現するため、自然環境が電力設備に及ぼす影響や、反対に電力設備が自然環境や我々の日常生活に及ぼす影響を把握し、評価することは極めて重要である。

本論文では、電力設備の電圧や電流、放電現象による電気・電磁現象に係る環境影響に着目し、その特徴や影響因子の発生メカニズムや低減手法について取り扱う。

## 1. 2 電力設備と環境問題

1950 年頃より、電力設備の建設が進み、さらに高電圧化が進められ、我々の生活環境と電力設備が接近する状況が増えてきた。大型の電力設備は設備が存在すること自体、周囲の環境に影響を及ぼすことがある。

表 1.1 は電力設備が関係する環境問題の事例である。発電所においては温室効果ガスである二酸化炭素の排出や冷却水として海などに排出される温排水、風車等の回転機では低周波振動や変電所でも変圧器の低周波の磁励音が問題となることがある。原子力発電所では放射能やバイオマス発電所でも悪臭の問題、高い送電鉄塔では日照や強風にさらされる場合は風切音による騒音問題もある。また、山間部の架空送電線の鉄塔では景観を損ねるなどの苦情もたびたびあり、鉄塔表面を緑色や茶色に塗装したり、電線表面の光沢を抑制するため、低反射の処理を行ったりすることもある。特に架空送電線については、建設前のルート選定が重要であり、自然環境や社会環境との調和が必要であるが、国内においては狭小地特有の問題として、時代とともに人家が送電線に接近するなどの状況もある[2]。

表 1.1 環境問題の事例

環境要素	対象	事例
大気	発電所、変電所	排気ガス、温室効果ガス
水	発電所、ダム	温排水
騒音・振動	発電所、風車、変電所	回転機の動作音、低周波振動、放電
放射能	原子力発電所	放射能汚染、核廃棄物
電磁界	電力設備全般	電界・磁界影響、電磁波、放電
悪臭	火力発電所、バイオマス発電所	燃焼ガス
日照	鉄塔、ビル	日照阻害
風害	鉄塔、ビル	風切音、ビル風
景観・史跡	電力設備全般	目障り、自然との不調和、NIMBY

## 1. 3 電力設備と電磁環境

表 1.2 は電力設備が関係する電磁環境問題の事例である。大型の送電線がある場合、送電線そのものが放送や通信の無線信号の妨げとなることがあり、送電線や変電所の電圧や電流が関係することもある。交流の高電圧では静電誘導や電界が人体に感知されにくくなるように送電線の高さが決定されているが、高電圧の電線から発生するコロナ放電による可聴騒音を人が感知することがある[2]。直流送電線では電線から発生するコロナ放電に伴うイオン流が線下の人や絶縁物に帯電し、冬場の静電気放電のような電気ショックを感じる

ことがある [3, 4]。交流の大電流については、電磁誘導による電気ショックの感知が低電圧の通信線や金属製のフェンス等で問題となることもある。交流磁界については生体影響が世界的にも問題視され、国内においても人体ばく露の規制値として、近年になって定められたこともある [5]。

また、電力設備では高電圧に関係する放電現象が発生することがある。電力設備で発生する放電現象を表 1.3 に示す。送電線の電線では降雨時に、電線の表面に付着した水滴の先端からコロナ放電が発生することがあり、AM ラジオや可聴騒音として感知されることがある [2][6]。送電線や配電線のがいしは絶縁物であり、通常は発生しないが、沿岸部では塩分に汚損されたがいし表面の絶縁性能が劣化し、沿面放電が発生することがある。汚損がいしは雨の洗浄効果で機能回復するが、沿面放電の発光が「送電線が燃えている」など近隣住民の不安をあおることもある。設備数が多く、生活環境に密接している配電線では古くより、がいし等の金属連結部の不具合箇所から発生する火花放電がアナログテレビやアマチュア無線の障害となることがあったが、人間の五感で直接感知されにくい火花放電はその検出が困難であった [7, 8]。

表 1.2 電力設備の電磁環境問題

原因	現象	対象	備考
設備	電波障害	デジタル地上波テレビ	遮へい，マルチパス
電圧（交流）	静電誘導	人	電圧の感知
	電界影響	電気・電子機器	電界による障害
	コロナ雑音	AMラジオ	聴取障害
	コロナ騒音	人	ランダム騒音，コロナハム音
	オゾン	人	（影響なし）
電圧（直流）	イオン流	人，通信線，建物	イオン流帯電現象
電流（交流）	電磁誘導	人，通信線	電流によるショック
	磁界影響	人，電気・電子機器	生体影響，磁界による障害
電流（直流）	直流磁界	動物	地磁気への影響

表 1.3 電力設備で発生する放電現象

設備	発生源	放電種別	発生原因	障害事例
送電線	電線金具	コロナ放電	電線表面の損傷 付着物（雨，雪，霧）	可聴騒音 電波障害
	がいし	沿面放電（沿面コロナ，局部アーク）	汚損	可聴騒音
配電線	がいし	沿面放電	汚損	可聴騒音 電波障害
		火花放電	金具連結部の不具合	電波障害
電気接点	電極間	アーク放電	大電流の遮断	電極の溶損
		シャワリングアーク	誘導性負荷の遮断	電波障害
自然現象	大気	雷放電	雲中の静電気	電力設備の事故 停電 家電製品の故障

気体中で発生する放電現象は図 1.3 に分類できる[9]。コロナ放電は尖った電極の周りに不均一な電界（不平等電界）が生じることにより発生する持続的な放電であり，電極の電圧が正極性の場合は正コロナ，負極性の場合は負コロナが発生する。交流電圧では正コロナと負コロナが交互に繰り返し発生することになる。コロナ放電の形態は電極の形状や課電電圧によって異なるが，正コロナは電流やその時間変化，外観から，ストリーマコロナ，バーストコロナ，正グローコロナと分類されることがある。負コロナもトリチェルコロナや負グローコロナと分類される。実際に交流架空送電線の電線で発生するコロナ放電の形態は主に正のストリーマコロナと負のトリチェルコロナと考えられており，正のストリーマコロナのほうが電流は mA 程度と大きく，発光も強い。正のストリーマコロナはパルス的に間欠して発生し，交流架空送電線のコロナ放電による放射電磁波は数 MHz までの周波数帯であり，AM ラジオ放送に影響することがある[2]。

火花放電は電極間の絶縁破壊（全路破壊）であり，電極間の電圧がある限界を超えたとき，電極間に火花の形態として観測される。火花放電は不連続な過渡現象であり，火花放電が継続的に発生するとグロー放電やアーク放電に移行する。グロー放電とアーク放電の電圧－電流特性を図 1.4 に示す。グロー放電は低気圧の気体中で発生する持続的な放電現象であり，気体の種類や圧力，放電管の形状などにより変化する。グロー放電の電流が増大するとアーク放電に遷移する。アーク放電は気体放電の最終段階で大きな電流が流れるため，電極の表面を激しく損傷させることがある[9]。変電所などで大電流を遮断する電気接点（遮断器）では，接点間のアーク放電を消弧するため，真空にしたり絶縁性能が高いガスを封入したりするなど工夫がされていることが多い。また，一般家庭の家電製品のスイッチなどでも間欠的にアーク放電が発生することがある。間欠的なアーク放電はシャワリングアークであり，モータや電磁石などの誘導性負荷を遮断する電気接点間に発生することがある[10]。

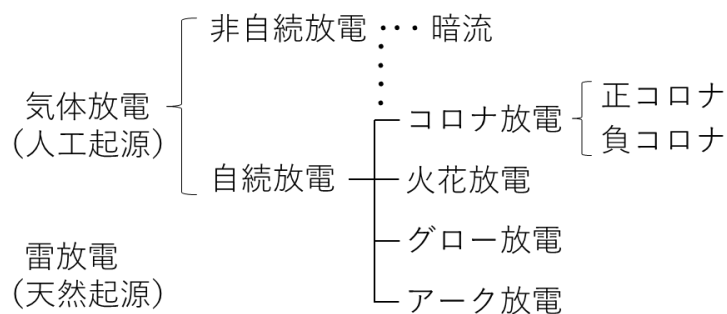


図 1.3 気体放電の分類

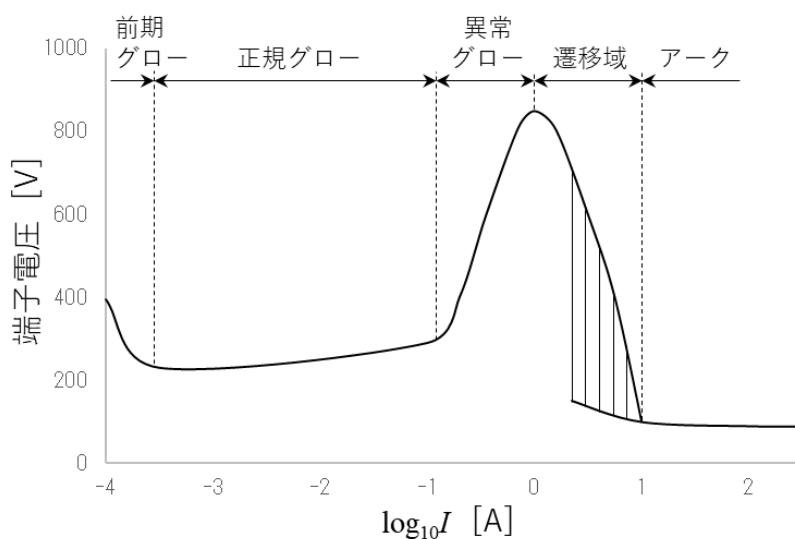


図 1.4 低気圧定常放電の電圧－電流特性

#### 1. 4 本論文の概要

本論文では、電力設備の電圧や電流、放電現象による電気・電磁現象に関する環境影響に着目し、その特徴や影響因子の発生メカニズム、低減手法について取り扱う。表 1.4 に示すように、2 章では超高压交流架空送電線を対象とした商用周波電界について、送電線周辺の電界強度や電界分布を明らかにし、商用周波電界による電子回路の誤動作特性について実験的検討を行う。さらに 2 章では古くより研究がなされている交流架空送電線のコロナ騒音について、電線の表面改質によるぬれ性（水滴の付着状態）の制御を用いたコロナ騒音低減手法と、その効果を示す。3 章では配電線を対象に、がいしなどの金具連結部の接触不良個所から発生する火花放電の特徴を実験から明らかにし、数値計算も併用した火花放電の発生メカニズムの説明を行う。さらに、雷現象が関係する一般の需要家での広域事故調査から、電源線に発生する雷過電圧の特徴を示すとともに、雷過電圧の発生メカニズムを検討

する。最後に4章では一般家庭でも多く使用されているモータ等の誘導性負荷の電気接点で生じるシャワリングアークについて、その特徴を明らかにし、シャワリングアークが変化していく要因やノイズ源として電子回路に及ぼす影響を示す。

表 1.4 本論文で扱う電気・電磁・放電現象

関係箇所	現象	発生個所（頻度）	影響	低減法
2 章	商用周波電界	超高圧架空送電線の周囲（常時）	電子回路の誤動作	静電シールド
	コロナ放電	超高圧架空送電線の電線表面（降雨時）	可聴騒音	表面改質
3 章	火花放電	がいし等の金属連結部（不具合発生時）	電波障害	連結部の結合
	雷放電 雷過電圧	大気中（雷雲発生時） 引込線（大地放電時）	家電製品の故障	鎖交磁束の低減
4 章	グロー放電 アーク放電	誘導性負荷の家電製品（電流遮断時）	電波障害	回路実装の工夫



## 2. 交流架空送電線の電磁環境

日本国内における交流架空送電線は 1950 年代から、急速な電力需要の増大に対応するため、送電電圧の高電圧化が次々となされてきた。現在は 500kV 運転であるが、1000kV 送電線設備も建設されている。また、交流送電設備は長年にわたる運用実績から、安価で大容量、かつ信頼性の高い送電方式として、重要なインフラであり、その設計、建設、運用ならびに保守技術は成熟の域に達している。しかし、狭小島国の日本では、交流架空送電線と生活環境が隣接する状況も多く、送電線で生じる電磁現象や放電現象が騒音や電波障害の事例として、近隣住民の生活に影響を与えることもある[2][6]。それゆえ、交流架空送電線の設備や運用条件を理解し、そこで生じる電磁現象や放電現象の特徴を明らかにすることが重要となる。

交流架空送電線に使用される送電鉄塔の例を図 2.1 に示す。図 2.1 は送電に用いられる電線は取り付けられていない状態であり、送電鉄塔と架空地線の状態である。また、図 2.1 は①と②の 2 回線の仕様であり、それぞれ A, B, C と  $120^\circ$  ずつ位相が異なる交流の電気が流れる電線を架線する構造となっている。国内の架空送電線の多くは送電鉄塔の最も高い位置に接地電位の架空地線を有しており、送電線に落雷があった場合、落雷を架空地線に誘導するとともに、雷の電流は送電鉄塔を通して地面に流す構造となっている。図 2.2 に工事中の交流架空送電線の一例を示す。架空送電線は通常、送電鉄塔と電線を磁器で形成されたがいしを介して接続される。電圧階級の高い送電線ほど、がいしを直列に接続する個数が多くなり、高電圧を絶縁する性能が向上する。これらをがいし連と呼び、沿岸部の送電線や配電線では、がいし表面に塩分が付着し、絶縁性能が低下するため、より長いがいし連を用いることもある。がいしや電線などの接続部は金属同士が接触し、回転や上下左右に可動する構造の金具で接続される。送電線の電線は送電線に流す電流が大きいほど、径の太い電線を用いるが、電線表面の電界を低くするために、細い電線を束にして使用することが多い。図 2.2 の送電線では 8 本の電線を 50cm 間隔で配置した 8 導体の例を示している。架空送電線の工事や点検時、作業員が送電鉄塔に昇塔したり、電線に乗り出したりすることがあるが、最近ではロボットやドローンの使用などが検討されており、危険作業の回避に対する期待も高い。

表 2.1 に現在国内において運用されている交流送電線（系統）の電圧階級を示す[9]。送電電圧は技術の向上とともに高電圧化が進められてきており、高電圧化に伴う機器作製の規格化によって、表 2.1 に示すような公称電圧と最高電圧の 2 種類が定められている。ただし、表 2.1 は線間電圧を示しており、送電線の電線 1 本について考慮する場合は対地電圧について考慮する必要がある。例えば、国内では 500kV 送電線の最高電圧 550kV について、その対地電圧  $318\text{kV}$  ( $550\text{kV} \div \sqrt{3}$ ) が国内の送電線の電線に課電される最高の電圧値となる。

高電圧に課電された送電線の電線では、電線の周辺や電線表面が高電界になる。交流架空

送電線では、電気設備の技術基準第 27 条 1 項に、送電線の直下の「地表上 1m における電界強度が 3kV/m 以下」と定められており、送電線の高さ、すなわち送電鉄塔設計についてはこの基準に基づく[5]。この基準は静電誘導における人体の感知レベルを参考に定められている。

また、高電圧に課電された電線では、電線表面の電界が高くなるために空気の部分的な絶縁破壊（部分放電）が発生することがある。この電線表面で発生する部分放電は、通常はコロナ放電と呼ばれ、送電線周辺において、可聴騒音源や電波雑音源となることがある。国内の交流架空送電線では、コロナ放電の発生を抑制するために、太い径の電線を使用したり、複数の電線を束にして使用する多導体方式を採用したりするが、降雨時や降雪時など、電線表面に付着した水滴の先端からコロナ放電が発生することがあり、コロナ放電による騒音や電波雑音の問題は自然環境に左右されることが多い[2]。

本章では、交流架空送電線の近傍の電界について、その特徴を示し、電線近傍に設置された電子回路の電界影響を実験的に明らかにしたため、その挙動や誤動作について述べる。また、コロナ放電については、電線表面のぬれ性（水滴の付着状態）とコロナ放電発生との関係を明らかにし、また、風音対策用に送電線に装着されるスパイラル線について、コロナ放電の発生も低減できる低騒音スパイラス線を開発したため、その特徴やコロナ騒音の低減効果を明らかにする。

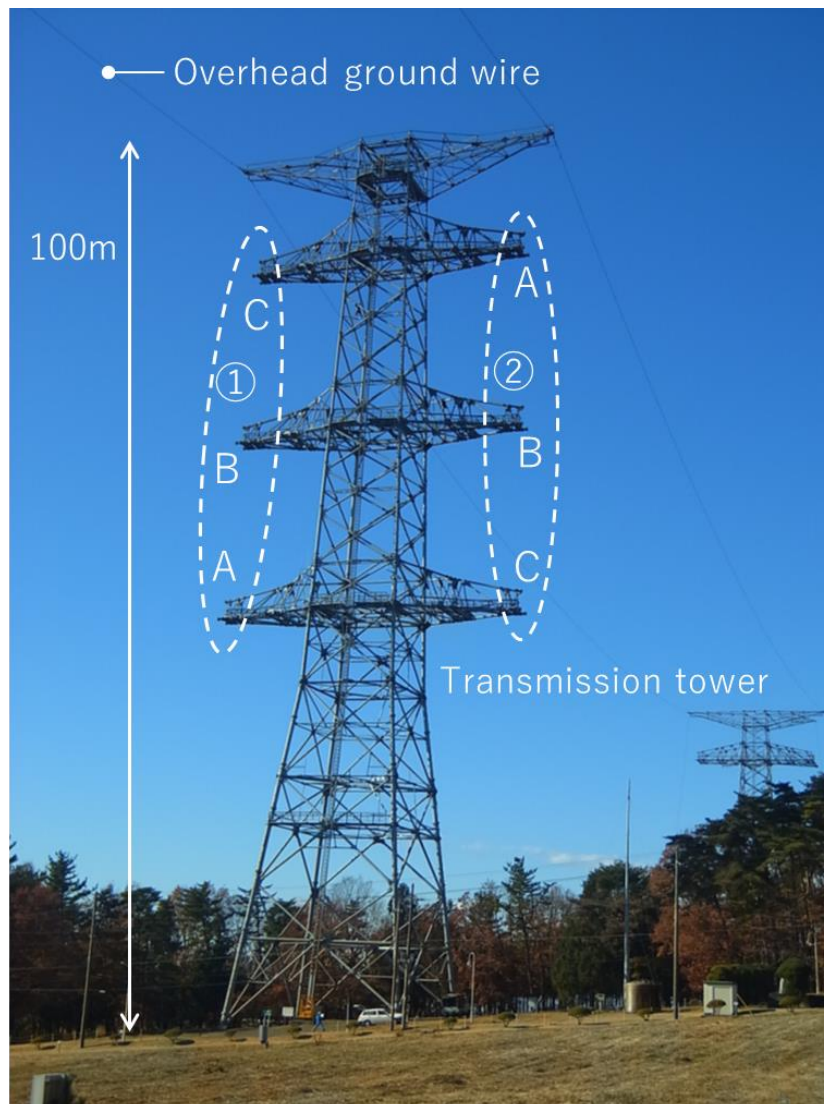


図 2.1 交流架空送電線の送電鉄塔の一例

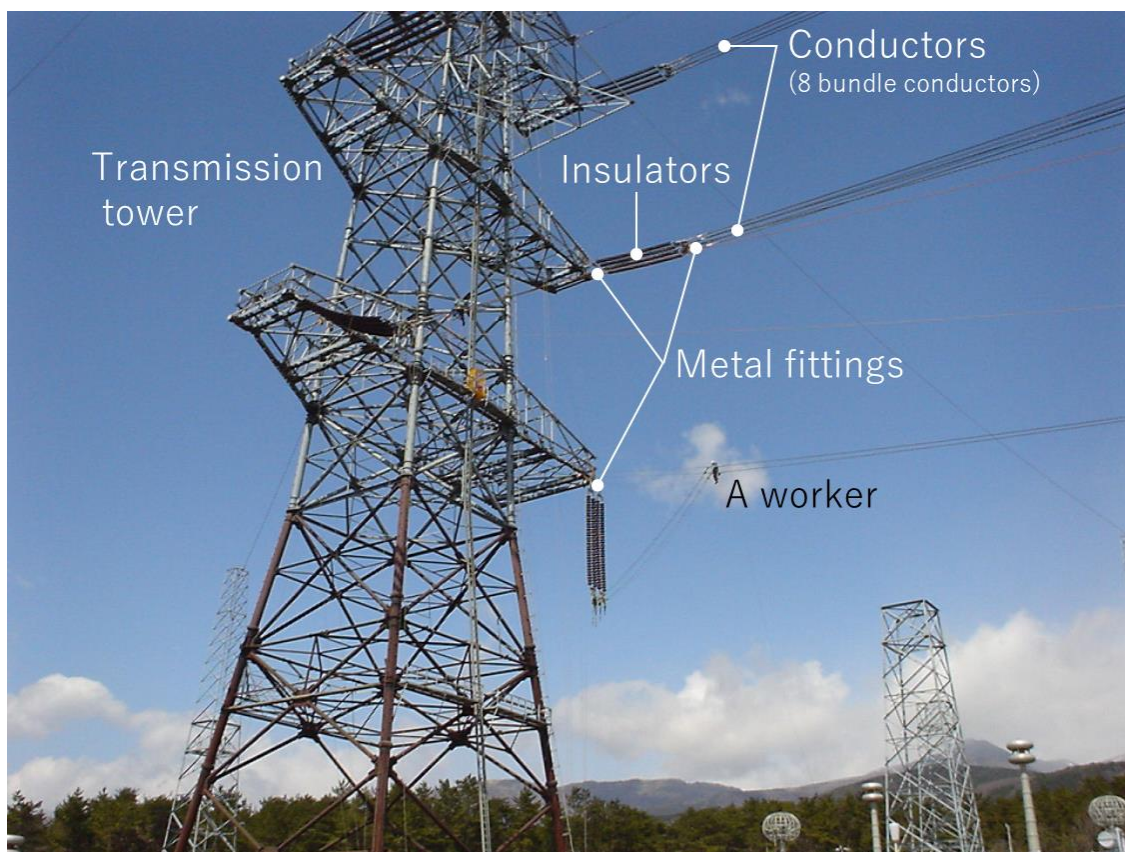


図 2.2 工事中の交流架空送電線の例

表 2.1 国内の系統の電圧

公称電圧 [kV]	最高電圧 [kV]
11	11.5
22	23
33	34.5
66, 77	69, 80.5
110	115
154, 187	161, 195.5
220, 275	230, 287.5
500	525／550

## 2. 1 商用周波電界

国内の交流架空送電線は、下記の電気設備技術基準の「架空送電路からの静電誘導作用又は電磁誘導作用による感電の防止、第 27 条、1 項」のように規定されているため、電圧階級の高い送電線ほど、送電線の高さが高い傾向にある[5]。

[電気設備技術基準「架空送電路からの静電誘導作用又は電磁誘導作用による感電の防止、第 27 条、1 項」]

"特別高圧の架空送電路は、通常の使用状態において、静電誘導作用により人による感知の恐れがないよう、地表上 1m における電界強度が 3kV/m 以下となるように施設しなければならない。ただし、田畑、山林その他の人の往来が少ない場所において、人体に危害を及ぼす恐れがないように施設する場合、この限りでない。"

この基準は静電誘導における人体の感知レベルを参考に定められており、図 2.3 に示すよう、傘をさした人体が静電誘導による電気ショックを感知しても不快を感じにくいレベルとして定められている。国内の基準は欧米と比較すると厳しく規制されている。

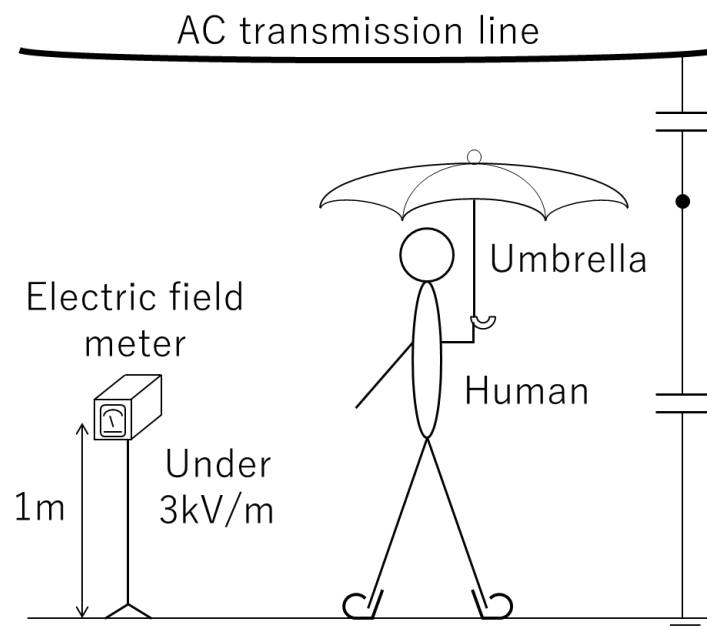


図 2.3 交流架空送電線下の静電誘導

国内の交流架空送電線では、線下の地表上 1m における電界強度は 3kV/m 以下であるが、上空の電線に接近するにつれ、電界強度は高くなる。例えば、通信や送電線監視・保守用の電気・電子機器類が送電鉄塔に設置される場合や、ロボットやドローン等の機器類が送電線に接近する場合は、これら機器類の高電圧・高電界による影響を考慮する必要があり、状況に応じ機器類を導電性の静電シールドで覆うような対策措置も必要となってくる[8]。

本節では、交流架空送電線に近接して使用される電子機器を対象に、高電圧や高電界による電子回路への影響を明らかにするため、はじめに交流架空送電線周辺の電界分布やレベルを計算により明らかにする。次にモデル電子回路を構築し、実際に高電圧に課電された電線に接近させ、その誤動作の様子を明らかにする。

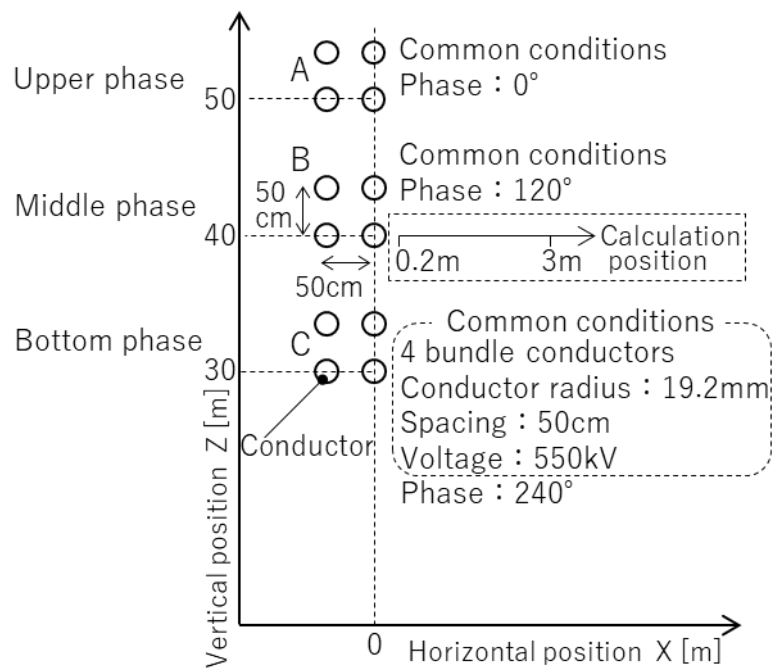
## 2. 1. 1 架空送電線周辺の商用周波電界の特徴

国内の交流架空送電線は様々であるが、ここでは標準的な送電線の仕様やサイズ、また運用条件を想定し、送電線周囲の電界分布やレベルを計算により求める。送電線は 2 次元の無限長の構造とみなし、計算を行った。電界計算については、線電荷置換法を採用し、計算ツールには（一般財団法人）電力中央研究所が開発した電力線周辺電磁界計算プログラム「CRIMAG 2010」を使用した[11-13]。

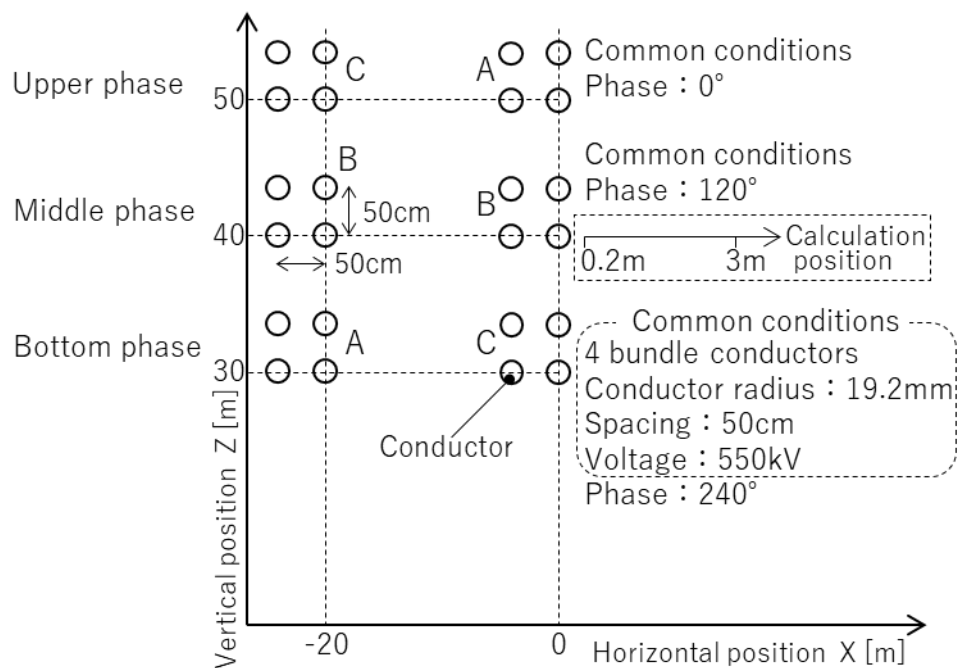
送電線の運用について、通常用いられる運用法を表 2.2 に示す。事例 1 の両回線運用は送電線の通常時であるが、片回線事故時や工事等の場合、事例 2 のように片回線に 2 倍の電流が流れる。2 回線の送電線の場合、両回線の使用と、たびたび片回線の使用となることがある。ここでは計算例として、図 2.4 に示すように、裸アルミ電線 ACSR810mm<sup>2</sup> の 4 導体方式の片回線運用と、両回線運用では逆相配列の 500kV 送電線（最高電圧 550kV）を計算モデルとし、電線周囲の電界の分布とレベルを明らかにする。ACSR は鋼心アルミ撚線（Aluminum Conductors Steel Reinforced）の略であり、図 2.5 に示すように中心は強度を保つための亜鉛メッキ鋼線、外側は硬アルミ線で構成された撚線構造の電線である。ACSR は軽量・高強度のため、架空送電線では多く用いられる。ACSR810mm<sup>2</sup> の場合、計算では半径 19.2mm の円柱形状とモデル化し、4 導体の場合は 50cm 間隔で 4 本を配置する計算モデルとした。

表 2.2 運用条件

事例 1（両回線運用）	電線の許容電流に対し、50%未満に相当する電流が両回線平等に流れる	通常時
事例 2（片回線運用）	事例 1 の通常時において、片回線の事故や工事によって、他の片回線に 2 倍の電流が流れる	事故・工事時



(a) 片回線運用



(b) 兩回線運用

図 2.4 計算モデル



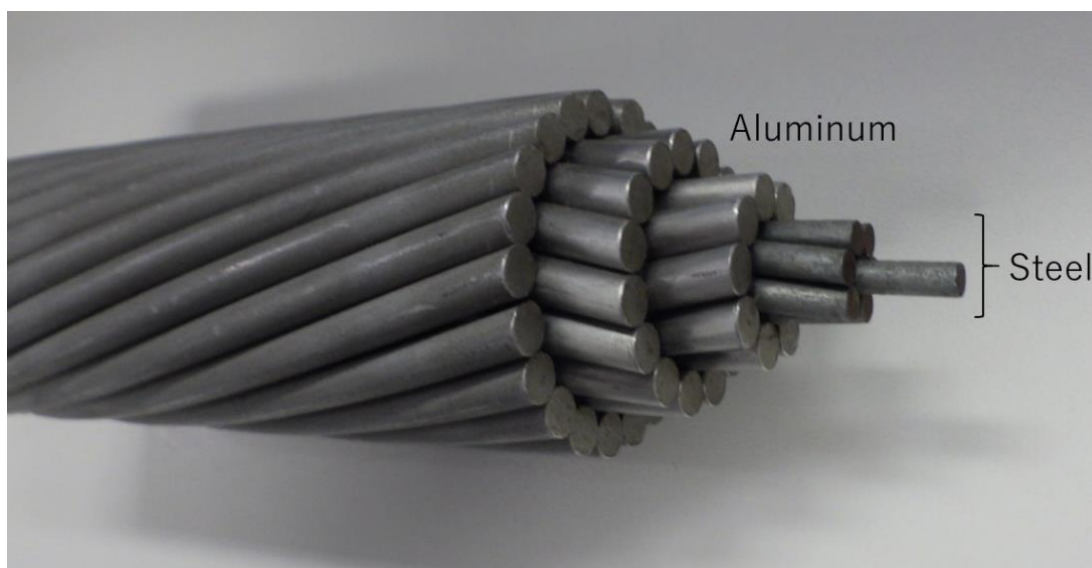


図 2.5 ACSR810mm<sup>2</sup>の外観

図 2.4 の計算モデルを用い、2 次元の線電荷置換法により電界計算を行った結果を示す。図 2.6 の片回線のケースでは全 12 本の電線による電界を計算しており、図 2.7～図 2.9 の両回線のケースでは全 24 本の電線による電界を計算している。計算範囲は電線中心からの距離 20cm～3m の位置とした。なお、電界強度の値は合成値を示す。座標系は図 2.4 に従う。

図 2.6 に、片回線のケースの 500kV 送電線（最高電圧 550kV）の上，中，下相および 4 導体の電線位置の違いによる電界レベルを示す。

図 2.7 と図 2.8 は両回線のケースであり、電線近傍では中相の電界レベルが他相よりわずかに高くなることがわかる。また、図 2.9 は両回線のケースの中相の場合であり、4 導体周辺の電線位置による差を示している。電線近傍では素導体の真横の位置の電界レベルが高くなることがわかる。

本来、送電線の形状、電線配置は様々である。例えば電子回路が電線に近接する場合、電界は他相の影響を受けるため、個別に電界分布を計算する必要がある。ただし、ここでの検討では 500kV 送電線の最高電圧（550kV）の条件を計算しており、電子回路が素導体から 20cm 以上離れる場合、電子回路がさらされる電界レベルは、国内では 200kV/m を超えないことが明らかとなった。

よって、電子回路の電界影響評価について、電子回路が電線まで 20cm の距離に近づく状況を想定した場合、国内では 200kV/m の電界強度までのばく露が必要となる。また、電線近傍では電界強度の減衰が大きい。



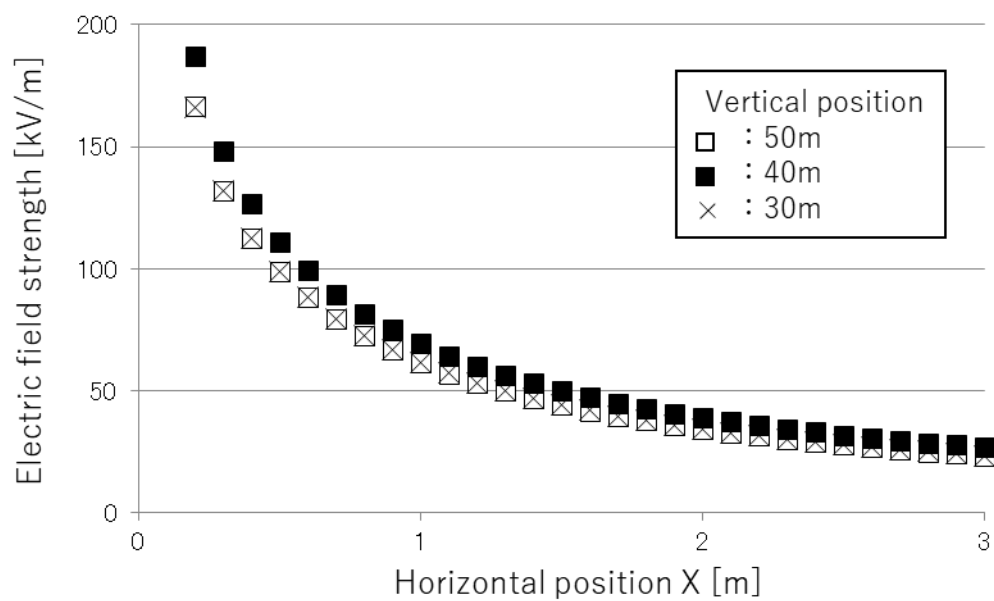


図 2.6 電界計算結果（片回線のケース）

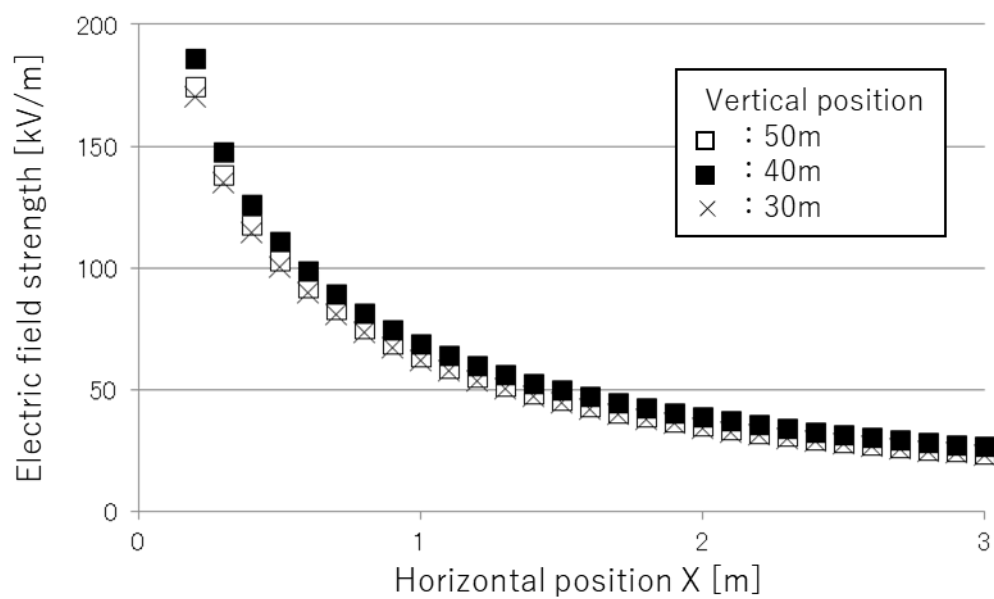


図 2.7 電界計算結果（兩回線のケース）

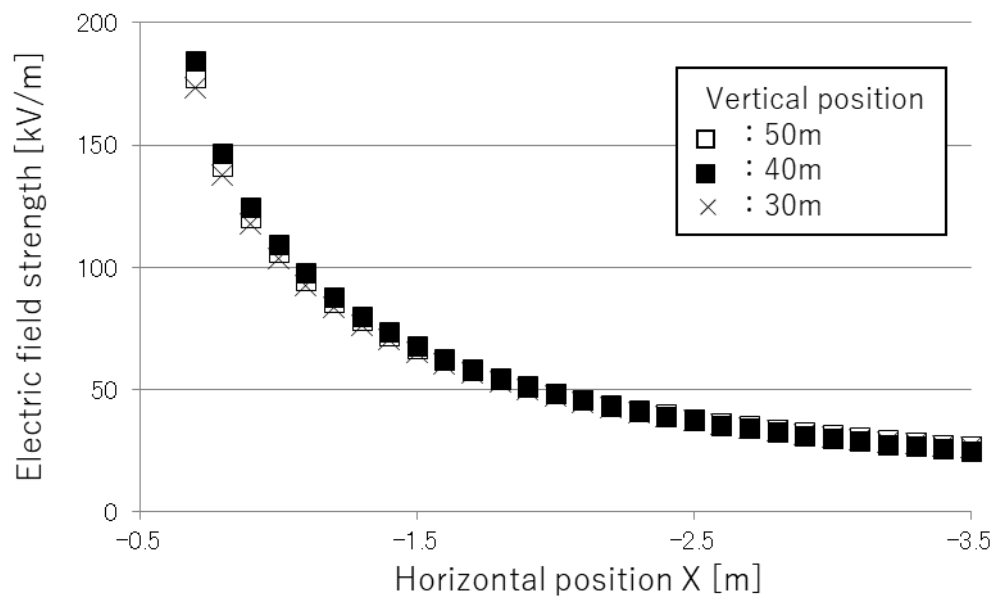


図 2.8 電界計算結果（両回線のケース，図 2.7 と計算範囲が逆方向）

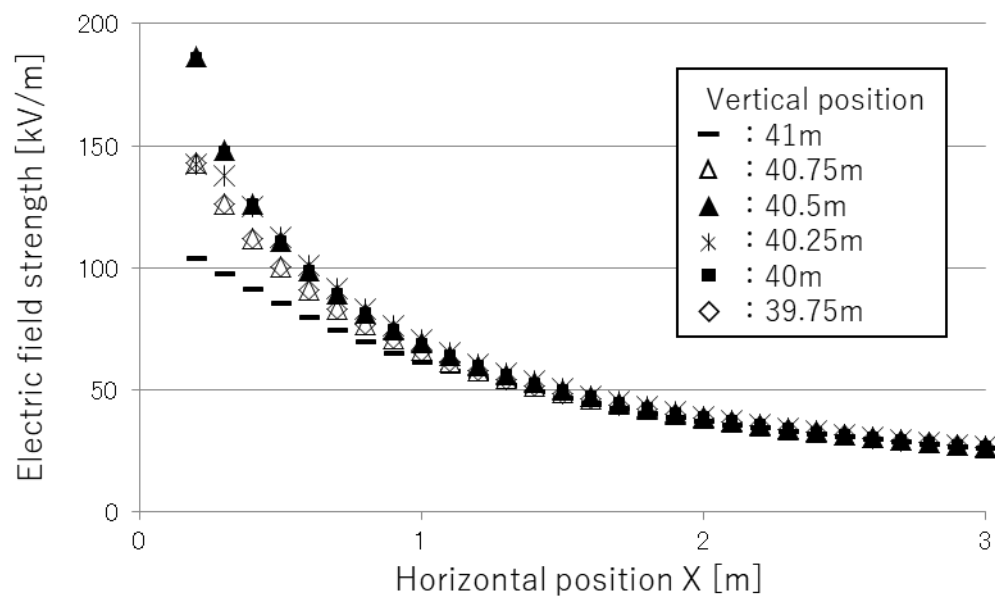


図 2.9 電界計算結果（両回線のケース，中相の位置）

## 2. 1. 2 商用周波電界による電子回路への影響

近年の電子技術やデジタル技術、情報技術の発展は急速であり、これらの産業利用への期待は大きく、電気事業においても、電力設備の監視や状態把握、保守・点検等の業務について、通信機能を有するカメラや各種センサの活用、ロボットやドローンを用いた省力化・効率化が求められ、電子回路を搭載した様々なシステムの導入が検討されている。特に、架空送電線の保守作業で、課電部に作業員が接近することは、感電災害の原因となるため、ドローン等を活用し、遠隔で保守作業を実施することは有効である[12-17]。

電力設備の近傍で各種センサや通信機器、その他電子回路を使用する場合、電力設備からの電磁界影響を評価する必要がある。例えば、数 V 以下、数 mA 以下で動作する電子回路を、数百 kV の高電圧に課電された電力設備の近傍で使用する場合は静電誘導による影響が考えられ、大電流については電磁誘導の影響が考えられる。

従来、電力設備の近傍に電子回路を設置する場合、電子回路をシールド材料で覆う等の対策が取られてきたが、ロボットやドローンの電磁シールドは、機体の重量化を招き、構造的にも困難な場合がある[8]。

このように低エネルギーで動作する電子回路を高電圧・大電流の電力設備の近傍で使用する場合、電子回路が正常に動作する条件を明らかにする必要がある。そこで、本節では、交流架空送電線の電線の近傍で使用される電子回路を想定し、まず、モデル電子回路を作製する。次にこのモデル電子回路を商用周波電界にばく露し、その誤動作の様子を観察する。そして、モデル電子回路の誤動作条件を実験により明らかにし、モデル電子回路と送電線の安全離隔距離に関する検討結果を示す。

### (1) モデル電子回路の商用周波電界ばく露

作製したモデル電子回路を図 2.10 に示す。モデル電子回路は複数の基板で構成されている電子機器や、基板から離れた位置にカメラや各種センサ、電源等が設置されている電子回路を模擬しており、ここでは発振回路とカウンタ回路の 2 種類のパーツにより構成され、2 つの回路間を 2 本の電源線と 1 本の信号線で接続する構成とした。発振回路はインバータ IC (74HC14) 1 個を用い、10Hz のクロックパルスをカウンタ回路に信号線を通じて送信するとともに、LED を 1 個、10Hz で点滅させる。カウンタ回路はカウンタ IC (74HC4017) 1 個を用い、発振回路からの 10Hz のクロックパルスを受信し、10 個ならべた LED を順に点滅させる動作を繰り返す。ここで、インバータ IC とカウンタ IC は同じ電源（単三アルカリ乾電池 4 個、DC4.8V）で動作させ、これら 2 つの回路を接続する電源線 2 本と信号線 1 本については 10cm、20cm、30cm、50cm の線長のものをそれぞれ用意し、発振回路とカウンタ回路間の距離を実験におけるパラメータとした。発振回路とカウンタ回路はそれぞれ 2 枚のユニバーサル基板に配線し、電源線と信号線の線長分、基板を離して設置する構造としている。

発振回路とカウンタ回路の基板、電源は厚さ 1cm の塩化ビニル板に固定した。実際のモデル電子回路の写真を図 2.11, 商用周波電界ばく露の様子を図 2.12 と図 2.13 に示す。図 2.12 は発信回路とカウンタ回路が電線と異なる距離に配置される場合, 図 2.13 は同じ距離に配置される場合を示す。商用周波電界ばく露においては, 地上高 6m の位置に, 長さ 10m の ACSR810mm<sup>2</sup> の単導体を平らな地面と水平に架線し, 電線の径間中央にモデル電子回路を絶縁性のロープで吊り下げる構造とした。なお, 電線に課電する電圧は 60kV~318kV の間で調整でき, 周波数は 50Hz である。電線と発振回路間の離隔距離もパラメータとし, 0.3m, 0.5m, 0.7m, 1m と設定した。2 つの電子回路をばく露する電界の条件を変化させるため, 発振回路とカウンタ回路間の距離と, 高電圧に課電した電線と発振回路間の離隔距離をパラメータとした。

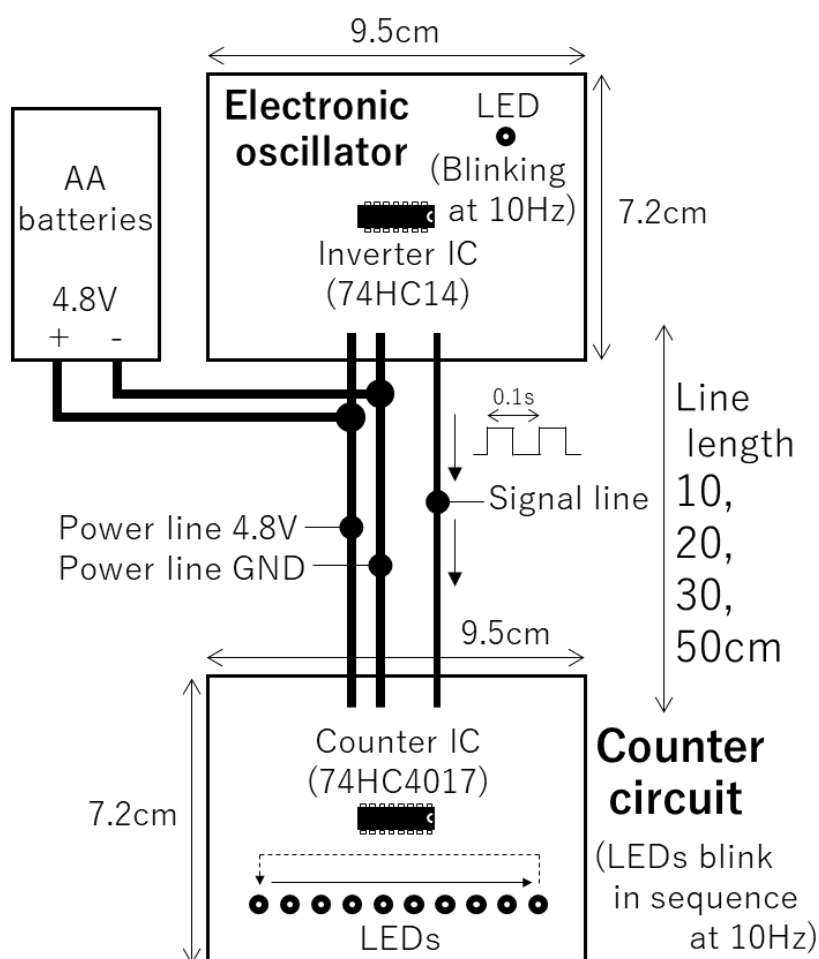


図 2.10 モデル電子回路

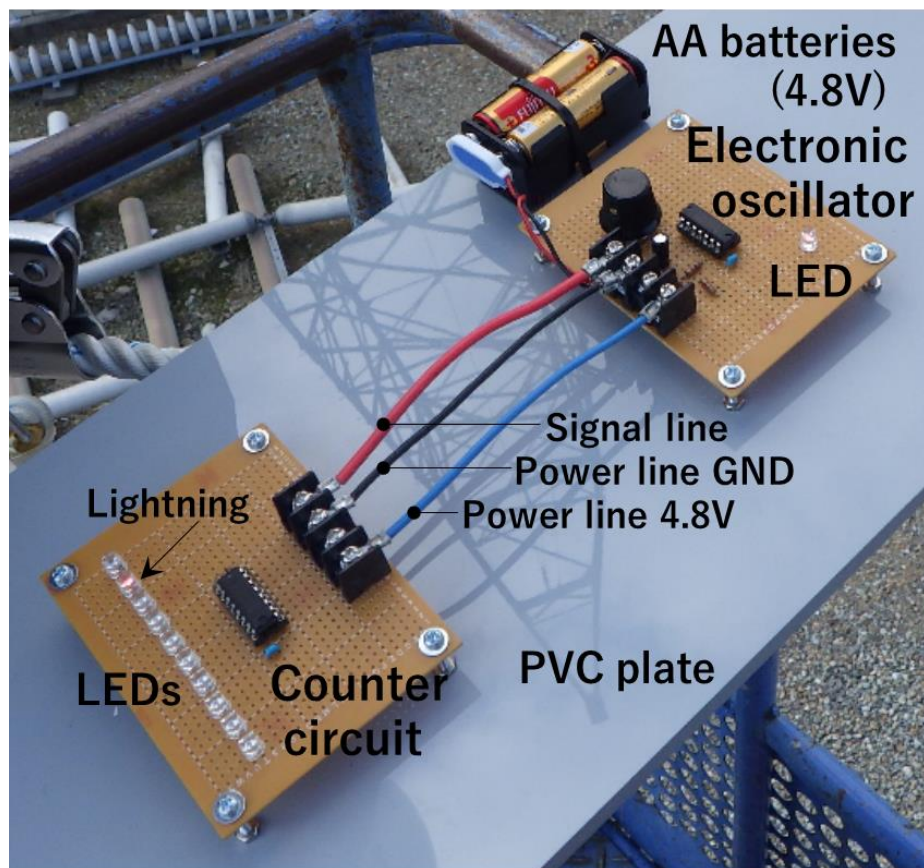


図 2.11 モデル電子回路の写真

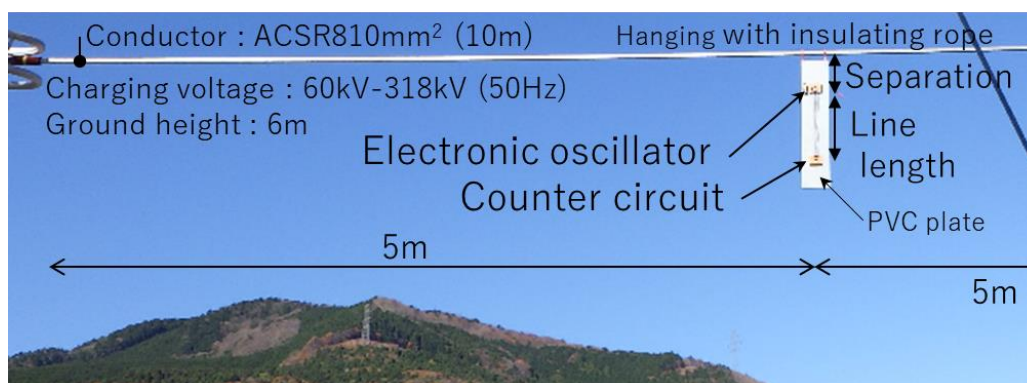


図 2.12 モデル電子回路の商用周波電界ばく露（縦配列）

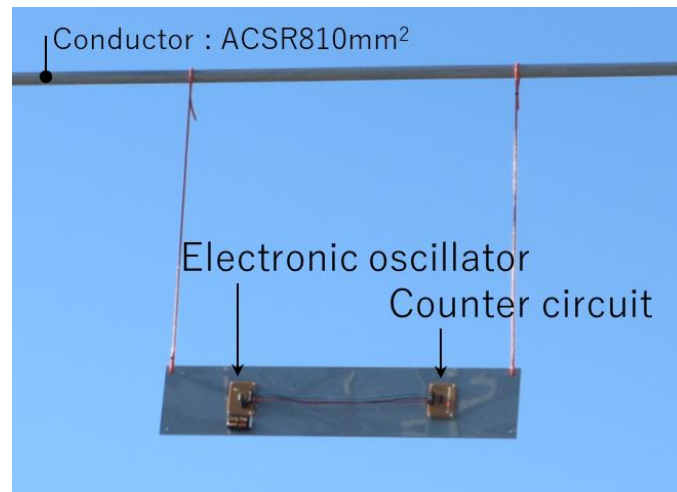


図 2.13 モデル電子回路の商用周波電界ばく露（横配列）

モデル電子回路の誤動作判定については、遠隔から目視判断できるよう、LED の点滅で判定することとした。これは、判定者が高電圧に課電された電線に接近できないことや、電子回路本来の誤動作特性を保つよう、電子回路に測定器等の別の電気回路を接続することを避けるためである。設定したモデル電子回路の誤動作判定基準を表 2.3 に示す。表 2.3 は発振回路とカウンタ回路の LED が 10Hz で正常に点滅しない条件を示す。例えば、カウンタ IC を DC4.8V の電源で動作させる場合、その信号の入力電圧は、カタログ値で最小電圧値 3.4V が Hi レベル、最大電圧値 1.4V が Low レベル判定となり、3.4V 以上、1.4V 以下の 10Hz のインバータ IC からの信号をカウンタ IC が受信し、信号をカウント、LED を順に点滅させることが正常動作となる。

表 2.3 モデル電子回路の誤動作判定基準

誤動作判定基準（目視判断）
A. 発振回路のLEDが点滅しない B. 発振回路のLEDが10Hzで点滅しない C. カウンタ回路のLEDが点灯しない D. カウンタ回路のLEDが10Hzで順に点灯しない E. カウンタ回路のLED点灯・点滅が不規則

商用周波電界ばく露によるモデル電子回路の誤動作発生条件を明らかにするため、電力線周辺電磁界計算プログラム「CRIMAG 2010」を用い、線電荷置換法による電線周囲の電界強度を数値計算により求めた[11]。計算位置は発振回路とカウンタ回路が存在するそれぞれの位置であり、計算条件は図 2.14 に示すように図 2.12 の実験条件と同じであるが、ここ

では電線の長さを無限長と簡略化し、2次元の計算条件としている。図 2.14 では水平方向を X 軸、高さ方向を Z 軸としている。

商用周波電界の計算結果を図 2.15 に示す。図 2.15 は電界の合成値であり、電線から離れるほど電界レベルが低くなることがわかる。図 2.16(a)に電界の X 軸方向成分、図 2.16(b)に Z 軸方向成分を示す。電線周囲について、電線中心より水平方向の空間では X 軸方向成分の電界、鉛直方向の空間では Z 軸方向成分の電界が支配的になることがわかる。また、図 2.17 は電線中心から真下の位置の電界レベルを示しているが、電界の成分は Z 軸方向成分のみとなり、電線から 0.3m 離れた位置 (Z=5.7m) では 170kV/m、0.5m 離れた位置 (Z=5.5m) では 100kV/m の電界レベルまで達する。

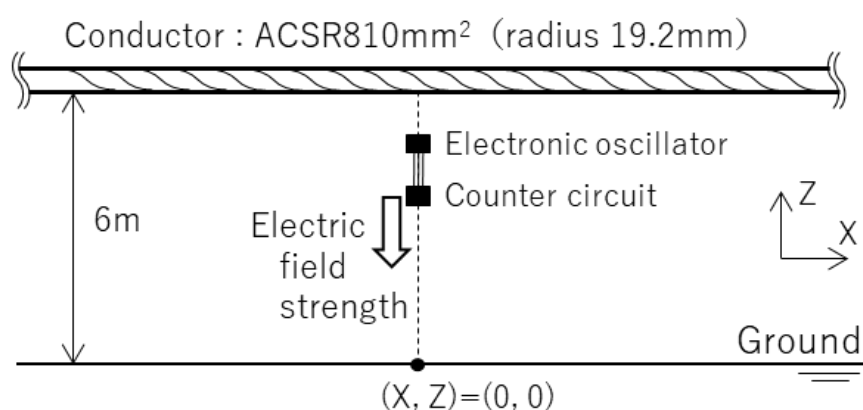


図 2.14 電界計算条件

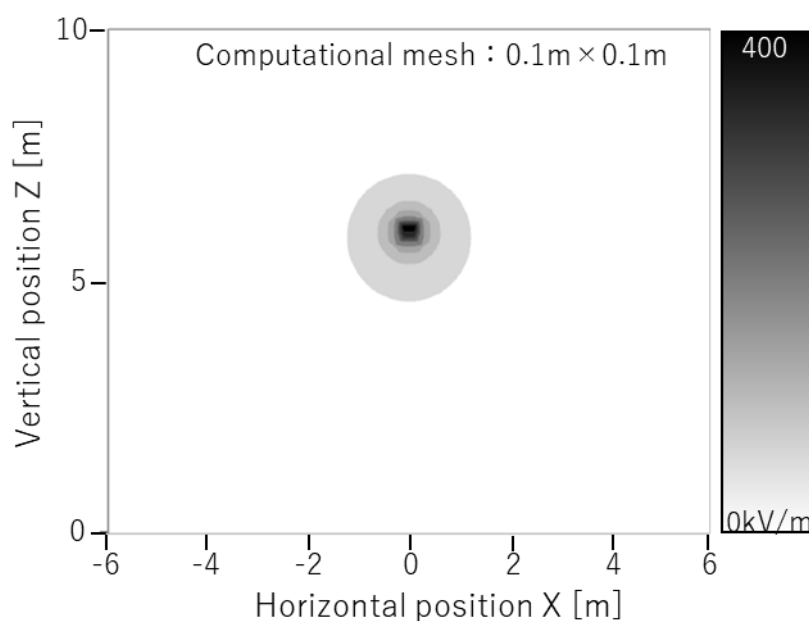
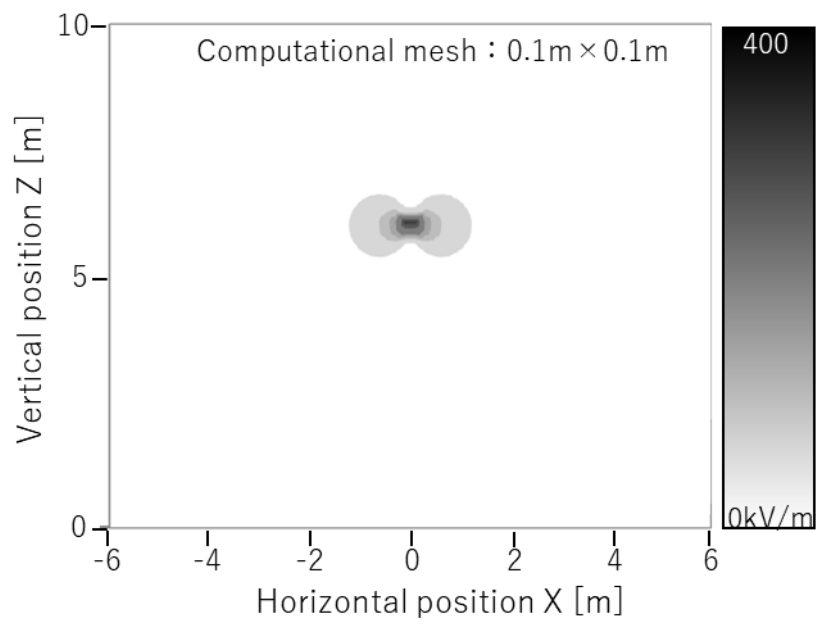
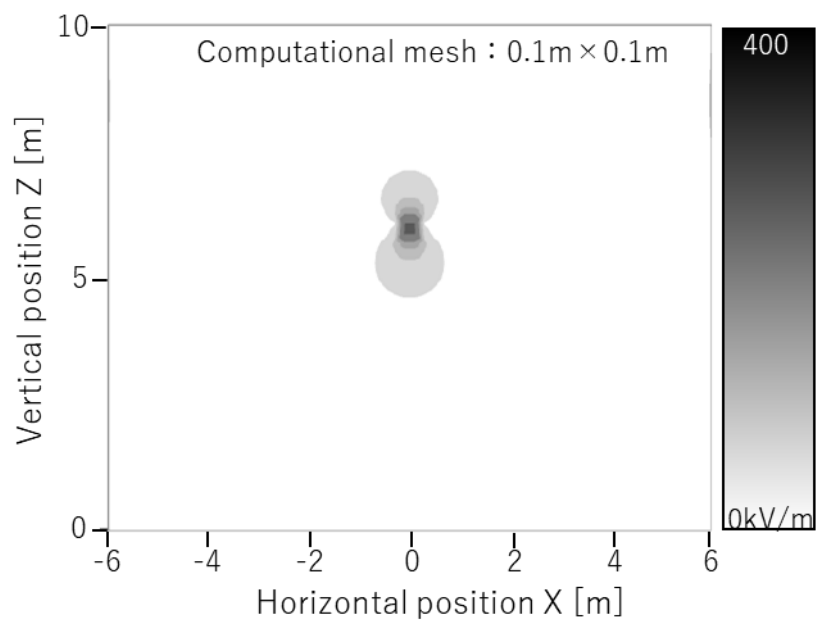


図 2.15 電界計算結果（合成値）



(a) X 軸方向成分



(b) Z 軸方向成分

図 2.16 電界計算結果



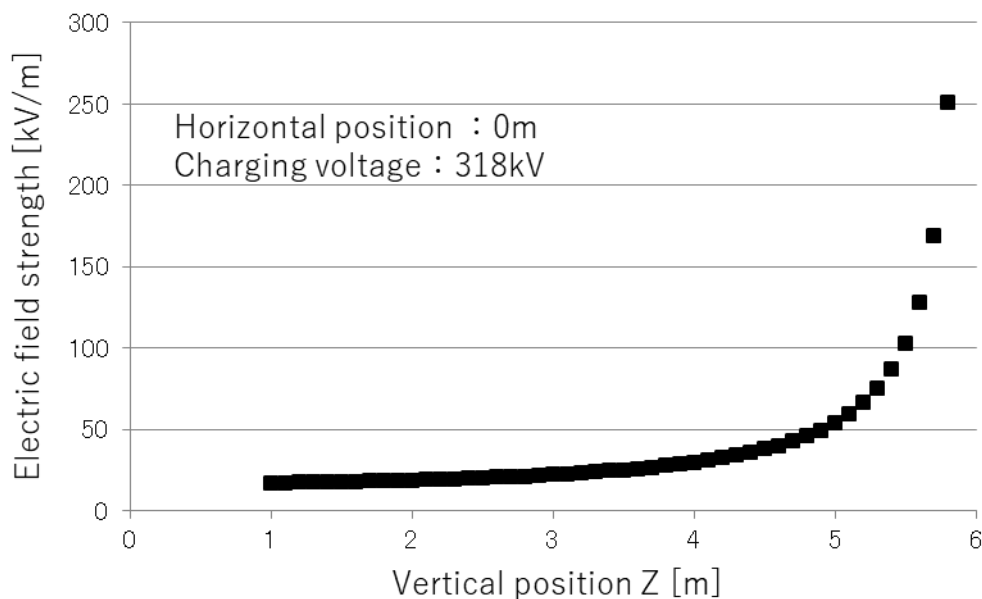


図 2.17 電界計算結果 (X=0m)

## (2) モデル電子回路の誤動作発生条件

図 2.10 と図 2.11 に示すモデル電子回路を図 2.12 のように電線の下に設置，電線の電圧を徐々に高くすることで，商用周波電界をばく露し，モデル電子回路の LED の点滅に誤動作が発生したときの電線の電圧を図 2.18 に黒色のプロットで示す。図 2.18 の黒色のプロットでは，発振回路とカウンタ回路間の電源線と信号線の線長ごとに，発振回路と電線の離隔距離を変化させたときの，誤動作発生電圧を示している。図 2.18 より，発振回路と電線が接近するほど，また，発振回路とカウンタ回路間が長くなるほど誤動作が発生する電圧は低く，誤動作が発生しやすくなることがわかる。このときの誤動作は，カウンタ回路の LED の点滅が不規則になり，表 2.3 の E の状態となった。また，いずれの場合も IC や LED，その他の電子部品の破壊や故障はなく，実験直後，電界ばく露をしていない状態においては，正常に動作することを確認している。

また，発振回路とカウンタ回路を図 2.13 のように設置した条件についての誤動作発生電圧を，図 2.18 に白色のプロットで示す。発振回路とカウンタ回路を 50cm の線で接続し，電線との離隔距離 0.3m の条件で，233kV の電圧を電線に課電したとき，表 2.3 の E の状態となった。なお，離隔距離が 0.5m 以上の条件についての誤動作発生電圧は，318kV を上回る。ここで，発振回路とカウンタ回路が課電された電線から同距離に設置される場合，すなわち，同じ強さの電界にばく露されるとき，回路の誤動作は発生しにくくなることが明らかとなった。この結果より，モデル電子回路の誤動作が発生する原因としては，発振回路とカウンタ回路が異なる強さの電界にばく露され，静電誘導でそれぞれの回路が異なる電位となり，信号線等に電位差が生じるか，それに伴う電流が流れることが主要因と考えられる。

そこで、本節では 2 つの電子回路間の電界強度の差に着目し、モデル電子回路の誤動作の検討を進める。

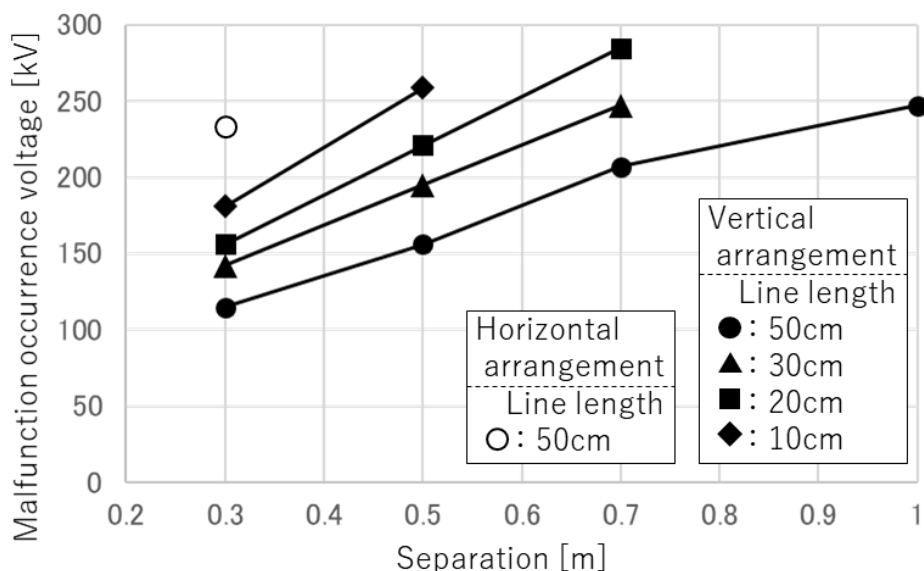


図 2.18 モデル電子回路の誤動作発生電圧

モデル電子回路の誤動作が発生した電圧について、発振回路とカウンタ回路の位置の電界強度の差ごとにプロットしたグラフを図 2.19 に示す。電界強度は図 2.17 の計算結果を参照している。図 2.19 より、誤動作発生電圧は、モデル電子回路の誤動作が発生する条件の発振回路とカウンタ回路の位置の電界強度の差に、負に比例していることがわかる。すなわち、モデル電子回路が高電圧の電線に近接する場合、モデル電子回路の誤動作は、電線の電圧値が高いほど、発振回路とカウンタ回路がばく露される電界強度の差が小さい条件でも発生することがわかる。

発振回路の位置に変化なく、また、発振回路とカウンタ回路間の距離が等しい場合、電線の電圧値が高くなるほど、両回路の位置の電界強度と、それらの差は大きくなる特徴がある。発振回路とカウンタ回路が電界ばく露され、それぞれに異なる誘導電圧が発生し、その誘導電圧の差が誤動作の要因となる電圧値に達する場合、電線の電圧値が高いほど、誘導電圧の値も、その差も高くなるため、誤動作は発生しやすくなる。このため、電線の電圧値が高いほど、発振回路とカウンタ回路がばく露される電界強度の差が小さい条件でも、誤動作が発生すると考えられる。

現在、国内で運用されている送電線の最高の電圧値(公称電圧)は 500kV であるが、500kV は 2 相間の線間電圧を示す[9]。ある 1 相については、その対地電圧は  $289\text{kV}$  ( $500\text{kV}/\sqrt{3}$ ) となる。ここで、本節で用いたモデル電子回路を 500kV 送電線のある 1 相に接近させると想定した場合、誤動作が発生する条件は発振回路とカウンタ回路の位置の電界強度の差が、

図 2.19 より 9kV/m 以上と推定できる。

現在、国内で運用されている 66kV から 500kV までの送電線について、モデル電子回路を送電線近傍で使用する場合は、図 2.19 より求めた誤動作発生条件（発振回路とカウンタ回路の位置の電界強度の差）を表 2.4 に示す。電圧階級が高い送電線ほど、誤動作発生条件の電界強度の差は小さくなることがわかる。

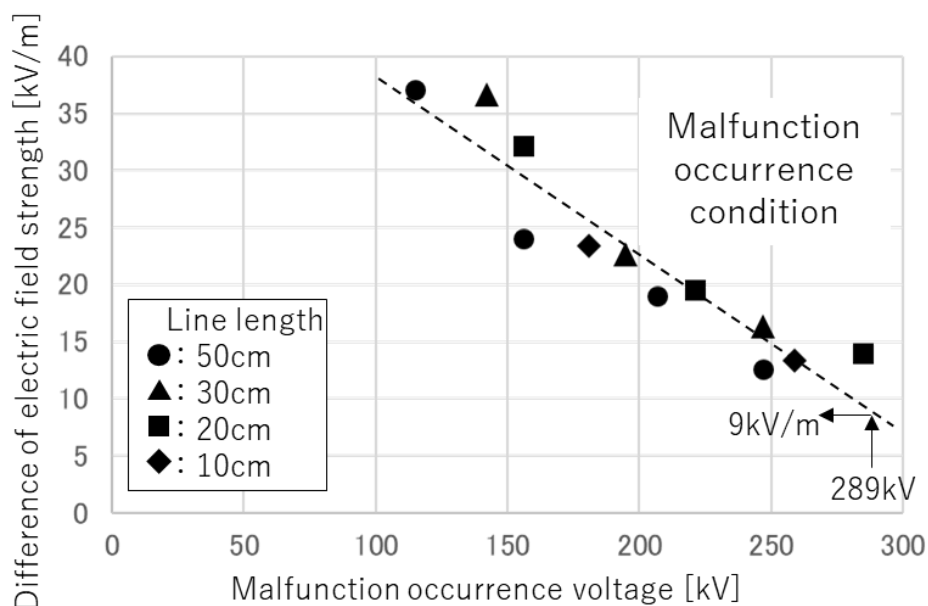


図 2.19 商用周波電界ばく露によるモデル電子回路の誤動作発生条件

表 2.4 モデル電子回路の誤動作発生条件

公称電圧 [kV] (線間電圧)	66	77	110	154	187	220	275	500
対地電圧 [kV]	38	44	64	89	108	127	159	289
電界強度差 [kV/m]	<b>48</b>	<b>47</b>	<b>44</b>	<b>40</b>	<b>37</b>	<b>34</b>	<b>29</b>	<b>9</b>

### (3) モデル電子回路と送電線の安全離隔距離

現在運用されている国内の送電線の最高の電圧値（公称電圧）は 500kV である。ここでは一例として、図 2.20 に示す 500kV 送電線を想定し、電線周囲の電界強度を線電荷置換法による数値計算にて算出し、電界分布の特徴を述べる。図 2.20 は ACSR810mm<sup>2</sup> の 4 導体方式（素導体半径：19.2mm，素導体間隔：50cm），2 回線逆送配列の送電線とした。なお，線電荷置換法では送電線の電線を 2 次元の構造とみなせる無限長と仮定し，計算ツールは「CRIMAG 2010」を使用した[11]。また，ここで扱う安全離隔距離は，人や作業車等が送

電線に接近し、感電災害を招くことを防ぐ離隔距離ではなく、モデル電子回路が正常に動作する、電線との離隔距離を意味する。

図 2.20 中に示す計算位置での計算結果を図 2.21 に示す。図 2.21 中の  $E_x$  は電界強度の水平方向成分、 $E_z$  は鉛直方向成分、 $|E|$  はこれらの合成値を示す。図 2.21 より、素導体から 20cm 離れた位置の電界強度は 170kV/m まで達するが、50cm 離れると 100kV/m まで減衰することがわかる。すなわち、例えば長さ 30cm の電子機器が素導体まで 20cm の距離に、真横から電線に接近した場合、電子機器による電界分布の乱れが無視できる仮定において、電子機器の電線側は 170kV/m、反対側は 100kV/m の電界にばく露される。また、ばく露される電界は水平方向成分が支配的であることがわかる。

ここで、図 2.20 で示した 500kV 送電線に、図 2.10 と図 2.11 に示したモデル電子回路が接近することを想定し、モデル電子回路の誤動作が発生しない送電線との安全離隔距離についての検討を行う。なお、モデル電子回路は発振回路とカウンタ回路が水平に並ぶ姿勢とし、接近する送電線の電線については、図 2.20 中に示した座標系の位置にて、モデル電子回路が電線に真横から接近するとする。また、本来であれば電線周囲の電界について、水平方向成分と鉛直方向成分ごとに分離した検討が必要であるが、ここでの条件における電線近傍では電界の水平方向成分と合成値に大差がないことと、安全離隔距離について検討手法の概念を示すことから、電界強度の合成値を用いることとした。

はじめに、図 2.21 で示した図 2.20 の 500kV 送電線における電界強度の合成値と、図 2.14 の発振回路とカウンタ回路がある位置について、電線の位置を原点とし、鉛直方向に計算した電界強度を図 2.22 示す。電界強度は鉛直方向成分のみとなる。図 2.22 より、電線（素導体）の近傍では電界強度は高く、変化も大きいことがわかる。電線から 1m 以上離れた場所では、それぞれについて、10cm 離れた場所の電界強度の変化の割合の差が 5%未満となり、電界強度の変化の傾向も似ていることから、図 2.20 の 500kV 送電線について、電線から 1m 以上離れた場所を図 2.19 のモデル電子回路の誤動作発生条件の適用範囲とした。

次に、図 2.23 に図 2.21 で示した電界強度の算出結果と、図 2.19 で示した 500kV 送電線における誤動作発生条件の 9kV/m の指標を示す。指標は、9kV/m の電界強度の差を高さ、発振回路とカウンタ回路間の距離を底辺とする直角三角形で示しており、ここでは例として、発振回路とカウンタ回路間の距離が 30cm と 50cm の場合の 2 種類を示している。

図 2.23 より、発振回路とカウンタ回路間の距離が 50cm の場合は、モデル電子回路に誤動作が発生する条件である電界強度の差が 9kV/m 以下となる電線との離隔距離は 1.5m 以上であることがわかる。モデル電子回路を図 2.20 の 500kV 送電線の中相近傍で使用する場合、モデル電子回路が正常動作する条件としては、モデル電子回路を電線から 1.5m 以上離す必要がある。同様に、発振回路とカウンタ回路間の距離が 30cm の場合は、モデル電子回路を電線から 1.1m 以上離す必要があることがわかる。また、図 2.23 では、中相の電線から上方向に 50cm 離れた位置の電界強度も示しているが、電線から離れるほど、電界の強さやその変化量も小さくなり、電子回路の安全離隔距離は送電線の周囲の場所ごとに異なる

ことがわかる。

電子回路を商用周波電界にばく露し、誤動作が発生する電圧を確認する実験と、電線周囲の電界分布を数値計算により求めた結果から、実験に用いた電子回路が正常動作する送電線までの離隔距離を求めることができた。

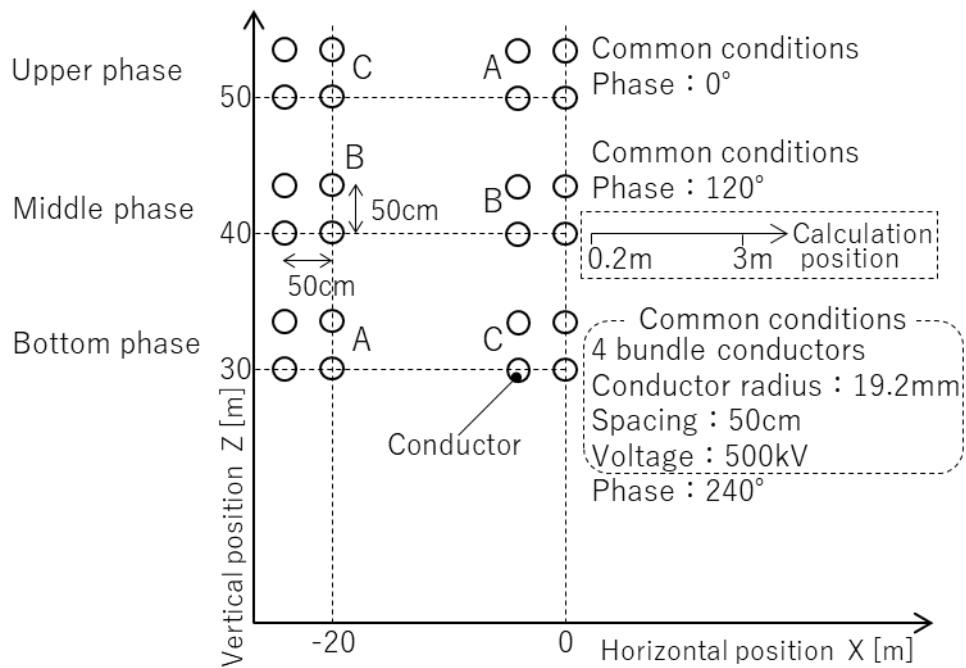


図 2.20 500kV 送電線の計算モデル

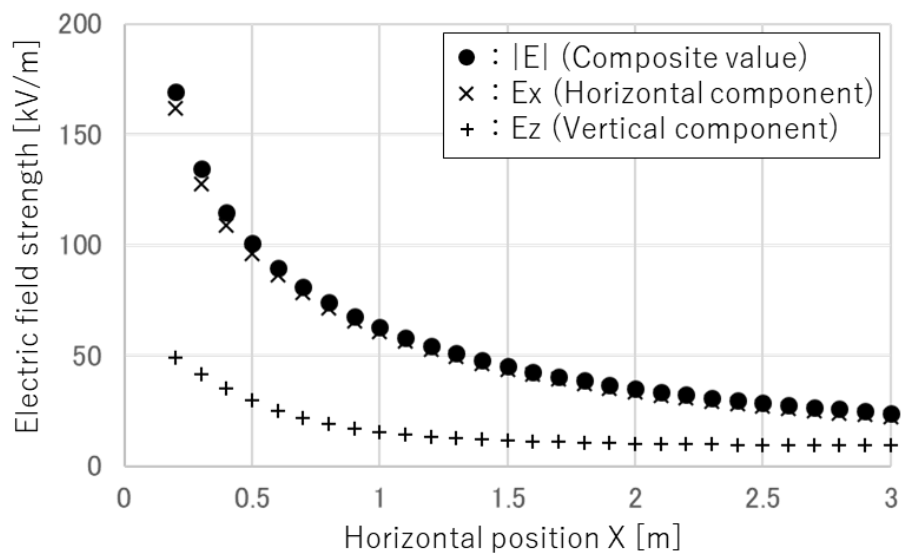


図 2.21 中相の電界計算結果

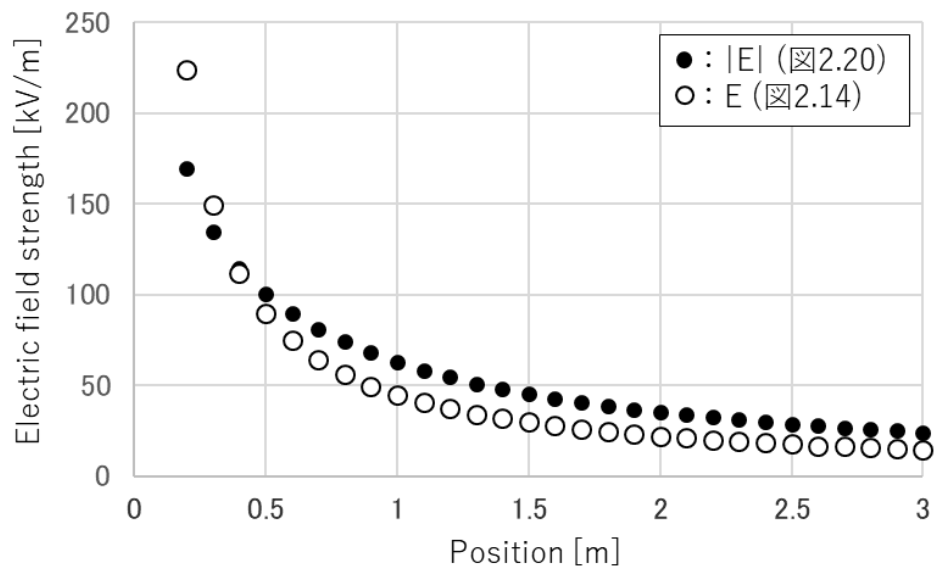


図 2.22 電界強度の差

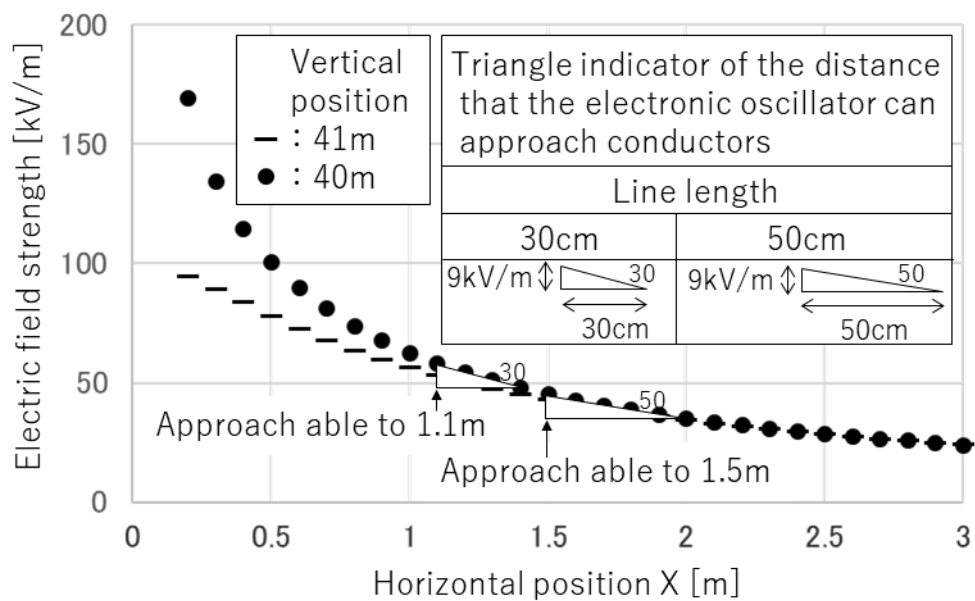


図 2.23 安全離隔距離の検討例（500kV 送電線）

#### （４）モデル電子回路の誤動作対策手法

静電誘導による電子回路の誤動作対策手法としては、電子回路を良導体で取り囲む静電シールドが有効である[8]。本節のモデル電子回路の誤動作も発振回路とカウンタ回路が異なる強さの電界にばく露され、静電誘導でそれぞれの回路が異なる電位となり、信号線等に電位差が生じるか、それに伴う電流が流れることが主要因として考えられる。

そこで、モデル電子回路を固定している基板の片面に厚さ 0.1mm のアルミニウムでコーティングして、図 2.24 に示すようにアルミニウムによる静電シールドの有無による誤動作発生電圧を、商用周波電界ばく露実験により確認する。電界ばく露条件は図 2.12 と同様であり、発振回路とカウンタ回路を 50cm の線で接続し、電線との離隔距離は 0.3m とした。

静電シールドの効果を図 2.25 に示す。静電シールドが無い場合は電線の課電電圧が 115kV で表 2.3 に示す E の誤動作が発生していたが、静電シールドが有りの場合は同じ E の誤動作が発生する課電電圧は 239kV であった。静電シールドにより、静電誘導で生じる発振回路とカウンタ回路の電位差が低くなる効果があり、誤動作が発生しにくくなったと考えられる。

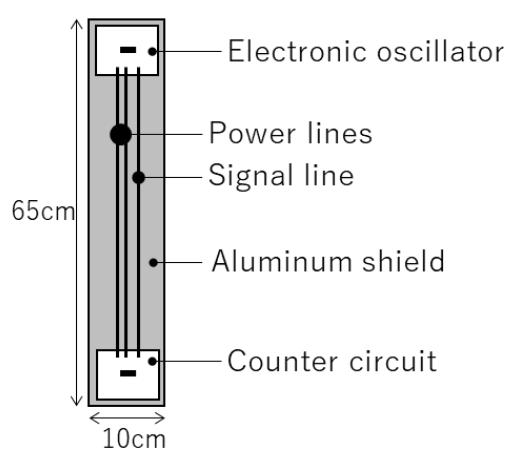


図 2.24 静電シールドによる誤動作対策例

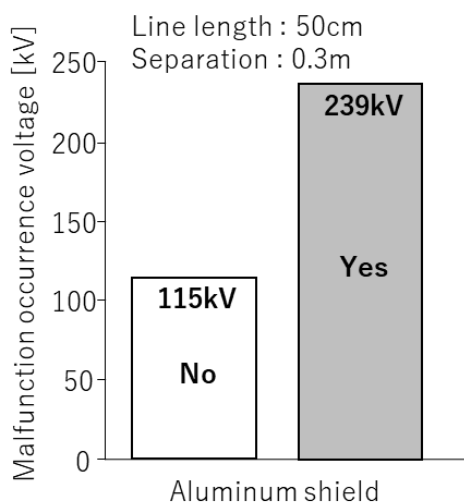


図 2.25 静電シールドの効果

## 2. 2 コロナ放電

国内の交流架空送電線は、電線表面から発生するコロナ放電による電波雑音や可聴騒音による送電線周辺での環境問題が発生しないように設計されているが、送電線の状態や自然環境の状況により、稀にコロナ騒音問題などが発生することがある[2][6]。

交流架空送電線で発生するコロナ放電は、電線表面の電界がコロナ開始条件以上に高くなったときに発生し、電線の電圧が正極性のときには正コロナ、負極性のときには負コロナが発生する。コロナ放電の電波雑音としての周波数帯域は数 MHz 以下であり、昔は AM ラジオの受信障害（ラジオ雑音）が生じることがあったが、下記の通産省電気事業関連通達の運用などにより、送電線周辺でラジオ雑音による障害が生じないように十分な配慮がなされている[2]。

[通産省電気事業関連通達]

"電磁誘導電圧計算値および電波障害検討書の取扱について（昭和 37 年 11 月 19 日、37 公局 832 号）

1) 雨天時に信号対雑音比(SN 比)が 20dB 未満の聴取者が生ずる場合には、送電開始後の障害防止対策を検討書に記載すること

2) 雨天時に SN 比が 30dB 未満の聴取者が生ずる場合には、その聴取者数および分布状態を 20dB 未満および 20dB 以上 30dB 未満に分けて記入した地図を検討書に添付すること"

コロナ放電の可聴音（コロナ騒音）には、「ザーザー」あるいは「ジリジリ」と聞こえる不規則音と、「ブーン」と聞こえる変圧器の励磁音に似た純音の 2 成分が含まれる。不規則音成分はランダム騒音と呼ばれ、コロナ放電によって瞬間的に空気中に放出されるエネルギーによるもので、一種の爆発音である。多数のコロナ放電による急峻なインパルス音がランダムに重なるため、広い周波数帯域を有する白色雑音に近くなる。純音成分は国内ではコロナハム音と呼ばれ、コロナ放電によって生成されたイオン群が電線周囲の商用周波電界によって励振され、中性分子との衝突によって空気中に伝搬される。コロナハム音は電源周波数の 2 倍（50Hz 地域では 100Hz、60Hz 地域では 120Hz）およびその高調波の周波数となる。コロナハム音は自然界にない音質であり、暗騒音によるマスク効果が期待できないことや建物等による遮音効果が期待できないことから、人に感知されやすい傾向にあり、苦情の対象となることがある。

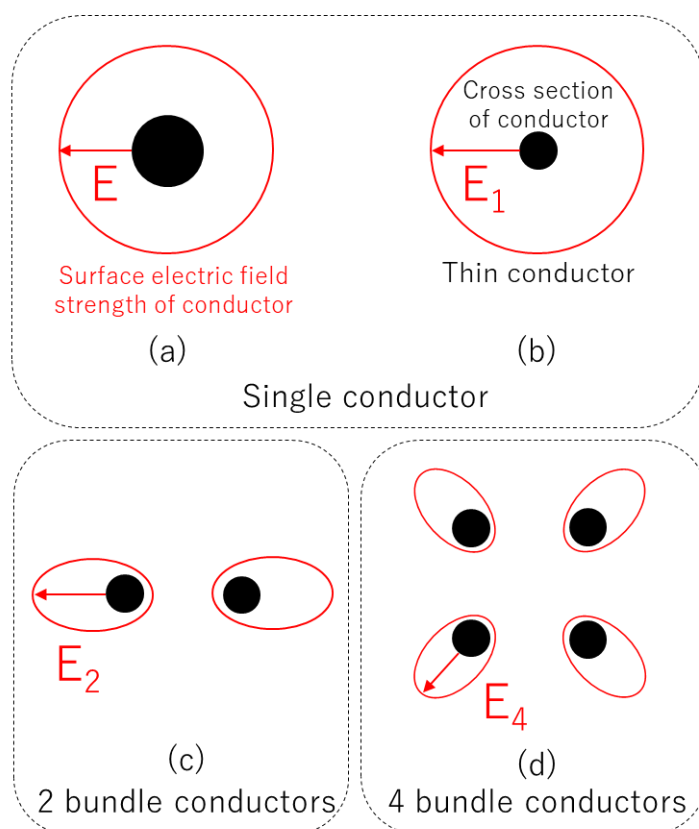
### 2. 2. 1 架空送電線から発生するコロナ放電の特徴

架空送電線の電線は流す電流が大きいほど、径の太い電線が用いられる。また、電圧階級の高い電線は高電圧が課電され、電線周囲の電界が高くなり、電線表面からコロナ放電が発生しやすくなるため、電線表面電界を低くする工夫が必要となる。単純に直径の大きい電線ほど表面電界は低くなるが、太い電線の採用は重量の問題から、電線を支持する送電鉄塔の



巨大化を招くため、電線に流す電流と電線表面電界の両者を考慮する必要がある[18]。

図 2.26 に電線の断面図と電線周囲の電界レベルを模式的に示す。(a)と(b)は単導体について、電線の太さの違いと電界レベルの関係を示している。電線の課電電圧が同じ場合、(a)の太い電線周囲の電界が低くなる。(b)と(c)と(d)は同じ電線でも本数の違いと電界レベルの関係を示している。同じ課電電圧の場合、(b)の単導体よりも(c)の複導体、さらに(d)の4導体の電界レベルが低くなる。また、多導体の特徴としては、電界の高くなる箇所は電線と向き合う面の反対側となり、電線と向き合う面は電界レベルが低くなる。ここで、(a)と(d)の電線の断面積が等しいとすると、課電電圧が同じ場合は(d)の4導体の電界レベルが低くなる。実際の架空送電線でも、太い単導体の電線を用いるよりも、同じ断面積の多導体方式を採用するほうが電線表面の電界レベルを低くできるため、課電する電圧に応じた電線本数の最適化設計がなされている[2]。



$$E_1 > E$$

$$E_1 > E_2 > E_4 \text{ (Use the same thin conductor)}$$

$$E > E_4 \text{ (Same cross-sectional area of conductors)}$$

図 2.26 電線周囲の電界分布

多導体方式の電線配置について、多導体の下側のほうに配置される電線は下面の電界レベルが高くなる。架空送電線の電線は図 2.5 に示したように撚線構造であるため、降雨時に電線内部に雨水がしみ込みやすく、電線の下面から水滴が滴り落ちる。このとき、水滴の先端は尖った形状であるため、電界が高くなり、コロナ放電が発生しやすくなる。そこで、実際の高電圧の架空送電線では多導体方式の採用だけでなく、多導体の下側の電線の下面の表面電界を低くする工夫がなされている[2]。図 2.27 は 1000kV 送電線に用いられている 8 導体の例であるが、(a)は標準配列、(b)は添え線方式、(c)は非対称配列を模式的に示している。(b)の添え線方式は(a)の標準配列の下側に電線を 1 本追加する手法であり、実質 9 導体となり、下側の電線の下面の表面電界レベルを低くすることができる。送電鉄塔の力学的な制限で電線の追加ができない場合は、(c)の非対称配列により、下側の電線を接近させることで下面の表面電界レベルを低くすることも可能である。

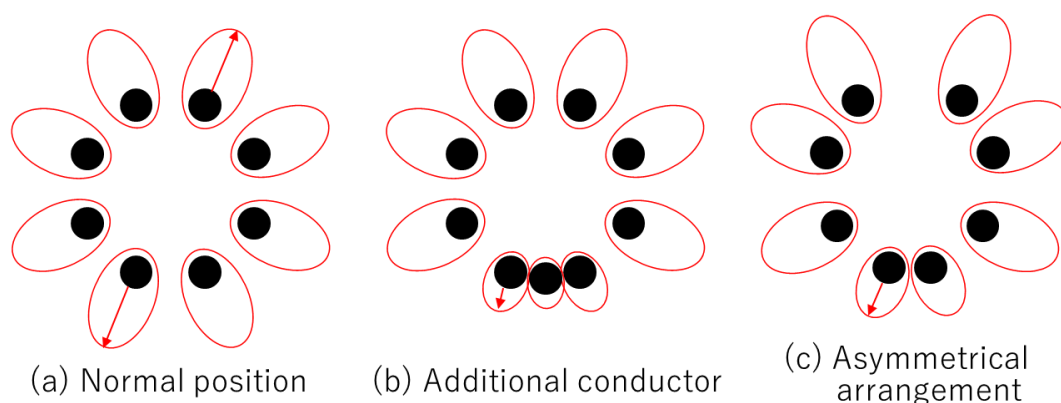


図 2.27 多導体の電線表面電界の低減法

架空送電線の電線に強い風が吹きつけられるとき、電線からエオルス音（風切音）が発生することがある。この風切音は風音と呼ばれ、風速 10m/s 以上の風が一様に吹くときに発生しやすい。国内の交流架空送電線では諸外国と比較すると厳しく、線下の地表上 1m における電界強度が 3kV/m 以下と定められているため、電線は地上高が高く遮るものの少ない、風が層流となって吹く空間に多く存在し、国内での風音による苦情は比較的に多い。

風音対策については、電線にアルミニウム製の細線を巻き付ける構造となるスパイラル線の装着がある。近年では、強風地域の架空送電線について、あらかじめ電線表面にスパイラル線の装着と同じ形状をしたヒレ状の突起を形成した風音対策電線（LN 電線）も製品化されている。スパイラル線を装着した電線の写真を図 2.28 に示す。電線表面の突起物となるスパイラル線の表面も電界が高くなる。また、図 2.28 はスパイラル線を装着した電線に注水課電しており、電線下面の位置にあるスパイラル線から滴り落ちる水滴からコロナ放電が発生している。電線表面のスパイラル線のさらにその表面にある水滴の先端は電界レベルが高くなるため、コロナ放電が発生しやすくなる。

スパイラル線による風音の抑制メカニズムを図 2.29 に示す。風音は電線の風下側に形成されるカルマン渦によるものであり、スパイラル線はカルマン渦を乱すため、風音が抑制される。なお、風音の卓越周波数  $F$  [Hz] は(2.1)式に従い、風速  $U$  [m/s] と電線の外径  $d$  [m] から算出できる[2]。

$$F = 0.2 \times U/d \cdots (2.1)$$

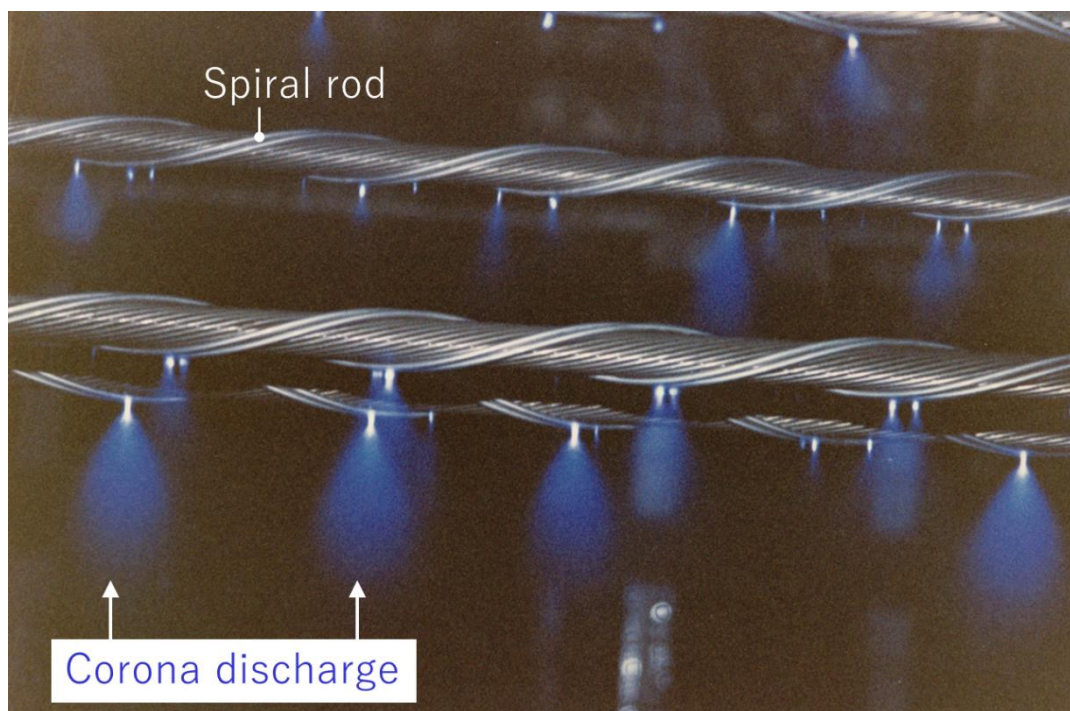


図 2.28 スパイラル線を装着した電線からのコロナ放電

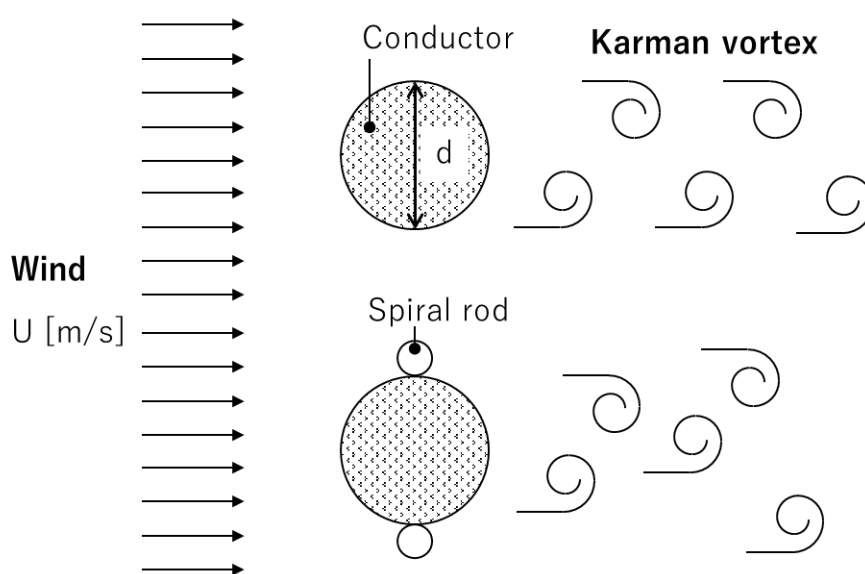


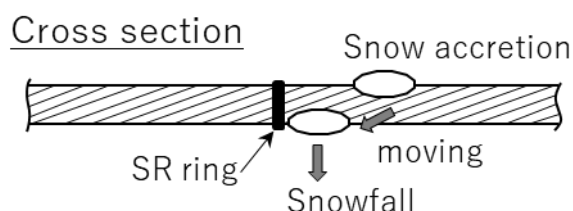
図 2.29 スパイラル線による風音の抑制

降雪時の架空送電線では電線上面に積雪して、その着雪が成長することで、電線表面に筒状の雪や氷におおわれることがある。電線表面の着氷雪は電線の重量が大幅に増す原因となり、電線の断線や鉄塔の倒壊を招く恐れがある。電線の着氷雪対策には、図 2.30(a)に示す導電性のプラスチックで形成された難着雪リング（SR リング）を電線の表面に装着する手法がある。難着雪リングによる着氷雪対策は、図 2.30(b)に示すように、電線上面の積雪が電線の撚りに沿って下面に移動し、これを繰り返し成長する積雪を難着雪リングにより移動を阻害して、積雪を落下させるメカニズムである。難着雪リングも電線表面の突起物となるため、コロナ放電の発生原因となりうる。

難着雪リングから発生しているコロナ放電の写真を図 2.31 に示す。90cm 間隔で装着された難着雪リングからコロナ放電が発生している。



(a)難着雪リングの形状



(b) 難着雪リングによる着雪の抑制

図 2.30 難着雪リング

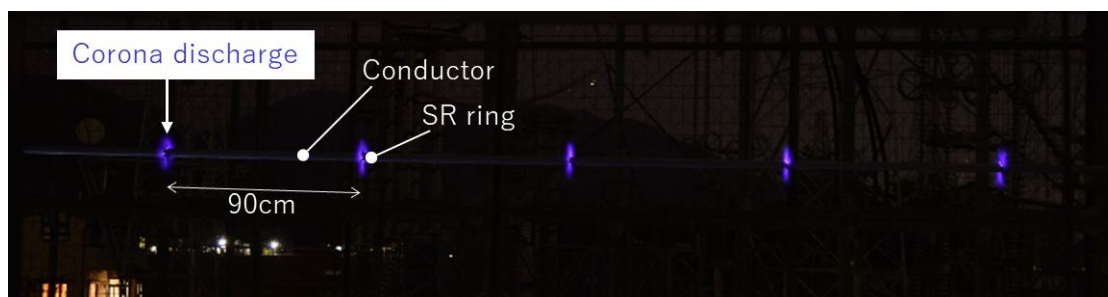


図 2.31 難着雪リングからのコロナ放電



## 2. 2. 2 電線表面のぬれ性とコロナ騒音の関係

特に 275kV 以上の国内の交流架空送電線では、コロナ放電が発生しないように多導体方式を採用するなどの設計がなされているが、本来は滑らかな表面を持つ電線に傷があったり、鳥糞などの異物が付着して突起が形成されたりすると、その表面電界は高くなり、コロナ放電が発生しやすくなる。降雨時も電線表面に水滴が付着するため、コロナ放電は発生しやすい[19, 20]。

一般に、降雨時の交流架空送電線において、送電線新設時はコロナ騒音が大きく、年を経るにつれ電線表面がエージングしてくるとコロナ騒音は小さくなる傾向にあることが認識されている。これは、両者の付着水滴の様子が異なるためである。実際、図 2.32 に示すように、(a)の新しい電線表面の付着水滴は、(b)の長期間自然ばく露した電線と比較するとコロナ放電点となる突起として多く存在する。このことは付着水滴の状態を決定付ける電線表面のぬれ性の改善が、一つのコロナ騒音低減法であることを意味し、自然のエージングに任せるのではなく、積極的な電線表面の改質により、降雨時の送電線から発生するコロナ放電ならびにコロナ騒音を低減できると考えられる。

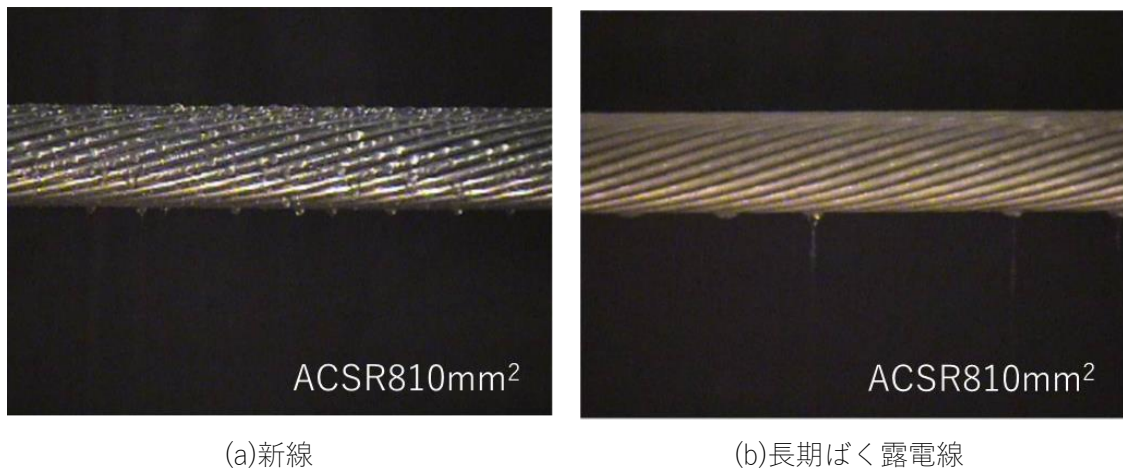


図 2.32 電線の付着水滴の比較

### (1) 電線の表面改質について

新しい電線は製造時に付着する潤滑油で撥水性を示し、送電線として鉄塔に架線され長期間自然ばく露されると、電線表面は脱油・酸化して親水性に変化する[21-23]。この電線表面の撥水性や親水性で表現しているぬれ性の度合いを示す指標として、水の接触角がある。接触角とは図 2.33 に示すように固体表面に少量の液体を滴下し、側面から観察したとき、液体の接線が固体表面に対して作る角度であり、滑らかな表面上の接触角 $\theta$ [°]は(2.2)式に示す Young の式のように、固体の表面張力 $\gamma_S$  [mN/m]と液体の表面張力 $\gamma_L$  [mN/m]、固体／液体の界面張力 $\gamma_{SL}$  [mN/m]で決定される[24]。表面が粗面化し、表面積が大きくな

った場合、見かけの接触角 $\theta_f [^\circ]$ は(2.3)式の Wenzel の式のように、撥水性の表面では接触角はさらに大きく水滴は球状にまとまり、親水性の表面では接触角はさらに小さく平らに広がる。ここで $r$ は表面増倍因子である。表面の粗面化による接触角への影響のイメージを図 2.34 に示す。また、一般に接触角 $90^\circ$ を境に撥水性と親水性は区別され、表面のぬれ性は接触角 $90^\circ$ より大きくなると撥水性、小さくなると親水性と呼ばれる[23]。そして、接触角が $150^\circ$ 以上になると超撥水性、接触角が数 $^\circ$ 以下では超親水性と呼ばれる。表面に水滴を滴下した時、超撥水性の表面では水滴はほぼ球状となり、わずかな傾斜でも水滴は表面を転がるような様子となり、超親水性の表面では水滴は表面に膜状に大きく広がるような様子となる。

$$(\gamma_S - \gamma_{SL})/\gamma_L = \cos \theta \cdots (2.2)$$

$$\cos \theta_f = r (\gamma_S - \gamma_{SL})/\gamma_L = r \cos \theta \cdots (2.3)$$

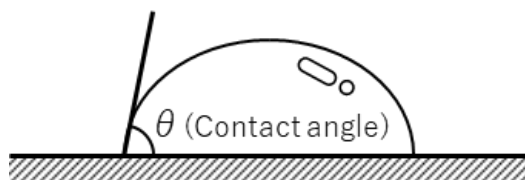


図 2.33 接触角

Condition	Hydrophobic	Hydrophilic
Flat		
Rough		

図 2.34 表面の粗面化による接触角の変化

ここで、電線表面にも適用できる表面改質法を用い、超撥水性から超親水性までの様々なぬれ性をもつ電線を作製して、降雨時の送電線を模擬した実験から、電線表面のぬれ性とコロナ騒音の関係を明らかにする。作製した試験電線は表 2.5 に示すように、接触角 $0.3 \sim 156.5^\circ$ のぬれ性の9種類である。電線表面はアルミ合金の素線が束になった撚線構造で、本来は数百メートル以上ある長物であるため、表面改質の方法には制限がある。そこで、アルミ表面にも均質な表面改質がオープンエアで実現できる3種類の方法を試行した。

表 2.5 試験電線のぬれ性と表面特性

Method of surface processing	Contact angle [degree]	Surface condition	
		Roughness	Hardness
Super-hydrophobic painting	156.5	Flat	Fragile
Hydrophobic painting	107.8	Flat	Hard
Super-hydrophilic painting	5.3	Flat	Hard
New (without surface processing)	98.6	Flat (Glossy)	-
Aging (long-term outdoor exposure, without surface processing)	-	Flat (Matte)	-
Sand blasting	74.0	Rough	-
Ti blasting	87.6	Rough	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> thermal spraying	11.6	Rough	Very hard
TiO <sub>2</sub> thermal spraying	0.3	Rough	Very hard

最初に、簡便な方法として塗料の塗布がある。これは塗料の種類により様々なぬれ性に行うことができ、既に架線した電線にも比較的容易に施工することができる。しかし、風雨や太陽光にさらされ続け、寒暖の差も激しい環境において、塗装皮膜の寿命は電線の寿命と比較してはるかに短く、特殊な場合を除いては現実的ではないと考えられる。

次に、ブラスト加工による表面改質法がある。サンドブラスト加工については実際の電線にも使用されており、その目的は光沢ある電線の表面を粗面化し、太陽の反射光を抑えるための環境調和である。また、ブラスト加工は、その条件によってはブラスト材料の一部を電線表面に打ち込むことも可能であり、アルミだけでは実現できないぬれ性も得られる。ブラスト加工は電線製造時の一工程として容易に実現できる。

最後に、溶射加工は熔融状態の高温の材料を電線表面に吹き付けて溶着する表面改質法であり、表面のぬれ性を溶射材料そのものの特性に変えることができる。溶射条件により、任意の溶射膜厚や構造を制御でき、電線表面への密着性も高い耐久性に優れた皮膜を得ることができる。溶射加工も電線製造時であれば、比較的容易に実現可能と考えられる [25, 26]。

なお、接触角測定は撚線構造の電線では困難であるため、表 2.5 の接触角は別に用意したアルミ平板に同じ表面改質を行って測定したものである。接触角測定について、親水性・撥水性・超撥水性の場合は、図 2.35 のように表面上の水滴を側面から観測し、接触角を測定した。接触角は液滴法による接触角計（画像処理式接触角計：協和界面科学製 CA-X 型）を用いて測定した。このときの接触角は図 2.36 のモデルに従い、(2.4)式により算出される。

超親水性の場合は、表 2.5 の超親水性塗料の塗布と酸化チタンの溶射を施した 2 種類の試験片であり、図 2.37 に酸化チタン溶射の例を示すように、滴下した水滴が表面に大きく広がり、液滴法では接触角を測定できなかった。そこで、水滴が試験片に接触する面積を試験片上面から写真撮影により求め、同じ接触面積で水滴が球を形成する場合を仮定し、接触角を推定することとした。なおこのとき、20 $\mu$ l の水滴を使用した。図 2.36 のような球冠の体

積  $V[\text{mm}^3]$ を求める(2.5)式と表面と水滴の接触面積  $A[\text{mm}^2]$ を求める(2.6)式, 接触角  $\theta[^\circ]$ を求める(2.7)式から, 水滴量  $20\mu\text{l}$  の場合は図 2.38 の接触面積  $A[\text{mm}^2]$ と接触角  $\theta[^\circ]$ の関係が得られるため, 実測した接触面積を図 2.38 の計算曲線に代入して接触角を推定した。図 2.38 に 3 種類の試験片で行った接触角の推定値を●印で示す。また, 接触角計にて接触角が測定できた試験片における接触角と接触面積の関係を○印で示す。接触角計での測定値は計算曲線とよく一致しており, 接触角の推定が無理のない結果であると考えられる。

$$\theta = 2 \tan^{-1}(h/a) \cdots (2.4)$$

$$V = 20\mu\text{l} = \frac{1}{3}\pi h^2(3r - h) \cdots (2.5)$$

$$A = \pi a^2 \cdots (2.6)$$

$$\theta = \sin^{-1}(a/r) \cdots (2.7)$$



図 2.35 液滴法の接触角計による測定



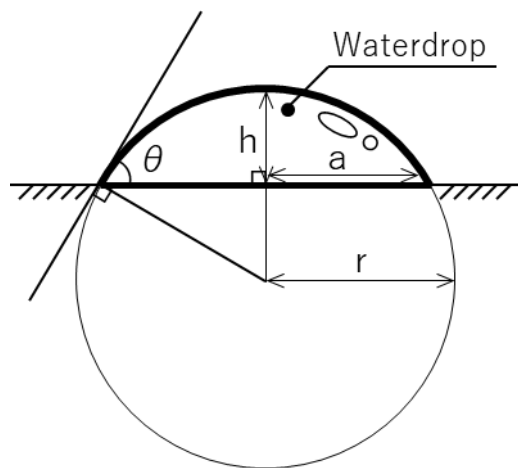


図 2.36 接触角測定モデル



図 2.37 酸化チタン溶射表面上の水滴 (20 $\mu$ l)

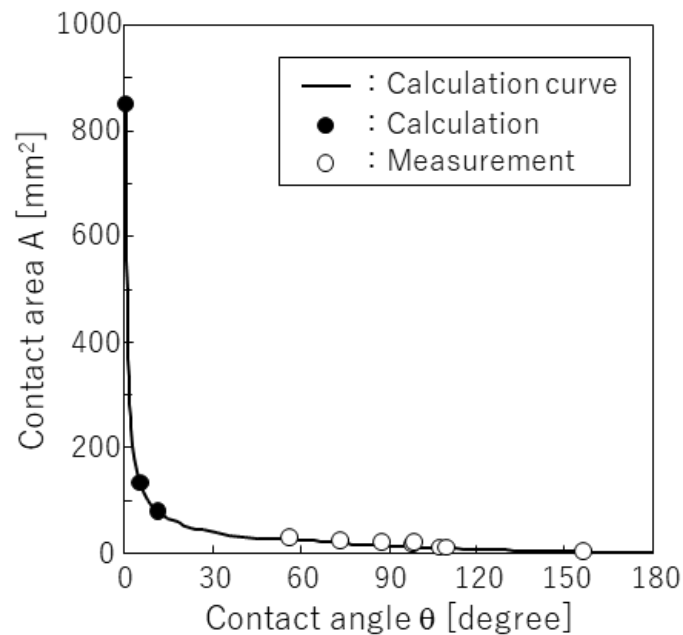


図 2.38 接触角と接触面積の関係 (20 $\mu$ l)

ここで、超親水性を実現した酸化チタン溶射について、酸化チタンは太陽光などに含まれる紫外線により光励起し、有機物を分解したり、超親水性を発現したりする。これら機能は、汚損物質の直接の分解や降雨による洗浄の相乗効果で、太陽光にさらされる屋外建築物では人的に洗浄することなく表面をクリーンに維持することができる。容易に洗浄作業ができない架空送電線では、表面改質によりぬれ性を改善しても、表面の汚損によりその特性を失う可能性もあるため、セルフクリーニング機能の応用は有効であると考えられる。酸化チタンの溶射皮膜の表面形状は図 2.39 示すように、直径 1 $\mu$ m の気孔や長さ 5 $\mu$ m の亀裂があり、また 0.5 $\mu$ m から 2 $\mu$ m 程度の微小球がある。表面全体にわたって $\mu$ m オーダーの凹凸があり、表面積が非常に大きく、溶射処理によって超親水性能が促進されていると考えられる。

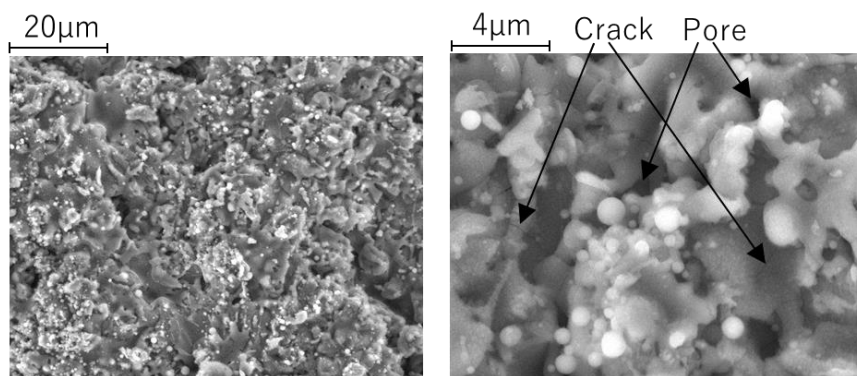


図 2.39 酸化チタン溶射皮膜の表面

## (2) 実験装置

表 2.5 のように作製した試験電線を用いて、降雨時の交流架空送電線を模擬した注水課電試験を行い、コロナ放電の発生に伴うコロナ騒音の測定と電線表面の付着水滴観測を行う。試験装置の写真を図 2.40, 概略図を図 2.41 に示す。試験電線は長さ約 2m の ACSR810mm<sup>2</sup> の単導体、最高電圧は AC150kV である。また、装置上部の注水ノズルからは、架線した試験電線に注水量を 1.2mm/min の一様な注水が可能である。

試験電線の課電電圧は超高圧送電線の電線表面電界レベルを参考に設定した。電線と接地面の距離 35cm の条件と試験電線の外径、電線を円筒形と見なす条件と、無限平面大地面に無限長の電線が存在すると仮定した場合の電線表面電界を電荷重畳法による計算により求めると、電線表面電界強度は電線と接地面が対向している最下面で最も高くなる。そして、この最下面の電界を最大導体表面電位の傾き（以後、 $G_{\max}$  と呼ぶ）と称し、 $G_{\max}$  が 12, 14, 16kV/cm の条件にて注水課電試験を行った。 $G_{\max}$  を 16kV/cm に設定する場合は、電線に 106kV を課電することとなる。

コロナ騒音測定には精密騒音計（RION 製 NA-27）を用い、マイクロホンは無指向性のコンデンサマイクロホンを用いた。精密騒音計の設置位置は試験電線の中心で、かつ試験電線と同じ高さとした。試験電線からマイクロホンまでの距離は 2m とした。電線に付着する水滴の観測にはデジタルビデオカメラを使用した。測定するコロナ騒音は JIS C 1505 に規定される A 特性で重み付けられた騒音レベルであり、(2.8)式により暗騒音補正したコロナ騒音発生量  $P_c$  [dB(A)] である。暗騒音  $P_n$  [dB(A)] は課電電圧 0kV、注水時の騒音レベルである。 $P_m$  [dB(A)] は注水課電時の騒音レベルである。

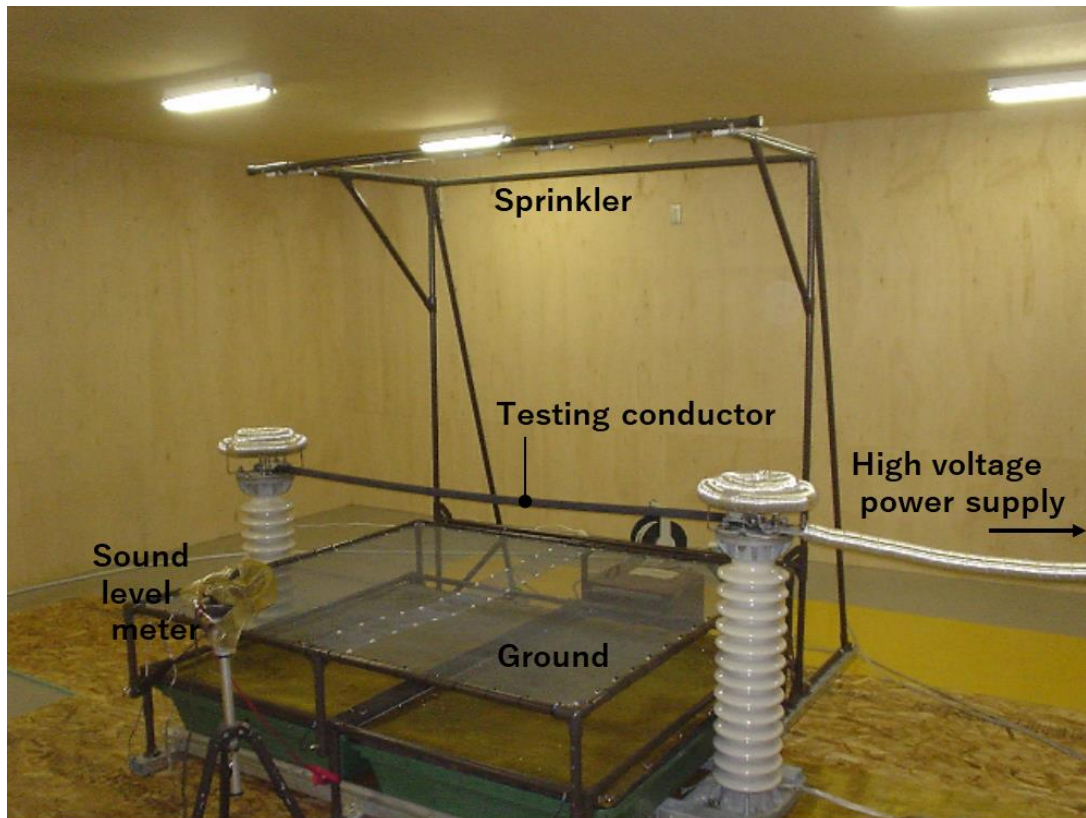


図 2.40 コロナ特性試験装置の写真

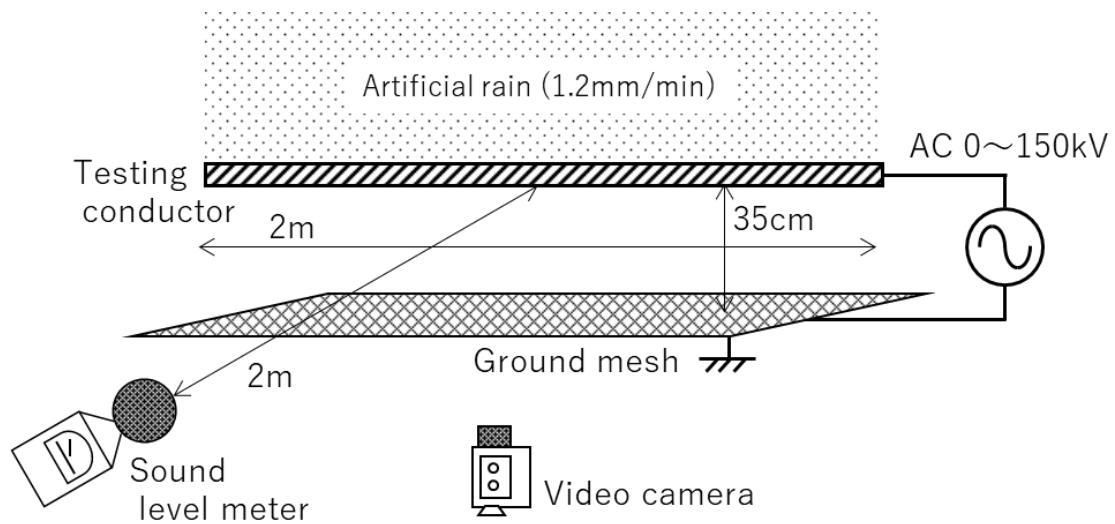


図 2.41 コロナ特性試験装置の概略図

$$P_c = 10 \log(10^{P_m/10} - 10^{P_n/10}) \dots (2.8)$$

図 2.42 に超撥水性塗料を塗布した電線と超親水性の表面を持つ酸化チタンを溶射した電線の注水課電時の電線表面画像を示す。図 2.42 は  $G_{\max}$  が  $16\text{kV/cm}$  のときの画像であり、デジタルビデオカメラで撮影した動画画像の 1 コマである。超撥水性塗料を塗布した電線の表面には水滴が存在しないことが確認できる。酸化チタンを溶射した超親水性の電線は電線下面にしか水滴は存在せず、親水性の電線は図 2.32 でも示したように、おおむねこのような水滴付着様相であったが、超親水性の電線では特に水滴個数が少なく、水滴の位置も移動しながら、間欠的にコロナ放電が発生している様子であった。

$G_{\max}$  が  $16\text{kV/cm}$  の場合について、各試験電線における接触角と付着水滴個数の関係を図 2.43 に示す。水滴の個数はコロナ放電が発生していると考えられる水滴をカウントしている。新線や撥水性塗料を塗布した撥水性の電線の水滴個数は多いことがわかる。

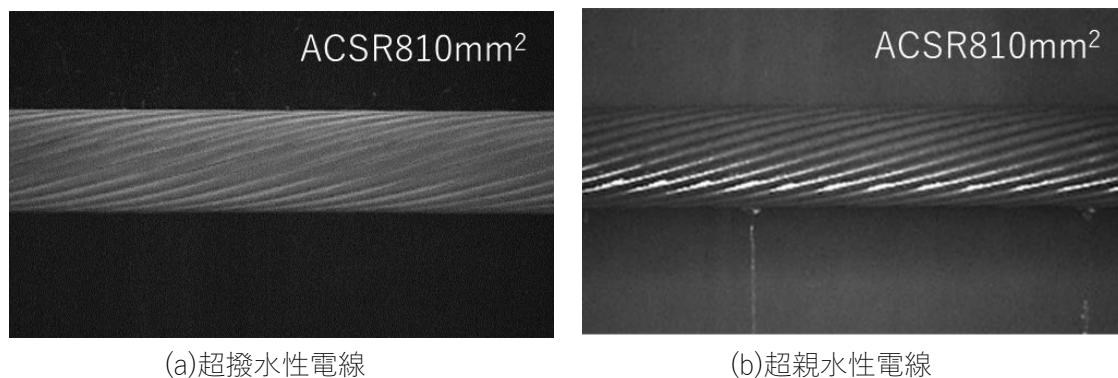


図 2.42 水滴付着状況

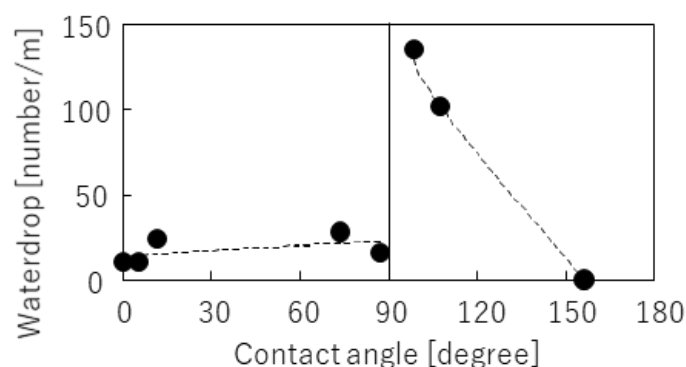


図 2.43 接触角と付着水滴個数の関係

図 2.44 に各試験電線のコロナ騒音測定結果を示す。注水しない状態，すなわち乾燥状態の電線では，耳に聞こえるコロナ騒音は発生しない。しかし，注水時は各試験電線とも  $G_{\max}$  が高くなるほど騒音レベルも増大し，「ジリジリ」や「チリチリ」，「ブーン」と聞こえるような騒音を発した。特に新線と撥水性塗料を塗布した撥水性の電線の騒音レベルは高くな

っているが、超撥水性塗料を塗布した電線ではかなり低くなる傾向にある。図 2.45 に付着水滴個数とコロナ騒音発生量の関係を示す。電線表面に付着する水滴の個数が増えるほど、コロナ騒音レベルも高くなることが明らかである。次に、図 2.46 に試験電線の接触角をパラメータとしたコロナ騒音発生量を示す。接触角が  $90^\circ$  より小さい親水性の領域での騒音レベルの変化は小さく、超親水性領域では接触角が小さくなるほど騒音レベルは低くなる傾向を示す。逆に、撥水性の領域では接触角が小さいほど騒音レベルは高くなることが明らかである。

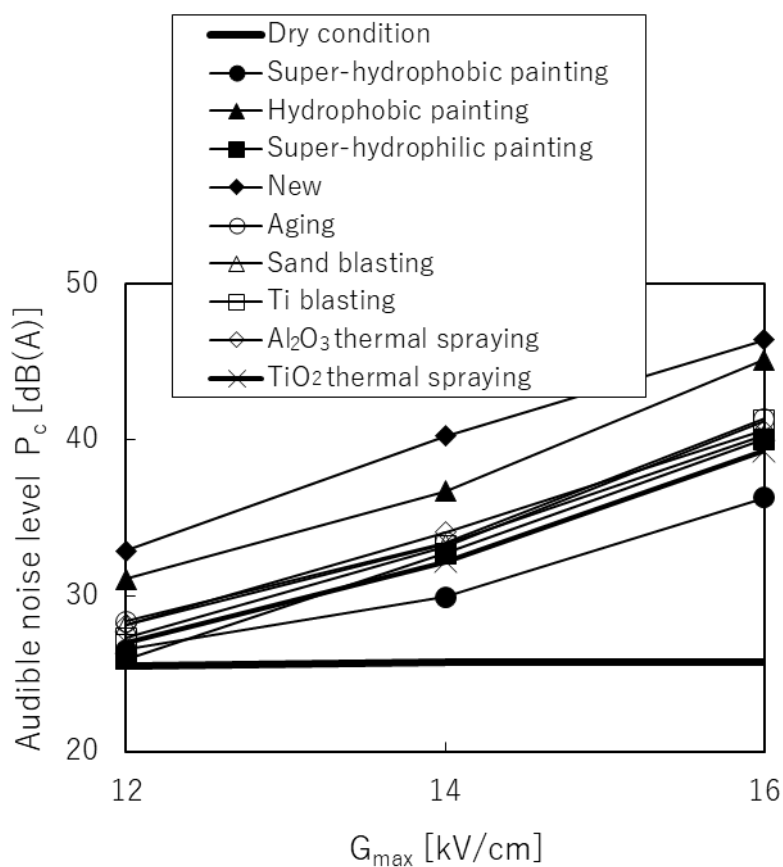


図 2.44 コロナ騒音測定結果

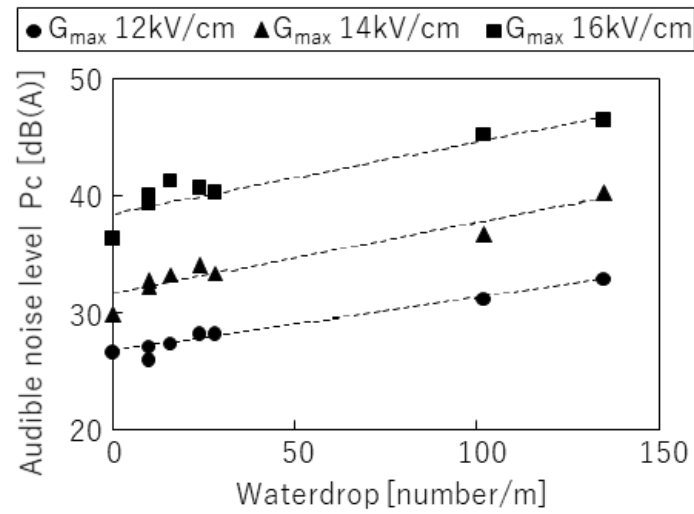


図 2.45 付着水滴個数とコロナ騒音発生量の関係

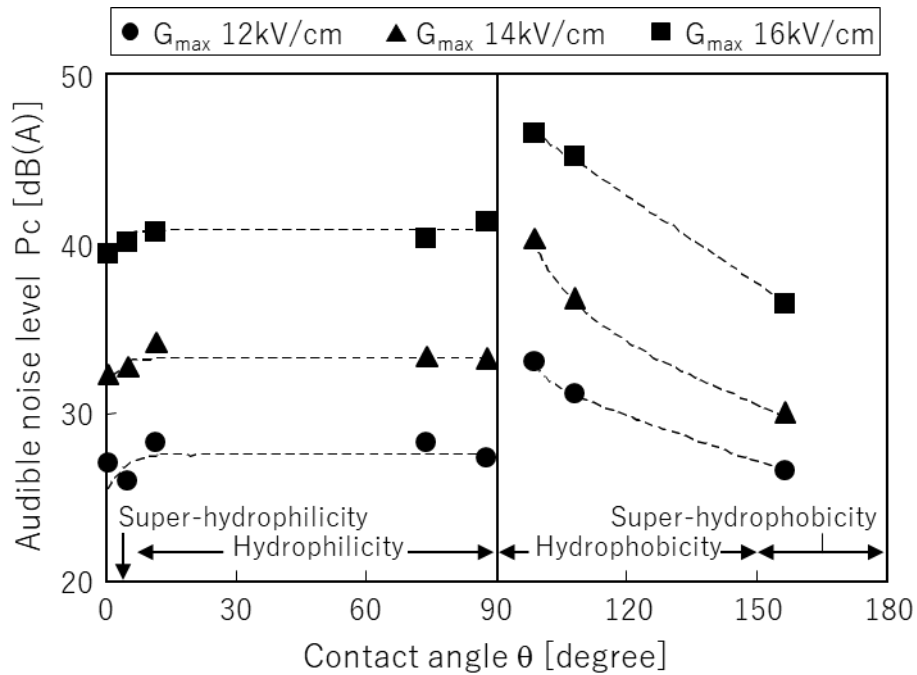


図 2.46 接触角とコロナ騒音発生量の関係

電線表面に付着した水滴の観測から、両者の特性の違いは明らかであり、図 2.32(b)のように親水性の電線では、その上面や側面には水滴が形成されず、下面のみに水滴が形成されるような様子であるのに対して、超撥水性以外の撥水性の電線では、図 2.32(a)のように電線表面のいたる所に水滴が付着するような様子であった。親水性の電線では接触角が小さいほど水滴の移動が容易であり、コロナ放電の発生源となる電線表面の水滴数が少なくな

るため、騒音レベルが低くなると考えられる。超撥水性の電線では、注水によって電線表面に衝突した水滴は弾かれるように落下し、定常的にコロナ放電を発生する水滴は電線表面には存在せず、注水による水滴が電線に衝突する際に、「チリチリ」とわずかに聞こえる程度であった。超撥水性塗料を塗布した電線の表面には水滴が存在しないことが確認できた。また、新線は電線下面に水滴が付着し、電線表面の電界によって円錐状の形状となり、そこから定常的にコロナ放電が発生していた。電線上面では水滴が溜まっては、纏まって流れ落ちるような状態を繰返し、上面や側面でも突起状となった水滴からはコロナ放電が発生していた。酸化チタンを溶射した電線は電線下面にしか水滴は存在せず、水滴個数が少なく、水滴の位置も流れるように移動しながら、間欠的にコロナ放電を発生している様子であった。

コロナ騒音の低減対策に最も有効な電線の表面改質法は超撥水化であるが、塗料の塗布については長期間にわたって性能を維持する表面改質法は困難である。また、超撥水性能が劣化した場合、急激なコロナ騒音の増大を招く恐れもあるため、送電線に適用可能なコロナ騒音低減対策手法は、表面の超親水化であると考えられる。さらに光触媒機能を持つ酸化チタンの応用は、その超親水性能だけでなく、性能劣化の一つである異物の付着による汚れも抑制できるため、酸化チタンを用いた電線表面の超親水化が、実用的で有効な表面改質法であると考えられる。



## 2. 2. 3 コロナ騒音の低減手法

架空送電線では、強風時、電線の後方に形成される周期的なカルマン渦に起因するエオルス音（風切音）が発生することがある。この風音の対策として、電線にスパイラル状の細線（スパイラル線）を巻き付けて、カルマン渦を乱す手法があるが、降雨時にはスパイラル線に水滴が付着し、水滴先端からコロナ放電が発生することがある。電線表面の突起物となるスパイラル線表面の電界は電線表面よりも高いため、スパイラル線表面の水滴からはコロナ放電が発生しやすい。交流架空送電線では、強風時の風音だけでなく、降雨時のコロナ放電によるコロナ騒音が苦情対象となることがある。

電線に付着する水滴の個数が少なくなるほど、電線表面から発生するコロナ放電によるコロナ騒音は小さくなることが前項で明らかにされており、酸化チタンの溶射による電線表面の超親水化がコロナ騒音の低減手法として有効と考えられる。

交流架空送電線の騒音対策では、風音とコロナ騒音の両者を低減することが求められるため、ここでは酸化チタンを表面に溶射したスパイラル線を作製し、送電線実規模コロナ試験より、そのコロナ騒音低減効果を明らかにする。

### （1）コロナケージによる送電線実規模コロナ試験

（一般財団法人）電力中央研究所 塩原実験場にあるコロナケージは送電線実規模レベルのコロナ試験を行うことができる大型の高電圧試験設備である。コロナケージの写真を図 2.47、概略図を図 2.48 に示す。コロナケージは断面が 8m×8m、長さ 24m の外網電極の中心に試験電線を架線し、図 2.49 に示す高電圧課電設備にて、AC700kV（50Hz）までの任意の電圧を電線に課電することができる。同時に、外網電極上部に設けた注水ノズルから降雨を模擬した注水が可能であり、電線に 30mm/hour の一様な注水ができる[27]。

コロナケージでは、電線の課電電圧の他に、①ランダム騒音、②コロナハム音の測定が可能である。また、外網電極の外から約 4m の距離で高電圧に課電された電線を観察することができ、夜間であれば③コロナ放電の発光がデジタルカメラで撮影できる。コロナケージの測定装置の配置を図 2.50、仕様を表 2.6 に示す。

#### ①ランダム騒音

周波数 20Hz～20kHz 程度までの可聴騒音をコロナケージの外網電極外面、電線と同じ高さに設置したコンデンサマイクロホンを用い、精密騒音計により A 特性の騒音レベルを測定する。

コロナケージでの騒音測定は長さ 24m の電線から発生する騒音を、電線から一定の間隔に設置したマイクロホンを用いて測定している。そこで測定値を無限長電線の電線中心から 1m 点の騒音レベルの条件に変換して、これを騒音の発生量と定義する。ランダム騒音発生量  $P_{Gr}$  [dB(A)] は(2.9)式を用いて測定値  $P_{mr}$  [dB(A)] に暗騒音  $P_n$  [dB(A)] の補正を行い、電線中心から 1m 点の出力音圧レベルに変換する。

$$P_{Gr} = 10 \log(10^{P_{mr}/10} - 10^{P_n/10}) + 8.4 \dots (2.9)$$

## ②コロナハム音

100Hz 成分の音圧レベルを精密騒音計により F 特性で測定する。マイクロホンが電線の真下の地表から約 20cm の高さに設置しており、電線との距離は 6.37m である。

コロナハム音については暗騒音補正ができないため、コロナハム音発生量  $P_{Gh}$  [dB(A)] は (2.10) 式を用いて A 特性補正ならびに自由空間における値への補正および電線中心から 1m 点の出力音圧レベルに変換する。(2.10) 式はコロナハム音レベルの測定値  $P_{mh}$  [dB(F)] が暗騒音レベルよりも 10dB 以上高いときに適用し、それ以外は参考値として示すこととする。

$$P_{Gh} = P_{mh} - 15.2 \dots (2.10)$$

## ③コロナ放電撮影

注水停止後 60 秒～120 秒の間の電線をデジタルカメラにてバルブ撮影する。デジタルカメラは外網電極外面、電線を斜め下から見上げる位置に固定している。



図 2.47 コロナケージの外観

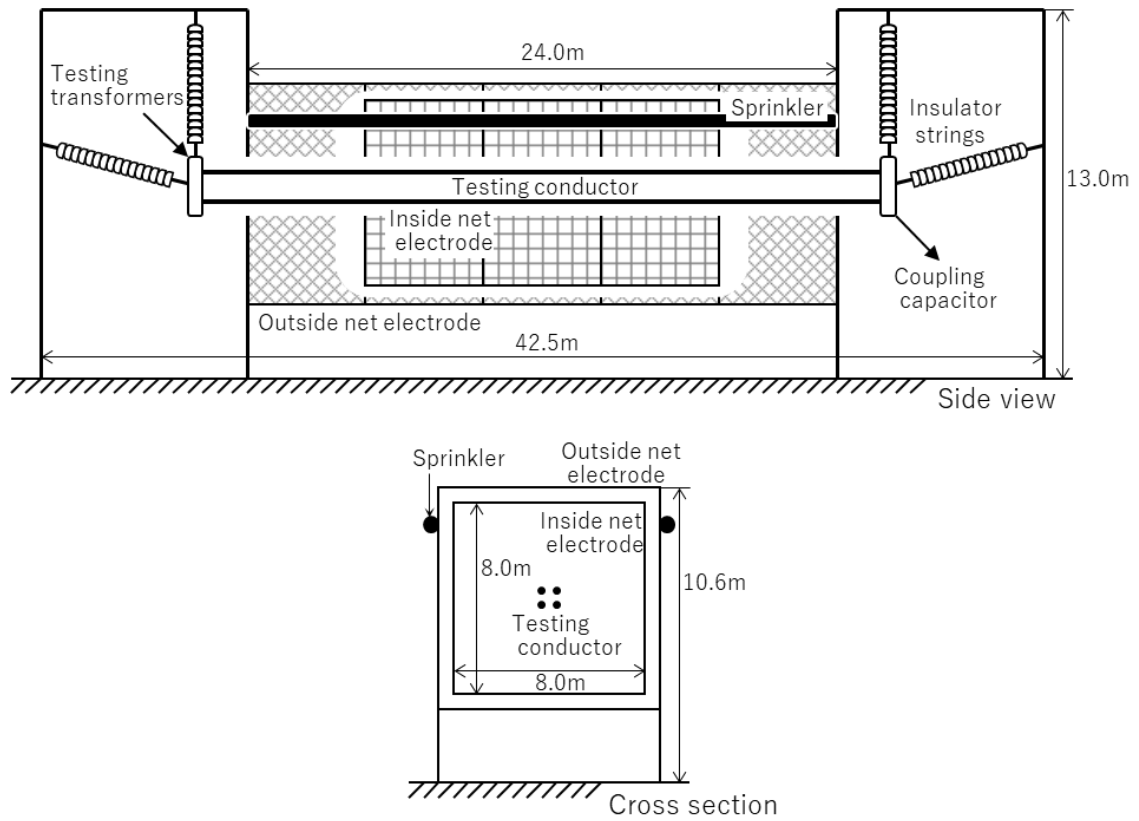


図 2.48 コロナケージの概略図

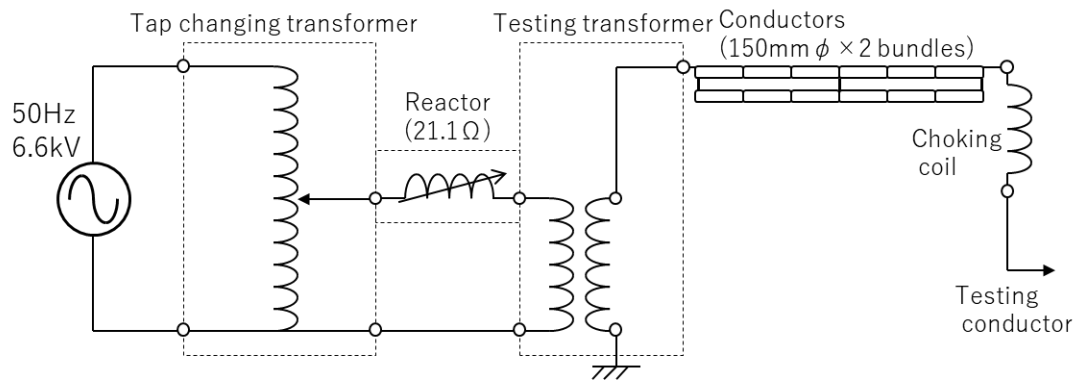


図 2.49 高電圧課電設備の概略図

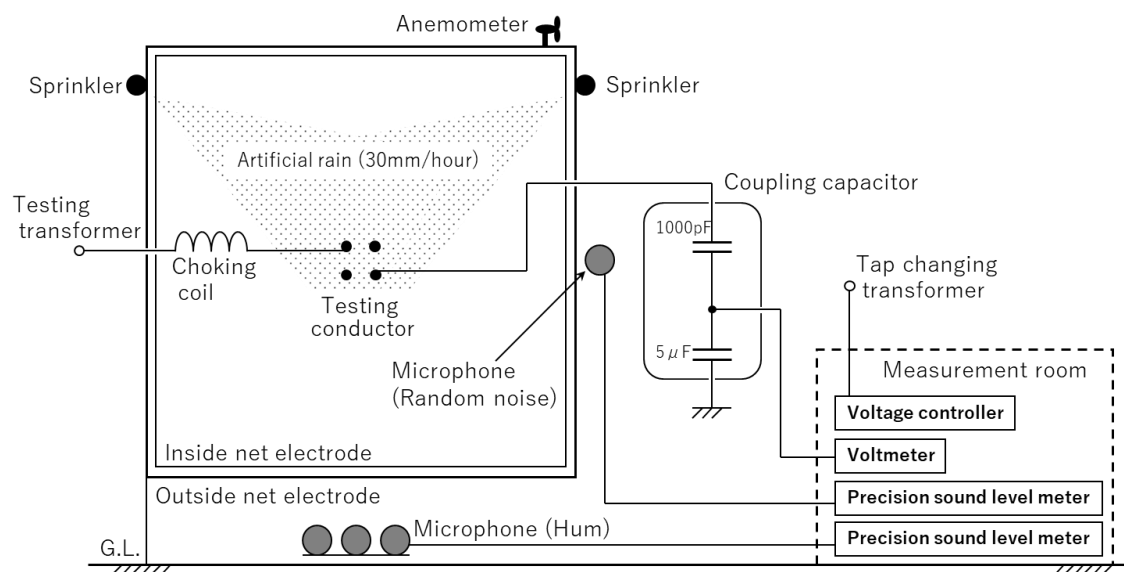


図 2.50 コロナケージの測定装置の配置

表 2.6 コロナケージの測定装置の仕様

測定項目	測定装置	仕様、型式	製造元
電圧	結合コンデンサ 電圧制御装置	分圧比：1/5000 分解能：1kV	日新電機 高岳製作所
ランダム 騒音	マイクロホン 防風スクリーン 精密騒音計	UC-53A（プリアンプ：NH-17A），コン デンス型，外径：1.27cm，感度：約- 32dB/Pa，バイアス電圧：60V 直径：20cm，材質：ウレタンフォーム，風 雑音低減効果：28dB(A)・19dB(F) NA-42，XH-5H，JIS C1505に準拠， 周波数重み特性：A・C・FLAT，時 間重み特性：FAST・SLOW，周波 数範囲：1Hz～100kHz	リオン
コロナ ハム音	マイクロホン 防風スクリーン 精密騒音計	MY-03C，エレクトレット型，外径： 1.27cm，感度：約-26dB/Pa 直径：12cm，材質：ウレタンフォーム，風 雑音低減効果：26dB(A)・15dB(F) NA-42，XH-5G，JIS C1505に準拠， 周波数重み特性：A・C・FLAT，時 間重み特性：FAST・SLOW，周波 数範囲：100・200・300Hz	リオン

コロナケージでの注水課電試験では、注水が風の影響を受けるため、風速 2m/s 以下の条件下で試験を実施している。また、コロナケージでは注水量が 30mm/hour と一定のため、強雨の条件しか模擬できない。実際の交流架空送電線で発生するコロナ騒音の苦情は暗騒音レベル（雨音）の低い軽雨時に多く、軽雨時を模擬するため、コロナケージでは注水停止後 60 秒，90 秒，120 秒の測定値の算術平均値を等価軽雨時とした。

ここでの試験条件としては、ACSR410mm<sup>2</sup>の素導体間隔 40cm の 4 導体方式の電線を対象として、酸化チタンを溶射した超親水性のスパイラル線（低騒音スパイラル線）のコロナ騒音低減効果を、スパイラル線を装着していない電線と、市販のスパイラル線を装着した 2 種類の電線と比較することで評価した。なお、電線の課電条件として、ACSR410mm<sup>2</sup>の素導体間隔 40cm の 4 導体の条件で計算により求めた最大導体表面電位の傾き ( $G_{\max}$ ) をパラメータに試験を行った。コロナケージに架線した低騒音スパイラル線を装着した 4 導体方式の試験電線の写真を図 2.51 に示す。スパイラル線の装着方式は密着 2 条巻とした[28]。



図 2.51 コロナケージ内の低騒音スパイラル線を装着した電線

## (2) コロナケージ試験結果

図 2.52 に  $G_{\max}$  が 15kV/cm のときのランダム騒音レベルを示す。注水時を 0s として、注水停止後の経過時間ごとのランダム騒音レベルを示している。図 2.52 では注水音や水の滴り落ちる音が暗騒音として同時に測定される。図中の暗騒音レベルは  $G_{\max}$  が 0kV/cm のときの平均的な騒音レベルである。ランダム騒音レベルは注水停止後、電線やスパイラル線に付着する水滴個数の減少とともに低くなる傾向があり、低騒音スパイラル線は電線に付着する水滴個数が少なく、騒音レベルも低い。市販のスパイラル線の製品 A と親水性が高い市販のスパイラル線の製品 B はスパイラル線なしの条件よりも騒音レベルは高く、スパイラル線の装着がコロナ騒音を増大させる一要因であることがわかるが、低騒音スパイラル線はスパイラル線なしの条件よりもランダム騒音レベルが低くなる。

図 2.53 の  $G_{\max}$  が 15kV/cm のときのコロナハム音レベルでは、その差が顕著であり、低騒音スパイラル線のコロナハム音レベルが最も低くなることが明らかである。スパイラル

線は電線に降り注ぐ水を溜め込む性質があるため、注水停止後もスパイラル線表面の水滴は長時間存在し、コロナ放電ならびにコロナ騒音の発生源となる。しかし、超親水性の低騒音スパイラル線は表面の水滴を移動させる能力が高く、水滴を素早く落下させるため、注水停止後のコロナ騒音低減効果が高いと考えられる。

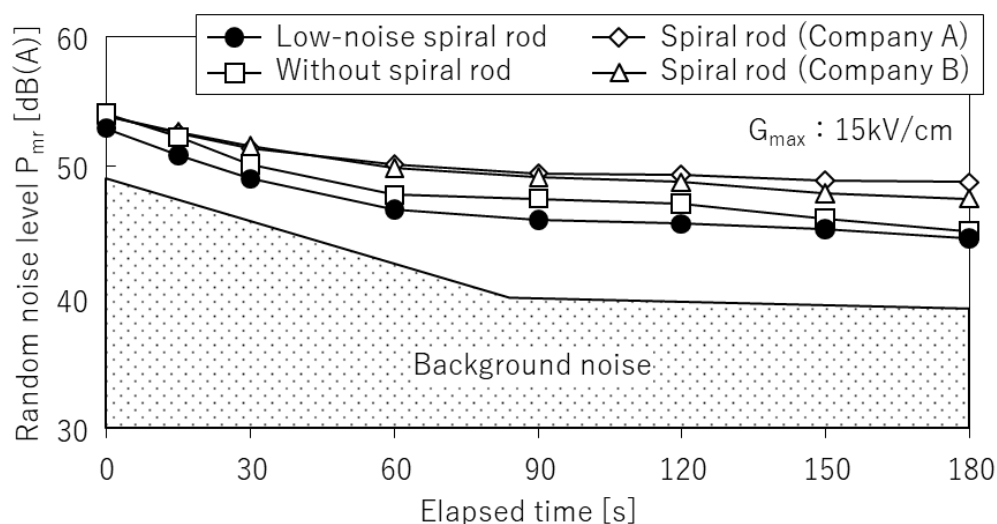


図 2.52 ランダム騒音レベルの測定結果

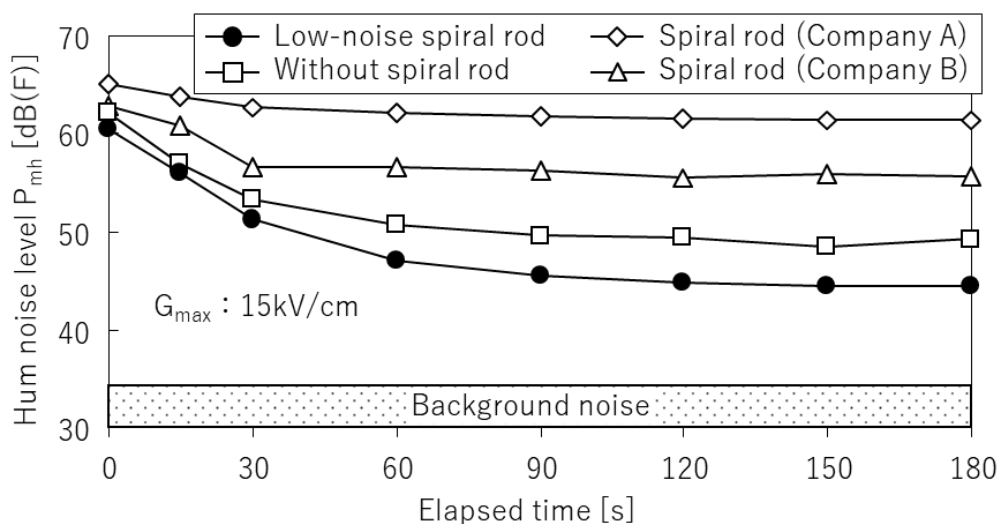


図 2.53 コロナハム音レベルの測定結果

図 2.54 に注水時のランダム騒音発生量を示す。 $G_{\max}$  が  $13\text{kV/cm}$  以上では顕著な差は見られないが、 $G_{\max}$  が  $12\text{kV/cm}$  のときに低騒音スパイラル線のランダム騒音発生量は、製品 A と製品 B よりも  $7\text{dB}$  以上も低く、スパイラル線なしのときと同等のレベルである。図

2.55 の注水時のコロナハム音発生量では、低騒音スパイラル線のコロナハム音発生量はスパイラル線なしのときと同等のレベルで、製品 A と製品 B よりも低い傾向を示す。

次に、図 2.56 に等価軽雨時のランダム騒音発生量を示す。 $G_{\max}$  が 16kV/cm 以下の低騒音スパイラル線のランダム騒音発生量はスパイラル線なしのときと同等のレベルであり、製品 A よりも低い。製品 B と比較すると  $G_{\max}$  が 13kV/cm 以下では同等レベルであるが、低騒音スパイラル線のランダム騒音発生量の方が低い傾向を示す。 $G_{\max}$  が 17kV/cm で低騒音スパイラル線のランダム騒音発生量は急増しているが、実際の国内の交流架空送電線では  $G_{\max}$  を 15kV/cm 以下で設計されていることが多いため、実用上差し支えないと考えられる。図 2.57 の等価軽雨時のコロナハム音発生量では、 $G_{\max}$  が 14kV/cm 以下の低騒音スパイラル線とスパイラル線なしのときと、 $G_{\max}$  が 12kV/cm の製品 B、 $G_{\max}$  が 11kV/cm の製品 A のコロナハム音レベルは暗騒音よりも 10dB 以上の差がなかったため、参考値として示している。低騒音スパイラル線のコロナハム音発生量はスパイラル線なしのときよりも低く、他の 2 つのスパイラル線よりも 10dB 以上低いことが明らかである。

コロナ騒音は一般に暗騒音が低い雨の降り始めや軽雨時に認知されやすいため、これら条件を模擬した等価軽雨時の結果は重要である。特に、軽雨時のコロナハム音は不快な騒音として認知されやすい。低騒音スパイラル線は従来のスパイラル線よりもコロナ騒音レベルは低く、スパイラル線なしのときと同レベルとなる。また、低騒音スパイラル線は軽雨時のコロナハム音の低減効果が高いため、有効な風音ならびにコロナ騒音低減手法であると考えられる。

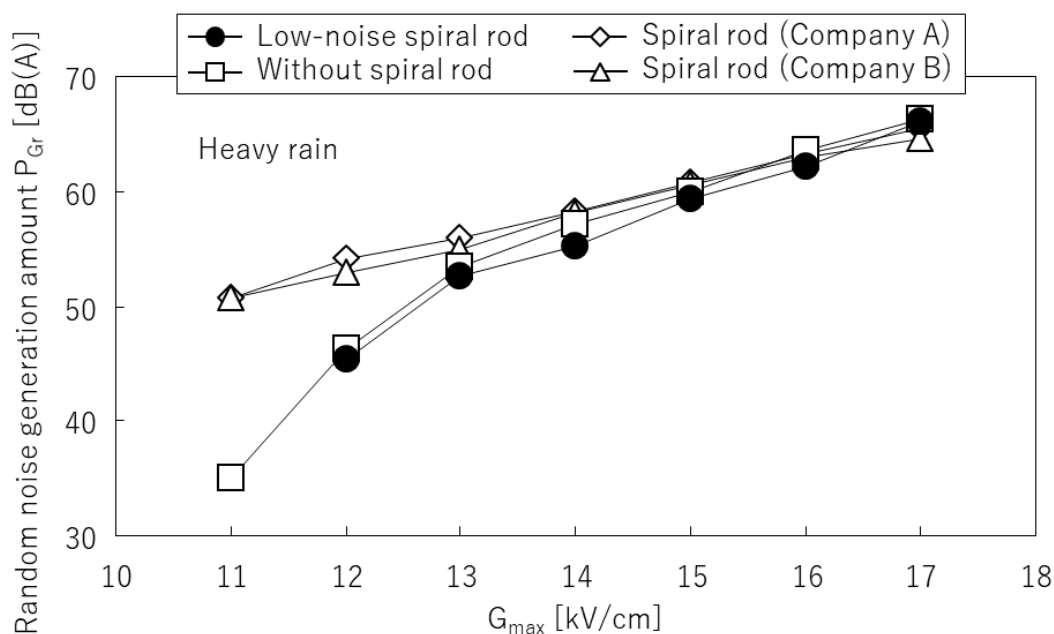


図 2.54 注水時のランダム騒音発生量

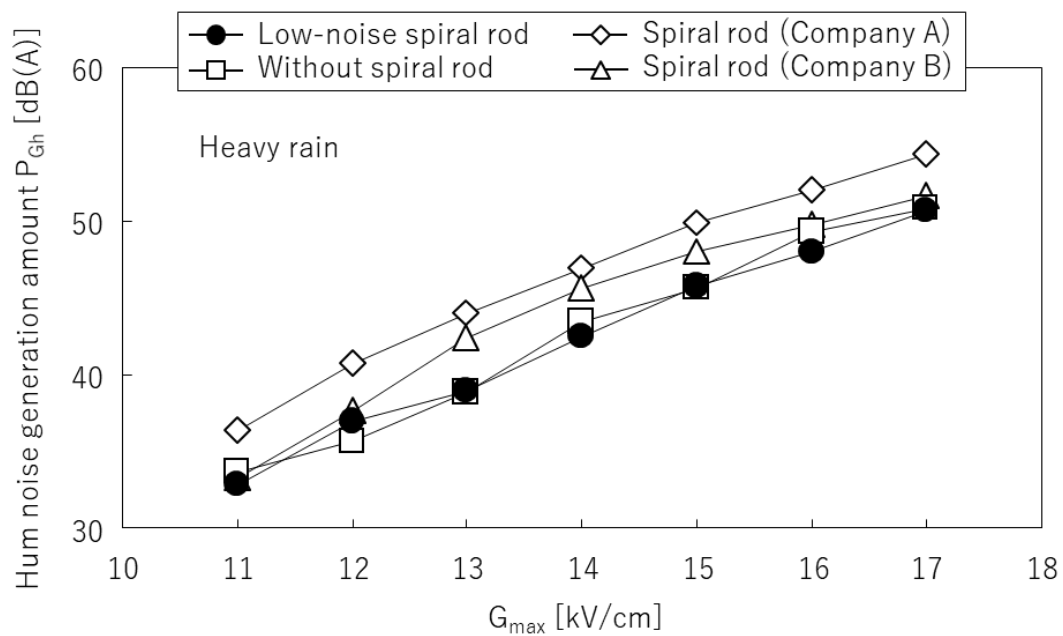


図 2.55 注水時のコロナハム音発生量

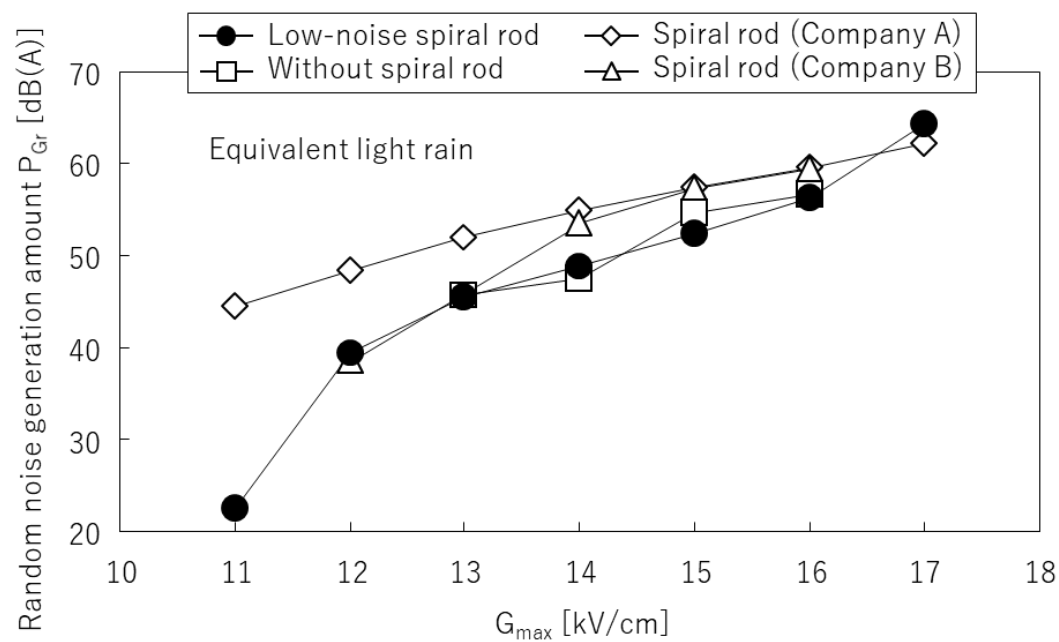


図 2.56 等価軽雨時のランダム騒音発生量



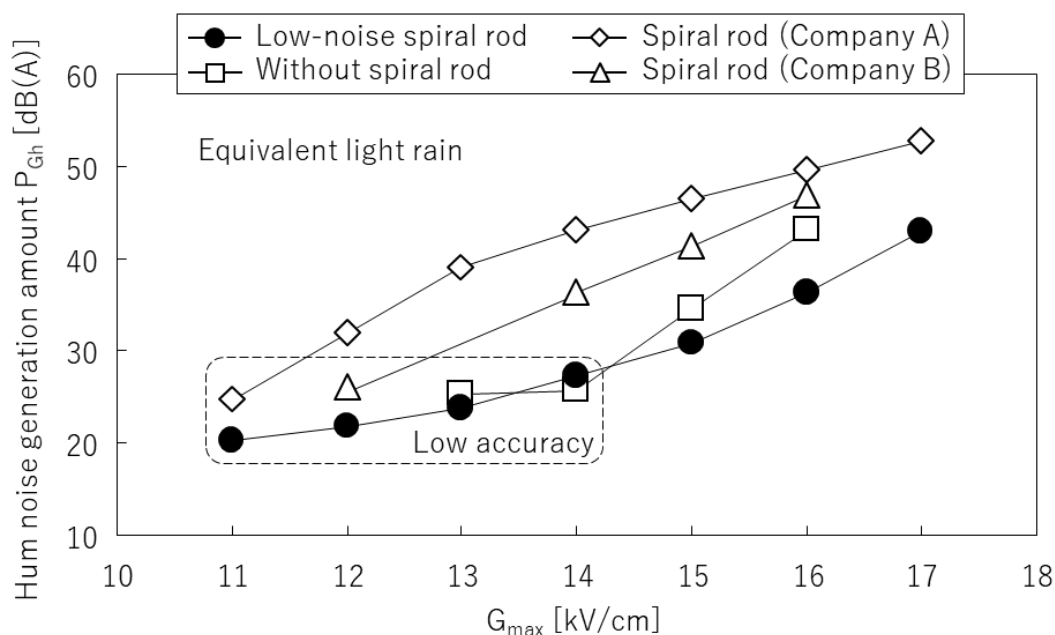


図 2.57 等価軽雨時のコロナハム音発生量

図 2.58 に注水停止後 60 秒～120 秒の間をバルブ撮影した写真を示す。図中の電線下面の紫色がコロナ放電であり、コロナ放電の発光が強いほどコロナ放電は鮮明に撮影される。また、同じ箇所で発生するコロナ放電の発生回数が多いほどコロナ放電は鮮明に撮影される。 $G_{\max}$  が 15kV/cm のときの製品 A のスパイラル線表面には注水停止後も多くの水滴が付着しており、特に 4 導体の下線にはコロナ放電が鮮明に撮影されている。水滴は電線表面を流れ、電線やスパイラル線の下面に集まりやすいが、下線下面の表面電界は上線下面よりも高くなるため、下線下面でコロナ放電は発生しやすくなる。図 2.59 の低騒音スパイラル線の下線下面にもわずかにコロナ放電が確認できるが、図 2.58 の製品 A よりも少ないことが明らかである。

図 2.60 に  $G_{\max}$  が 17kV/cm のときの低騒音スパイラル線のコロナ放電の写真を示す。 $G_{\max}$  が 15kV/cm のときよりも電線表面の電界が高く、コロナ放電の発光が強くなるため、コロナ放電はより鮮明に撮影されている。一般に多導体方式の送電線にスパイラル線を装着するとき、風加重が一定方向に作用しないように、隣り合う導体に対しては逆方向巻きのスパイラル線を装着する。電線は細線を撚り合わせた構造であるが、電線に降り注ぐ水は電線表面の撚りに従い流れる傾向がある。このとき電線の撚り方向とスパイラル線の巻き方向が異なり、電線表面の細線とスパイラル線が交差する構造であれば、電線表面の水流はスパイラル線にせき止められて、スパイラル線の撚りに誘導される状態で集められると考えられる。スパイラル線の親水性が高いとき、この効果は促進される。図 2.60 の下線奥側の電線は水滴がスパイラル線に集められて、電線の下面に位置するスパイラル線から落下する。一方、電線の撚りとスパイラル線の巻き方向が同じである下線手前側は電線下面とスパイラ

ル線から多くのコロナ放電が発生していることがわかる。風加重に関する考慮も必要であるが、多導体方式の送電線の場合、下線は電線の表面電界が高くなる方向に水滴が付着するため、下線のスパイラル線は電線の撚りと逆方向のスパイラル線を巻き付けることがコロナ騒音低減対策の一つであると考えられる。

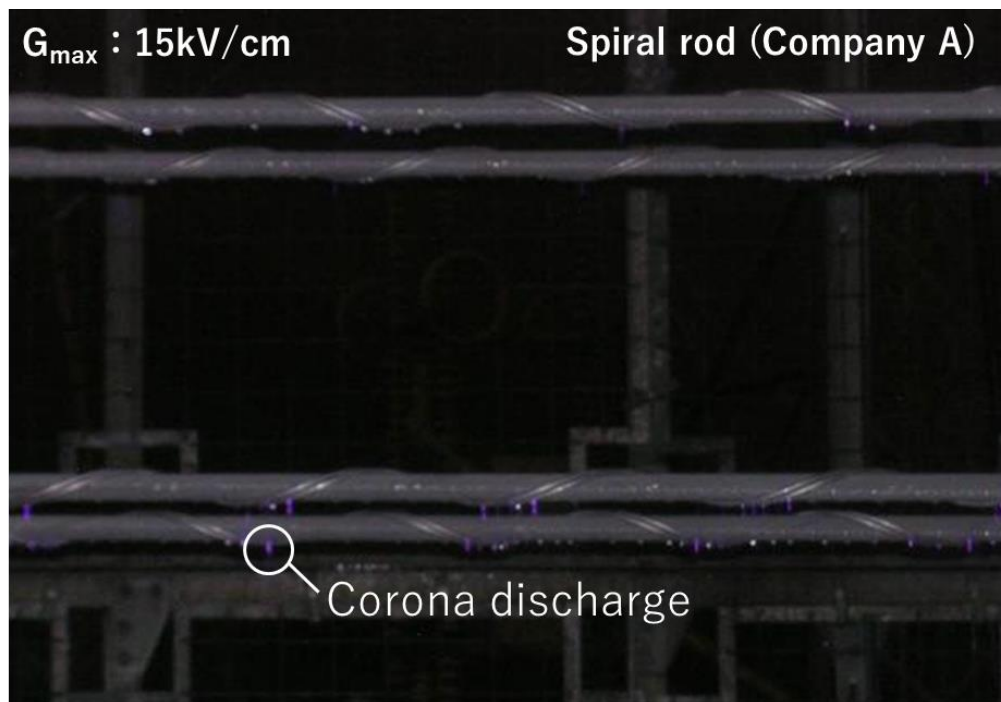


図 2.58 コロナ放電写真（製品 A,  $G_{\max}$  : 15kV/cm）

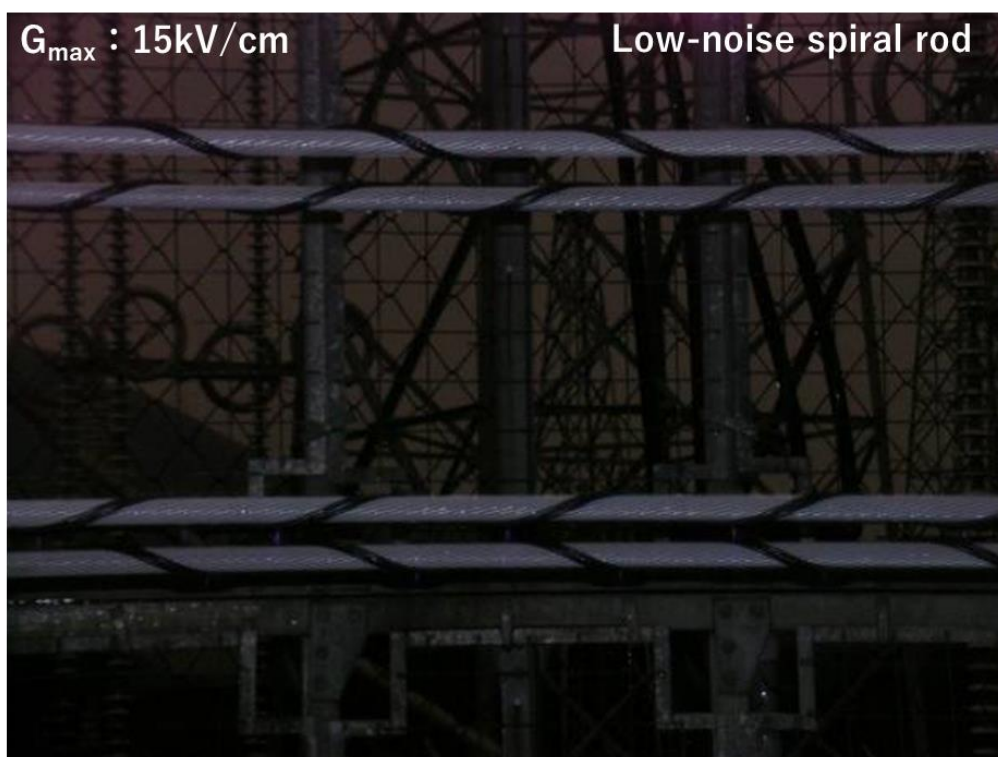


図 2.59 コロナ放電写真（低騒音スパイラル線,  $G_{\max} : 15\text{kV/cm}$ ）

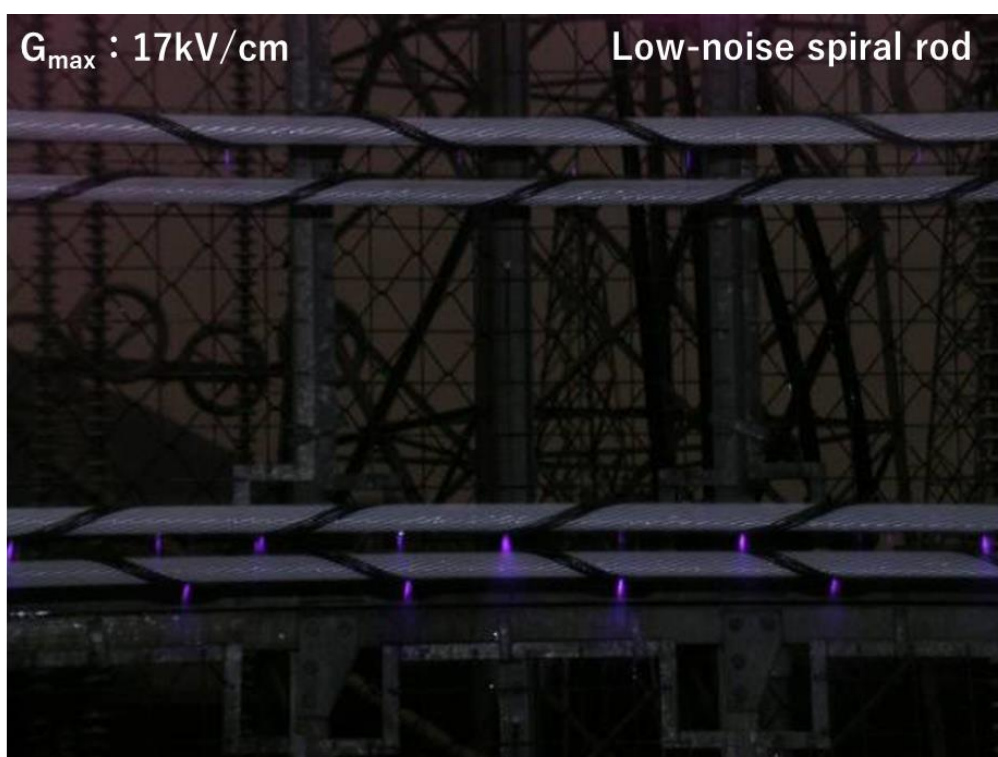


図 2.60 コロナ放電写真（低騒音スパイラル線,  $G_{\max} : 17\text{kV/cm}$ ）

### 3. 配電線と引込線の電磁環境

配電線は「発電所，変電所もしくは送電線路と需要家の間，または需要設備相互間の電線路およびこれに付属する開閉所その他の電気工作物」と定義されており，普通は配電用変電所から需要家引込口にいたるまでの部分が配電線として取り扱われている。配電線は送電線と比較して網状の面的構成をなしており，個々の設備単位の規模は小さいがその個数は膨大であり，またその施設場所も生活環境に密着していることが特徴である。配電線から先の引込線は架空電線路の支持物から需要家の取付点にいたる電線であり，電力会社の設備となる[9]。

配電線は表 3.1 に示す電圧の種別により 3 種に区別されており，国内の標準電圧として低圧では表 3.2 の公称電圧，高圧および特別高圧では表 3.3 の公称電圧と最高電圧が定められている。一般供給地域では，図 3.1 に示す高圧 6.6kV が多く採用されているが，都市中心部の高負荷密度地域における各種ビル，集合住宅などでは特別高圧 22kV または 33kV が導入されている。また，国内の低圧配電線の電圧には 100V または 200V が主として採用されているが，100V の低圧配電線は世界的にも最も低く，世界でも日本の他，わずかな国で採用されているにすぎない。1999 年より，EU やその近隣諸国では 230・400V に統一されている[9]。

表 3.1 配電電圧の種別

低圧	直流750V以下，交流600V以下のもの
高圧	低圧の限度を超え，7kV以下のもの
特別高圧	7kVを超えるもの

表 3.2 配電系統（低圧）の標準電圧

公称電圧 [V]
100
200
100/200
415
240/415

表 3.3 配電系統（高圧および特別高圧）の標準電圧

公称電圧 [kV]	最高電圧 [kV]
3.3	3.45
6.6	6.9
11	11.5
22	23
33	34.5

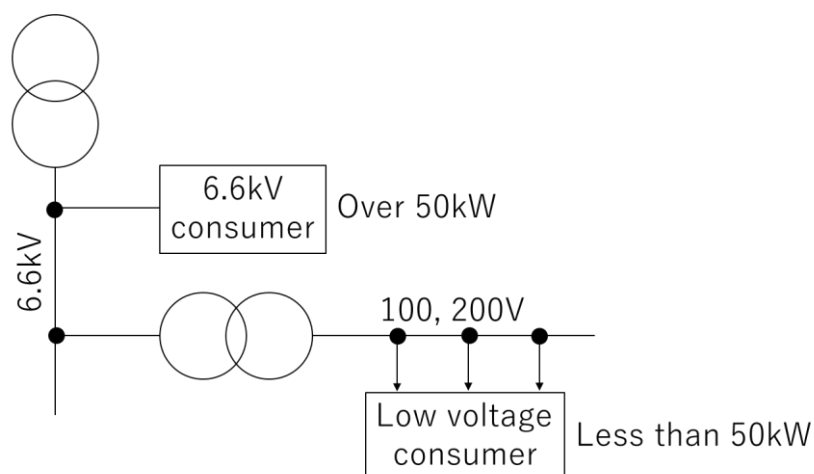


図 3.1 6.6kV 高圧配電方式

配電線は設備数が多く、我々の生活環境に密接していることと、適用される電圧階級が低いため、送電線と比較すると設備は小型で、絶縁強度が低い。このため、台風や落雷その他の自然現象により被害を受けることも多く、その被害による影響が近隣の住民に認識されることも多い[29-31]。

本章では、配電線の設備で数多く使用されている“がいし”について、その金具の接触不良個所で発生する火花放電について、発生メカニズムや特徴を示し、稀頻度で発生する火花放電を定量化する手法を説明する。また、火花放電がデジタル地上波テレビ放送に及ぼす影響を示す。また本章では、雷放電が主要因と考えられる家電製品の故障が頻発する一般需要家にについて、配電線と引込線に接続される 100V の屋内電源の現地測定調査を行ったため、屋内電源に発生する雷過電圧の特徴と、雷放電との関係を示し、雷過電圧の発生メカニズムを明らかにする。

### 3. 1 火花放電

火花放電は電極間の電圧がある限界を超えると、火花を伴った放電が生じる現象であり、不連続な放電である。火花放電が持続すると、グロー放電やアーク放電に移行するが、一般的には短時間に消滅する[7-9][32, 33]。

電力設備では絶縁用に“がいし”を用い、高電圧の絶縁ほど、多数のがいしを連結することがある。図 3.2 の 2 個連耐張がいしの写真と図 3.3 の構造図のように、がいしの連結部は金具が接触し、組み合わせた状態であり、金具同士を積極的に同電位になるように接続することは少なく、がいしや電線類の自重や電線の張力で電氣的にも接続されることになる。設備が小型で軽量の配電線や、電線の配線が複雑で電線張力も低い変電所等では、がいしの金具の連結がルーズになりやすく、強風にさらされたときなどにがいし金具の連結部に隙間（ギャップ）が生じて、そこで火花放電が発生することがある。金具の錆びや連結部に異物が詰まった場合も火花放電が発生することがあるが、国内の電力設備で火花放電が発生することは極めて稀である[34-36]。



図 3.2 2 個連耐張がいし

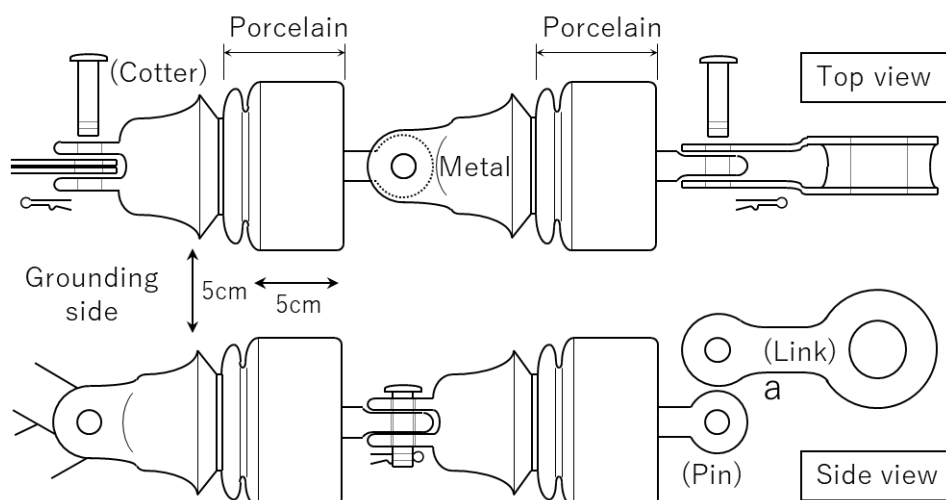


図 3.3 2 個連耐張がいしの構造図

### 3. 1. 1 配電線のがいしから発生する火花放電の特徴

配電線の不具合による障害事例として、アナログテレビの受信障害が発生することがあった[7]。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火花放電が、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た。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、配電線の耐張がいしに多いことが確認されている。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。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が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。

#### (1) 不良がいしで発生する火花放電

実際の6.6kV配電線で使用され、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、不良がいしに高電圧を課電する実験を実施した。不良がいしの課電実験は、図3.4に示すようにがいしの課電端に対地電圧3.8kV(6.6kV配電線の対地電圧、 $3.8\text{kV}=6.6\text{kV}/\sqrt{3}$ )を課電し、電線に流れる電流や放射電磁界を測定した。電流測定は電流センサ(ピアソン: Model2877, 周波数帯域300~200MHz)とデジタルオシロスコープ(レクロイ製: WR104Xi, 周波数帯域1GHz)を用い、電磁界測定にはアンテナ(対数周期アンテナ, ETS LINDGREN: Model3147)を設置し、スペクトラムアナライザ(アドバンテスト: R3147)を用いた。3.8kV課電後、不良がいしから“チリチリチリ”もしくは“シーシー”というような火花放電の発声音を確認することができた。

図3.5と図3.6に火花放電の電流測定結果を示す。火花放電は電源周波数1サイクルに数回発生する様子であり、波高値にして3~4Aの急峻なインパルス状の電流が間欠的に流れることがわかった。次に、図3.7に放射電磁界の測定結果を示す。火花放電の放射電磁界は、400MHz帯で90dB $\mu$ V/mに達し、2.6GHzまでの周波数成分を含むことがわかる。ただし、火花放電の発生頻度は低く、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ためには、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個連耐張がいしで発生する火花放電は、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状態によって、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。



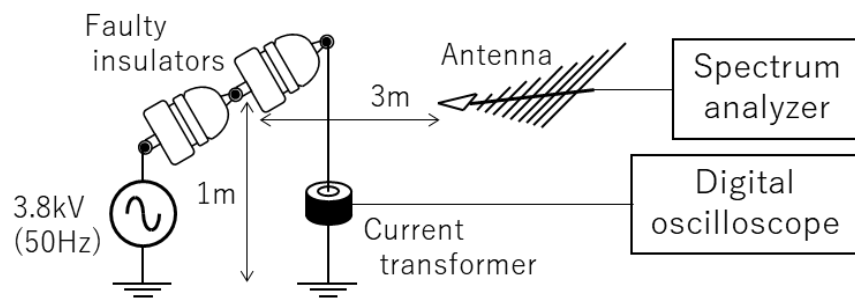


図 3.4 不良がいしの火花放電実験装置

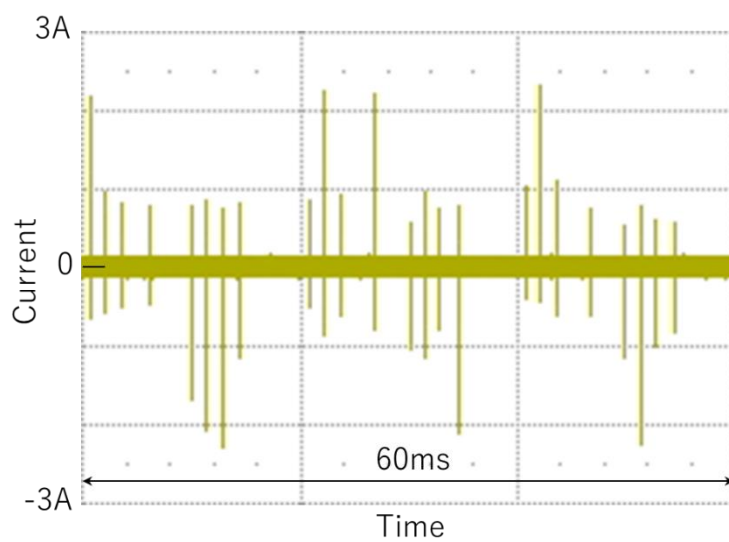


図 3.5 火花放電の電流波形

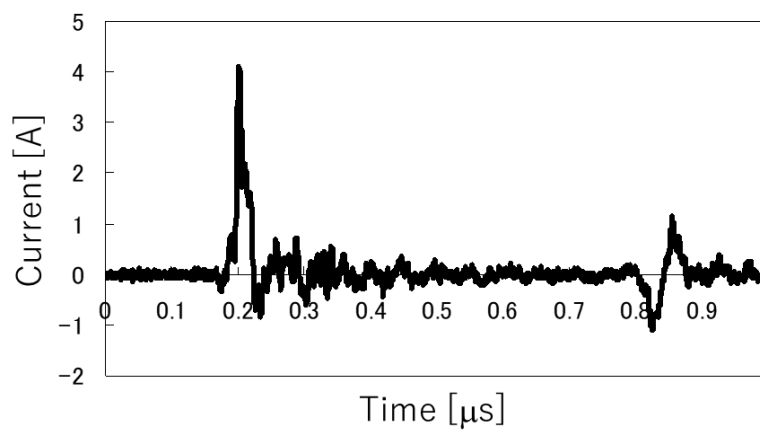


図 3.6 火花放電の電流波形（拡大図）



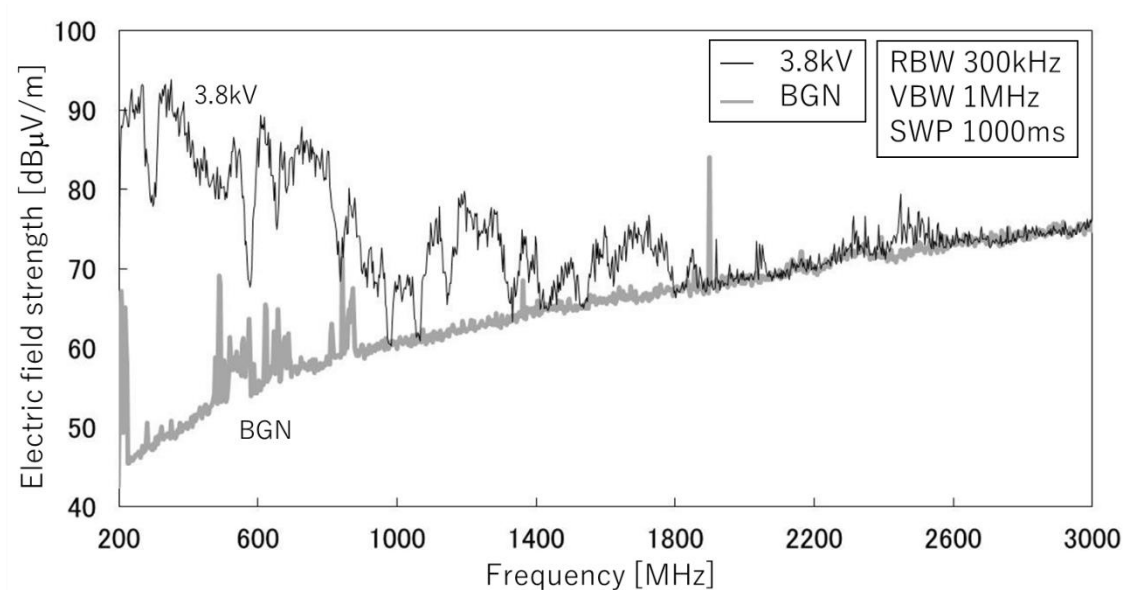


図 3.7 火花放電の放射電磁界

## (2) がいし金具接触不良個所で生じる火花放電の発生メカニズム

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。

このように、実際に使用されていた不良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ため、金具の腐食を人工的に再現し、火花放電の特徴解明には有効であると考えられる。そこで、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、図 3.3 で示したがいしのピンやコッタ、金具に酸化亜鉛と砥粉（主な成分： $\text{SiO}_2$ ）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 3.8 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 3.8 の写真では白っぽい茶色）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。

次に、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、絶縁薄膜を形成した金具連結部のインピーダンスを測定した結果、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。連結部間のインピーダンス測定を複数回実施したとき、おおよそ  $20\text{p}\sim 35\text{pF}$  の間でばらつき、その平均値は  $25\text{pF}$  程度であった。薄膜形成を行わずに、金具の連結を、その可動範囲内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  $20\text{p}\sim 30\text{pF}$  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  $25\text{pF}$  程度と考えられる。また、耐張がいし 1 個のインピーダンスを測定した結果、 $30\text{pF}$  の容量成分と  $50\text{M}\Omega$  の抵抗成分の並列接続回路で模擬できることを明らかにした。

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 3.9 に示すように模擬できる。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  $C_{\text{gap}}$  が  $25\text{pF}$  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  $30\text{pF}$  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。

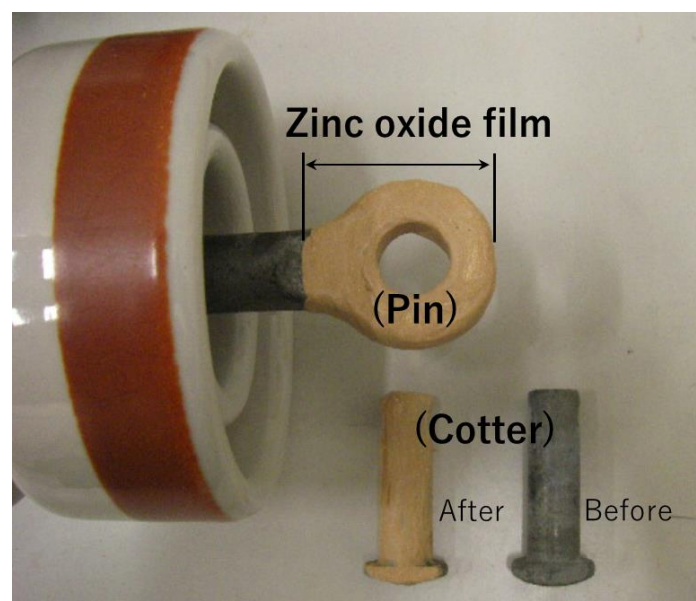


図 3.8 絶縁薄膜を人工的に形成したがいし金具

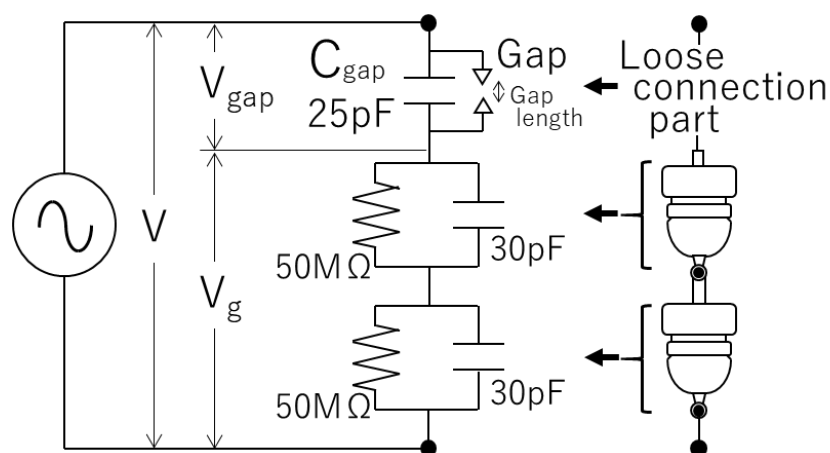


図 3.9 接触不良がある 2 個連耐張がいしの等価回路

本項では間欠的に生じる火花放電の発生メカニズムを、実験と等価回路を用いた数値計算により明らかにする。実験では図 3.9 に示した接触不良がある 2 個連耐張がいしの等価回路を用い、火花放電が発生するギャップを作製する。実験と数値計算の比較は、図 3.9 に示したギャップ間電圧  $V_{\text{gap}}$  とがいし間電圧  $V_g$  で行う。

作製した放電ギャップモデルの概略を図 3.10 に示す。接触不良箇所は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。ここでは放電ギャップの静電容量は 25pF とし、ギャップ間隔は 0.2mm と 0.08mm に設定できるようにした。

はじめに、実験で接触不良箇所を図 3.10 の放電ギャップを用い、2 個連耐張がいしに直列接続して、これらに対地電圧 3.8kV を課電したときの、図 3.9 に示すギャップ間電圧  $V_{\text{gap}}$  とがいし間電圧  $V_g$  の測定結果を図 3.11 と図 3.12 に示す。図 3.11 はギャップ間隔が 0.2mm、図 3.12 は 0.08mm の場合である。電圧測定には高電圧プローブ（PMK：PHV4002-3）とオシロスコープ（日本テクトロニクス：DPO7104）を用いた。

図 3.11 の静電容量が 25pF、ギャップ間隔が 0.2mm の場合、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  $V_{\text{gap}}$  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、 $V_{\text{gap}}$  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、 $V_{\text{gap}}$  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 3.12 は接触不良箇所の静電容量が 25pF、ギャップ間隔が 0.08mm の場合であり、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。接触不良箇所が発生する火花放電は、ギャッ

プ間隔が狭いときに数多く発生することがわかる。また、火花放電の発生電圧はギャップ間隔により異なる。

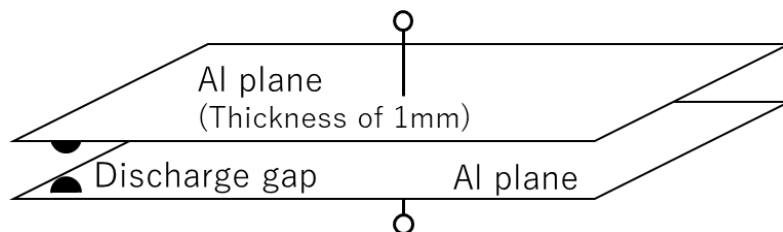


図 3.10 接触不良個所のモデル化

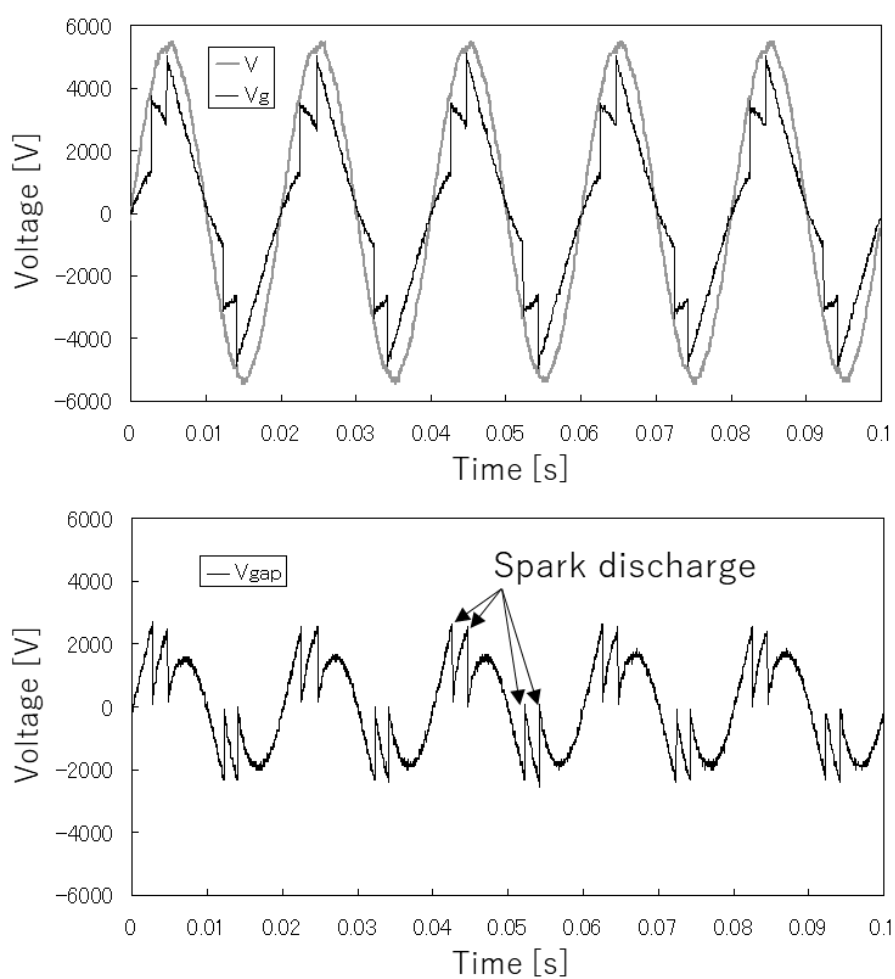


図 3.11 電圧測定結果（ギャップ間隔：0.2mm）

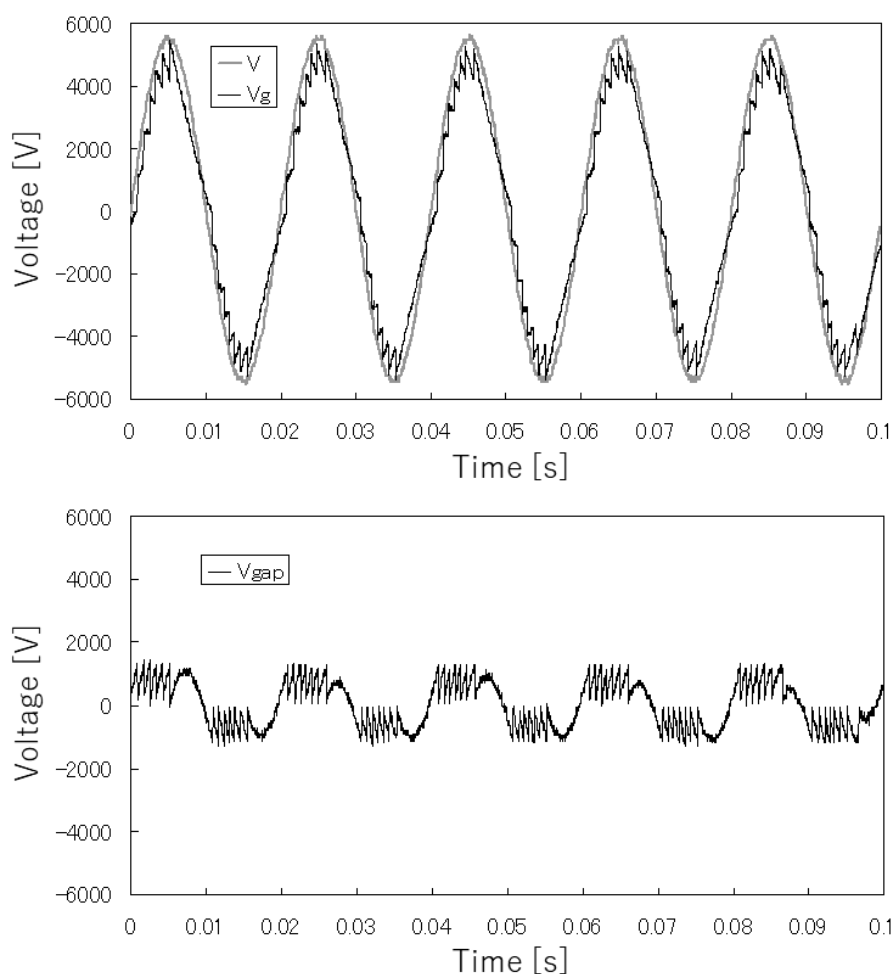


図 3.12 電圧測定結果（ギャップ間隔：0.08mm）

次に、数値計算で金具に接触不良がある 2 個連耐張がいしに対地電圧 3.8kV を課電したときの、図 3.9 に示すギャップ間電圧  $V_{gap}$  とがいし間電圧  $V_g$  の計算結果を図 3.13 と図 3.14 に示す。数値計算では電力系統瞬時解析プログラム（XTAP：eXpandable Transient Analysis Program）を用いた[37]。また、計算条件として、放電ギャップのモデル化については、ギャップ間電圧  $V_{gap}$  が火花放電開始電圧未満のときは開放状態、ギャップ間電圧  $V_{gap}$  が火花放電開始電圧に達すると、短絡状態と切り替わるようにした。ギャップ間の火花放電開始電圧は、事前の実験で図 3.15 の火花放電開始電圧の特性を得ており、この特性も計算条件として用いた。

図 3.13 は放電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。図 3.13 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 3.11 の実測結果とよく一致している。図 3.14 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 3.12 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。

がいし連結金具の接触不良個所で発生する火花放電は接触不良個所とがいしの容量成分比で分担した電圧のうち、接触不良個所間の電圧がそのギャップ間隔で決まる火花放電開始電圧に達するときに発生し、これを繰り返すことが実験と数値計算により明らかとなった。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抑制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、接触不良箇所で生じる火花放電の発生回数を少なくすることができると考えられる。

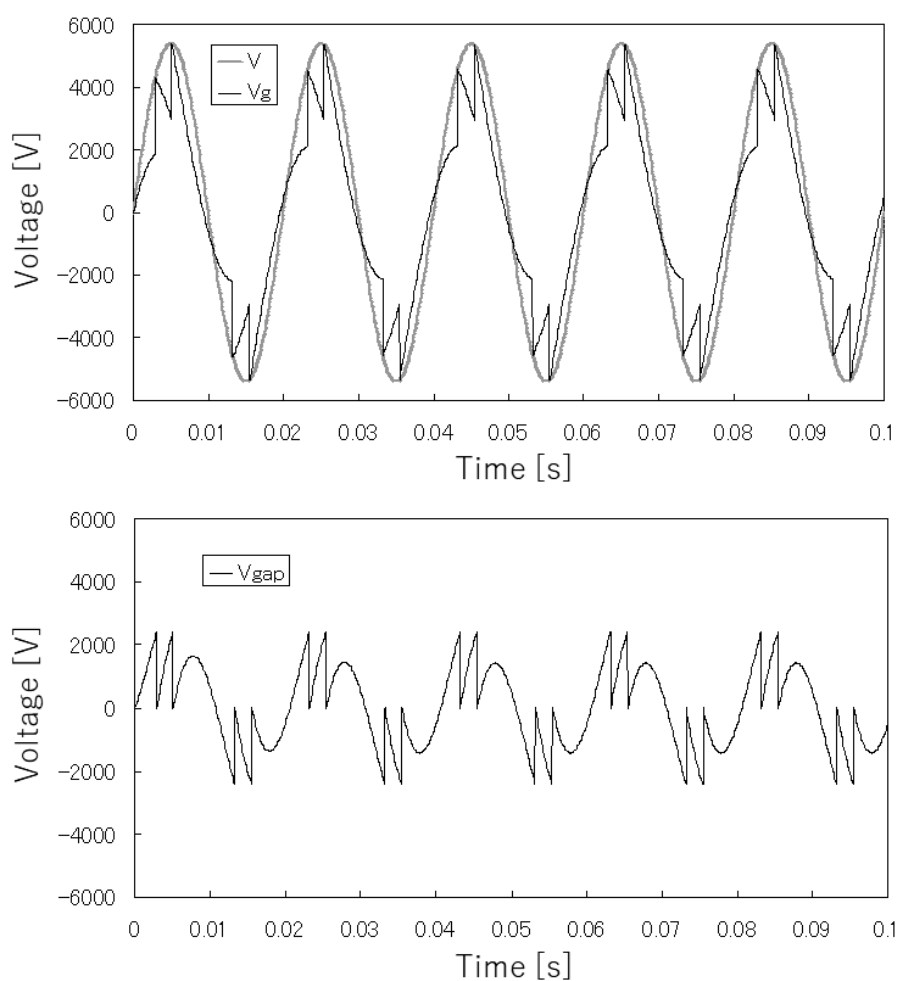


図 3.13 電圧計算結果（ギャップ間隔：0.2mm）

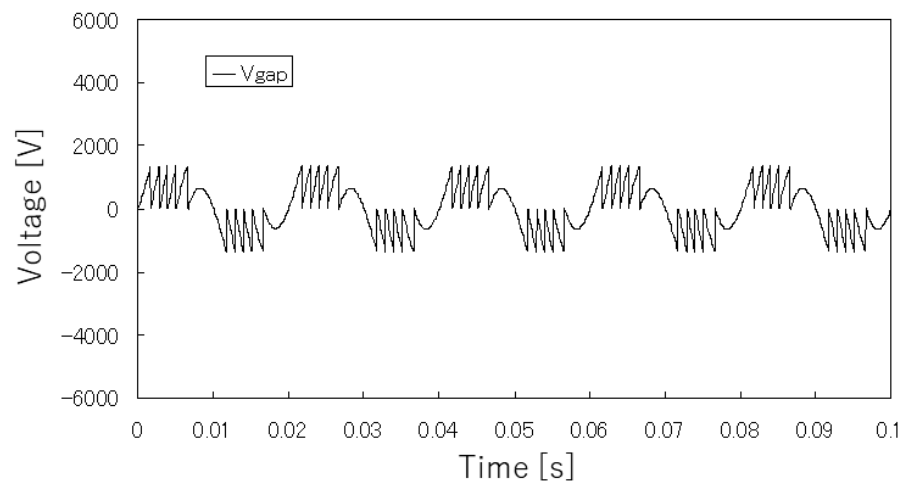
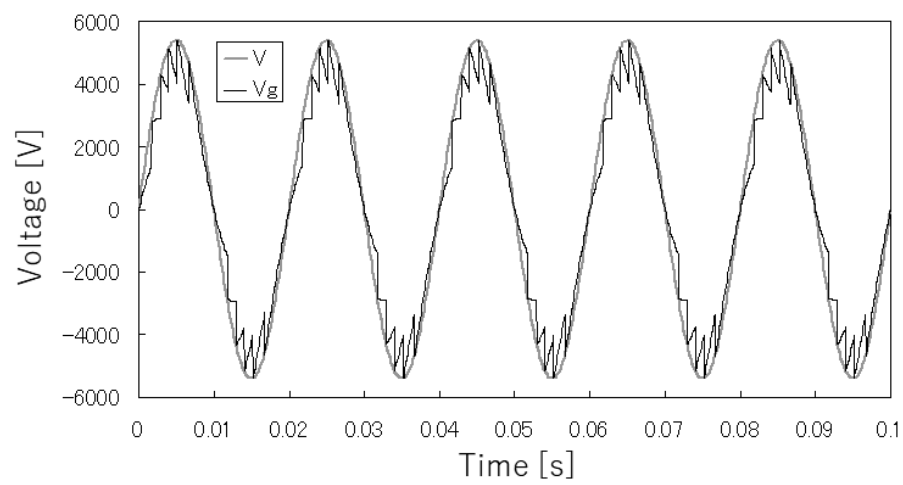


図 3.14 電圧計算結果（ギャップ間隔：0.08mm）

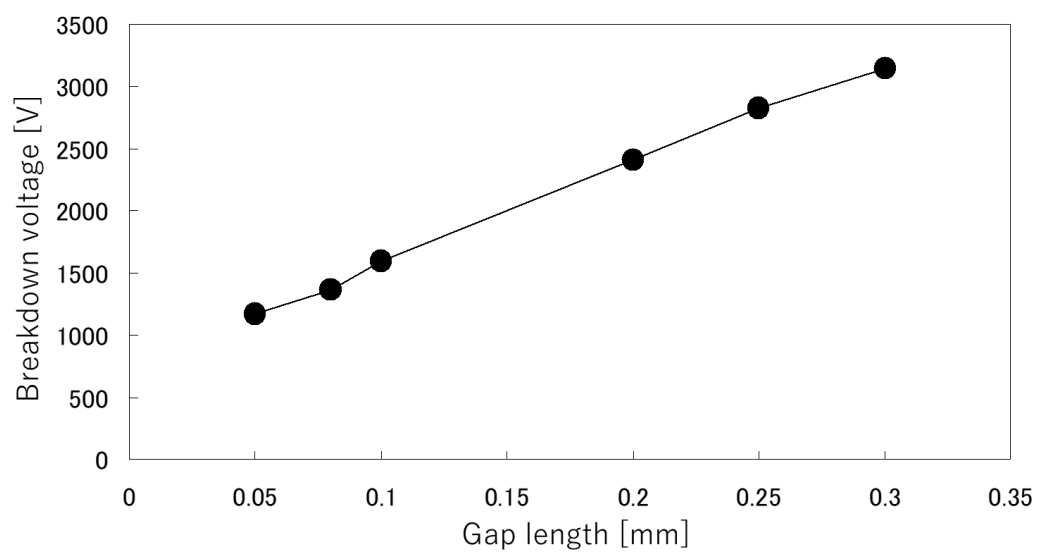


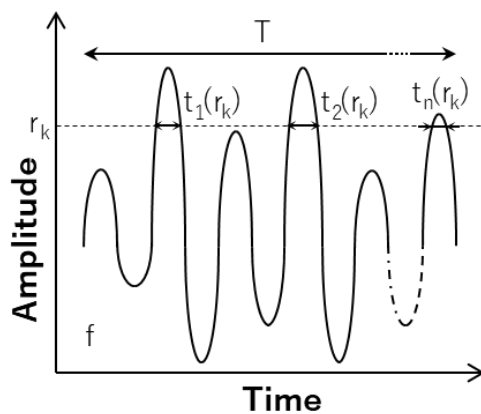
図 3.15 放電開始電圧のギャップ間隔特性

### (3) 火花放電の放射電磁界の定量化

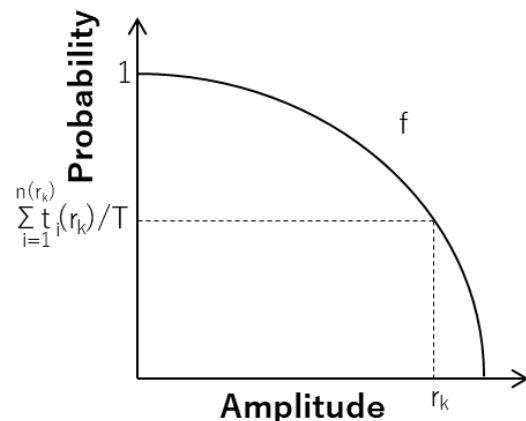
放射電磁界の測定には、アンテナとスペクトラムアナライザを用いた電界測定がある。このとき、検波の種類には、平均値検波とせん頭値検波、準せん頭値検波などがある。平均値検波は連続して発生する放射電磁界の測定に適しており、せん頭値検波は測定時間を調整することで、間欠的に発生する放射電磁界のレベルを測定することができる。準せん頭値検波は AM ラジオ放送の聴取者の耳の特性を表現しており、放射電磁界のレベルや発生頻度が高いほど大きな値となる[8]。準せん頭値は、平均値とせん頭値の中間的な値となる。図 3.7 の火花放電の放射電磁界は、せん頭値検波の最大値保持で測定したが、稀頻度で発生する火花放電の発生頻度を評価することはできなかった。近年、GHz 帯を超える雑音やデジタル信号、低頻度で発生する電磁界について、振幅確率分布 (APD: Amplitude Probability Distribution) による評価が確立された。例えば、デジタル通信の周波数帯域における雑音波形の 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[38-43]。

図 3.16 に APD の概念を示す。放射電磁界の周波数  $f$  成分について振幅測定を行った場合、図 3.16(a) に示される時間波形について、計測時間  $T$  内においてその振幅の時間変化がある閾値  $r_k$  を超える時間率は、(3.1) 式で表わされる。閾値  $r_k$  を変数とすると、APD( $r_k$ ) は図 3.16(b) のような単調減少曲線として得られる。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。ここで、 $t(r_k)$  は閾値  $r_k$  を超える時間である。

$$\text{APD}(r_k) = \sum_{i=1}^{n(r_k)} t_i(r_k) / T \cdots (3.1)$$



(a)時間波形



(b)APD

図 3.16 APD の概念図



ここで、2 個連耐張がいしと図 3.10 に示した放電ギャップを直列接続し、図 3.17 に示す実験用の 6.6kV 配電線の S 地点に接続したときの火花放電の放射電磁界を測定する。測定の様子を図 3.18、測定システムの設定を図 3.19 に示す。APD の測定にはアンテナ（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）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。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  $10^{-6}$  まで向上させている。

はじめに、ギャップ間隔が 0.2mm の場合の火花放電の放射電磁界の周波数特性を図 3.20 に示す。火花放電の放射電磁界の周波数範囲は約 2.6GHz までおよび、図 3.7 の実際の不良がいしの測定結果と同じような特徴があることがわかる。背景雑音（BGN）においては、500MHz 付近の周波数範囲にデジタル地上波テレビ放送の信号が認められるが、火花放電の電界強度はそれよりも 10dB 以上高いことがわかる。

次に、一例として 450MHz 成分についてのデジタルオシロスコープの測定結果を図 3.21 に示す。デジタルオシロスコープは電圧波形を示すが、図 3.21 は電界強度に換算しており、20ms の間に 4 個のパルス波形が測定されており、最大 100dB $\mu$ V/m にまで達することがわかる。

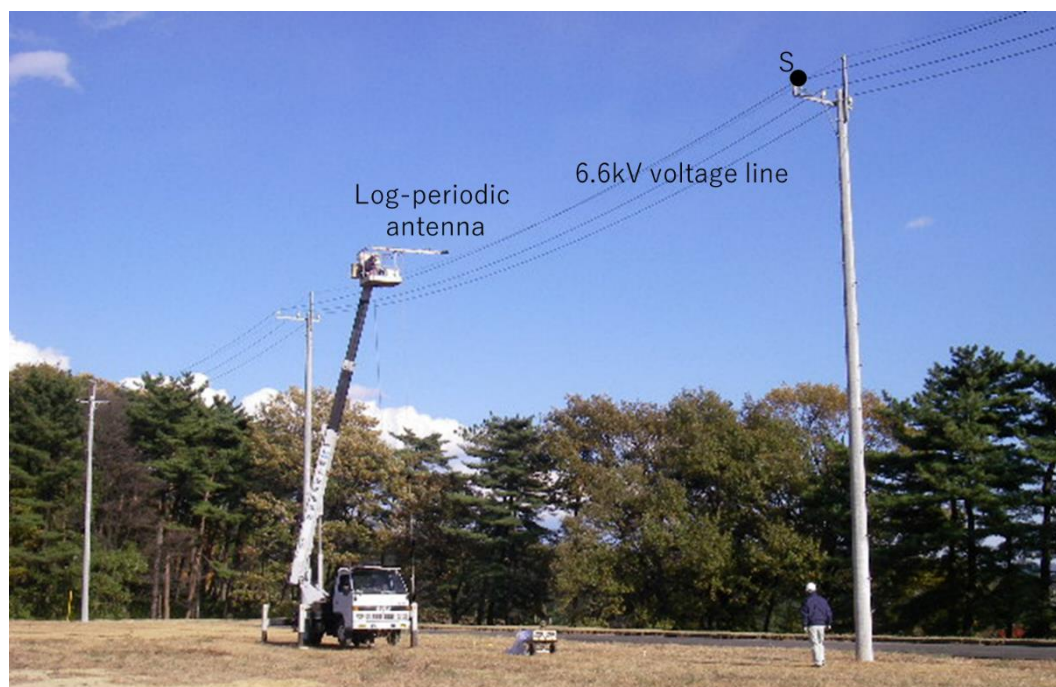


図 3.17 6.6kV 実験用配電線

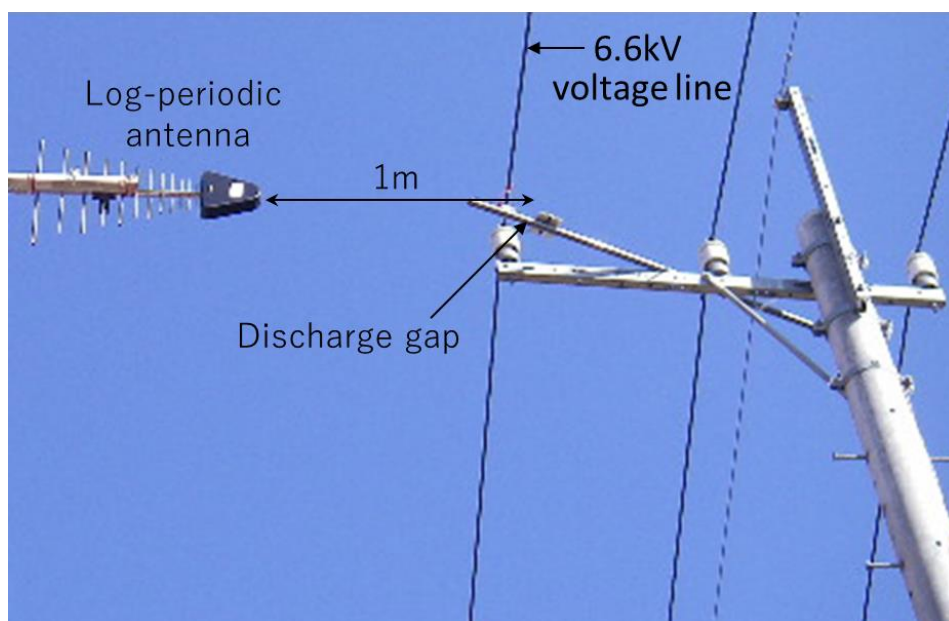


図 3.18 放射電磁界の測定風景

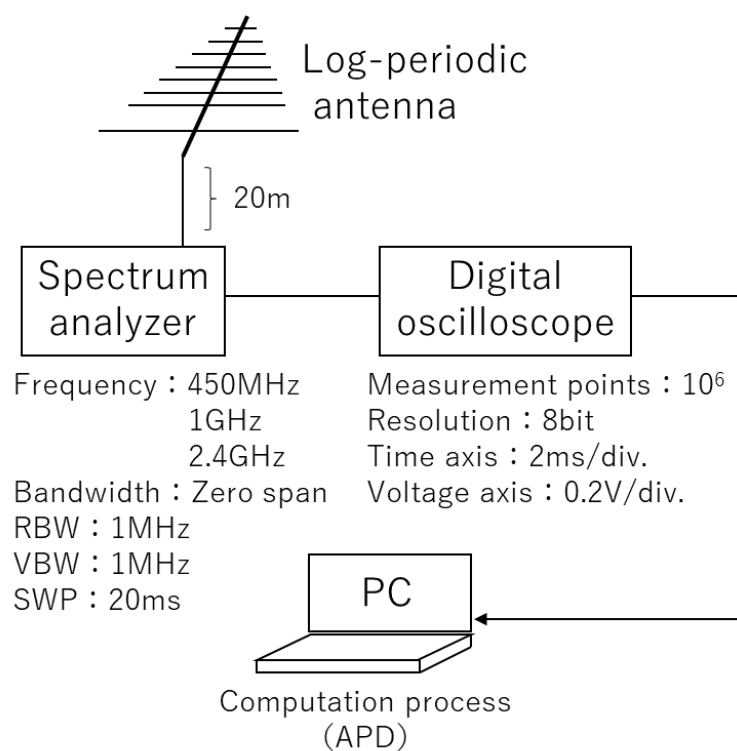


図 3.19 APD の測定システム

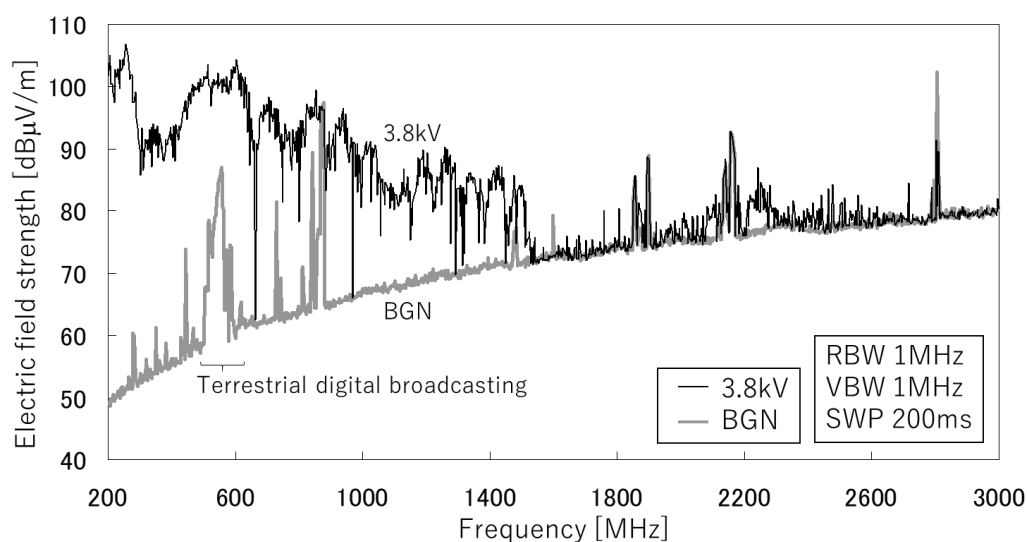


図 3.20 火花放電の放射電磁界の周波数特性

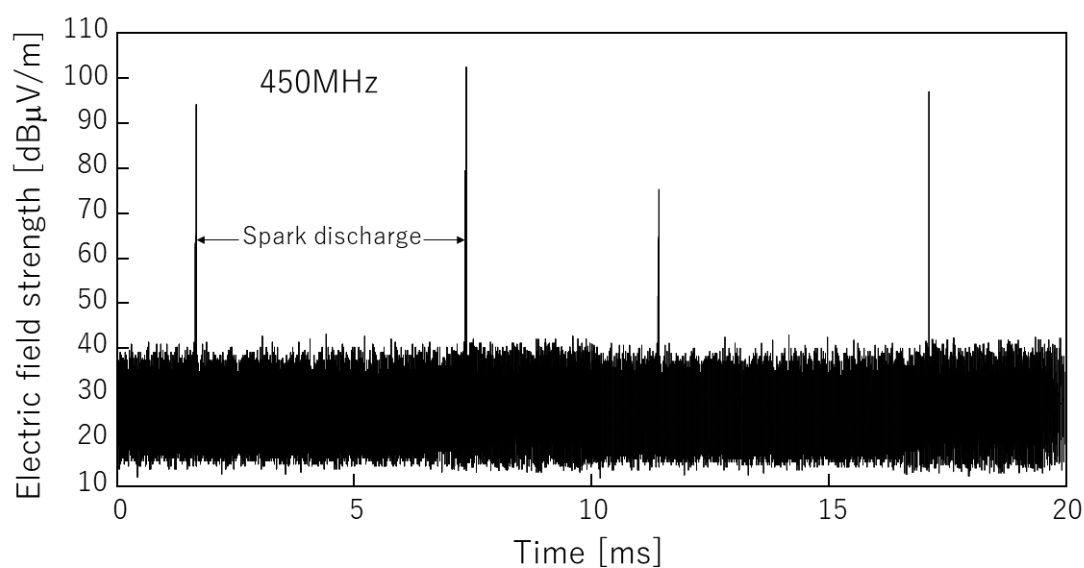


図 3.21 放射電磁界の 450MHz 成分の時間変化

最後に、図 3.21 に示したようなデジタルオシロスコープの波形をパソコンにて APD 分析した結果を示す。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 の場合については放電ギャップとアンテナの間隔を 1m, 5m, また、ギャップ間隔 0.08mm の場合については放電ギャップとアンテナの間隔を 1m とした。図 3.22 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 95dB $\mu$ V/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

90dB $\mu$ V/m を下回るが、55～70dB $\mu$ V/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96dB $\mu$ V/m 程度となり、55～90dB $\mu$ V/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 80dB $\mu$ V/m 以下の発生確率は、図 3.22 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、数値計算から求めた図 3.13 と図 3.14 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 3.23 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ことわかり、発生確率も高い。図 3.24 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 $\mu$ 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 $\mu$ s 程度となる。

このように APD を用いることにより、火花放電の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る。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。

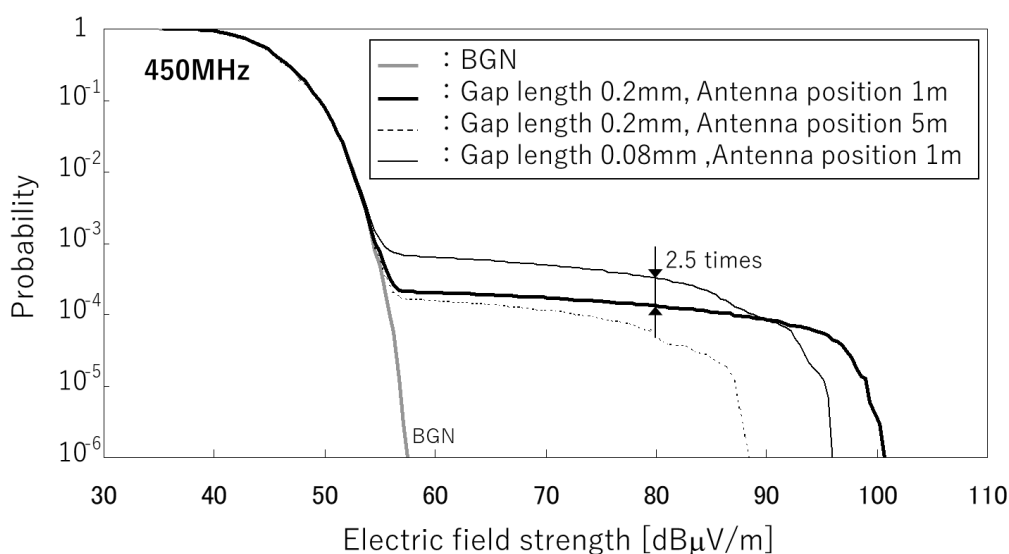


図 3.22 火花放電の放射電磁界の APD (450MHz)

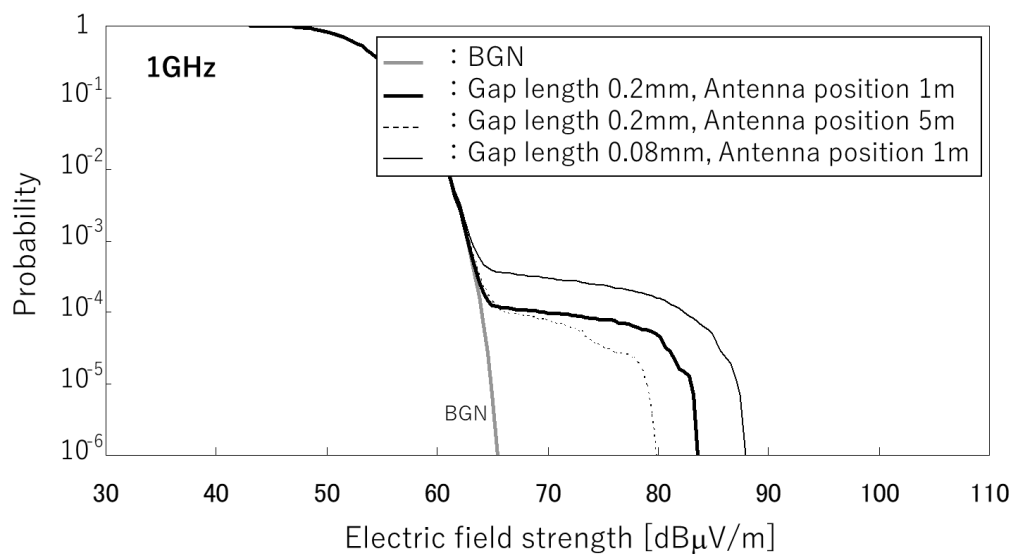


図 3.23 火花放電の放射電磁界の APD (1GHz)

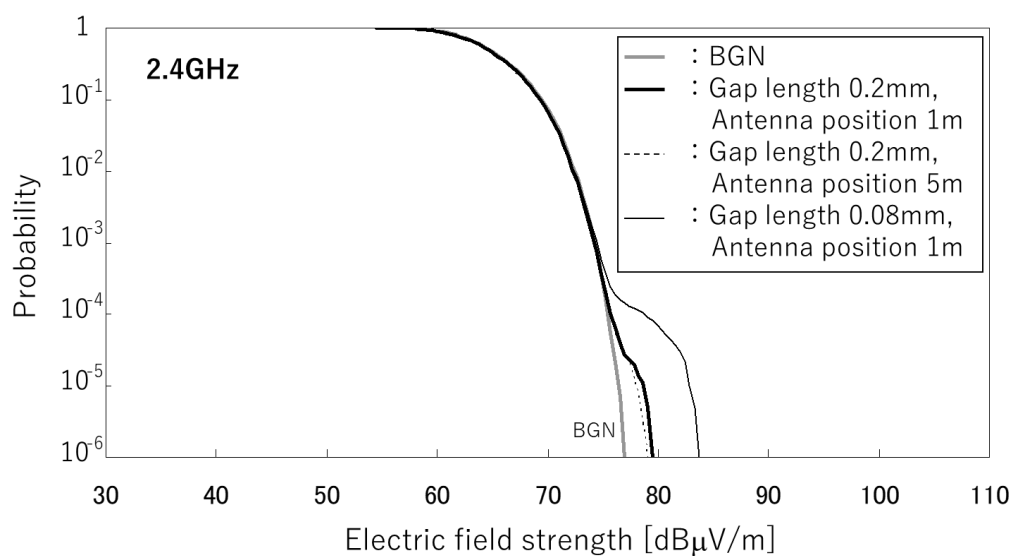


図 3.24 火花放電の放射電磁界の APD (2.4GHz)

### 3. 1. 2 火花放電の放射電磁界によるデジタル地上波テレビ放送への影響

日本のデジタル地上波テレビ放送（以下、デジタル放送）は、2003 年 12 月に開始された。2011 年 7 月には一部の地域を除いて、アナログ地上波テレビジョン放送（以下、アナログ放送）は終了し、現在はデジタル放送が本格運用されている。そして、このデジタル放送は、ISDB-T（Integrated Services Digital Broadcasting -Terrestrial）と呼ばれる方式であり、詳細な仕様については一般社団法人 電波産業会（ARIB）で標準規格として定められている[44-46]。ISDB-T 方式は 1 つのチャンネルの帯域（5.6MHz）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。ISDB-T 方式の送信機は、映像や音声、データを符号化して伝送する。送信データはまずリードソロモン符号によって符号化され、最大 3 つの階層に分割される。分割後は階層ごとに、畳み込み符号等の処理が行われる。そして、階層合成後、時間・周波数インタリーブが行われ、受信処理に必要な各種制御信号が挿入される。その後、OFDM フレームを形成して、逆フーリエ変換処理により、OFDM 信号が生成され、ガードインターバルが付加されて、UHF 帯の周波数帯の電波で送信される。受信機側では送信機側と逆の処理を行い、受信データを復号化するが、畳み込み符号の復号にはビタビ復号法を用いる。デジタル放送では、ランダム・エラー（散発的に発生する誤り）に対する訂正能力が高い畳み込み符号と、バースト・エラー（集中的に発生する誤り）の訂正能力に優れているリードソロモン符号を組み合わせた二重符号化を用いて受信性能を高め、アナログ放送よりも受信障害が少なくなるよう設計されている。

電力設備が関係した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）があった。また、配電線の設備不良箇所では放電現象が生じた場合はメダカノイズ（パルス性電波雑音）が発生していた。多くの一般視聴者においては、例えば家屋の屋根に設置した UHF アンテナにてデジタル放送を受信する。同時にこの環境には多数の配電設備が近接することが多く、配電設備で放電現象が発生した場合に、アナログ放送で生じていた受信障害がデジタル放送でも発生する可能性が考えられる。

図 3.25 にアナログ放送およびデジタル放送の信号品質と画質、視聴状態の関係を表したイメージを示す。アナログ放送では信号品質が悪いと視聴不可となるが、信号品質が良くなっていくと、画質もそれに従い良くなっていく。視聴は困難なもの、デジタル放送より低い信号レベルでアナログ放送は映像や音声を確認できることもあった。デジタル放送では受信機の性能にもよるが、ある信号品質を境に視聴が可能であるか不可であるか二つに分かれる特徴がある。また、デジタル放送は、アナログ放送よりも低い信号レベルでも視聴は可能となるよう設計されており、マルチパス（アナログ放送ではゴーストと表現されていた放送波の反射波による受信障害）の対応も十分に考慮されている。

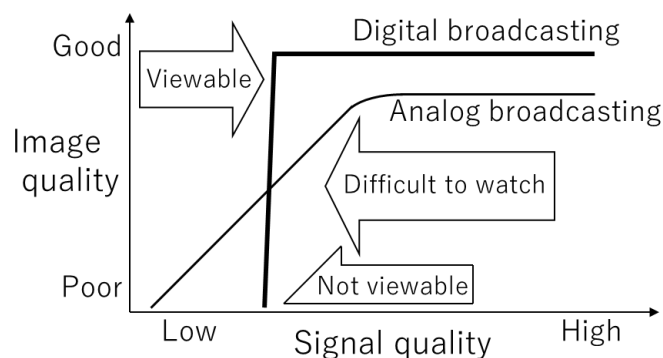


図 3.25 デジタル放送の画質

2009 年 11 月 17 日の午前に、群馬県前橋市で測定した VHF 帯の電界強度分布を図 3.26、UHF 帯の電界強度分布を図 3.27 に示す。測定場所は東京タワーから約 104km 離れているが、関東平野を一望できる高台に位置し、テレビ放送波を良好に受信できる。電界測定は入力端子のインピーダンスが  $50\Omega$  終端のスペクトラムアナライザ(アドバンテスト:R3172)と VHF 帯はアクティブダイポールアンテナ (アドバンテスト:TR17203)、UHF 帯は対数周期アンテナ (ETS LINDGREN: Model 3147) を用い、アンテナは地上 10m の位置で、その受信感度が高い方向に向けて設置した。図 3.26 ではアナログ放送の放送波が確認できる。アナログ放送は映像と音声の信号を、4.5MHz 離れた周波数を利用して送信している。スペクトラムアナライザの設定として、分解能帯域幅 (RBW) を 100kHz、ビデオ帯域幅 (VBW) を 1kHz、掃引時間 (SWP) を 3s と設定した。図 3.27 では各チャンネルについて 5.6MHz の周波数帯域を使用したデジタル放送の放送波が確認できる。デジタル放送では、1つのチャンネルについて約 1kHz 間隔で密に配置された 5617 本のキャリアを用いて送信しており、5.6MHz の全帯域を使用した周波数特性が確認できる。

次に、配電線周囲のテレビ放送波の状態を明らかにするため、群馬県前橋市にある 6.6kV 実験用配電線を用いて、図 3.28 に示すように配電線から 2m、5m、10m 離れた位置におけるテレビ放送波の電界強度の地上高分布 (ハイトパターン) を測定した。配電線は無電圧である。図 3.29 に 91.25MHz (アナログ放送, NHK 総合, 映像) の電界強度分布を示す。アナログ放送では、例えば配電柱より 2m 離れた位置の架空地線や高圧線近傍にアンテナを配置した場合では、映像が 2 重に映るゴーストが発生しており、配電線の影響による映像の劣化が確認された。図 3.30 に 557MHz (デジタル放送, NHK 総合) の電界強度分布を示す。UHF 帯の波長は VHF 帯よりも短いため、電界強度の振幅変化の間隔も短くなることがわかる。UHF 帯では、わずかなアンテナ位置の変化でも放送波の受信レベルが大きく変わることがわかる。デジタル放送の視聴の所要電界強度は 60dB $\mu$ V/m 以上とされており、アナログ放送より 10dB 低いレベルでも受信可能になるよう設計されている[47]。ここでの測定では 60dB $\mu$ V/m より低いレベルの条件もあったが、映像や音声に劣化は全く見られず視聴は良好であった。

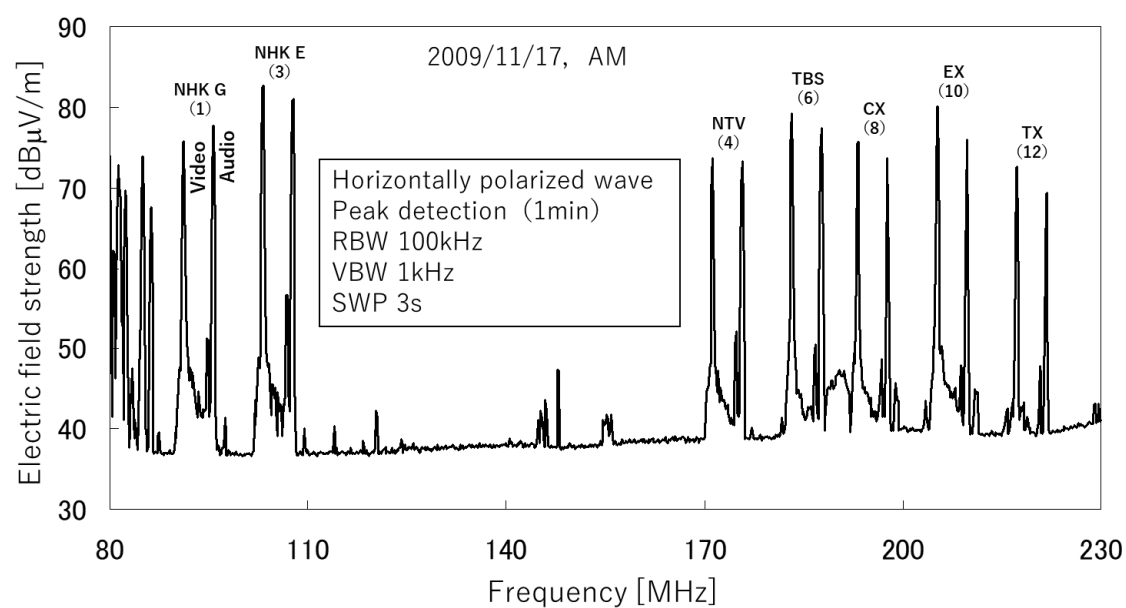


図 3.26 アナログ放送信号

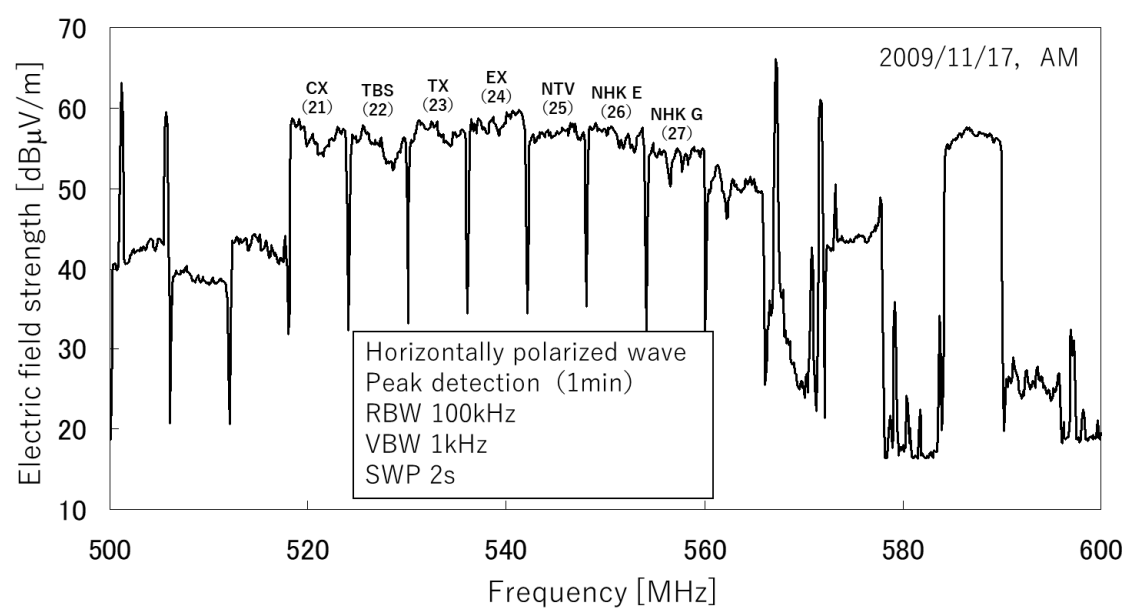


図 3.27 デジタル放送信号



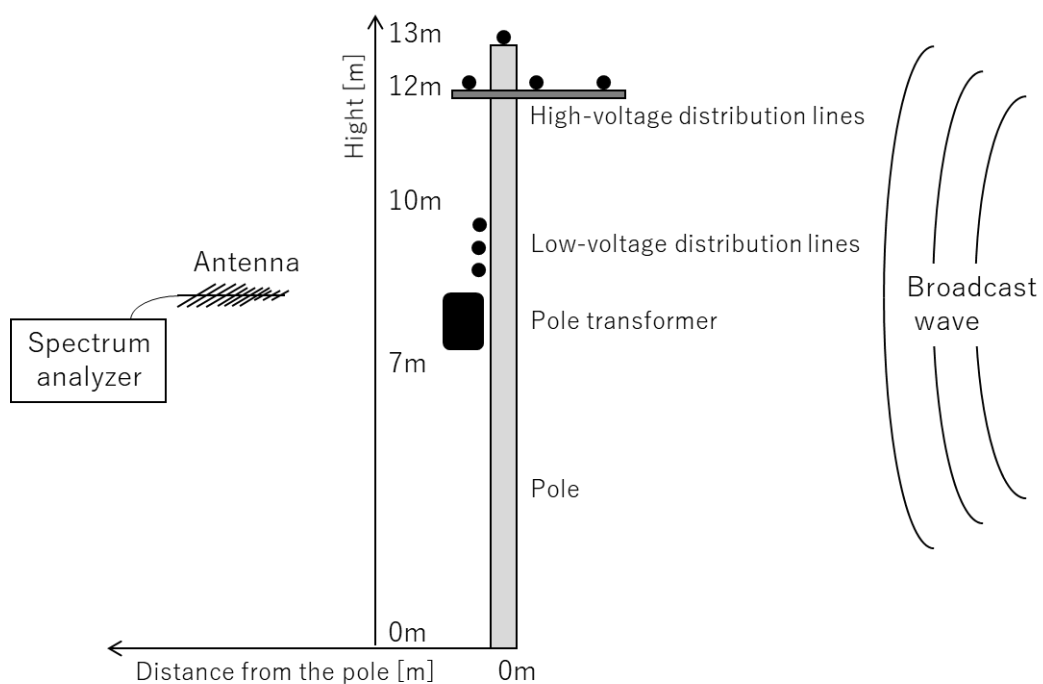


図 3.28 テレビ放送波の電界強度測定

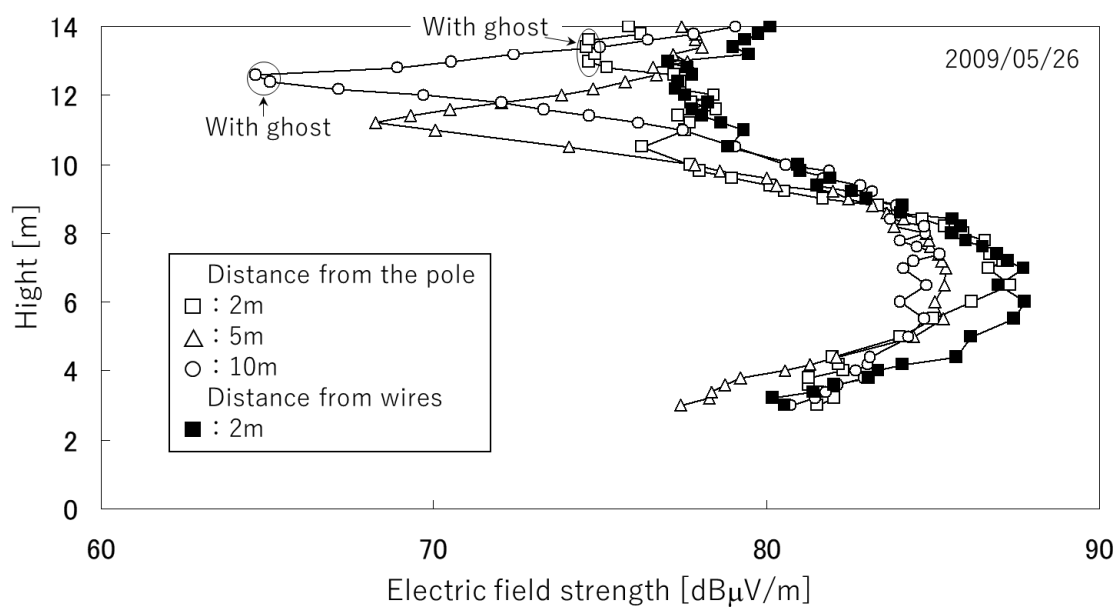


図 3.29 アナログ放送のハイトパターン

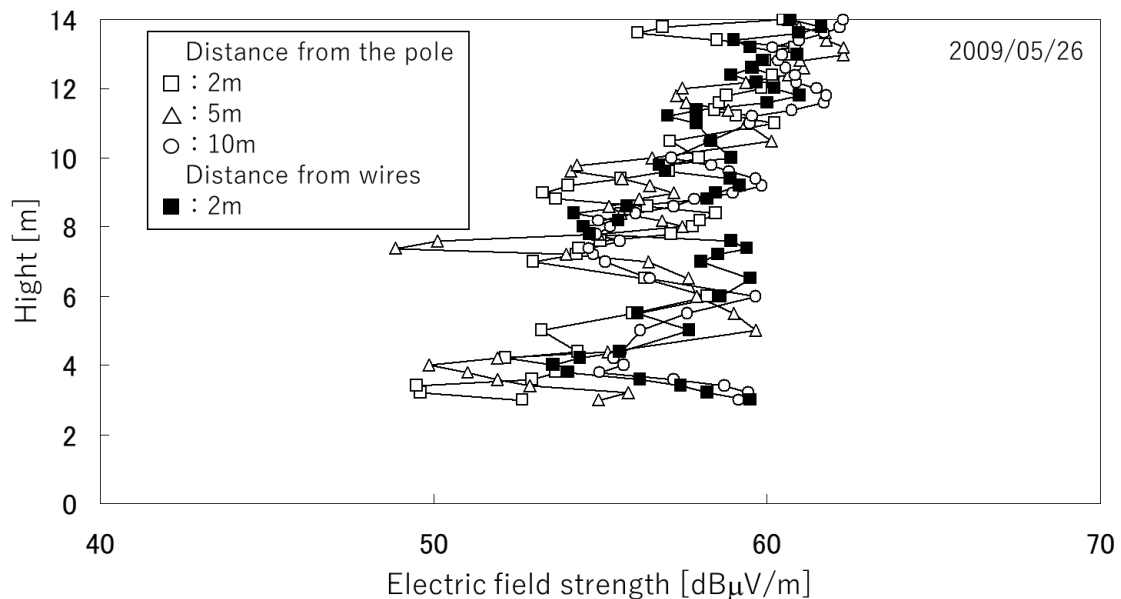


図 3.30 デジタル放送のハイトパターン

#### (1) デジタル放送に及ぼす火花放電の影響

火花放電の周波数帯域は数 GHz まで含むが、配電線の不具合箇所で発生する火花放電の発生頻度は低い。一般にデジタル通信については様々なエラー訂正機能が付加されており、デジタル放送についても二重符号化等が付加されている。デジタル放送の受信信号の評価法にはビット・エラー・レート（以下、BER）だけでなく、モジュレーション・エラー・レシオ（MER）等の評価法もあるが、ここでは間欠的に発生する火花放電を主に扱うため、このパルス性雑音の影響をよく表現する BER、特にビタビ復号前の BER（以下、BER(VIT)）を用いてデジタル放送の信号品質を評価することとする[48]。

デジタル放送は 500MHz 帯の周波数を利用するが、火花放電もこの周波数帯を含む。ここでは図 3.31 に示すように小型の火花放電発生器を作製し、火花放電がデジタル放送に及ぼす影響の基礎的な特性を明らかにする[48]。実験にはスペクトラムアナライザ（アドバンテスト：R3172）と対数周期アンテナ（ETS LINDGREN：Model 3147）、ISDB-T アナライザ（パナソニック：VP-8480A）、一般のテレビ受信機（17 インチ液晶テレビ）を使用した。スペクトラムアナライザでは火花放電の電界強度、ISDB-T アナライザではデジタル放送の受信レベルや BER を測定した。さらに、一般の液晶テレビ受信機で放送の受信状態を確認した。実験手法はデジタル放送が受信できるようアンテナを設置し、アンテナの前方に配置した火花放電発生器で火花放電を発生させる。アンテナの受信レベルは信号線に接続したアッテネータ（ATT）の減衰率を変化させることや、アンテナを回転させることで調整する。また、火花放電発生器のギャップ間隔を変化させることで、火花放電の発生頻度を調整することができ、アンテナと放電ギャップ間の距離（測定距離）を変えることで、

アンテナが受信する火花放電の電界強度を調整することができる。そして、デジタル放送の受信状態を変化させながら、様々な条件の火花放電の電波雑音をデジタル放送の信号に重畳させ、BER の測定や放送の受信状態の確認を行った。

一般的にデジタル放送の所要電界強度は  $60\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  以上とされているが、ARIB の規格ではデジタル放送受信機のアンテナ入力レベルの範囲は  $50\sim 105\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  としている。実際、放送の電界強度が  $50\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  以上であれば、ARIB 規格を満足する受信機についてはデジタル放送が受信可能となる。図 3.31 の実験装置において、アッテネータの減衰率を  $0\text{dB}$  とし、アンテナの方向を回転させ、受信レベルを変化させたときのビタビ復号前の BER(VIT)を図 3.32 に示す。図 3.32 は一般のテレビで放送番組が視聴できた場合と、視聴不可の場合を区分している。アンテナを回転させ、放送波の電界強度が低くなり、受信状態が悪くなっていくとき、BER(VIT)は高くなり、やがて視聴不可になる。ここで使用したテレビ受信機では、電界強度が  $45\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  より低下し、BER(VIT)が  $0.07$  を上回ると視聴不可となった。また、図 3.32 にはデジタル放送に与える火花放電の影響も示している。実験では火花放電発生器の放電ギャップとアンテナの距離は  $1\text{m}$  の一定としており、火花放電発生器のギャップ間隔が短いほうが放電の発生頻度は高くなる。図 3.32 より、受信する放送波の電界強度が同じでも、火花放電が発生しているとき、さらに放電の発生頻度が高いときほど BER(VIT)は高くなることが明らかとなった。しかし、実験において発生させた火花放電は、実際の配電線で発生しうる火花放電よりも、その発生頻度は同等か高いレベルであるため、デジタル放送の所要電界強度  $60\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  以上の環境においては、通常、配電線の設備不良箇所が発生しうる火花放電の電波雑音ではデジタル放送は視聴不可にならないことがわかった。

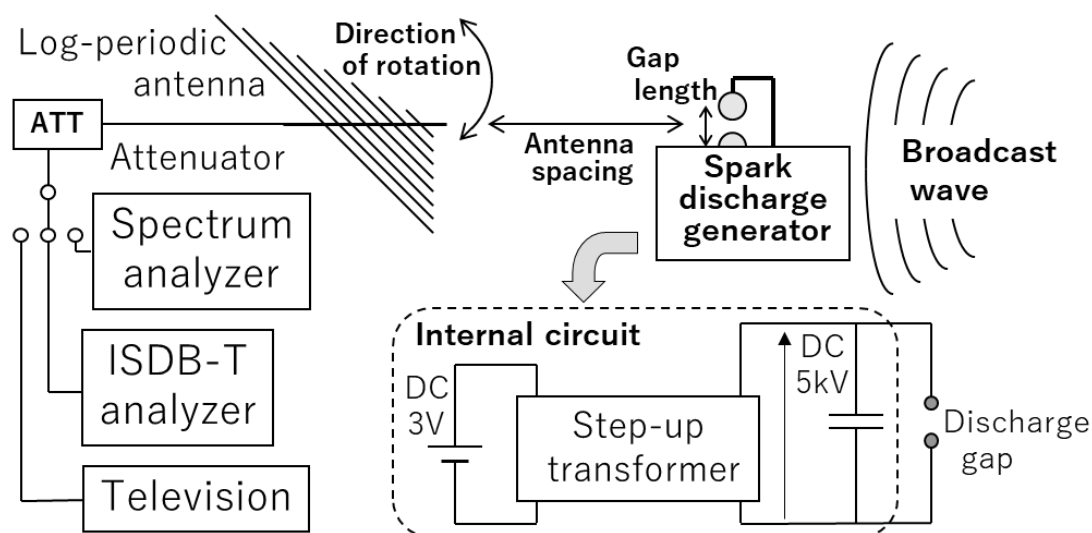


図 3.31 火花放電がデジタル放送に及ぼす影響の評価実験装置

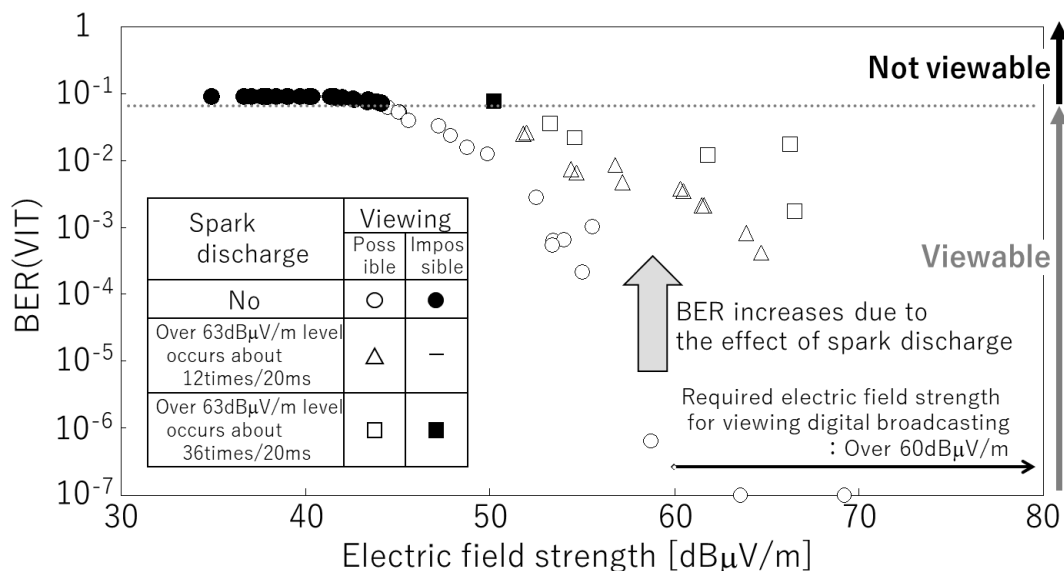


図 3.32 放送の受信レベルと BER の関係

## (2) APD とデジタル信号の BER の関係

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、APD による評価がある[48]。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[43]。ここでは火花放電のパルス性の放射電磁界が地上デジタル放送の信号に及ぼす影響を明らかにするため、火花放電の放射電磁界を振幅確率分布 (APD) によって定量化し、デジタル放送信号の BER との関係を求める。

APD の測定システムは図 3.19 と同様であるが、ここでは測定周波数を 560.08MHz とした。測定周波数は 500MHz 帯のうちデジタル放送に使用されていない周波数を選定した。火花放電発生器のギャップ間隔が 0.2mm と 0.4mm のときの、デジタルオシロスコープの測定波形を図 3.33 に示す。火花放電発生器とアンテナ間の距離は 1m である。

次に、図 3.34 に火花放電の放射電磁界の APD を示す。例えば、図 3.31 における信号線のアッテネータの減衰率を 0dB として、アンテナと火花放電発生器の距離を 1m と設定した場合、火花放電発生器のギャップ間隔 0.2mm のときが 0.4mm のときよりも電界強度の最大値が 5dB 程度高くなり、電界強度の閾値 65dBμV/m 以上の発生確率も高くなることがわかる。また、図 3.34 には APD 測定時とほぼ同時刻で測定したビタビ復号前の BER(VIT) も図中の表に示している。図 3.31 の測定装置において、ATT の減衰率が一定でもアンテナと火花放電発生器の距離を保ちながらアンテナの方向を回転させることで、アンテナが受信する火花放電の電界強度を変化させることなく、デジタル放送の受信レベルを変化させることができる。図 3.34 のような火花放電の APD 特性の場合、デジタル放送の電界強度 65dBμV/m のときが、受信レベルが低下した 62dBμV/m のときよりも BER(VIT)は低

くなり、デジタル放送の受信状態が良好であるときほど、火花放電の影響を受けにくいことがわかる。

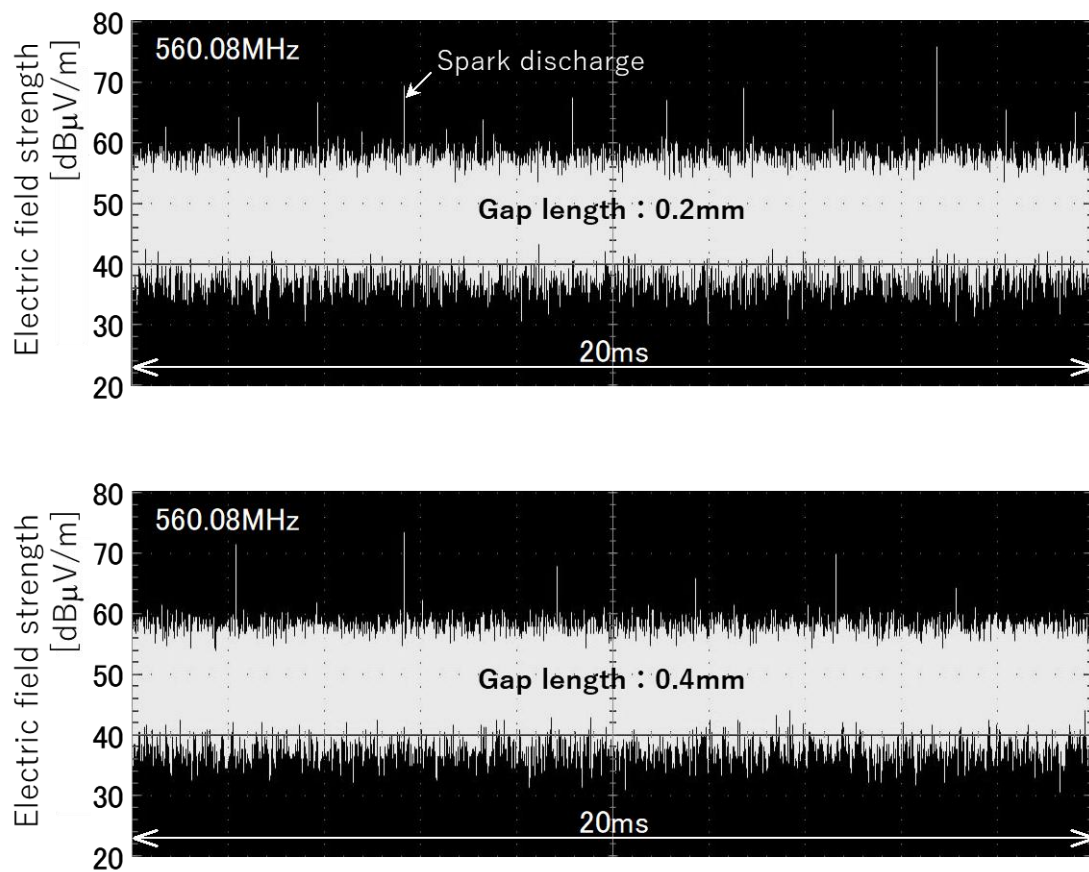


図 3.33 放射電磁界の 560.08MHz 成分の時間変化

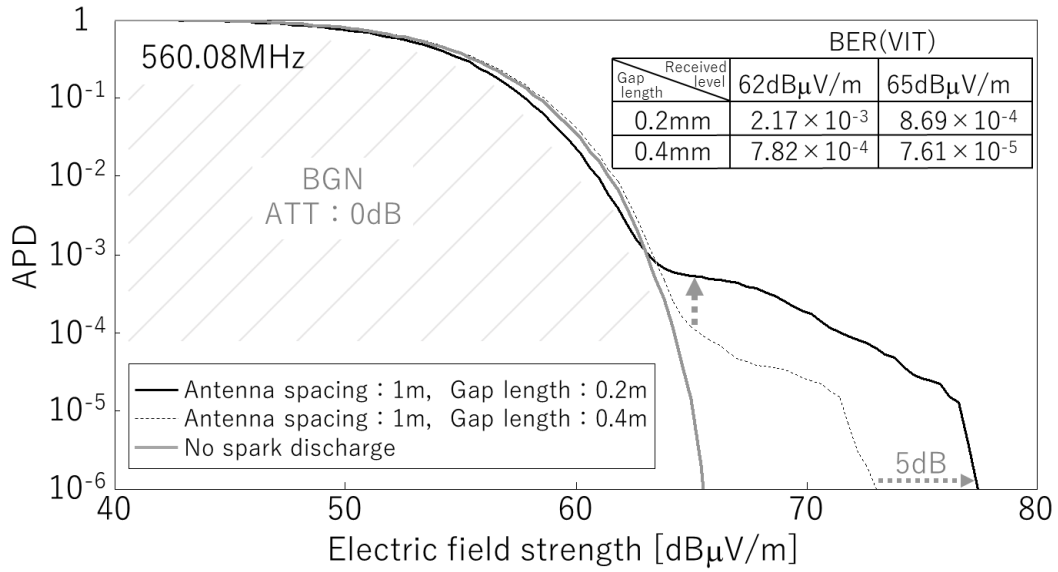


図 3.34 APD 測定結果 (560.08MHz)

火花放電の放射電磁界がデジタル放送信号の BER(VIT)に影響することを確認した。そこで、デジタル放送の受信レベルを既知の条件に設定し、火花放電の放射電磁界の APD と、その火花放電の影響を受けたときのデジタル放送信号の BER(VIT)の関係を求める。火花放電の放射電磁界は 560.08MHz を測定し、デジタル放送は 554.3M~559.9MHz の周波数帯を使用する NHK 総合放送を参照する。ここでは火花放電の放射電磁界の APD 特性から求めたある閾値の確率  $APD_i$  とその放射電磁界の影響を受けたデジタル放送信号の BER(VIT)の  $BER_i$ の相関係数を求め、評価する。相関係数は 2 つの確率変数の相関を統計学的に示す指標であり、その値が“1”に近づくほど強い正の比例関係にあり、“0”に近づくほど相関は弱いこととなる。そして、相関係数  $r$  は(3.2)式で算出することができる。ここで、 $N$ は全データ数、 $\overline{APD}$ は APD 特性のある閾値の確率の平均値、 $\overline{BER}$ は BER 測定値の平均値である[8]。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (APD_i - \overline{APD})(BER_i - \overline{BER})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (APD_i - \overline{APD})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (BER_i - \overline{BER})^2}} \dots (3.2)$$

デジタル放送の電界強度 65dBμV/m において、デジタル放送の受信信号の BER(VIT)と、火花放電の電波雑音の閾値を 65dBμV/m としたときの APD の関係を図 3.35 に示す。APD が高くなるほど BER(VIT)も高くなり、相関係数も大きい。受信するデジタル放送の電界強度と同等の閾値を設定した火花放電の電波雑音の APD は、その火花放電の影響を受けたデジタル放送信号の BER(VIT)と高い正の相関があることがわかる。また、図 3.36 にデジタル放送の電界強度 62dBμV/m において、火花放電の電波雑音の閾値

を 62dB $\mu$ V/m としたときの APD と、受信信号の BER(VIT)の関係を示す。ここでも高い相関が確認でき、他の閾値における APD との比較においては、相関係数がこれよりもかなり小さくなった。電波雑音の電界強度の閾値を適切に選ぶことにより、その APD と BER の相関が高くなることが明らかになった。

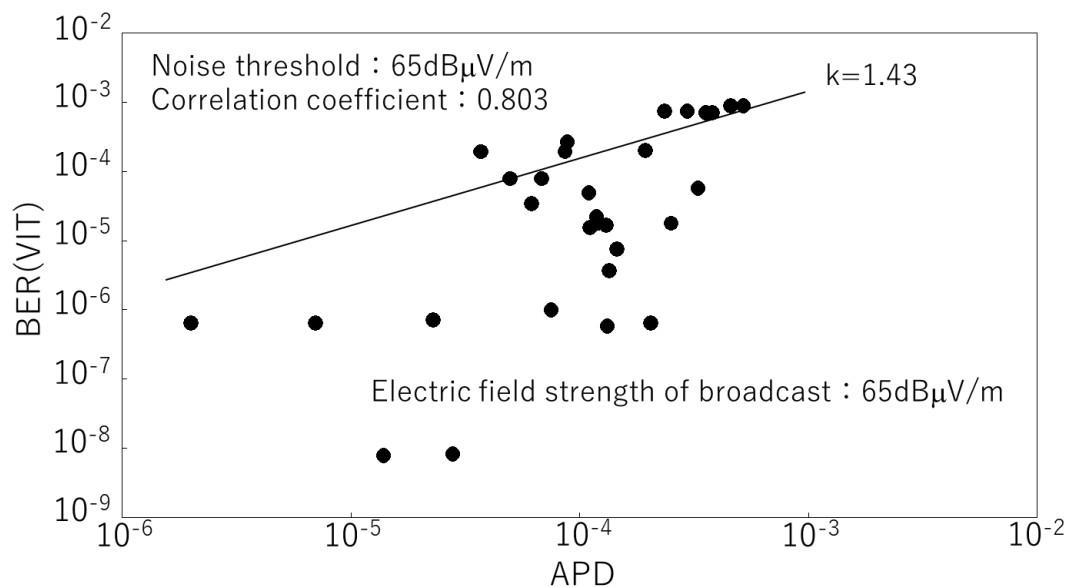


図 3.35 APD と BER の関係 (デジタル放送の電界強度 : 65dB $\mu$ V/m)

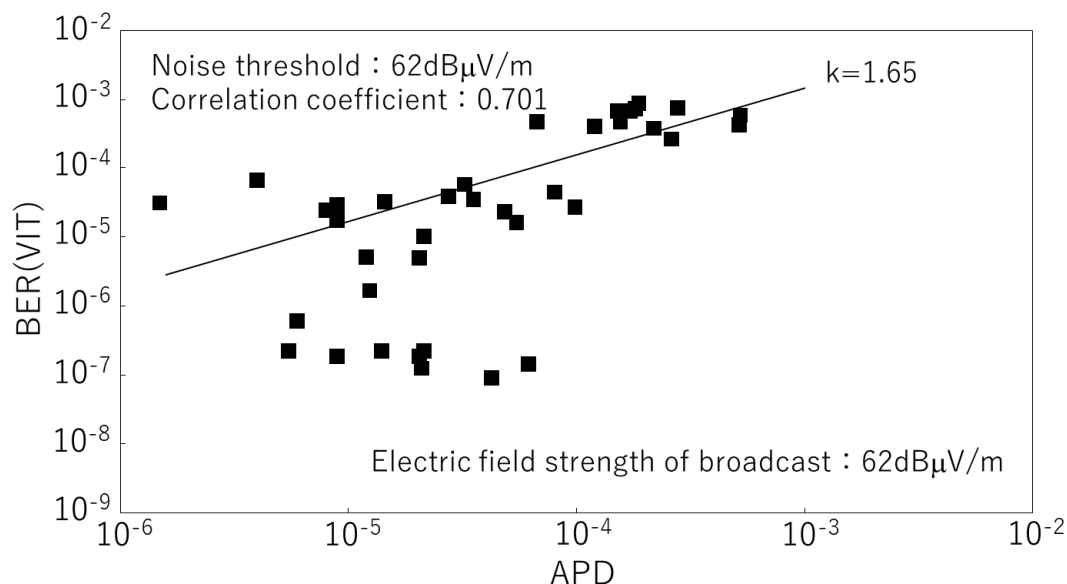


図 3.36 APD と BER の関係 (デジタル放送の電界強度 : 62dB $\mu$ V/m)

### 3. 2 雷放電による雷過電圧

雷現象のもととなる雷雲（積乱雲）の発生は強い上昇気流によるもので、その発生原因から界雷、地形雷、熱雷などに分類される。界雷は寒冷前線の進行により、これが暖気の下に潜り込むことで生じる上昇気流が原因となるもので、季節に関係なく発生する。山腹に吹き付ける風が傾斜面を上昇し、界雷と同じ機構で雷雨が発生することがあり、これを地形雷または山岳雷と呼ぶ。熱雷は無風に近い平穏晴天で、地表面付近の大気の湿度が高い場合、強烈な日射によって地表面が熱せられ、これによる上昇気流で積乱雲が発生することが原因となるもので、平穏・強日射・高湿度が必要条件であって、国内では夏季に多く発生する。

夏季雷は雷雲の高度が高いことから、地表の構造物の高低差にかかわらず、どこにでも雷撃する可能性がある。また、冬季の日本海側では日本海を東進する低気圧・前線の通過に伴って冬季雷が発生する。冬季雷は夏季雷に比べて雷雲の高度が低いため、雷雲との距離が近い高構造物に集中することが多く、エネルギーが大きいことも多いため、設備に甚大な被害をもたらすことが多い[9][31]。

配電線の脅威となる雷現象には直撃雷、誘導雷、逆流雷がある。これらは上記の雷現象の発生原因による分類ではなく、雷撃後の事故様相による分類となる。図 3.37 の直撃雷は配電線に直接落雷する場合であり、流入電流や発生電圧は極めて大きいものとなる。同じく図 3.37 の誘導雷は配電線近傍の樹木や構造物などに落雷した場合に雷放電路を流れる電流により、配電線近傍の電磁界の急変より生じる。逆流雷は構造物やアンテナ設備等に落雷し、構造物の接地抵抗が高い場合、構造物の接地電位が高くなり、電源を供給している配電線側へ雷電流の一部が侵入するものである[29]。

近年では、エネルギーの活用が電力にシフトしてきたことと情報通信のネットワークが密になってきたこと、低エネルギーで動作する電子回路が普及したことにより、雷撃の被害は産業・経済・医療などあらゆる分野に影響を及ぼすことになっている。特に一般家庭にも電子回路が組み込まれた電気製品は広く普及しており、真空管や電磁リレーの時代の 2 桁か 3 桁低いオーダーの過電圧でも電子回路は破壊する欠点を持っている。最近は無線化が進んでいるが、一般家庭には電源線と通信線の両方に接続された多機能電話やファクシミリ、パソコンなどの情報通信機器も多数設置され、雷による被害の様相も複雑になっている[29]。

雷現象の発生状況や過去、現在の落雷状況などをマップ上に示す落雷位置標定システムは電力会社が運用するだけでなく、一般企業のサービスとしても普及している[30]。図 3.38 の落雷位置標定システムは広範囲に設置されたアンテナを用い、複数同時に観測された雷の電磁界情報と、GPS の時間情報から、雷撃地点を標定するもので、現在は誤差範囲 500m 以内の精度を実現していると言われている。電力会社では送電線の雷被害の調査に落雷位置標定システムを活用している。



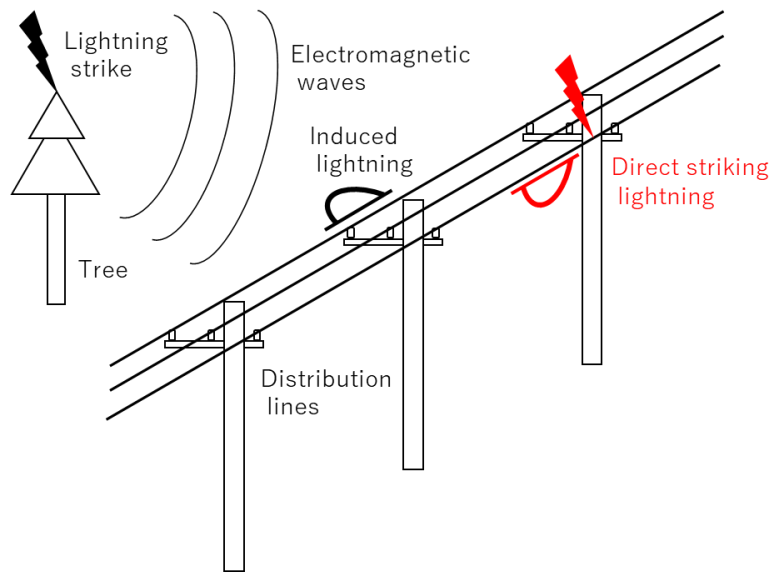


図 3.37 直撃雷と誘導雷

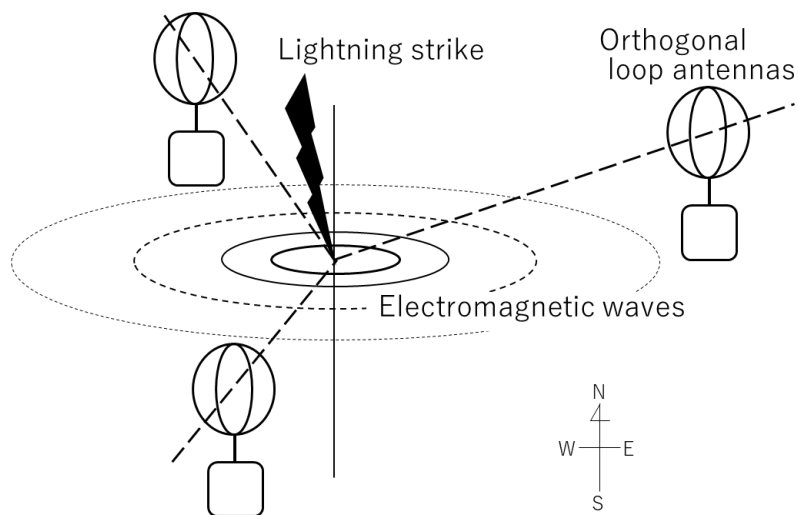


図 3.38 落雷位置標定システムの標定原理

### 3. 2. 1 引込線に発生する雷過電圧の特徴

近年、低エネルギーで動作する電子回路を搭載した電気製品やパソコン等が広く普及し、雷発生時、配電線やその他の配線から侵入する雷サージにより機器の誤動作や破壊が生じる事例が多数報告されている。ここでは雷が原因と思われる電子機器の故障が高頻度で発生している会社事務所を対象に、低圧配電線から引き込まれる電源電圧の連続測定から得られた雷発生時に生じるインパルス性の雷過電圧の特徴を明らかにし、その後、国内の広範囲で実施した雷過電圧の現地調査結果を示す[49, 50]。

(1) 雷過電圧の現地測定

屋内の電源電圧の連続測定を行った場所は一般住宅街に位置する 3 階建ての会社事務所であり、事務所内にはパソコンやその他多数の OA 機器が存在する。会社勤務者の話によれば、2 年に 1 件程度の頻度で夏季の落雷発生時、事務所内の電気製品に不具合が発生する状況であった。事務所内の電源の連続測定は表 3.4 に示すように 2000 年 7 月下旬から 9 月中旬にかけての約 1 ヶ月間行った。測定回路は図 3.39 に示すように建物の地下の接地電極（第 1 種接地）を基準に電源の両端子の電圧をそれぞれ連続測定し、電源電圧に変化（過電圧、電圧変動、周波数変動等）が見られたときに、その電圧波形と測定時間を測定器内部のメモリに記録した。測定には電源品質アナライザ（ドラネッツ社製：658 型，Sampling rate 7.2kHz，Impulse sampling rate 1.8432MHz）を用いた。

表 3.4 測定期間

Sun	Mon	Tue	Wed	The	Fri	Sat
<b>Date</b>					2000	7/29
<b>NL</b>						-
<b>NO</b>						0
30 - 0	31 - 0	8/1 241 0	2 1528 112	3 1804 0	4 11625 0	5 9434 10
6 1797 0	7 9397 34	8 6836 5	9 18861 4	10 1794 0	11 172 0	12 0 0
13 0 -	14 61 -	15 120 -	16 1893 -	17 299 -	18 22 -	19 0 -
20 1 -	21 1 -	22 1811 -	23 217 -	24 0 -	25 11 -	26 403 -
27 236 -	28 0 0	29 18 0	30 462 0	31 509 0	9/1 23 0	2 328 0
3 1 0	4 18 0	5 0 0	6 74 0	7 2036 0	8 620 0	9 630 0
10 121 0	11 590 1	12 203 5	13 6 0	14 0 0	15 229 0	16 12029 221

NL：落雷回数

NO：過電圧の発生回数

←→：非測定期間

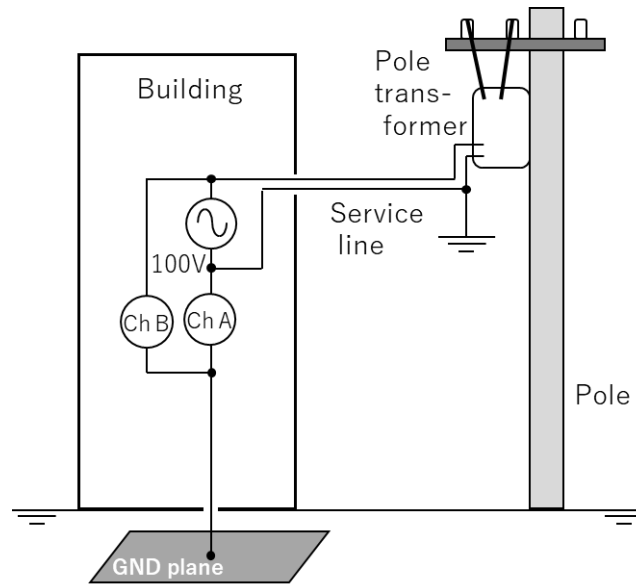


図 3.39 測定回路

表 3.4 には測定場所である会社事務所を中心として，東西約 180km，南北約 160km の領域にあった落雷回数（NL）を日ごとに示している。落雷回数の情報は国内の各電力会社が運用している落雷位置標定システムのデータを統合処理した（一般財団法人）電力中央研究所の落雷位置標定システムデータベースを参照した。また，表 3.4 には電源品質アナライザが測定した過電圧の発生回数（NO）も日ごとに示しており，落雷の多い日ほど過電圧は多く発生していることがわかる。

測定結果の一例を図 3.40 に示す。図 3.40 は測定された過電圧の中でその波高値（絶対値）が最も高い電圧波形である。負極性で 2.5kV の波高値のインパルス性過電圧が発生していることがわかる。この他の測定結果もほとんどが電源線両端子に同時刻，同程度の波高値のインパルス性過電圧であった。また，落雷位置標定システムデータベースを参照した結果，図 3.40 の過電圧発生時間と同じ時間に落雷も発生しており，図 3.40 の過電圧が落雷により発生した雷過電圧であることがわかった。このように，測定された過電圧と落雷位置標定システムデータベースの時間を比較し，測定された過電圧の発生回数 392 回のうち 280 回が落雷による雷過電圧であることがわかった。

280 回の雷過電圧の波高値の累積頻度分布を図 3.41 に示す。雷過電圧の波高値は 100V 以下が過半数を占めるものの，1kV 以上が 2%程度発生することが明らかになった。

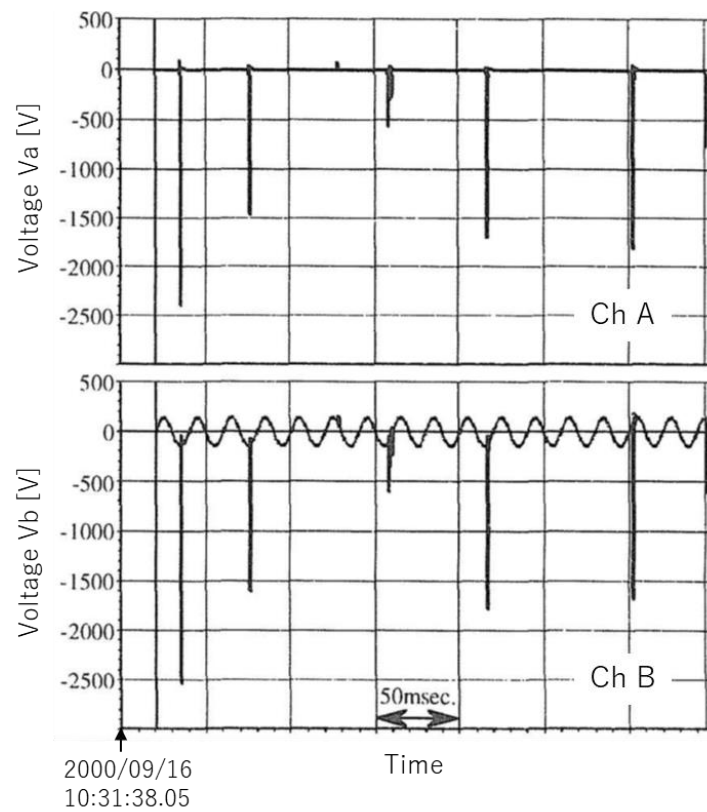


図 3.40 過電圧の測定結果

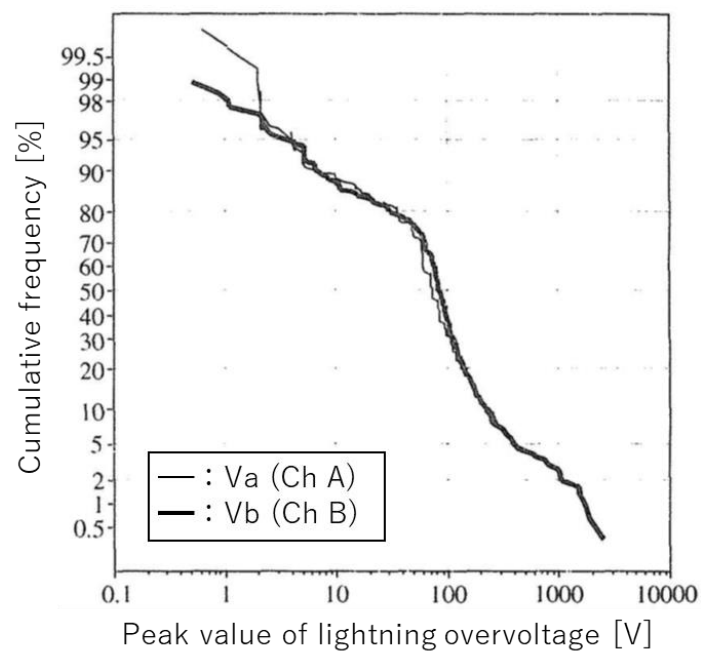


図 3.41 雷過電圧の波高値の累積頻度分布

落雷位置標定システムは落雷の電流と位置を推定するため、雷の電流の波高値ごとに分類した測定場所から落雷地点までの距離と雷過電圧の波高値の関係を図 3.42 に示す。雷過電圧の波高値（絶対値）は落雷位置が測定場所に近いほど高くなる傾向にあり、2km 以内では 1kV 以上になる可能性がある。また、測定場所近傍のデータから、雷電流が大きいほど雷過電圧の波高値は高くなる傾向があることがわかる。

図 3.43 に雷過電圧の波高値ごとに分類した雷過電圧の原因となった落雷の位置をマップ上に示す。図 3.43 の上方向が北となる。雷過電圧の極性は測定場所である会社事務所を中心として、北北東と南南西を結ぶ直線を境に落雷位置が西側の場合は正極性、東側の場合は負極性になる傾向があることが明らかとなった。また、図 3.40 に示した雷過電圧の発生原因となった落雷の位置を図 3.44 に示す。測定場所の極めて近くに多重雷が発生し、雷過電圧の原因となったことがわかる。

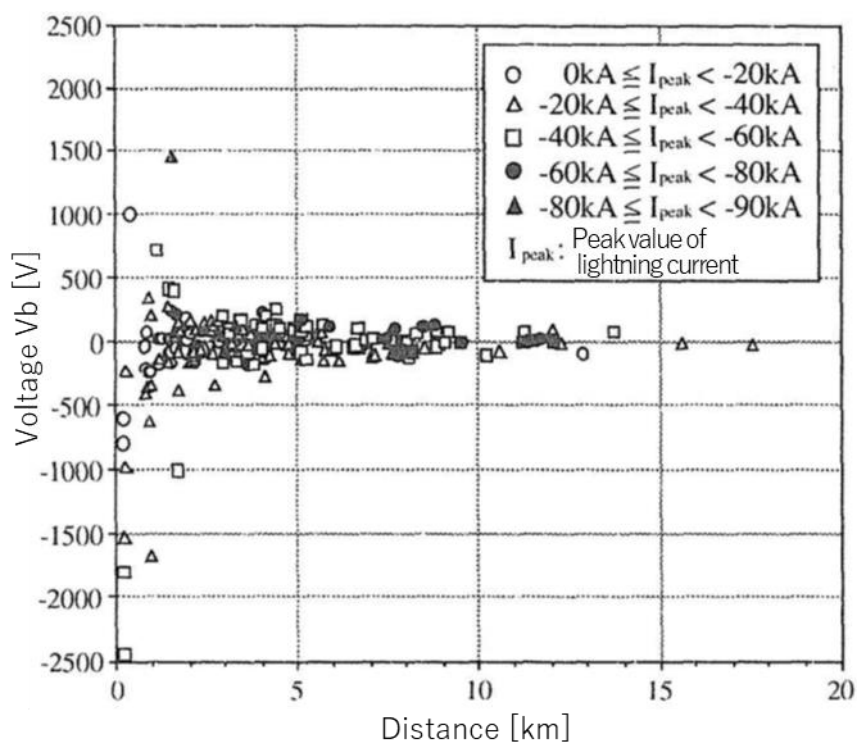


図 3.42 雷過電圧の波高値の距離特性

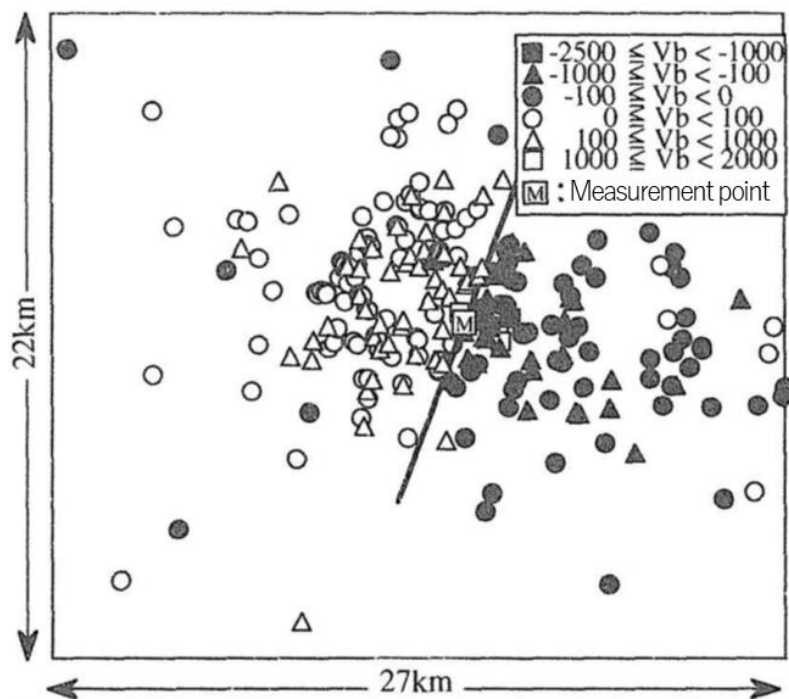


図 3.43 雷過電圧の原因となった落雷の位置

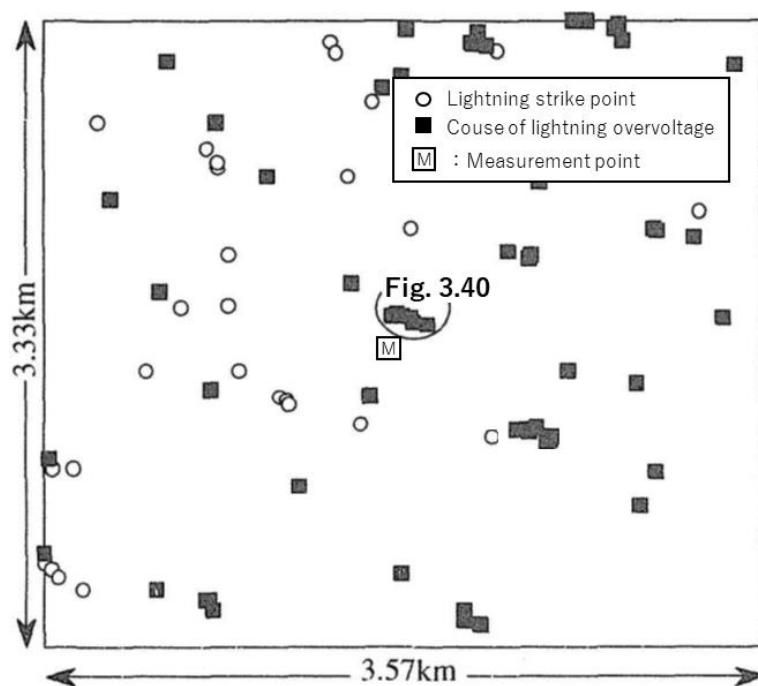


図 3.44 多重雷の落雷位置

## (2) 雷過電圧の発生メカニズム

電磁誘導による誘導起電力  $V$  は、例えば図 3.45 に示すモデルを考えた場合、(3.3)式のよう  
に面積  $S$  のループを鎖交する磁束密度  $B$  の変化で表すことができる。そして、(3.5)式の  
関係にある磁界の強さ  $H$  は(3.6)式で表されるように電流  $I$  に比例し、ループと電流路の距  
離  $r$  に反比例する。また、ループの反対側に電流路  $I$  がある場合、誘導起電力  $-V$  の極性は  
反転する。ここで、(3.4)式は大気中の場合の  $B$  と  $H$  の関係を示し、 $\mu_0$  は真空の透磁率で  
ある[51, 52]。

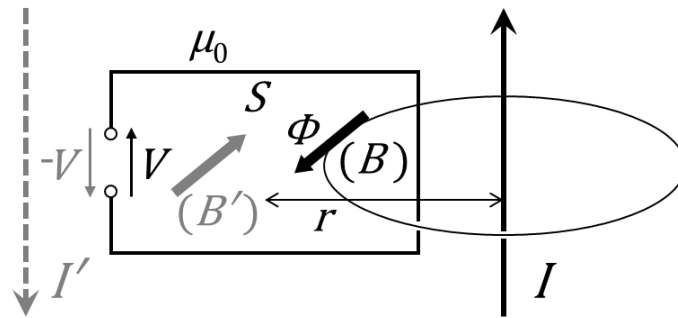


図 3.45 電磁誘導のモデル

$$V = -\frac{d\Phi}{dt} = -S \frac{dB}{dt} \dots (3.3)$$

$$\therefore \Phi = BS \dots (3.4)$$

$$B = \mu_0 H \dots (3.5)$$

$$H \propto \frac{I}{r} \dots (3.6)$$

測定場所に電源を供給する配電線が落雷時に、雷電流による磁界と結合するループを形  
成する場合、測定場所の電源端子に発生する雷過電圧は落雷位置に近いほど、また雷電流が  
大きいほど高くなる。そして、落雷位置の違いによる鎖交磁束の方向により雷過電圧の極性  
が反転する理由が説明できる。そこで、雷過電圧の測定データと落雷位置標定システムのデ  
ータから、(3.3)～(3.6)式と落雷の電流波形を一定と仮定した(3.9)式によって導かれる  
(3.12)式を用い、雷過電圧の波高値  $Vb$  と落雷の雷電流の波高値  $I_{peak}$ 、測定場所までの距離  
 $L$  の関係の角度特性を図 3.46 に示す。(3.12)式においての右辺は雷電流の磁界と鎖交する  
ループの面積を示しているが、雷電流(波頭長、波尾長)とその他の定数を一定と仮定した  
任意定数  $C$  を乗じているため、左辺の値はループの面積を直接表さない。しかし、鎖交ル  
ープの面積と比例関係にある図 3.46 は、数ケースに逸脱した値はあるものの多数のデータ  
群では正弦波を描いている。そして、その最大値は  $340^\circ$ 、最小値は  $160^\circ$  付近と読み取る  
ことができ、 $160\text{-}340^\circ$  平面にループの存在を予測することができる。

(3.3)～(3.6)式より、(3.7)式が導かれる。 $C_0$ は定数である。

$$V = -\mu_0 S \frac{dH}{dt} \propto -\frac{\mu_0 S}{r} C_0 \frac{dI}{dt} \dots (3.7)$$

$$\therefore \frac{dH}{dt} = \frac{C_0}{r} \frac{dI}{dt} \dots (3.8)$$

雷電流の波形を一定とし、電流の時間積分が電流の波高値に比例すると仮定すると(3.9)式が成立する。 $C_1$ は定数である。(3.7)と(3.9)式より(3.10)式が導かれ、一元化した定数を(3.11)式のようにおくと(3.10)と(3.11)式より、雷電流による磁界の鎖交ループ予測式の(3.12)式が導かれる。

実際に測定場所の現地調査を行った結果、測定場所から約 60m の距離で低圧配電線は引き込まれており、測定場所を中心として東を  $0^\circ$  とする反時計回りに角度を刻む図 3.46 の座標系に従う場合、約  $340^\circ$  の方向に配電線は位置していた。地上高約 10m の位置に架線された長さ 60m の配電線が形成するループに落雷の雷電流によって生じる磁束が鎖交し、雷過電圧が発生すると考えられる。

$$\frac{dI}{dt} = C_1 I_{peak} \dots (3.9)$$

$$V \propto -\frac{\mu_0 S}{r} C_0 C_1 I_{peak} \dots (3.10)$$

$$C = -\mu_0 C_0 C_1 \dots (3.11)$$

$$\frac{Vr}{I_{peak}} \propto CS \dots (3.12)$$

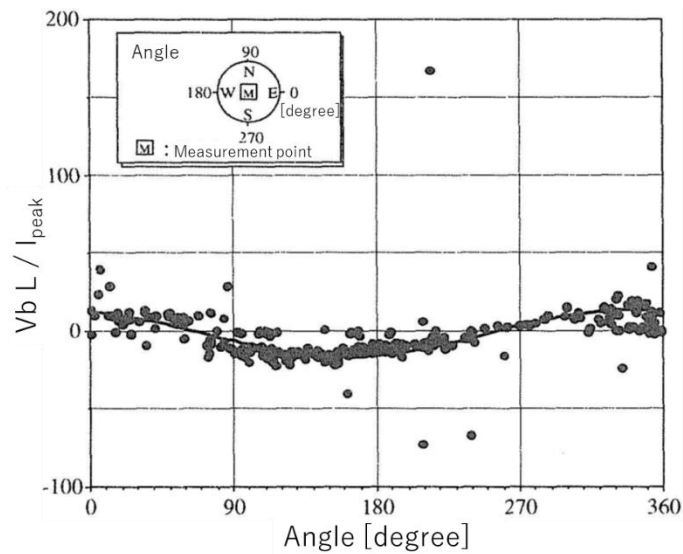


図 3.46 雷過電圧レベルの落雷位置特性



1996 年より日本海沿岸において五島らは冬季雷の雷電流と近傍，遠方の磁界観測を行っており，モデルを用いたシミュレーション結果とあわせて，それらの関係を明らかにしている[53, 54]。落雷地点から遠ざかるほど雷電流によって生じる磁束密度の変化は放射成分が支配的になり，急峻になることを示している。図 3.47 に測定場所近傍，図 3.48 に遠方の落雷によって生じた雷過電圧の今回の測定結果の一例を示す。近傍落雷による雷過電圧波形の波尾は比較的緩やかな変化を示し，遠方は正負両極にスパイク状の波形となる。

また，五島らの計算手法を基に配電線の設置角度と大きさを考慮した雷過電圧の計算結果を図 3.49 と図 3.50 に示す。ここでの雷の条件は夏季雷において一般的と考えられている値を用いた。図 3.49 の近傍落雷の計算結果は図 3.47 の測定結果をよく表現しており，図 3.50 の遠方の計算結果も図 3.48 測定結果の特徴を示す。ただし，ここでの計算は多様な雷の発生状態を一様と仮定しており，測定された雷過電圧の波形の全てを説明できない。より詳細な解析には雷電流の直接測定や空間電磁界測定を行う必要がある。

#### 【計算条件】

計算方法：五島らの高構造物を考慮しない方法を誘導起電力に発展させた手法

計算式：文献[53]の(13)式である下記の(3.13)式を(3.3)式に代入して電圧を得る

$$\begin{aligned}
 B &= \int_0^h dB \, dz \\
 &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ \int_0^h \frac{\sin \alpha}{r^2} I(z', t - r/c) \, dz' \right. \\
 &\quad \left. + \int_0^h \frac{\sin \alpha}{cr} \frac{\partial I(z', t - r/c)}{\partial t} \, dz' \right] \dots (3.13)
 \end{aligned}$$

$h$ ：ある時刻  $t$  までの電流の進展高さ

$z'$ ：雷道におけるある計算区間高さ

$r$ ： $z'$  とループまでの長さ

$c$ ：光速， $3 \times 10^8 \text{m/s}$

$I$ ：雷電流値

$\alpha$ ： $z'$  方向と  $r$  方向間の角度

磁束密度鎖交ループ：低圧配電線

面積： $600 \text{m}^2$ ， $60 \text{m} \times 10 \text{m}$

方向：図 3.46 の  $340^\circ$  方向

雷電流波形：三角波

波頭長： $2 \mu\text{s}$

波尾長：70 $\mu$ s  
 進展速度：100m/ $\mu$ s  
 雷雲の高さ：5000m

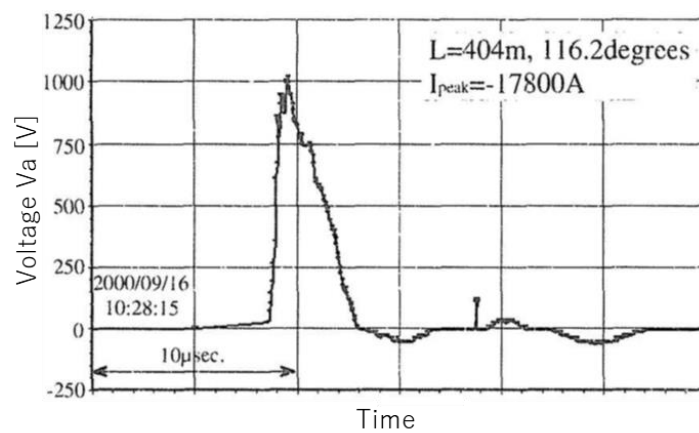


図 3.47 雷過電圧測定結果（近傍）

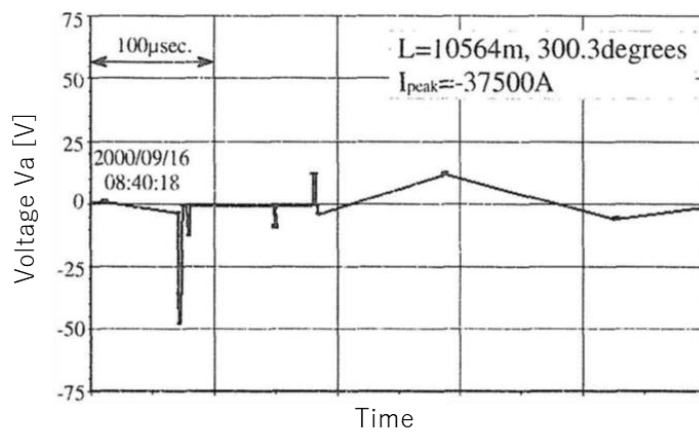


図 3.48 雷過電圧測定結果（遠方）

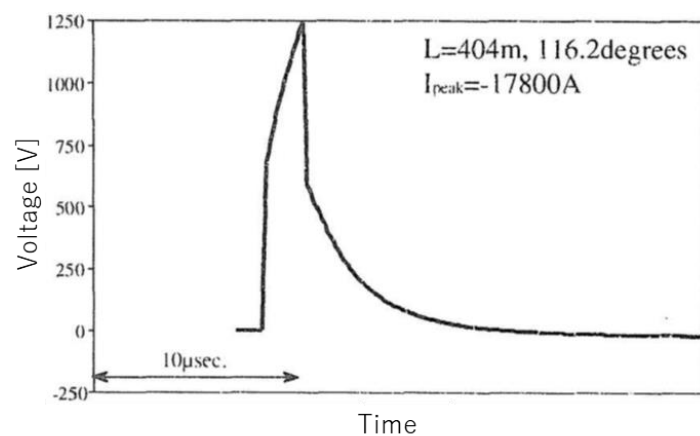


図 3.49 雷過電圧計算結果（近傍）

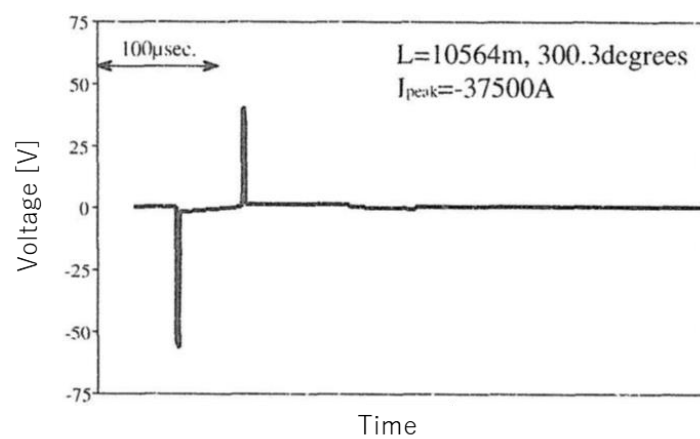


図 3.50 雷過電圧計算結果（遠方）

### 3. 2. 2 雷過電圧の広域調査

前項のように、2000 年の夏季、住宅街に位置する会社事務所の電源電圧の連続測定を行った結果、接地電位を基準とした引込線の両端子に発生するインパルス性の雷過電圧を多数測定した。そして、落雷位置標定システムのデータから雷過電圧の特徴を明らかにした。本項では多地点における一般需要家の電源電圧の連続測定を行い、落雷位置標定システムのデータから雷による電圧変動等の特徴を明らかにする。

表 3.5 と図 3.51～図 3.53 に連続測定を行った場所と期間、回路図、特徴を示す。測定場所は A～F の 6 箇所である。測定は例えば図 3.51 のように電源線の端子間電圧と、測定場所に埋設した接地端子と電源線の中性線端子間の電圧である。電圧測定には電源品質アナライザ (HIOKI 製：3196, Sampling rate 2048points/10cycles (50Hz), 2048points/12cycles (60Hz), Transient sampling rate：2MHz) を用いた。測定場所 A は都会の人口密集地にある 3 階建ての集合住宅の 1 室である。測定場所 B も同じく 3 階建ての集合住宅の 1 室であるが、海沿いの閑静な住宅街に位置する。測定場所 C は日本海を望む住宅地の木造 2 階建ての 1 軒家である。測定場所 D は雷害多発地域の木造 1 軒家の倉庫内であり、本州以外の平野部に位置する。測定場所 D では測定期間外ではあるが 2004 年 8 月に落雷による家電製品の大量故障の被害があった。測定場所 E は電力やその他の試験設備が多数ある試験センターの事務所であり、山間部の落雷多発地域である。2004 年 7 月、測定場所 E 近辺の会社事務所でパソコンの通信機器が多数故障する被害があった。測定場所 F も山間部の落雷多発地域であり、高電圧試験設備が近傍にある木造の業務用宿舎で多数の高い鉄塔に囲まれている。測定場所 F では 2004 年の夏季の間、多数の家電製品や警備ネットワークシステムの故障が相次ぎ停電も頻発した。

表 3.5 測定場所の特徴

測定場所	A	B	C	D	E	F
測定期間	2003/08/31～ 2004/03/24	2004/04/04～ 2004/12/12	2003/10/26～ 2004/12/27	2004/06/23～ 2004/12/17	2004/07/01～ 2004/12/17	2003/09/03～ 2004/12/09
測定回路	タイプ①	タイプ①	タイプ②	タイプ②	タイプ③	タイプ②
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 夏季雷地域</li> <li>・ 住宅密集地</li> <li>・ 集合住宅</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 夏季雷地域</li> <li>・ 住宅地</li> <li>・ 集合住宅</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 冬季雷地域</li> <li>・ 住宅地</li> <li>・ 一軒家</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 夏季雷地域</li> <li>・ 過疎地</li> <li>・ 一軒家</li> <li>・ 雷害多発地</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 夏季雷地域</li> <li>・ 過疎地</li> <li>・ 会社事務所</li> <li>・ 雷害多発地</li> <li>・ 電力、他試験設備近傍</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 夏季雷地域</li> <li>・ 過疎地</li> <li>・ 一軒家</li> <li>・ 雷害多発地</li> <li>・ 高電圧研究設備近傍</li> </ul>

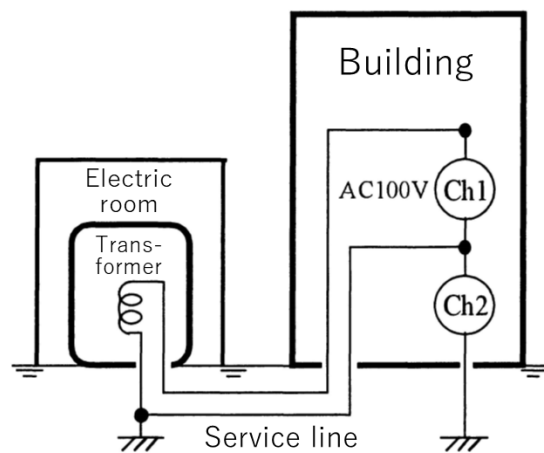


図 3.51 測定場所の測定回路（タイプ①）

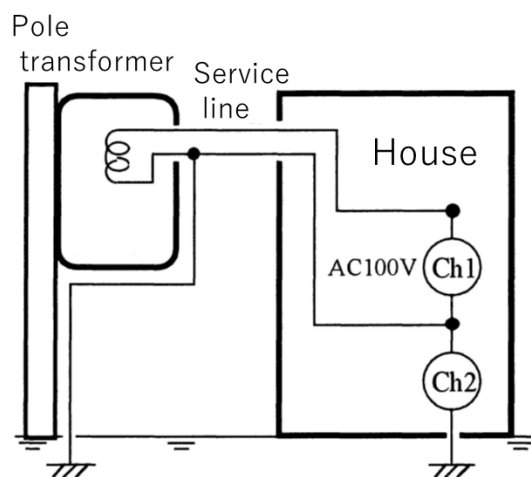


図 3.52 測定場所の測定回路（タイプ②）

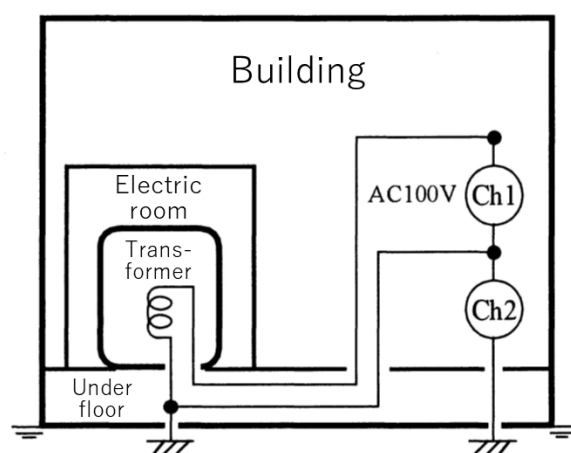
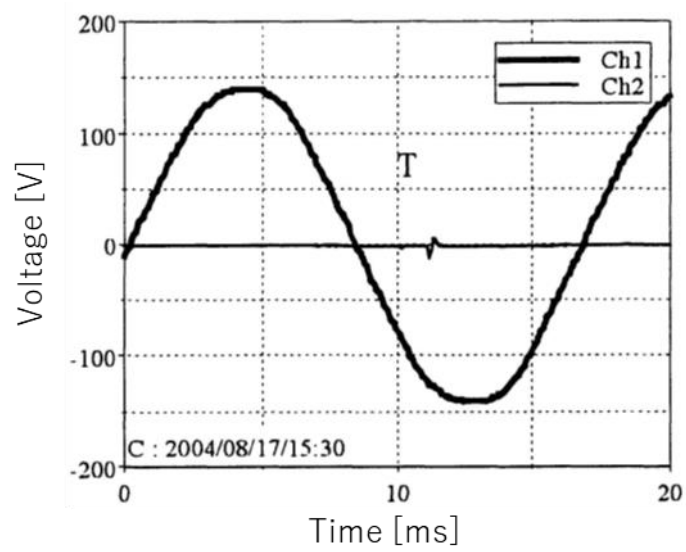
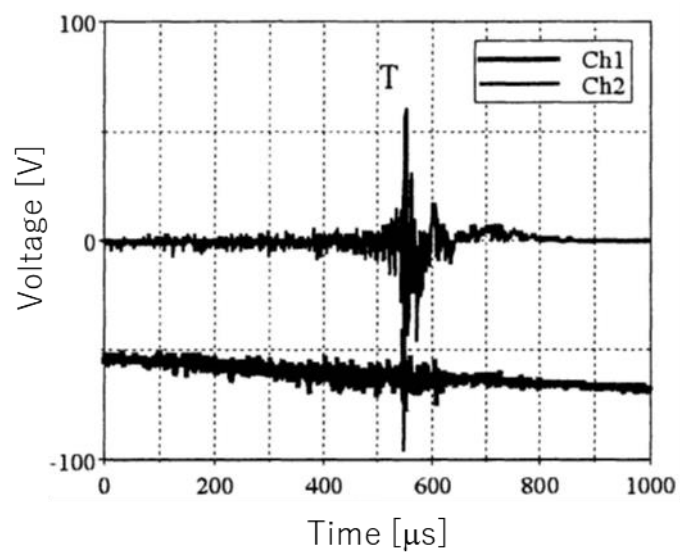


図 3.53 測定場所の測定回路（タイプ③）

測定場所 A と測定場所 B では、波高値が 50V 以下のインパルス性過電圧が数多く測定されたが、エアコンや大型の照明器具の動作に関係しており、雷現象に伴い電圧変動等は確認できなかった。測定場所 C では住民が近傍の落雷を確認している時間に例として図 3.54 と図 3.55 の雷過電圧が測定された。例えば図 3.54(a)中の T は図 3.54(b)中の T の過電圧に対応しており、以後に関しても同様である。図の横軸の時間は相対時間を示す。図 3.54 より、中性線にはインパルス状の雷過電圧が確認できるが電源電圧の変化は少ないことがわかる。この他の波形についても同様の特徴を示したが、唯一、図 3.55 のみ電源電圧にも影響を及ぼす事例があった。測定場所 D では台風による停電時に多くの過電圧が測定されたが、雷現象によるものではなかったため、ここでは省略する。落雷位置標定システムのデータを参照した結果、雷現象による雷過電圧は 3 波形が測定され、その一例は図 3.56 に示すようであり、ここでも電源電圧にインパルス状の雷過電圧は発生しなかった。測定場所 E では 16 波形の雷過電圧が測定された、その一例を図 3.57 に示す。測定場所 E の中性線に発生する雷過電圧の波高値は低く、200V（絶対値）より低い値であった。測定場所 F では極めて多くの過電圧が測定され、654 波形が雷過電圧として特定できた。一例を図 3.58 と図 3.59 に示す。ここでも電源電圧の変動は小さかった。図 3.59 は雷による電力設備の被害で発生した停電後の測定結果であるが、中性線には給電の有無によらずインパルス状の雷過電圧が発生していることがわかる。

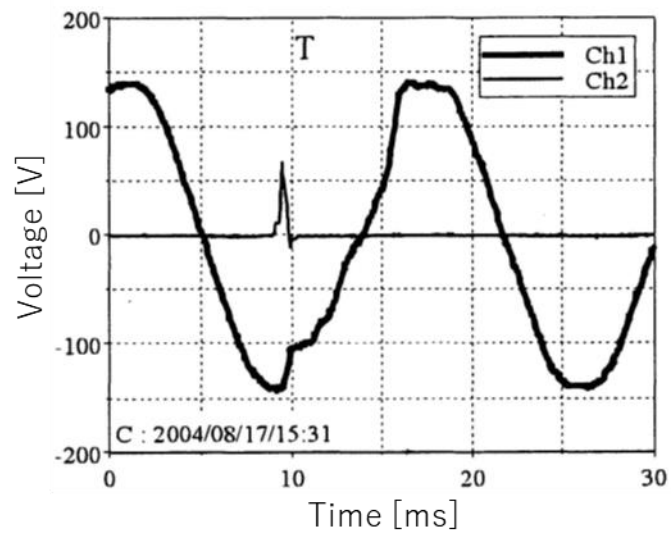


(a)電源電圧

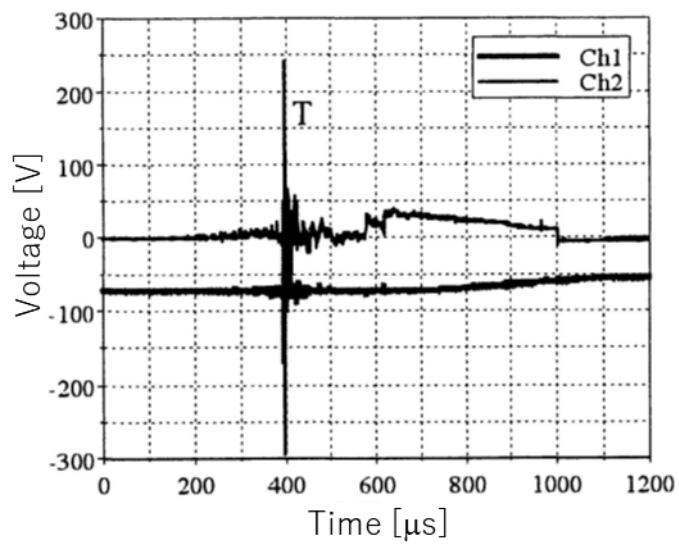


(b)インパルス性過電圧

図 3.54 測定波形例（測定場所 C その 1）



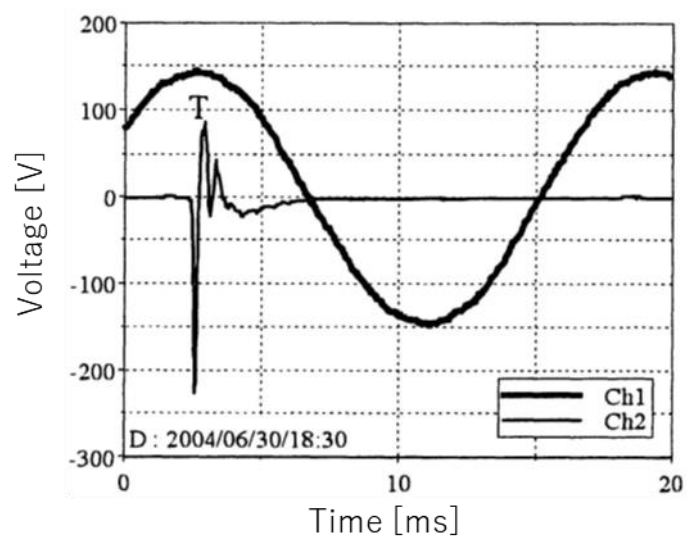
(a)電源電圧



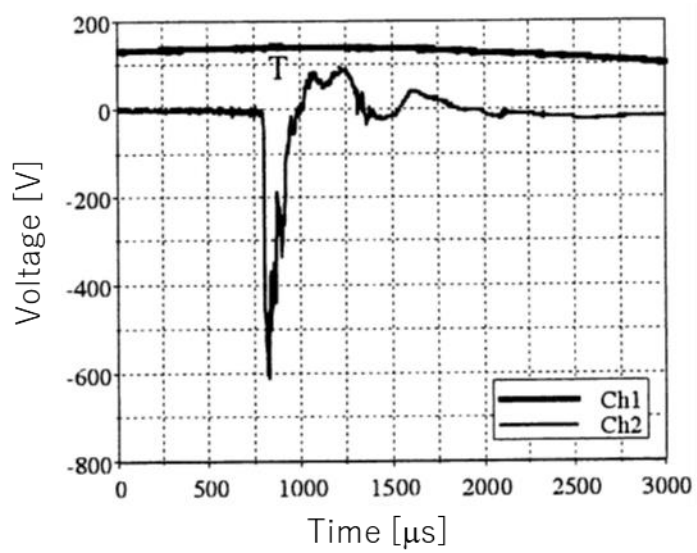
(b)インパルス性過電圧

図 3.55 測定波形例（測定場所 C その 2）



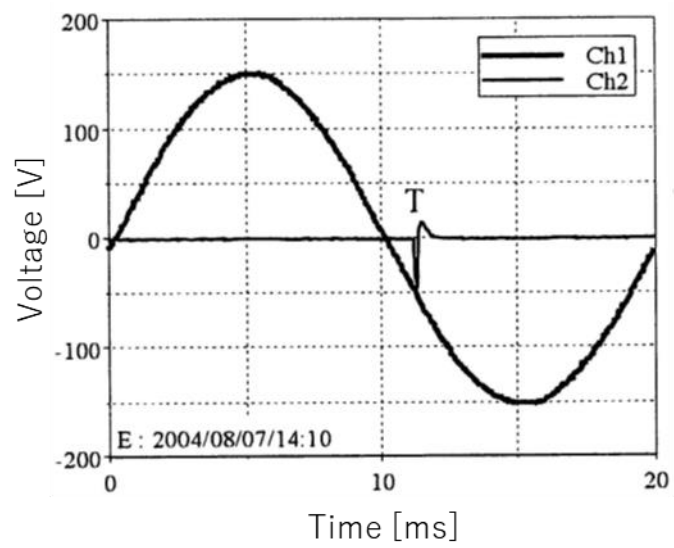


(a)電源電圧

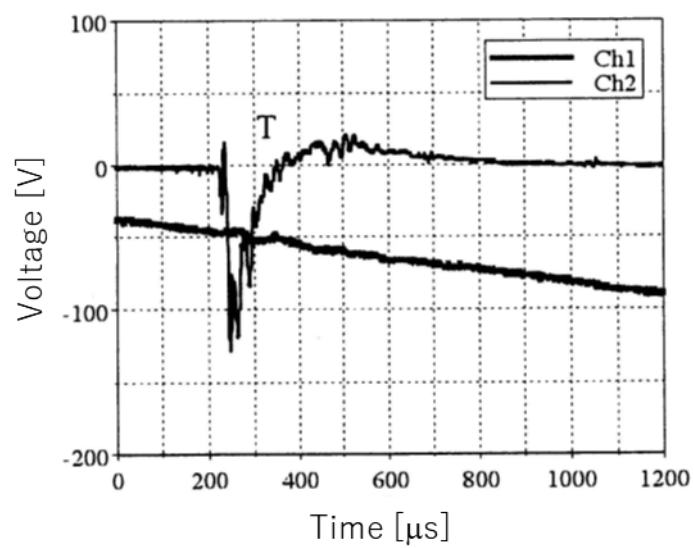


(b)インパルス性過電圧

図 3.56 測定波形例 (測定場所 D)

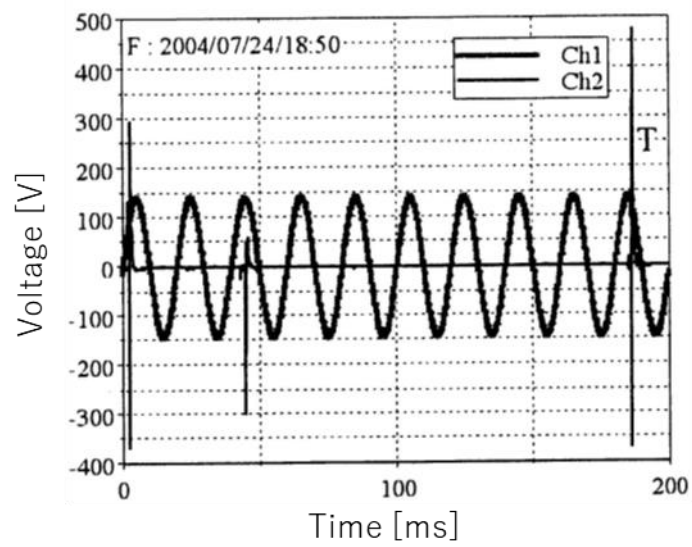


(a)電源電圧

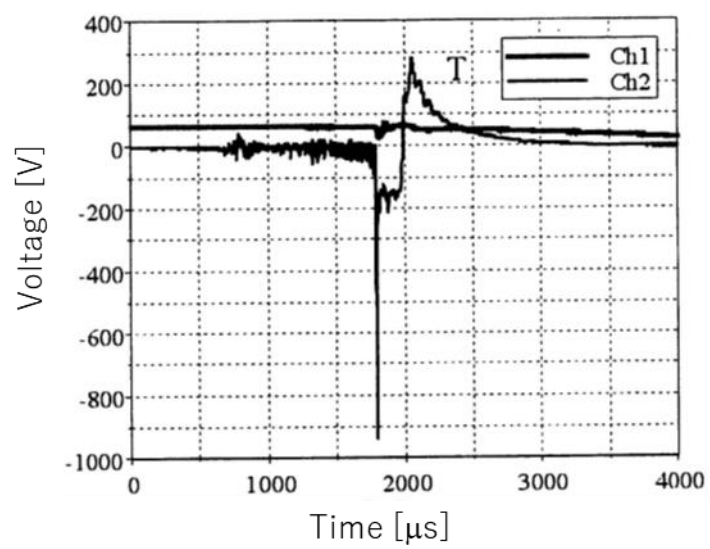


(b)インパルス性過電圧

図 3.57 測定波形例 (測定場所 E)

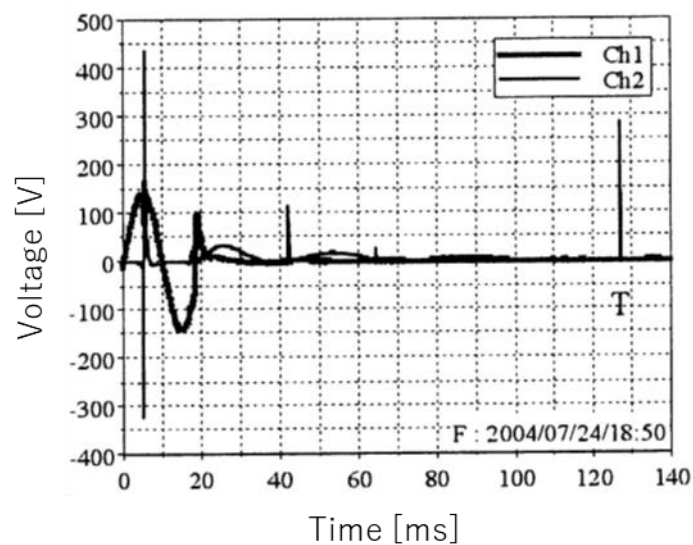


(a)電源電圧

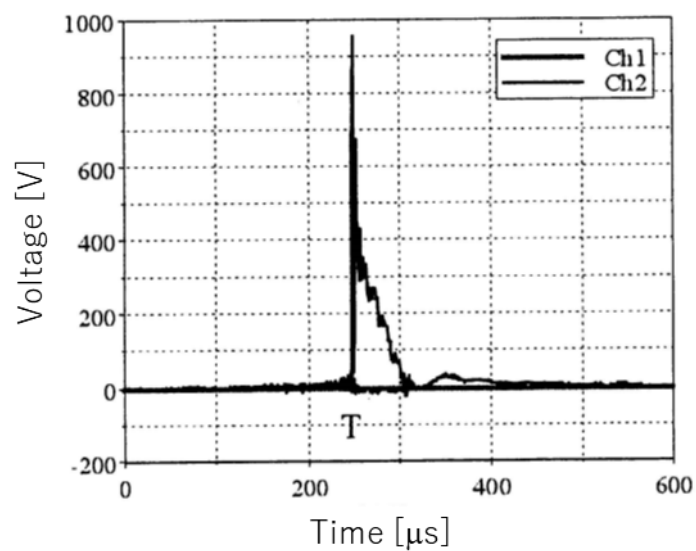


(b)インパルス性過電圧

図 3.58 測定波形例（測定場所 F その 1）



(a)電源電圧



(b)インパルス性過電圧

図 3.59 測定波形例（測定場所 F その 2）

測定場所 C の中性線に発生した雷過電圧の波高値の距離特性を図 3.60 に示す。測定場所 C では測定場所から 3km 以内の落雷が雷過電圧として影響していることがわかる。測定場所 D の中性線に発生した雷過電圧の波高値の距離特性を図 3.61 に示す。ここでは測定場所から 6km 以内の落雷が雷過電圧として影響しており、サンプル数は少ないが測定場所に近い落雷ほど雷過電圧の波高値（絶対値）が高くなる傾向がある。測定場所 E について、図 3.62 の中性線に発生した雷過電圧の波高値の距離特性より、測定場所から 3km 以内の落雷が 200V 未満の波高値（絶対値）の雷過電圧となることがわかる。図 3.63 は測定場所 E で

の雷過電圧の原因となった落雷の位置を示す。測定場所 F については、図 3.64 より、測定場所に近い落雷ほど雷過電圧の波高値（絶対値）が高くなる傾向があることは明らかであり、雷電流（絶対値）が大きいほど、中性線に発生する雷過電圧の波高値も高くなる傾向があることがわかる。また、図 3.65 の雷過電圧の原因となった落雷の位置より、雷過電圧の極性が配電線の位置する方向と直交する直線で二分される傾向があることがわかった。この特徴は前項の図 3.43 と同じであり、雷過電圧の発生メカニズムも同様であると考えられる。

前項の 2000 年の夏季に実施した電源線における雷過電圧の測定に続いた本測定でも、雷現象が関係する雷過電圧の発生を一般家庭内の電源電圧にも確認できた。また、落雷による磁界の変化が配電線に影響し、雷過電圧を発生させる現象を 2000 年夏季の例と同様にここでも一件確認できた。

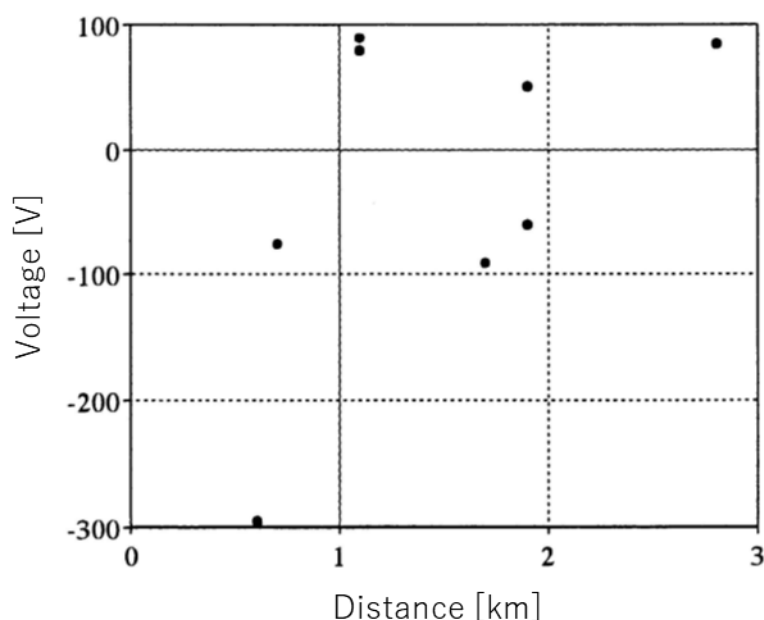


図 3.60 雷過電圧の波高値の距離特性（測定場所 C）

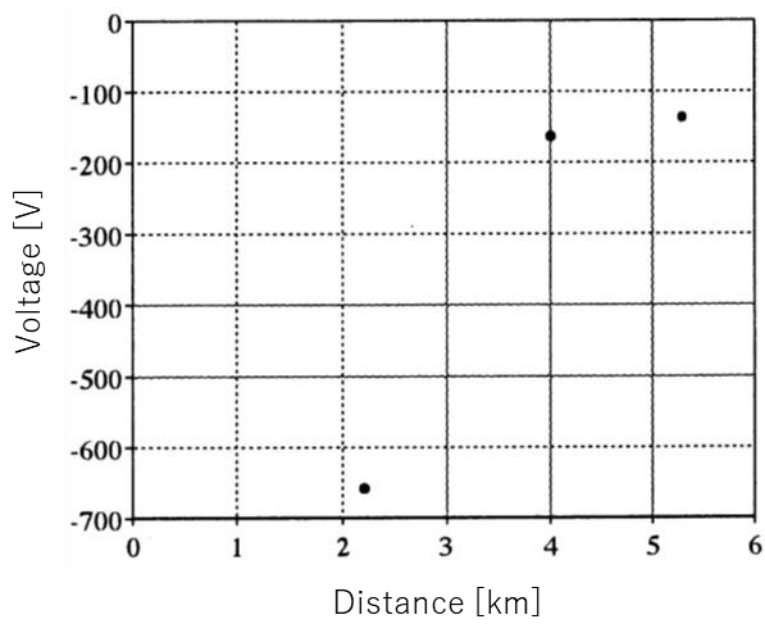


図 3.61 雷過電圧の波高値の距離特性（測定場所 D）

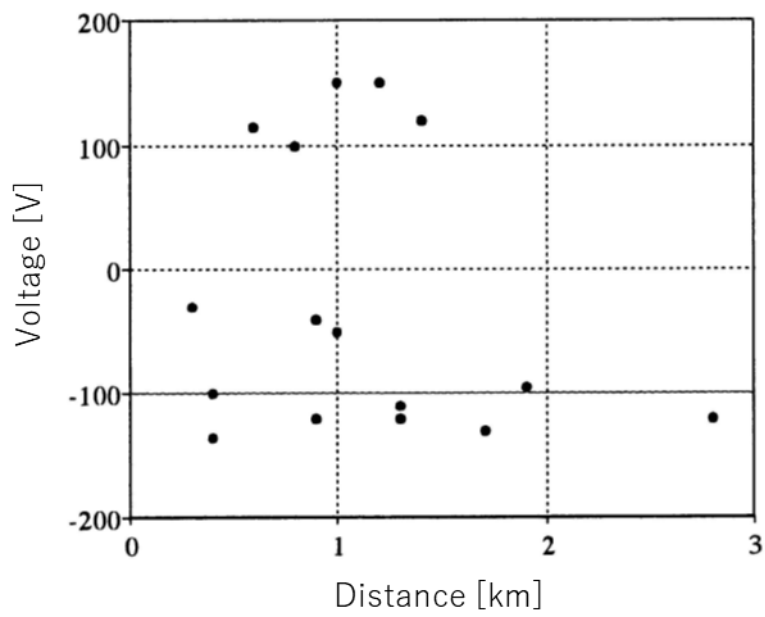


図 3.62 雷過電圧の波高値の距離特性（測定場所 E）

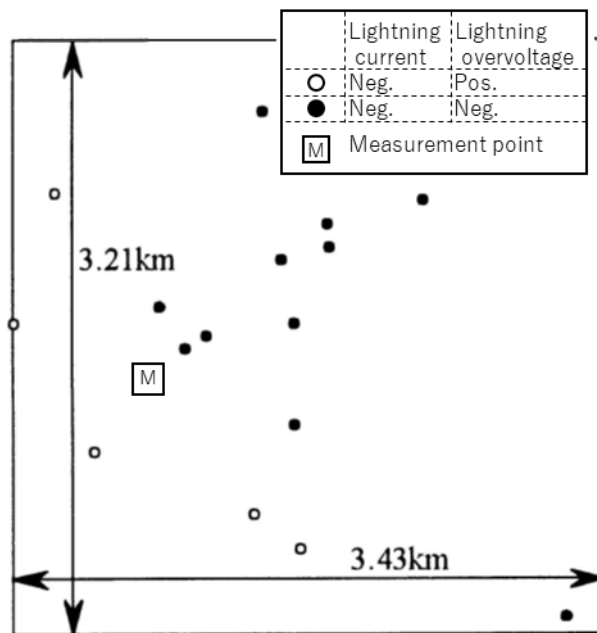


図 3.63 雷過電圧の原因となった落雷の位置（測定場所 E）

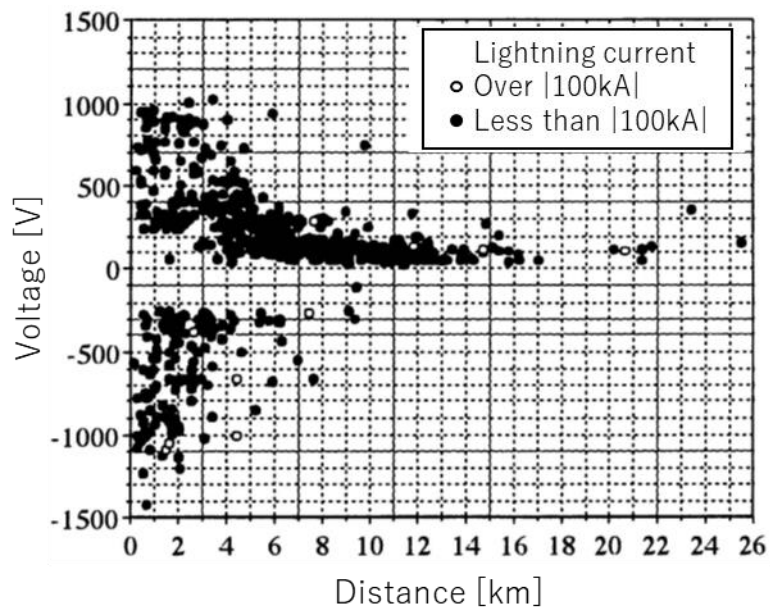


図 3.64 雷過電圧の波高値の距離特性（測定場所 F）

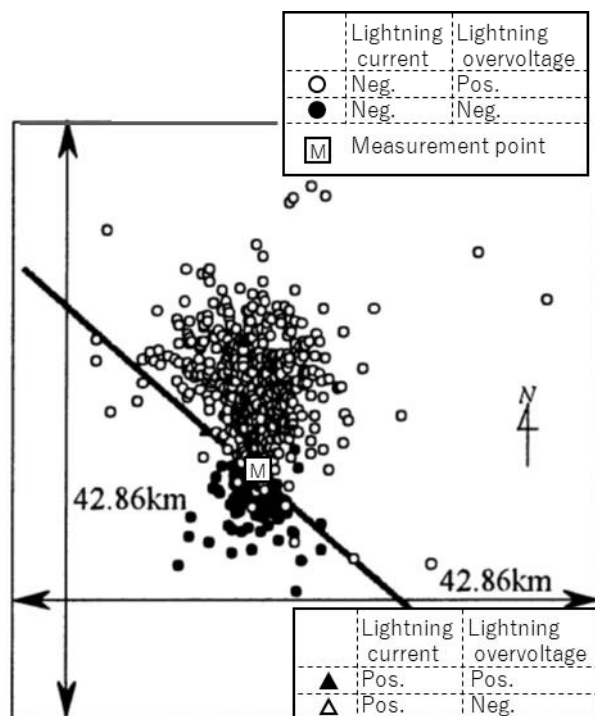


図 3.65 雷過電圧の原因となった落雷の位置（測定場所 F）



#### 4. 屋内配線の電磁環境

電子機器の発達には機器のデジタル化およびその高速化、高密度化、高機能化、低エネルギー化によって実現されてきた。この結果、モータなどの大きな機器を電子機器の低エネルギーで制御するシステムが実現され、必然的に制御側と被制御側の間にパワーミスマッチングが生じることとなった。また、電子機器の発達は外部の不要エネルギー（電磁雑音、ノイズ）に敏感に応答するシステムを作り出し、一つの電子機器の誤動作がシステム全体の誤動作を招き、社会問題まで発展することもある。一般に電磁雑音による電子機器の誤動作を考えた場合、その多くが再現性に乏しく原因の解明が困難であるため、電磁雑音源の特徴を把握し、対策を施すことは極めて重要である[55]。

近年では、電力用半導体素子を用いた電力変換と制御技術（パワーエレクトロニクス技術）の発展と利用拡大に伴い、一般家庭で使用される電気製品でも電力用半導体素子が数多く使用されている。電力用半導体素子は急峻に電力の ON/OFF を高速で繰り返すことから、電源線に重畳する伝導性電磁雑音やこれによる放射性電磁雑音の発生源となることがある[56, 57]。最近では太陽光発電システムのパワーコンディショナやエアコンや洗濯機等のモータに使用されるインバータ回路、LED 照明等のコンバータ回路など大容量の機器から小型の機器まで幅広い。小型の機器ではインバータやコンバータの電磁雑音対策が不十分なときもあり、FM ラジオの障害となったこともある[58]。

また最近では、地球温暖化を防止する有力な方法として、太陽光発電システムや風力発電システムの導入が積極的に進められており、分散する発電システムからの電力を有効利用するため、配電線レベルの電力流通網を電気自動車のバッテリー等とも組み合わせ、電力流通を制御するスマートグリッドの構成も世界的に進められている。ここでも電磁雑音が問題視されており、IEC（国際電気標準会議）の中の特別委員会である CISPR（国際無線障害特別委員会）では無線障害となりうる電磁雑音のエミッションやイミュニティの許容値、測定法などを取りまとめている[59]。

過去には、何かトラブルが発生したときの電磁雑音の発生源としては、図 4.1 に示すようにリレーや遮断器などの電気接点を用いたものが多くの割合を占めていた[60]。現在でも電気接点は数多く使用されている。電気接点は劣化・寿命を有する電気部品であり、劣化の原因は接点間で生じる放電現象であるが、その特徴は十分に解明されていない。本章では、電気接点間で発生する放電現象に着目し、その特徴を示す。

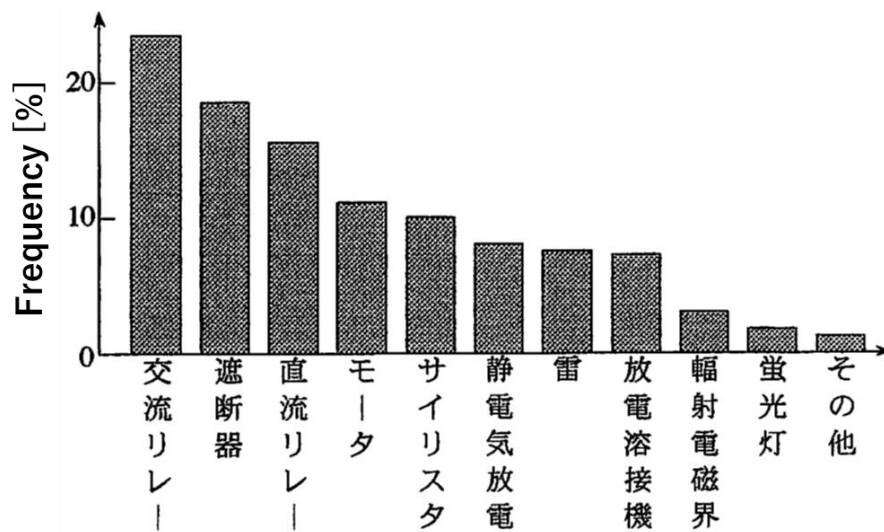


図 4.1 トラブル時のノイズ源

#### 4. 1 シャワリングアーク

アーク放電は電気接点の開離時と閉成時に発生するものに大別され、現実的に問題となるのは主として開離時アークである。開離時アークは一般に接点材料によって決まる最小アーク電流の値より閉成中の通電電流が大きい場合にブリッジ破壊直後に発生するアークと、電流が比較的小さい場合にブリッジ破壊後に接点間電圧がギャップの絶縁破壊電圧に達して発生するアーク（シャワリングアーク）に大別される。シャワリングアークは弱電流用接点の消耗の主要な原因となり、誘導性負荷を含む回路では電源電圧が低くても発生する[10][61-63]。

モータや電磁石など誘導性負荷を含む電気回路の電気接点を開閉するとき、急激な電圧変化に伴い回路に減衰振動が発生する[64, 65]。例として図 4.2 に示す並列共振回路の接点を OFF にすると、(4.1)式の条件においては減衰振動が発生する。そして、 $R$  が非常に大きいとき減衰振動の周波数  $f$  は(4.3)式で示される値にほぼ等しくなる。また、共振点においては(4.4)式が得られる。並列共振回路において、 $S$  が(4.5)式によって定義され、 $S$  を導入することにより式(4.1)と式(4.5)より、回路の振動条件は式(4.6)で表現される。図 4.3 に示す減衰振動波形を得るためには  $S$  の値が必要であるが、 $S$  は図 4.4 に示す並列共振回路の周波数—インピーダンス特性 ( $f-|Z|$  特性) から求めることができる。すなわち、図 4.4 において並列共振周波数  $f_1$  におけるインピーダンスは  $R$  となり、 $R$  と比べて 3dB 低いインピーダンスを持つ 2 つの周波数  $f_{a1}$  と  $f_{b1}$  の差である  $2\Delta f_1$  を図式的に得ることにより、(4.7)式から  $S$  を求めることができる。なお、図 4.3 中の 23 番目のピークでは電流がほぼ 0 と考え、 $S/f_1$  は減衰振動の継続時間を示す。

$$\alpha < \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdots (4.1)$$

$$\alpha = \frac{1}{2CR} \cdots (4.2)$$

$$2\pi f = \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdots (4.3)$$

$$X = \omega L = \frac{1}{\omega C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdots (4.4)$$

$$S = \frac{R}{X} \cdots (4.5)$$

$$S > \frac{1}{2} \cdots (4.6)$$

$$S = \frac{f_1}{2\Delta f_1} \cdots (4.7)$$

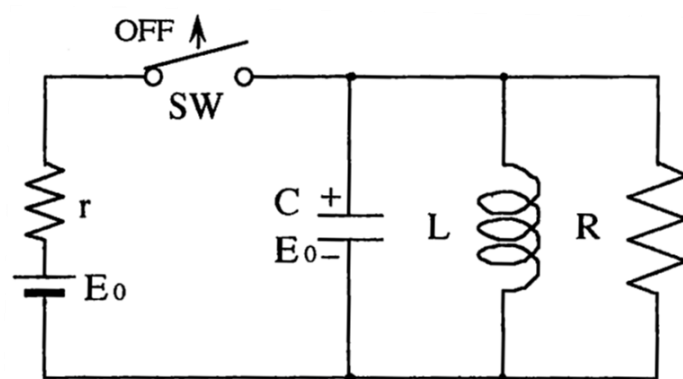


图 4.2 並列共振回路

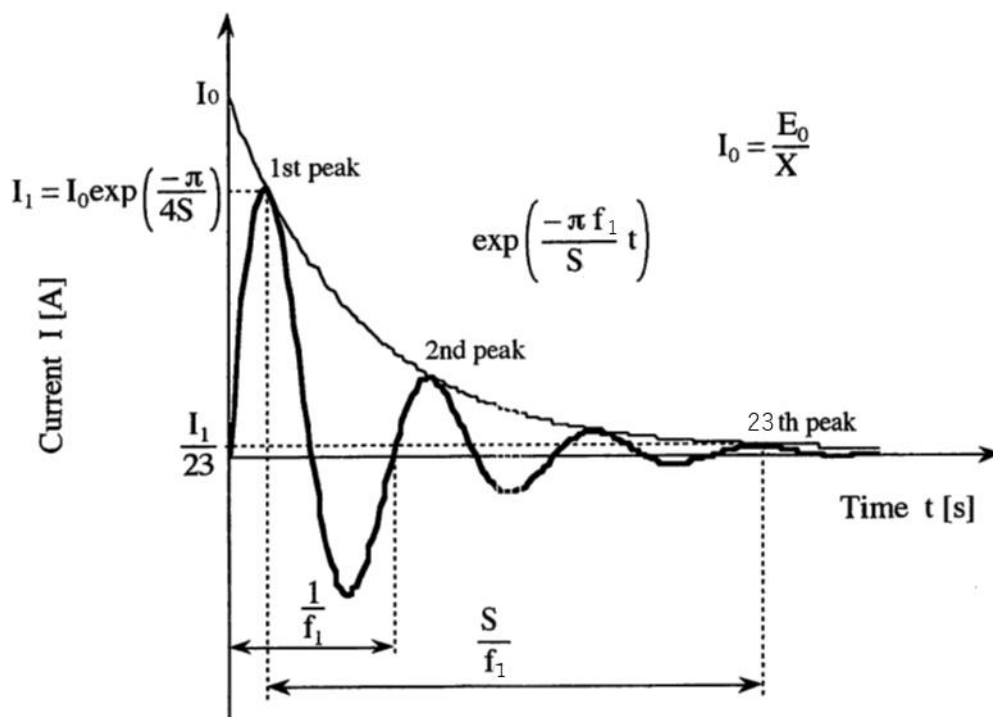


図 4.3 減衰振動波形（電流）

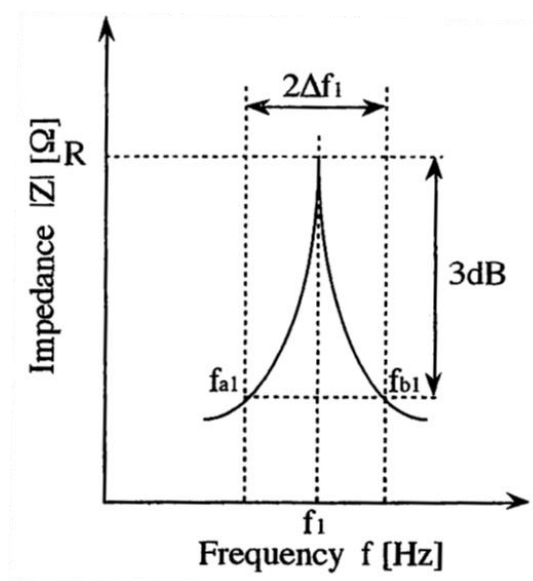


図 4.4 並列共振回路の  $f-|Z|$  特性

#### 4. 1. 1 電気接点間に発生するシャワリングアークの特徴

電気接点間で発生する放電の発生と持続条件を図 4.5 に示す。アーク放電は狭い接点間において電界より誘起された電子放出により発生し、低電圧でも放電開始して、大電流で維持

する。電子放出を発生するためには約  $0.5\text{MV/cm}$  の電位傾度が必要とされ、アーク放電は真空中でも発生する。接点間で発生するグロー放電は接点間距離が  $7.6\mu\text{m}$  で  $320\text{V}$  必要であり、距離がこれより大きくても小さくても電圧は高くなる。グロー放電開始後、グロー放電を維持するのに必要な電圧はグロー放電開始電圧より低く、接点間距離に関係なくほぼ一定である。このとき、放電の維持に必要な電流は数  $\text{mA}$  と言われ、グロー放電は高電圧・小電流の放電である[66-71]。

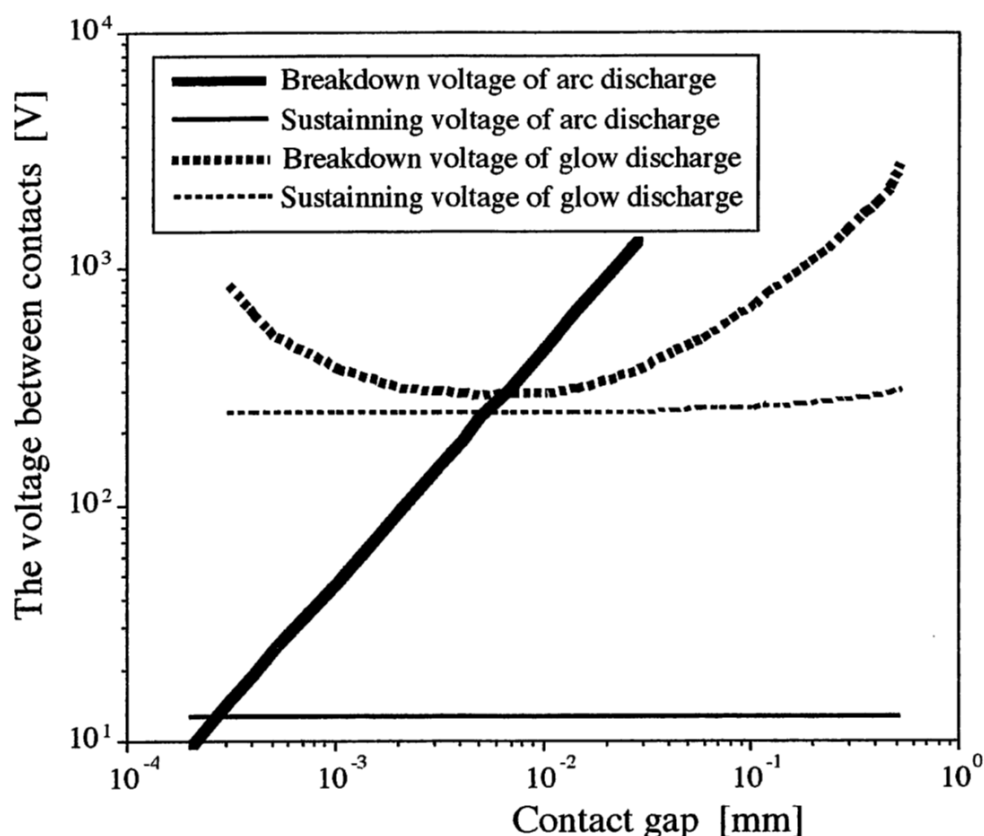


図 4.5 放電発生条件

電気接点開離時に発生する放電を実験的に明らかにするため、図 4.6 に示すように接点間の電圧  $V$  をデジタルオシロスコープ(Hewlett Packard 製:54510A, 周波数帯域  $250\text{MHz}$ ,  $1\text{G}$  サンプルング/s) にて測定した。また、電気接点には図 4.7 に示すリレー接点(オムロン社製:マルチコンタクトリレーLY-2,  $\text{DC}24\text{V}$  駆動)を用いた。ここで、抵抗負荷と誘導性負荷の 2 種類の負荷について実験を行ったが、負荷の  $f-|Z|$  特性はインピーダンスアナライザ(Hewlett Packard 製:4194A,  $100\sim 40\text{MHz}$ ) を用いて測定した。

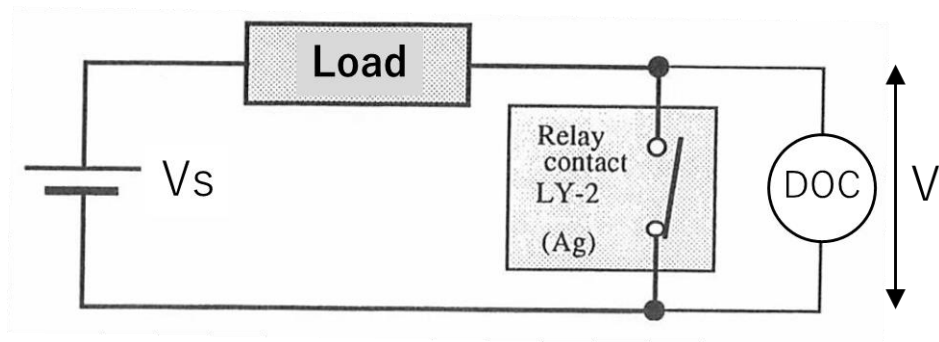


図 4.6 接点間電圧測定回路

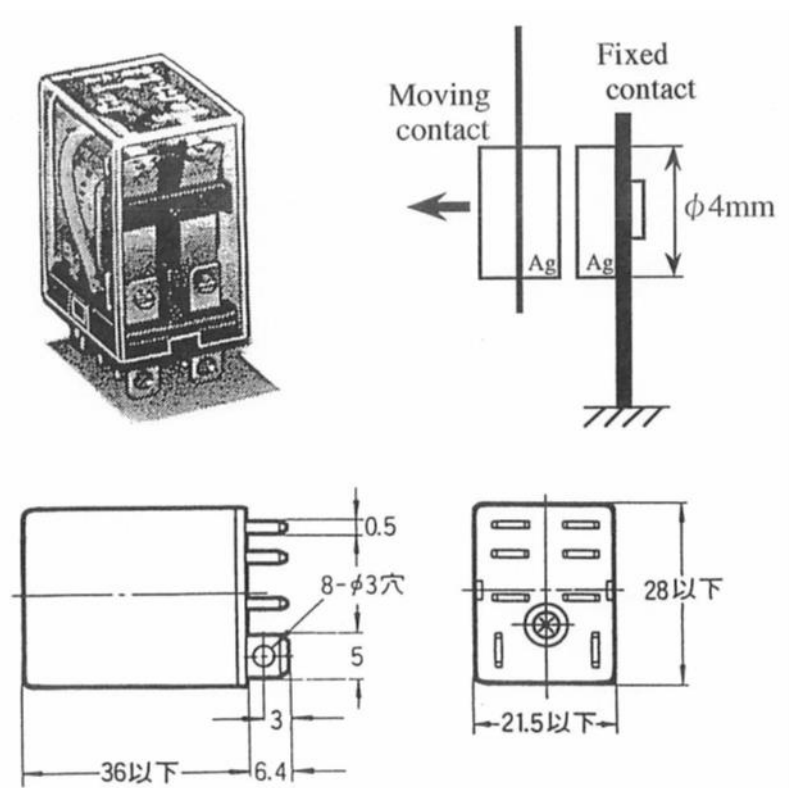


図 4.7 リレー接点の仕様 (LY-2)

図 4.8 に示す特性の抵抗負荷について、電源電圧 10V の回路を遮断したときの接点間の電圧波形を図 4.9、電源電圧 20V のときを図 4.10 に示す。抵抗負荷は  $30\Omega$  のセメント抵抗であり内部の抵抗体が巻線になっているため、 $300\text{kHz}$  を超える高周波ではインダクタンスの特性を示す。図 4.9 より接点間には接点開離後 250ns の間、アーク放電が発生しているのがわかる。図 4.10 ではアーク放電が  $200\mu\text{s}$  発生しており、肉眼でもアーク放電の発光が確認できた。

次に、図 4.11 に示す特性の誘導性負荷について、電源電圧 10V の回路を遮断したときの

接点間の電圧波形を図 4.12, 電源電圧 20V のときを図 4.13, 100V のときを図 4.14 に示す。誘導性負荷は直列抵抗  $3.2\text{k}\Omega$  の電磁石であり  $36\text{kHz}$  付近に並列共振点が存在する。図 4.12 より接点間には接点開離後  $80\mu\text{s}$  の間、間欠的にアーク放電が発生している。アーク放電の開始電圧は時間経過ごとに高くなり、アーク放電終了後は減衰振動波形となる。図 4.13 ではアーク放電が間欠的に発生した後にグロー放電が間欠的に発生している。グロー放電が発生している間の接点間電圧は  $320$  から  $370\text{V}$  の間で振動している。図 4.14 ではアーク放電が間欠的に発生した後にグロー放電が持続的に発生しており、青い発光が確認できた。また、文献[72]では放電波形からシャワリングアークを分類しており、図 4.12 の形状を B 形過渡現象、図 4.14 の形状を A 形過渡現象と呼んでいる。

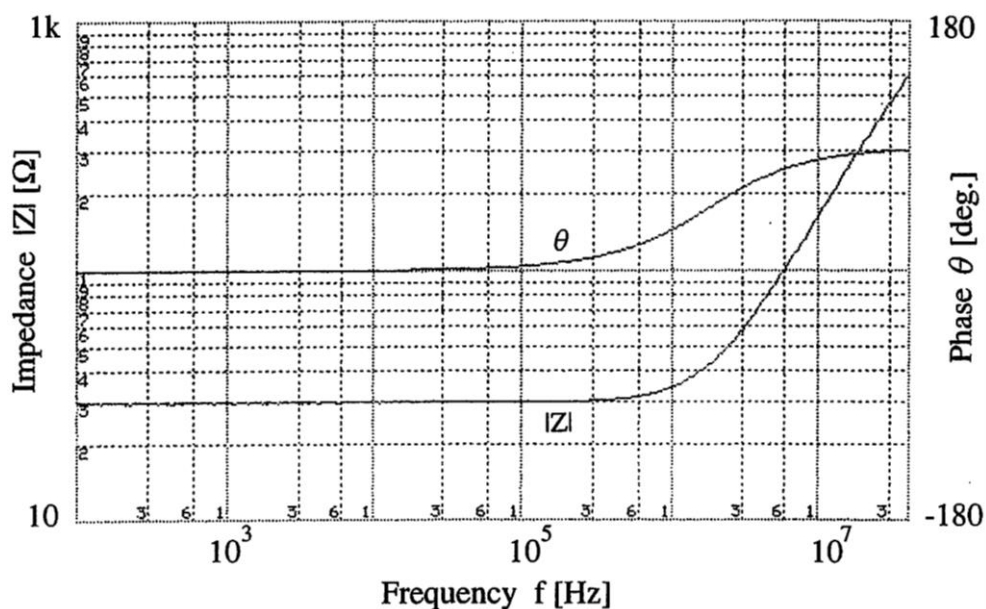


図 4.8 抵抗負荷のインピーダンス特性

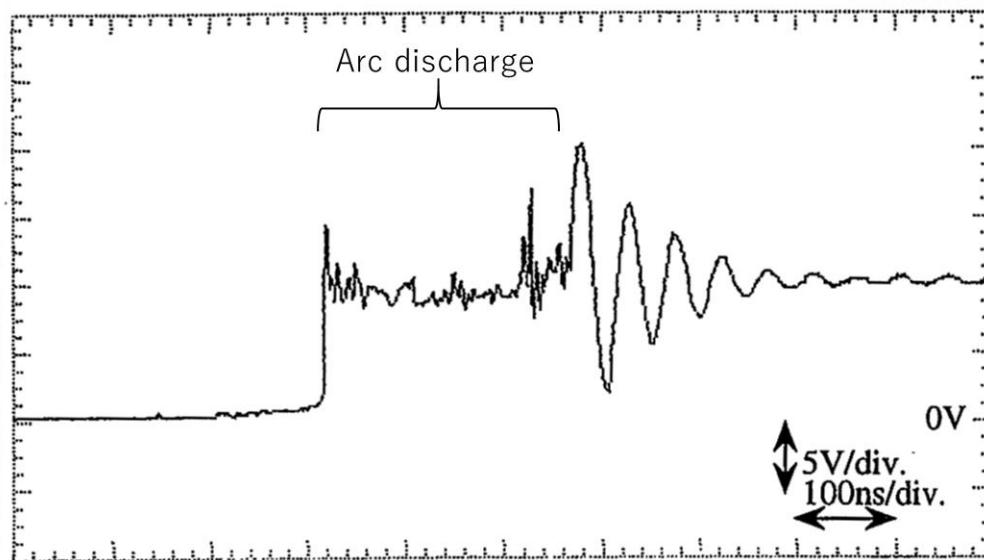


図 4.9 接点間電圧波形（抵抗負荷，電源電圧 10V）

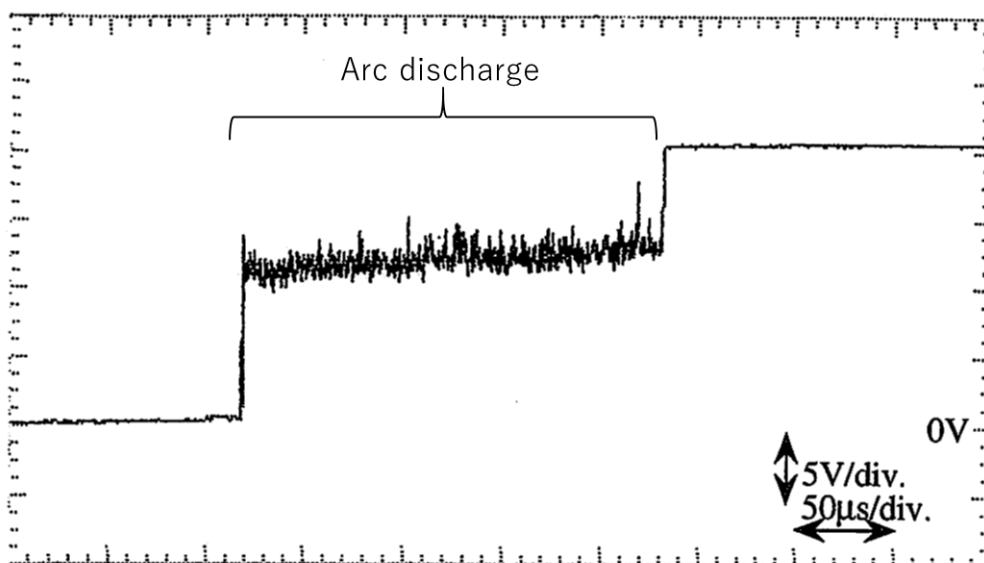


図 4.10 接点間電圧波形（抵抗負荷，電源電圧 20V）



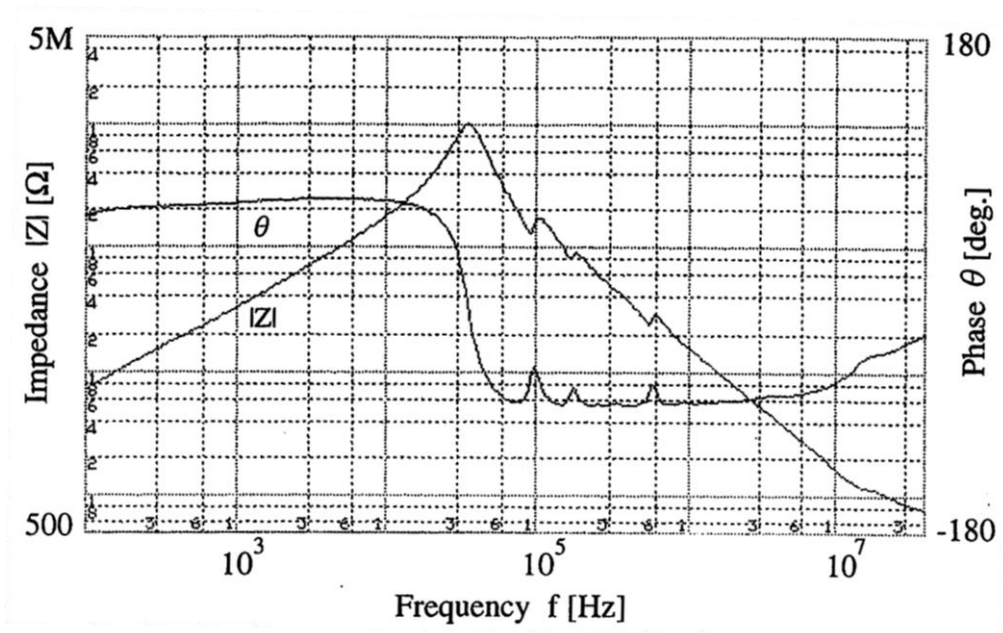


図 4.11 誘導性負荷のインピーダンス特性

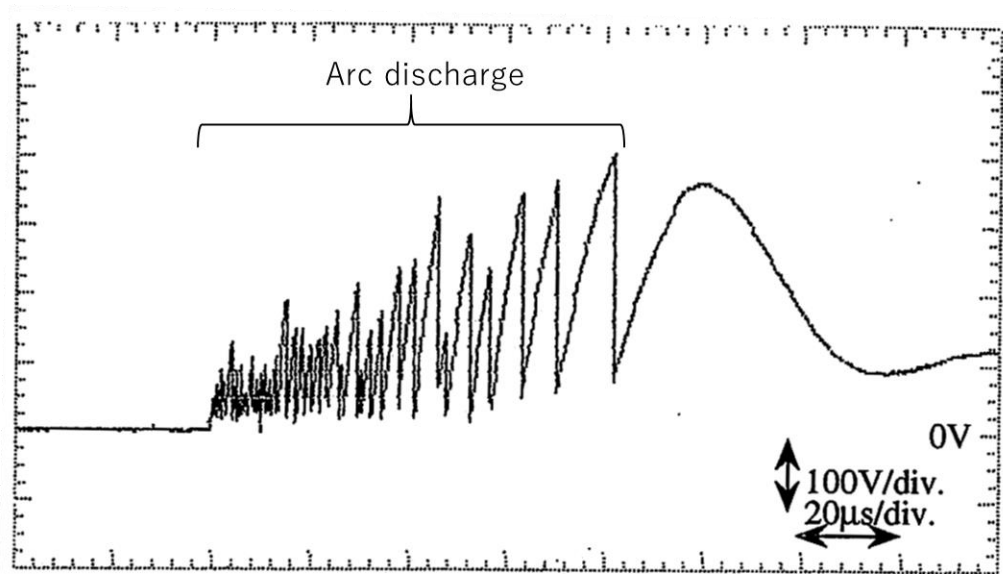


図 4.12 接点間電圧波形（誘導性負荷，電源電圧 10V）

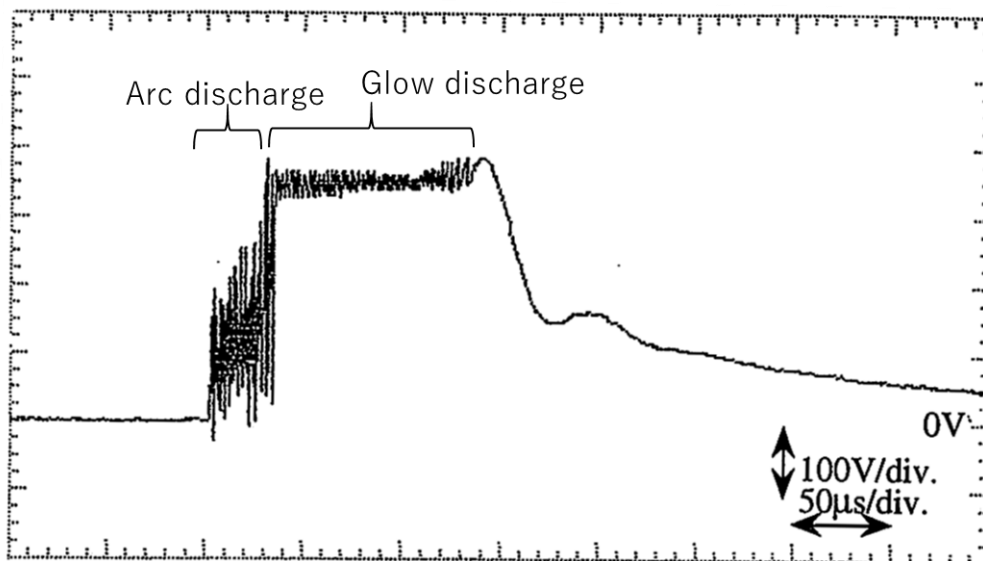


図 4.13 接点間電圧波形（誘導性負荷，電源電圧 20V）

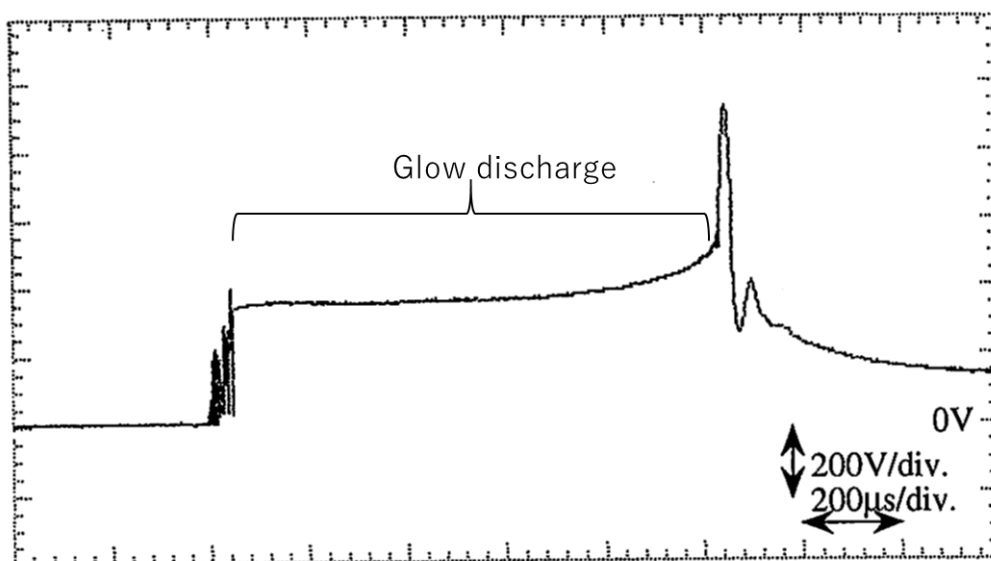


図 4.14 接点間電圧波形（誘導性負荷，電源電圧 100V）

電気接点間で発生する放電の発生条件は図 4.5 に示したように接点距離による。図 4.12 のようなシャワリングアークの発生メカニズムを明らかにするためには、接点開離時の接点間距離の時間変化を解明する必要がある[73, 74]。そこで、実験に使用したリレー接点（LY-2）の運動を解析するため、図 4.15 に示すようにリレー接点をモデル化した。モデルはリレーの電磁石に接触する部分の鉄片（質量  $M$ ）とコイルバネ（バネ定数  $k$ ）からなる 1 自由度振動系とし、接点閉成時に固定接点と接触している可動接点表面の中心部の運動を解析する。

モーメントの釣り合いより運動方程式を導くと(4.8)式が得られる。可動接点の角度  $\theta$  [rad] について  $\theta_0$  は接点閉成時の可動接点角度の初期値である。可動接点の固有振動数  $\omega$  [rad/s] は(4.9)式となり、接点間距離が微小のときは(4.10)式の近似式が適用できる。接点開離運動の式は(4.11)式となり、接点間距離  $X$  [mm] の時間変化が計算できる。

(4.11)式の接点間距離の時間変化のグラフを図 4.16 に示す。また、可動接点の運動をレーザー距離計 (Keyence 社: 可視光レーザ式変位センサ LB-100, アナログコントローラ RD) で測定した結果を図 4.17 に示す。両者は同様の結果を示し、モデルの妥当性が確認できる。

$$b^2 M \ddot{\theta} + a^2 k (\theta - \theta_0) = 0 \cdots (4.8)$$

$$\omega = \frac{a}{b} \sqrt{\frac{k}{M}} = 260 \cdots (4.9)$$

$$X = (b + c) \theta \cdots (4.10)$$

$$X = 16 \{1 - \cos(260t)\} \cdots (4.11)$$

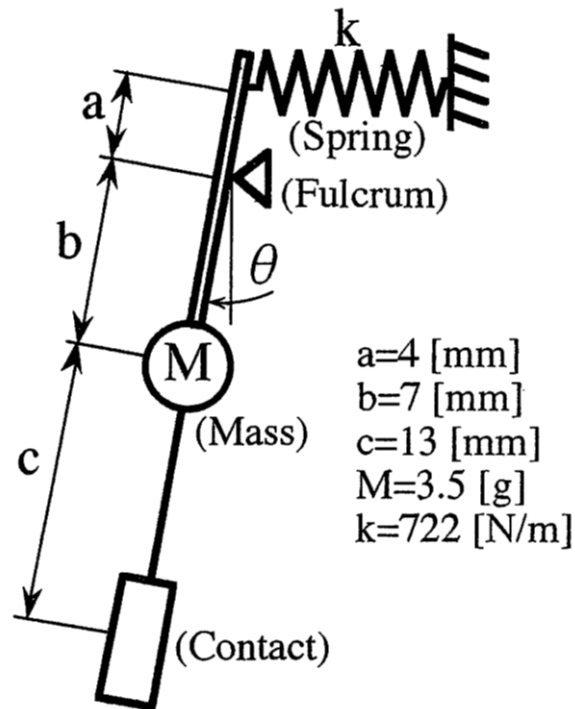


図 4.15 リレー接点のモデル

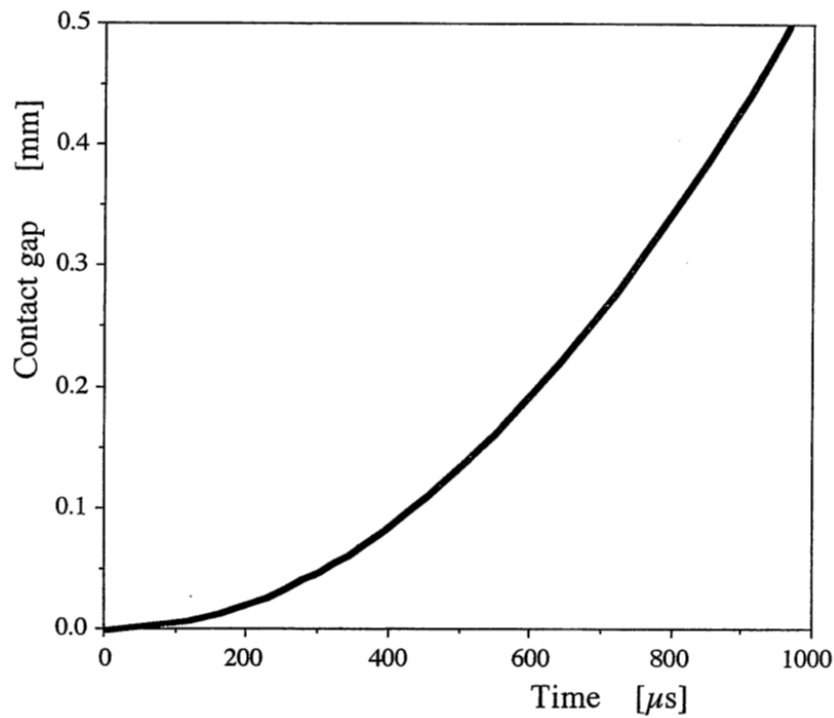


図 4.16 接点开離運動

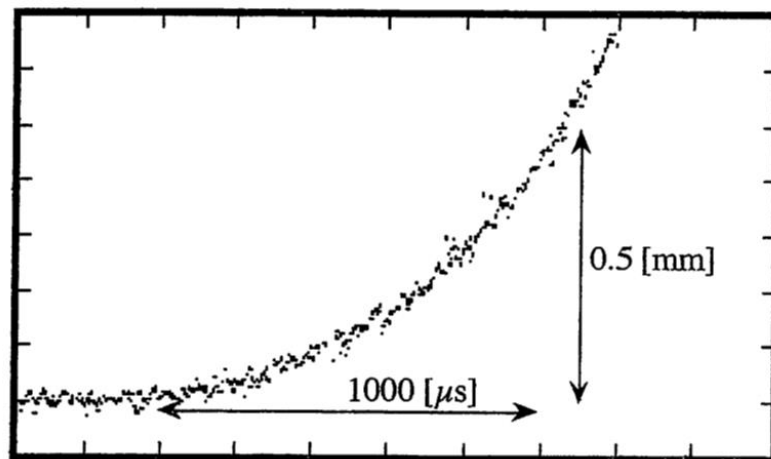


図 4.17 レーザ距離計による接点運動の測定結果

図 4.5 の電気接点間で発生する放電の発生条件を実験で使用したリレー接点 (LY-2) について、(4.11)式による時間領域の特性に変換した結果を図 4.18 に示す。そして、図 4.18 を用いて、図 4.12 のシャワリングアーク (B 形過渡現象) の模擬波形を図 4.19、図 4.14 のシャワリングアーク (A 形過渡現象) の模擬波形を図 4.20 に示す。図 4.19 では接点开離後に発生する減衰振動がアーク放電開始電圧に達するとアーク放電が発生し、電圧が低下する。このとき回路に流れる電流が小さく、アーク放電を維持できずにアーク放電は消滅し、

減衰振動が再び発生する。この間に接点間距離は長くなっているため、アーク放電開始電圧は高くなっており、減衰振動の電圧が放電開始電圧に達しなくなるまで上記の動作を繰り返す。図 4.20 では回路に流れる電流がアーク放電を維持できる大きさではないため、間欠的にアーク放電は発生するが、グロー放電は維持できるため持続的にグロー放電が発生していると考えられる。このように、減衰振動により発生した接点間の電圧は接点開離運動に従う放電の発生条件により、アーク放電またはグロー放電が発生し、回路の電流が大きい場合は放電が継続し、小さい場合は間欠的に発生するシャワリングアークになることが説明できる。

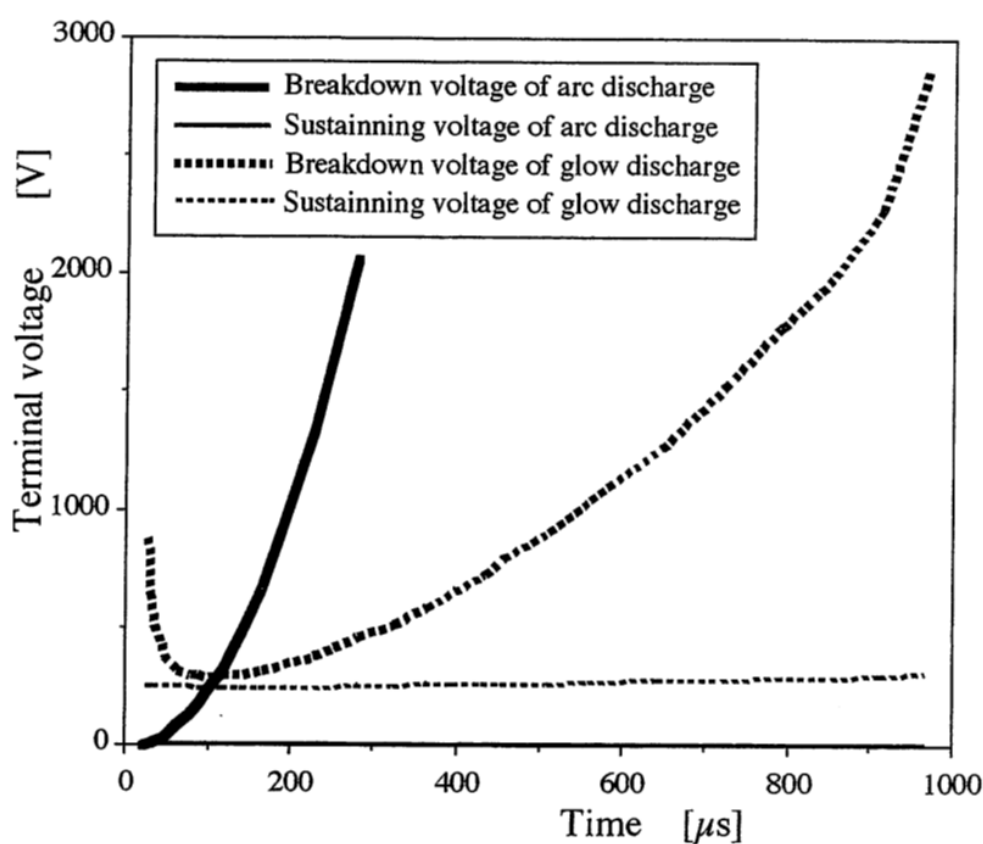


図 4.18 リレー接点 (LY-2) の放電発生条件

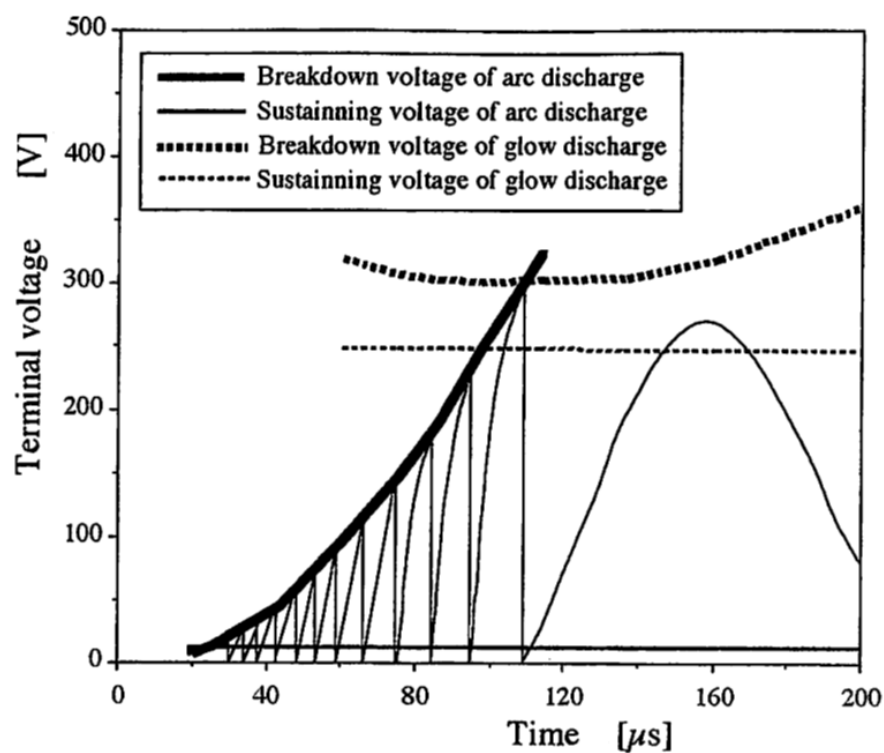


図 4.19 シャワリングアーク模擬波形 (B 形過渡現象)

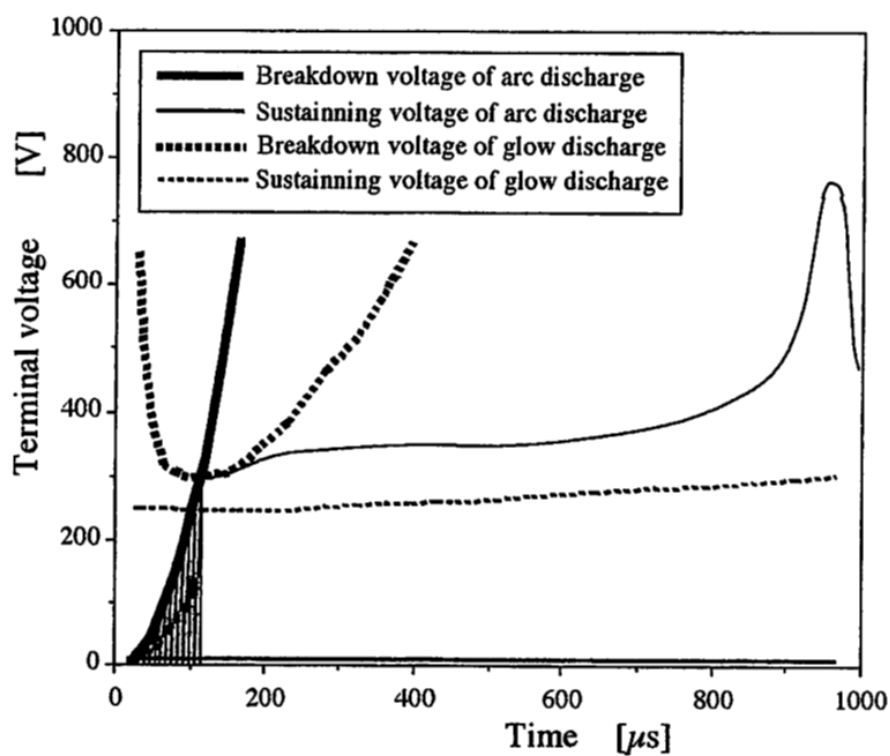


図 4.20 シャワリングアーク模擬波形 (A 形過渡現象)

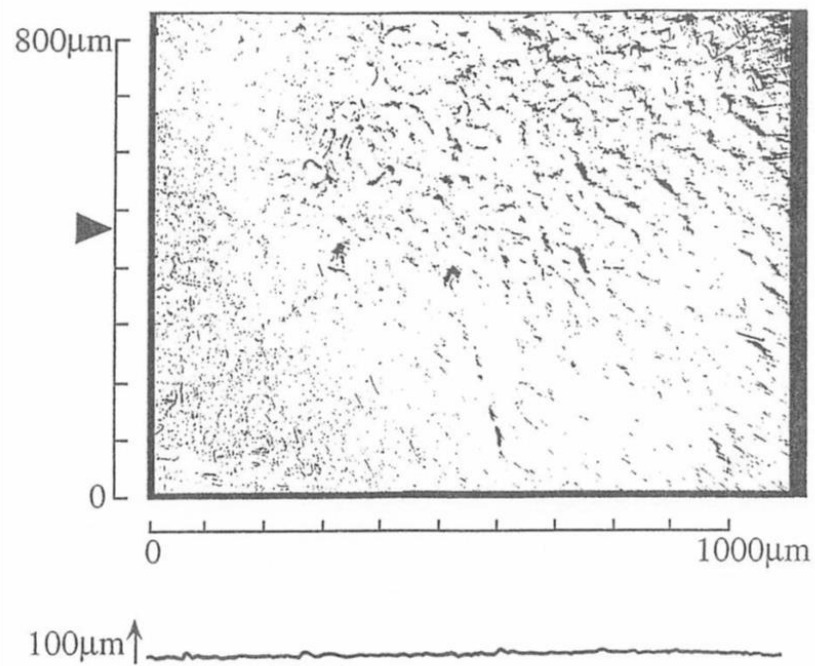
#### 4. 1. 2 電気接点の表面あらさとシャワリングアークの関係

電気接点が開閉する際に生じる接点表面の変化は、接点開離時に発生する放電によるものと、接点閉成時に生じるチャタリングの際に発生する放電と機械的な衝突によるものがあると考えられる。ここでは図 4.6 に示した実験回路と図 4.11 に示した誘導性負荷を用いて、リレー接点 (LY-2) を  $10^7$  回開閉したときのシャワリングアークと接点表面の変化を実験的に明らかにする。接点表面の観察は走査型レーザ顕微鏡 (レーザテック(株)製:1LM21W) を用いた[75-77]。

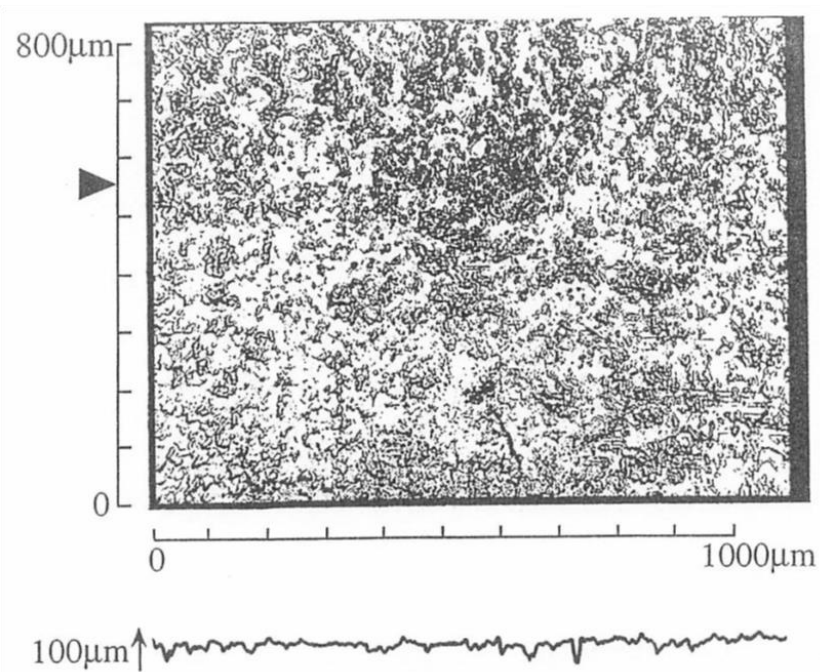
未使用の接点表面の写真を図 4.21 に示す。図 4.21 には►の位置の表面あらさも写真の下に示している。陽極よりも陰極の表面の方に凹凸がある。図 4.22 は  $10^4$  回開閉後の接点表面であるが、肉眼でも確認できるほどの放電痕が見られる。また、図 4.22 中の A 部とそれに向き合う B 部では鋭い凹凸が確認できる。図 4.23 は  $10^7$  回開閉後の接点表面であり、放電痕はさらに広がり、凹凸も大きくなっていることがわかる。

次に、シャワリングアークの電圧波形を示す。図 4.24 は未使用のリレー接点をはじめて開閉したときの電圧波形であり、図 4.25 は  $10^2$  回、図 4.26 は  $10^4$  回、図 4.27 は  $10^7$  回開閉後の電圧波形である。特徴的であるのは図 4.26 でグロー放電が間欠的に発生しており、図 4.27 では放電の発生が不規則になっていることである。 $10^7$  回開閉後は図 4.23 に示したように接点表面は荒れており、表面の状態によってもシャワリングアークの電圧波形は変化すると考えられる[78, 79]。

ここで、アーク放電やグロー放電の発生回数をカウントし、電気接点の開閉回数との関係を求める。カウント方法は図 4.28 に示すように電圧変化が大きくなる、接点間電圧が 0V 付近まで降下するときの現象をカウントするものである。放電発生回数の変化を図 4.29 に示す。接点開閉回数が  $10^0$  回の場合はシャワリングアーク 1 波形の放電発生回数をカウントしているが、その後、例えば  $10^2$  回の場合は 100 回から 109 回までの連続 10 波形の放電発生回数を平均している。接点開閉回数  $N$  ごとに放電発生回数  $d$  は変化し、接点開閉回数が  $10^4$  回になるまでは放電発生回数は減少していき、その後、増加する傾向があることがわかる。ただし、この結果はここでの実験回路や電気接点条件によるものである。



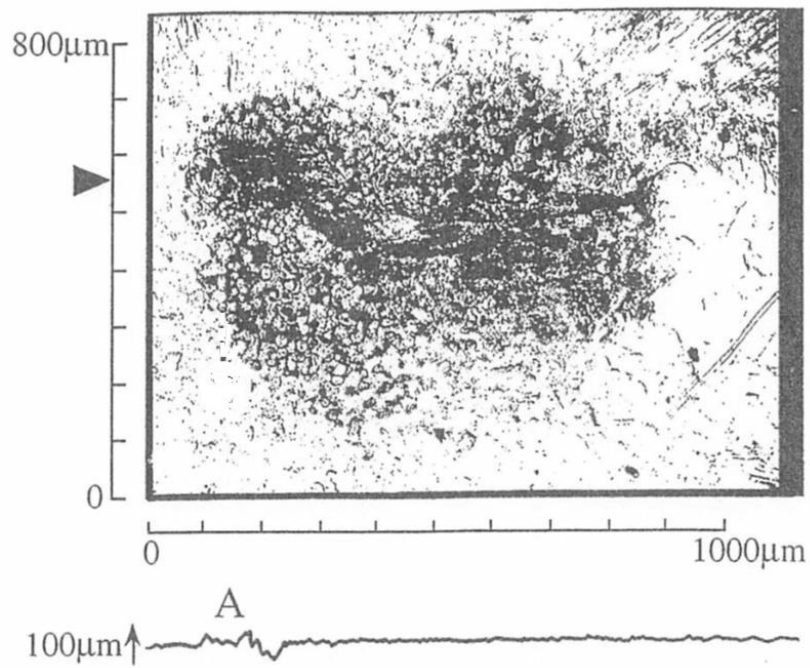
(a)陽極



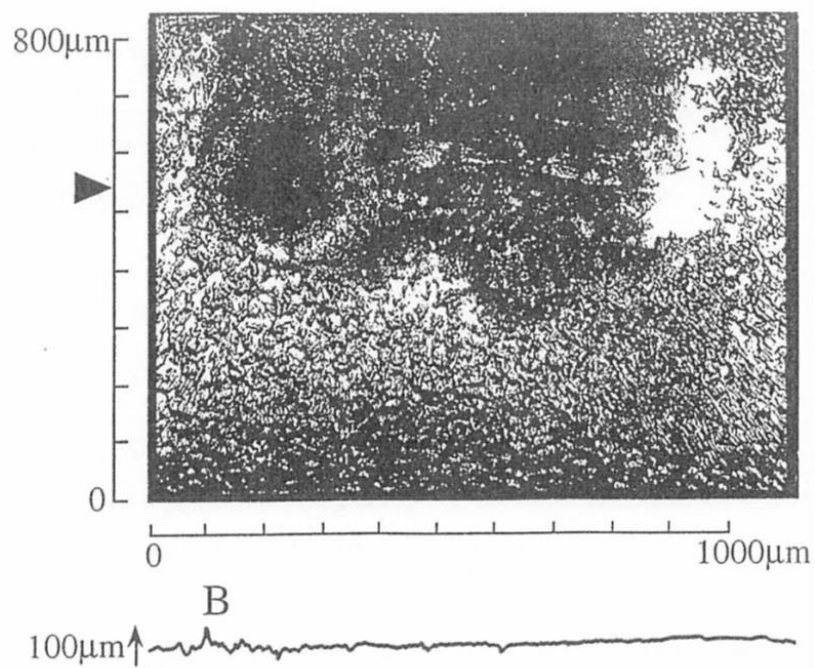
(b)陰極

図 4.21 未使用の接点表面



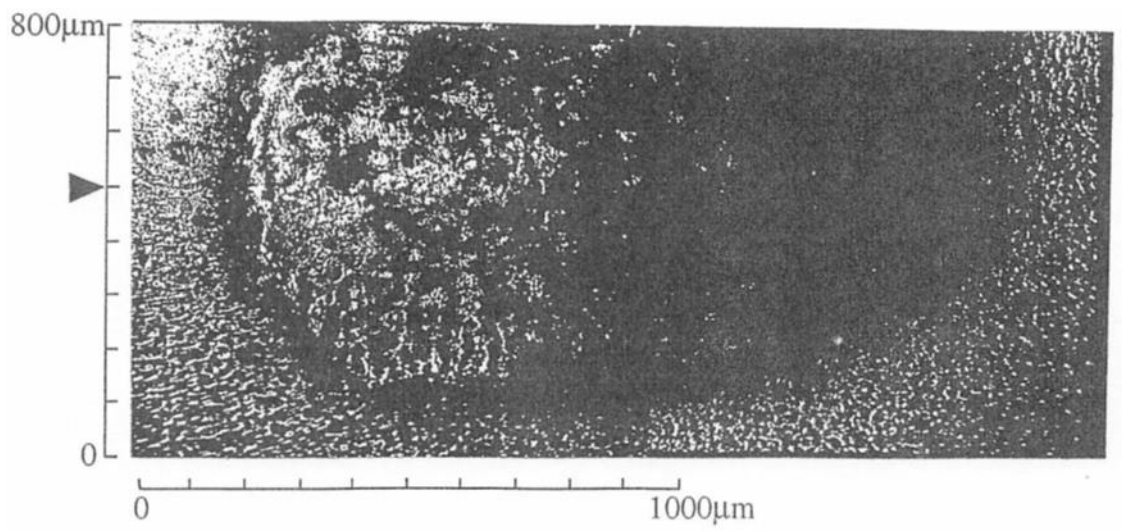


(a)陽極

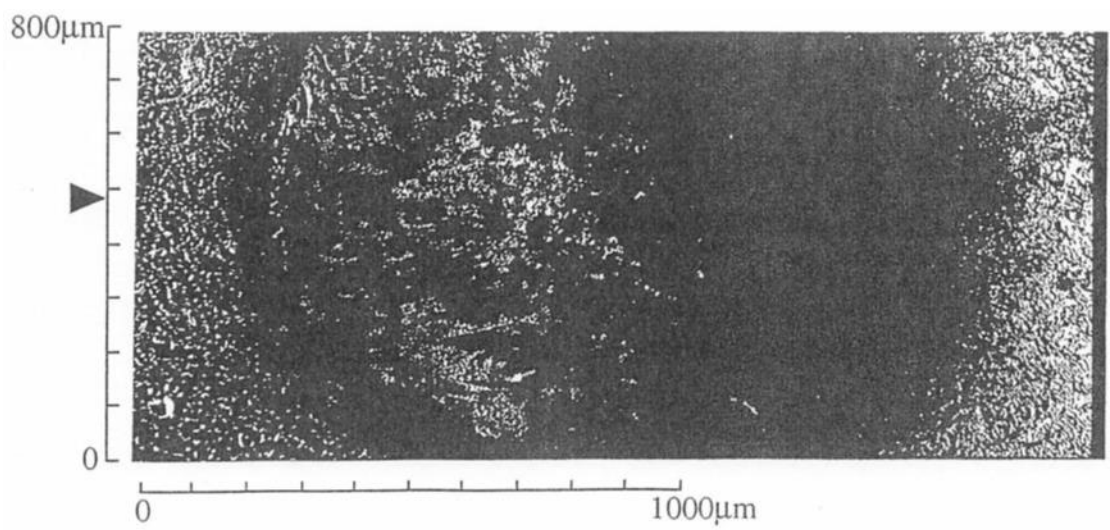


(b)陰極

図 4.22  $10^4$  回開閉後の接点表面



(a)陽極



(b)陰極

図 4.23  $10^7$  回開閉後の接点表面

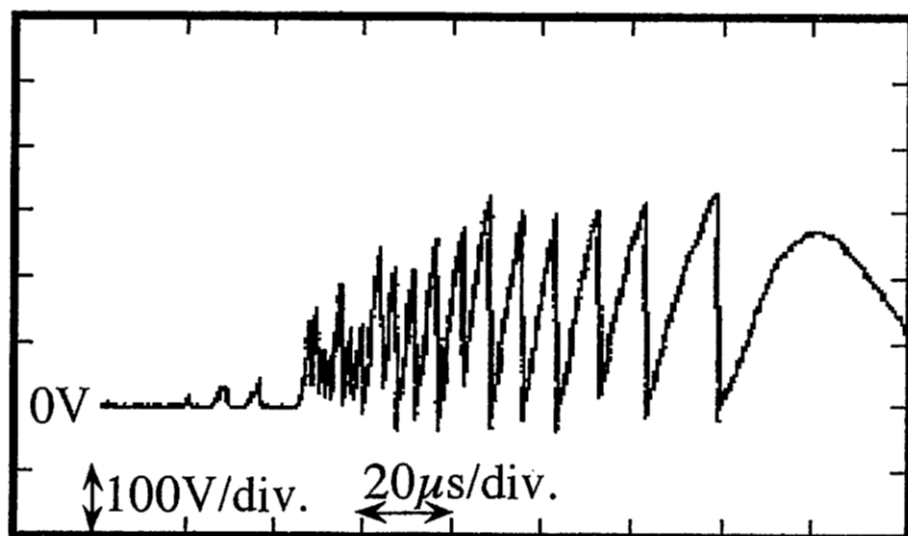


図 4.24 シャワリングアーク電圧波形（開閉回数 1 回）

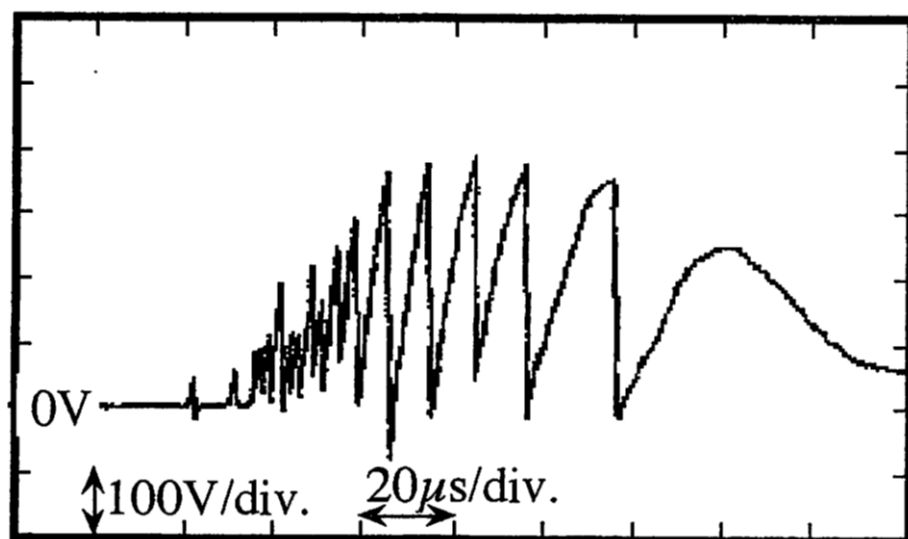


図 4.25 シャワリングアーク電圧波形（開閉回数 10<sup>2</sup> 回）

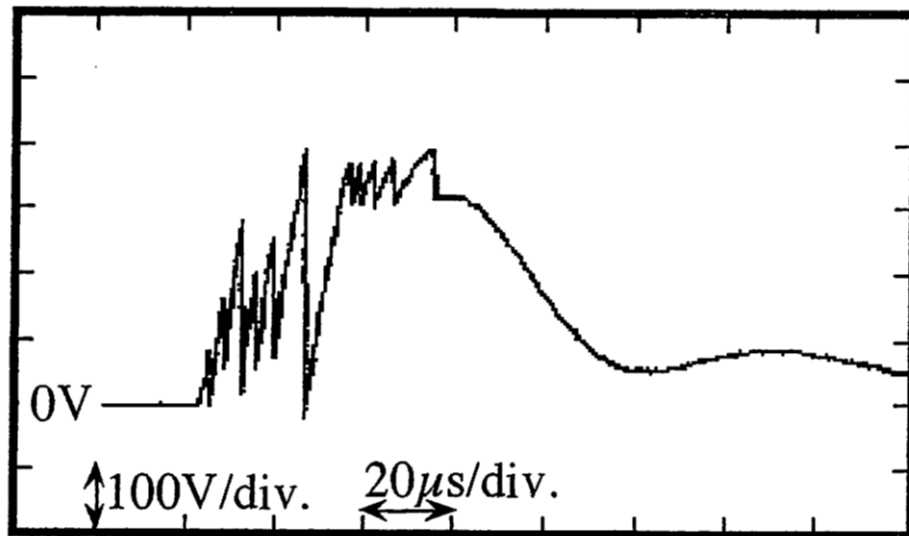


図 4.26 シャワリングアーク電圧波形（開閉回数  $10^4$  回）

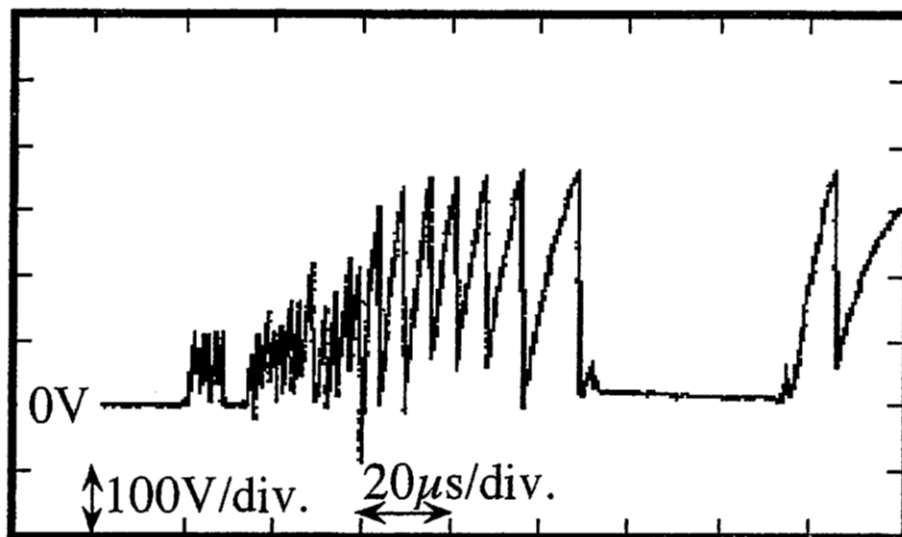
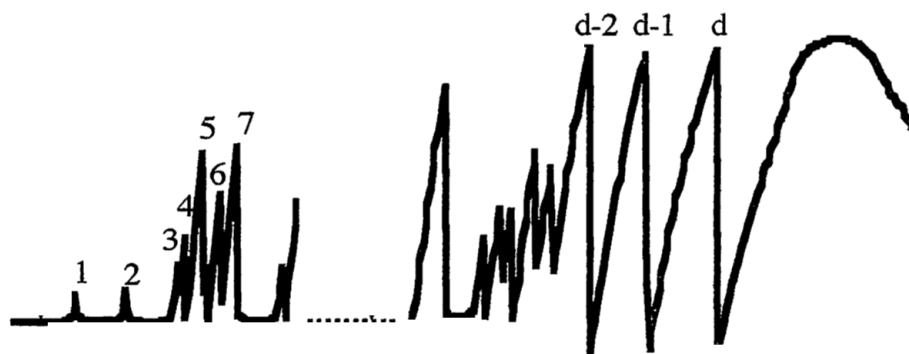


図 4.27 シャワリングアーク電圧波形（開閉回数  $10^7$  回）



$d$  : Number of arc discharges

図 4.28 放電発生回数のカウント方法

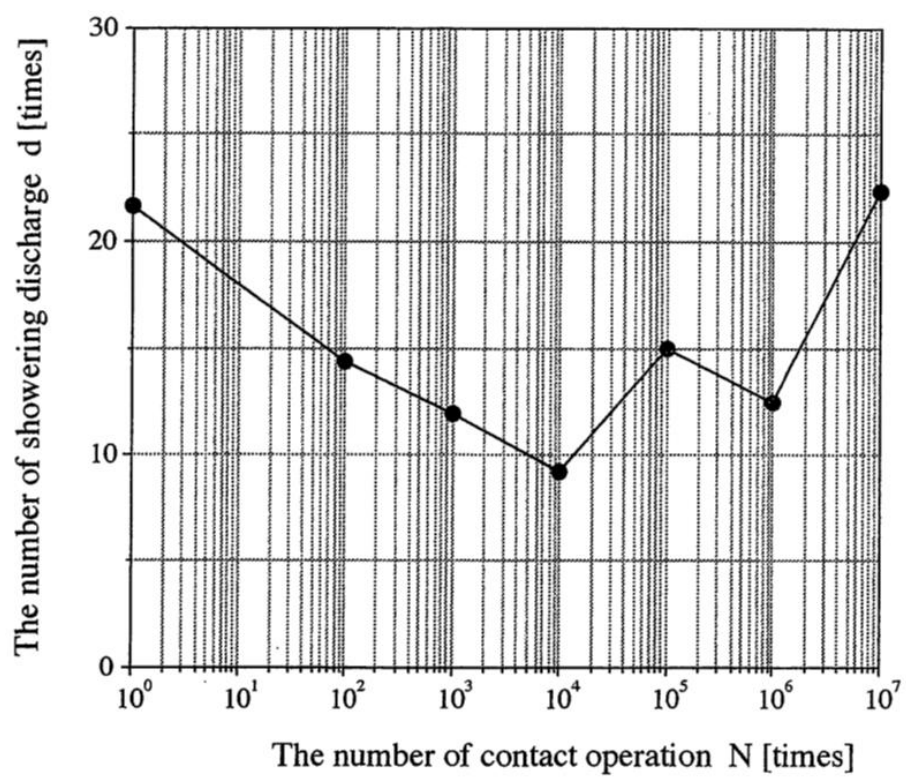


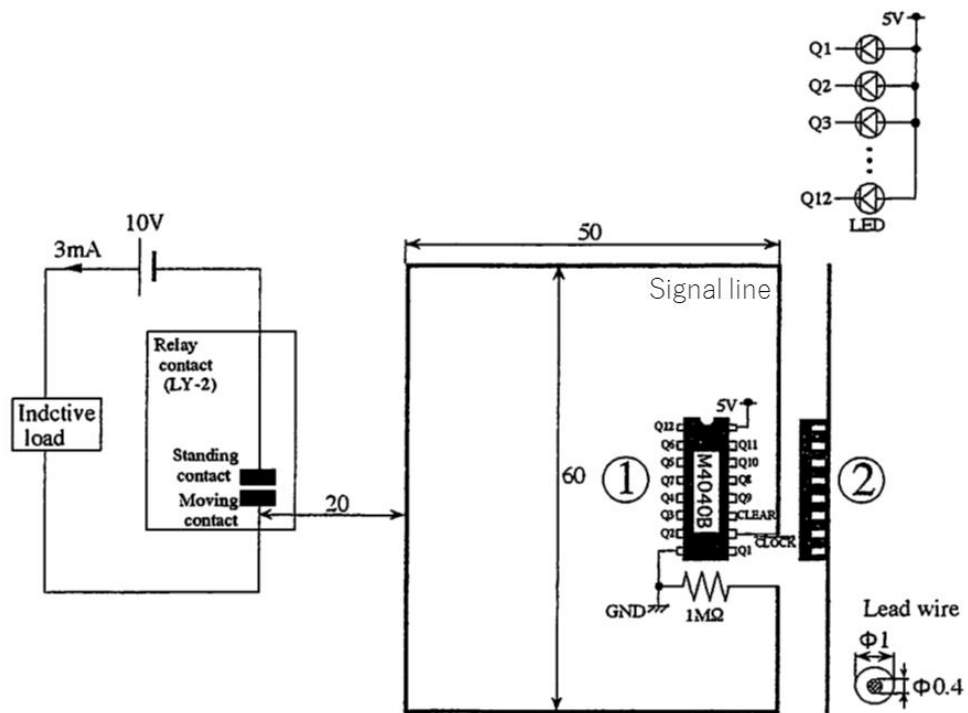
図 4.29 放電の発生回数の変化

#### 4. 1. 3 シャワリングアークによる電子回路への影響

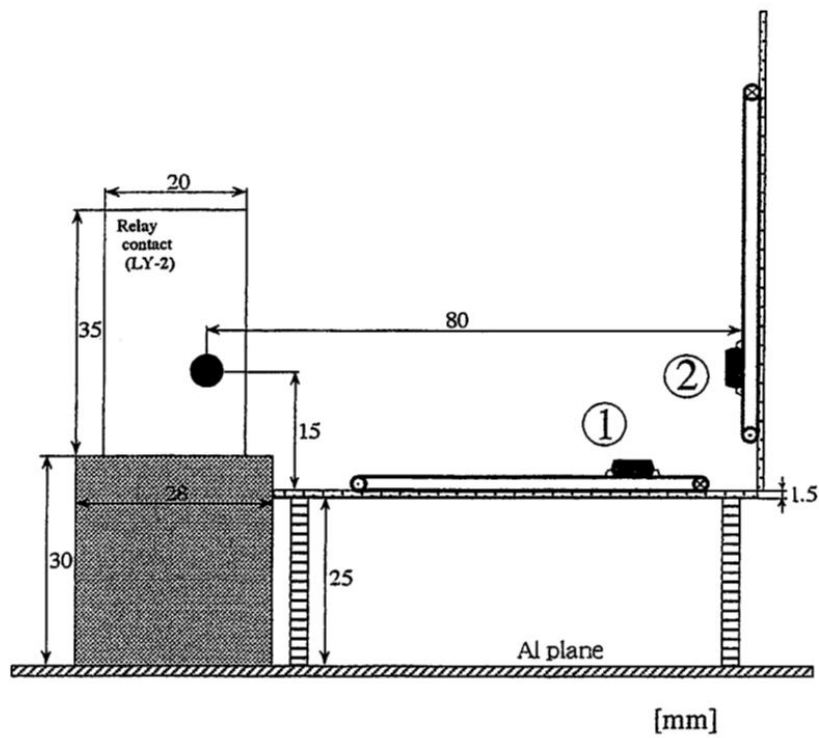
前項より、回路の電源電圧だけでなく、電気接点の表面状態によってシャワリングアークの電圧波形が変化することが明らかになった[80, 81]。本項では外部からの電磁雑音に敏感に反応する電子回路を作製し、シャワリングアークによる電子回路の反応を実験的に明らかにする。作製した電子回路は図 4.30 に示すようにバイナリカウンタ IC (CMOS 4040) のクロック信号入力端子に  $1\text{M}\Omega$  の抵抗と信号線をループ状に接続し、出力端子には LED をそれぞれ 12 個接続したものである。外部の電磁雑音による入力のカウントを誤動作として、出力端子の LED の発光でカウント数を測定した。また、電子回路は図 4.30 に示すように 2 つの同じ回路を①と②のように配置した。シャワリングアークを発生させる回路は、図 4.6 に示した実験回路と図 4.11 に示した誘導性負荷を用いて、リレー接点 (LY-2) を  $10^7$  回開閉させた。

①の電子回路の入力信号例を図 4.31 に、②の電子回路の入力信号例を図 4.32 に示す。入力信号レベルは①の電子回路ほうが大きいことがわかる。図 4.33 に出力端子の LED の発光によりカウントした誤動作の発生回数を示す。①の電子回路の誤動作発生回数  $C1$  は変化するが、②の電子回路の誤動作発生回数  $C2$  の変化は少ないことがわかる。次に、図 4.29 の放電発生回数  $d$  と図 4.33 の誤動作発生回数の関係を図 4.34 に示す。①の電子回路については放電発生回数と誤動作発生回数は比例関係の傾向があることがわかる。

誘導性負荷を含む回路の電気接点を開離するときに、接点間で発生するシャワリングアークは接点の表面状態により変化し、この変化に伴い、近傍の電子回路の誤動作の様相も変化する事例を実験により明らかにした。また、シャワリングアークの電磁雑音が周囲の電子回路に影響する場合、回路実装の工夫により影響度合いも変化することが実験的に明らかになった。



(a)回路図



(b)配置図

図 4.30 電子回路のシャワリングアーク誤動作実験装置

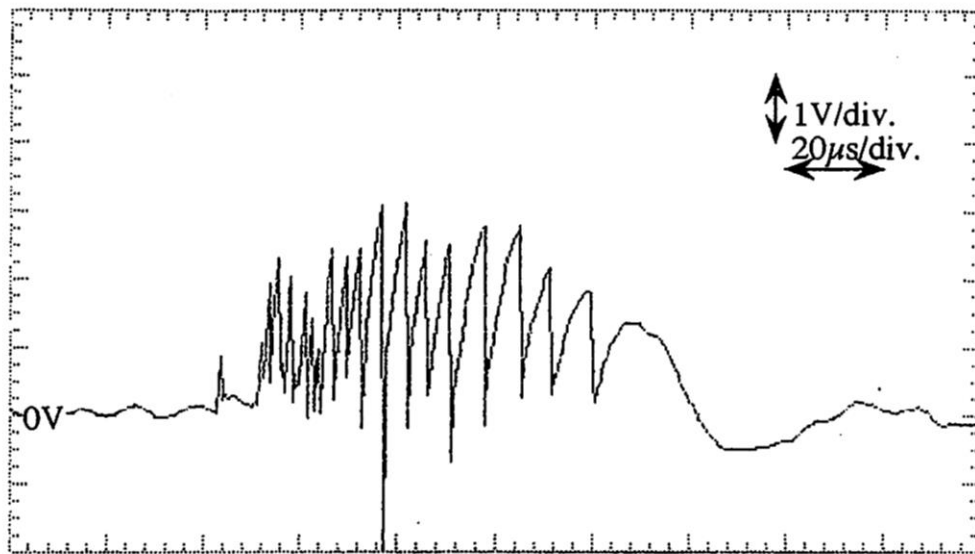


図 4.31 信号電圧波形 (①)

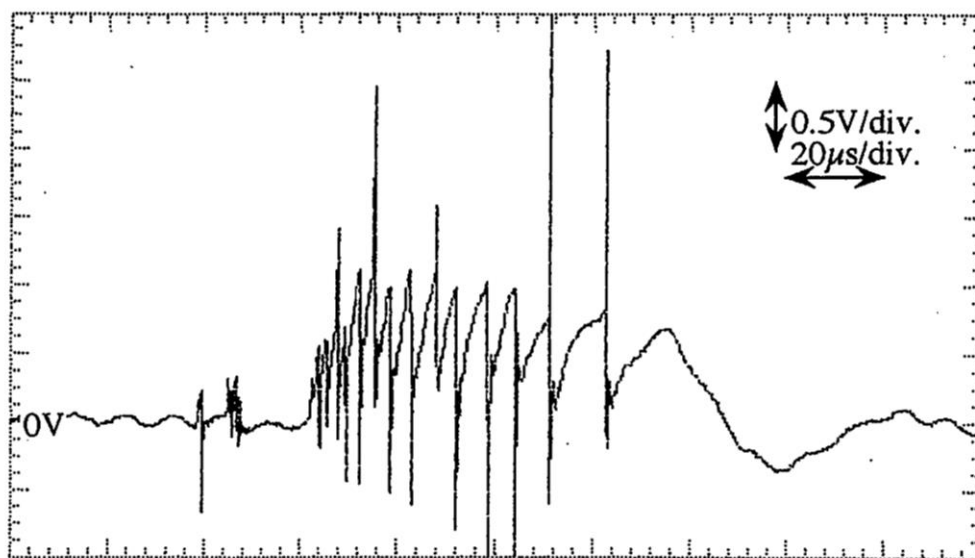


図 4.32 信号電圧波形 (②)



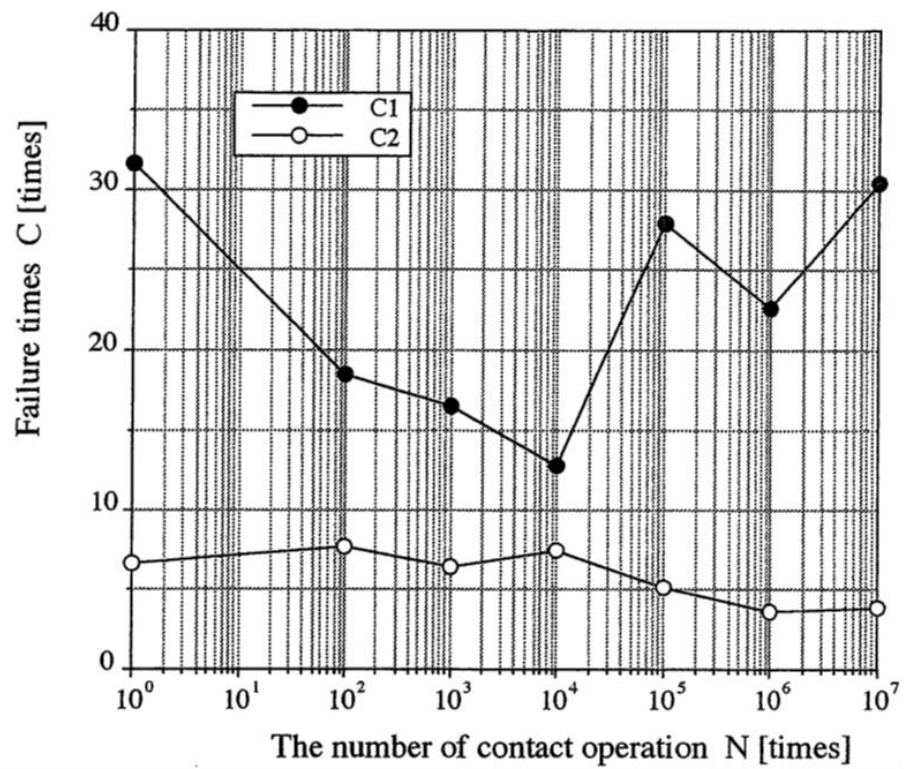


図 4.33 誤動作発生回数

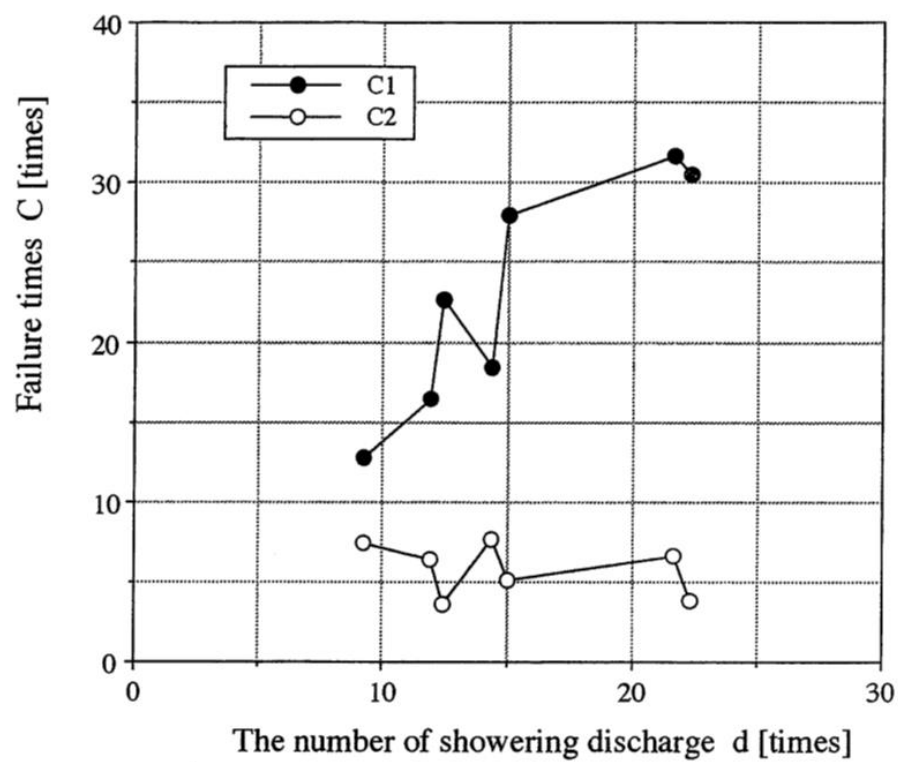


図 4.34 放電発生回数と誤動作発生回数の関係

## 5. 結言

我々の生活や産業活動において必要不可欠な電気は、発電所で発電され、送電線や変電所、配電線を経て需要家まで届けられる。近年の電力需要の増加に伴い、送電電圧は高電圧化し、送電線や変電所は巨大設備となり、配電線は網目状に広域に広がり、我々の生活環境に密接する設備となった。

電力設備が関係する環境問題としては、高電圧に起因する静電誘導や電界ばく露、高電界により発生するコロナ放電がある。放電現象はコロナ放電以外にも沿面放電や火花放電があり、放電現象による可聴騒音や電波雑音として放送や通信に影響することがある。また、自然現象の雷放電が電線路を伝搬し、需要家設備に影響することもある。

第2章では、超高圧の交流架空送電線を対象に送電線周囲の電界のレベルや分布を数値計算で明らかにし、送電線にドローンやロボットが近接する状況を想定した電子回路の電界ばく露実験を実施した。電子回路の電界ばく露実験から、電子回路の誤動作の特徴を明らかにし、電子回路の送電線までの安全離隔距離に関する評価手法を提案した。また、送電線の電線から発生するコロナ放電について、電線表面のぬれ性とコロナ放電の関係を明らかにし、電線表面の超撥水化や超親水化がコロナ放電低減手法であることを実験的に明らかにした。さらに、酸化チタンの溶射により超親水性を実現した低騒音スパイラル線を開発し、送電線実規模試験から、低騒音スパイラル線のコロナ騒音低減効果を定量的に明らかにした。

第3章では配電線を対象とし、配電線の不良がいしで発生する火花放電の特徴を実験的に明らかにし、火花放電の発生メカニズムを数値計算も併用した検討手法により解明した。さらに、火花放電の定量的な評価手法としてAPDが有効であることを示し、火花放電がデジタル地上波テレビ放送に及ぼす影響を明らかにした。また、自然現象の落雷が一般需要家の電源に雷過電圧として発生することを現地測定により確認し、雷過電圧の特徴と発生メカニズムを明らかにした。

第4章では、誘導性負荷を含む回路の電気接点間に発生するシャワリングアークの特徴を示し、シャワリングアークが接点の表面状態により変化することを実験的に明らかにした。そして、シャワリングアークが近接する電子回路の誤動作の原因となる場合、接点の表面状態によるシャワリングアークの変化が電子回路の誤動作様相にも影響することを明らかにした。

近年、電力設備と我々の生活が接近する状況が増え、送電線が関係する騒音や電波雑音が問題視されることも増えた。また、電力設備の保守・点検等で活用するドローンやロボット等の電子回路を搭載する機器の期待も大きく、これらの商用周波電界や磁界影響、また放電現象に伴う高周波の電波雑音の影響の検討は必須である。さらに今後、デジタル放送やデジタル無線通信の利用拡大においても、電力設備からの電波雑音は無視できない。電力設備における高電圧や放電現象は今後も重要な研究課題である。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，適切な御意見と御指導を賜りました東京農工大学 宇野亨教授，有馬卓司准教授に深く感謝します。

また，本研究の実験にあたり，御指導と御助言を賜りました横山茂先生，田邊一夫先生，富田誠悦先輩に深く感謝します。

最後に，研究の道に導いていただきました仁田周一先生には心から感謝します。

## 参考文献

- [1] 競争環境下における電力品質調査専門委員会,「競争環境下における電力品質」, 電気学会技術報告, 第 925 号, (2003)
- [2] 田辺 一夫, 河本 正, 須永 孝隆, 熊谷 博道, 竹下 和磨, 出口 義博, 福島 充男,「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] 宮島 清富, 椎名 健雄,「スパイラル線の影響を考慮した直流送電線下のイオン流帯電電圧の予測手法の開発ーコロナケージと実規模直流試験線による実験的検討ー」, 電中研研究報告 H18012, (2019)
- [4] 宮島 清富, 椎名 健雄, 平田 直樹, 北村 敏夫,「200kV 直流送電線のコロナ放電およびイオン流の特性」, 電学論 B, Vol.141 No.1 pp.36-42, (2021)
- [5] 一般社団法人 日本電気協会,「平成 29 年度 電気設備の技術基準とその解釈」, オーム社, (2017)
- [6] 田辺 一夫,「交流架空送電線から発生するコロナハム音の諸特性, 予測法, ならびに低減対策に関する研究」, 電中研総合報告 T60, (1999)
- [7] 中嶋 正夫,「配電線パルス障害」, (財)NHK 放送研修センター, (2007)
- [8] 仁田 周一, 上 芳夫, 佐藤 由朗, 杉浦 行, 瀬戸 信二, 藤原 修,「環境電磁ノイズハンドブック」, 朝倉書店, (1999)
- [9] 電気学会,「電気工学ハンドブック (第 6 版)」, オーム社, (2001)
- [10] 高木 相,「電気接点のアーク放電現象」, コロナ社, (1995)
- [11] 山崎 健一, 岩本 敏久, 河本 正, 藤波 秀雄,「各種電線路における交流磁界分布と磁界遮へい方策に関する検討」, 電学論 B, Vol.118-B No.6 pp.635-642, (1998)
- [12] 宮島 清富, 椎名 健雄,「架空送電線近傍電磁界の無人航空機に及ぼす影響の基礎検討」, 電中研研究報告 H07010, (2008)
- [13] 宮島 清富, 有馬 卓司, 宇野 亨,「交流送電線近傍の電子回路の安全離隔距離に関する基礎検討」, 電学論 A, Vol.140 No.11 pp.516-521, (2020)
- [14] 中屋 耕, 大石 祐嗣, 鈴木 準平,「送電線と樹木の離隔計測への小型無人飛行機の適用性評価」, 電中研研究報告 V15004, (2016)
- [15] 宮下 充史, 黒野 正裕,「設備保全フィールドセンサネットワークの構成手法 (その 4)ー変電所構内における無線センサノードの位置推定精度ー」, 電中研研究報告 R15011, (2016)
- [16] 大谷 哲夫, 宮下 充史, 黒野 正裕, 片山 茂樹, 石原 祐二, 田中 立二,「変電所設備保全センサネットワークの構成手法ー無線通信とプラグアンドプレイ機能の連携方法改良ー」, 電中研研究報告 R15008, (2016)
- [17] 石野 隆一,「塗装すべき経年鉄塔の選定に役立つ画像処理技術の開発ー空撮画像からの鉄塔抽出手法の開発ー」, 電中研研究報告 C16009, (2017)

- [18] 電気協同研究会,「環境と共生する電力流通技術」, 電気協同研究 第 57 巻 第 4 号, (2002)
- [19] 福島 充男,「送電線のコロナ騒音」, 電中研総合報告 T01, (1986)
- [20] 架空送電線路のコロナ・風音対策技術調査専門委員会,「架空送電線路のコロナ・風音対策技術」, 電気学会技術報告, 第 976 号, (2004)
- [21] 宮島 清富, 田辺 一夫,「架空送電線表面の超撥水処理によるコロナ騒音低減」, 電学論 B, Vol.121 No.1 pp.136-137, (2001)
- [22] 宮島 清富, 田辺 一夫,「表面改質した交流架空送電線のコロナ騒音評価」, 電学論 B, Vol. 126 No. 4 pp. 415-420, (2006)
- [23] 宮島 清富, 上野 嘉之, 田辺 一夫,「表面改質による交流架空送電線のコロナ騒音低減対策手法の開発」, 電中研研究報告 T03021, (2004)
- [24] 辻井 薫,「撥水・撥油の技術と材料」, シーエムシー, (2008)
- [25] 樋口 貞雄, 宮島 清富, 小林 陽, 古谷 正裕, 河村 浩孝, 田辺 一夫,「超高压送電線のコロナ障害対策に向けた酸化チタン化合物の親水性評価」, 電中研研究報告 Q04018, (2005)
- [26] 樋口 貞雄, 宮島 清富, 古谷 正裕, 小林 陽, 河村 浩孝, 田辺 一夫,「プラズマ溶射法により作製した酸化チタン化合物の親水性評価」, 電学論 A, Vol.126 No.8 pp.857-862, (2006)
- [27] 宮島 清富, 樋口 貞雄, 立松 明芳, 田辺 一夫,「低騒音スパイラル線のコロナ特性評価ー酸化チタン溶射によるスパイラル線のコロナ騒音低減法ー」, 電中研研究報告 H05004, (2006)
- [28] 宮島 清富, 樋口 貞雄, 田辺 一夫,「低コロナ騒音スパイラル線の開発と耐候性評価」, 電中研研究報告 H07007, (2008)
- [29] 電気設備学会 雷保護対策検討委員会,「雷と高度情報化社会」, 電気設備学会, (1999)
- [30] 電中研 耐雷設計委員会 配電分科会,「配電線耐雷設計ガイド」, 電中研総合報告 T69, (2002)
- [31] 配電線雷被害率予測手法調査専門委員会,「配電線雷スパークオーバ発生率予測手法の現状と今後の課題」, 電気学会技術報告, 第 937 号, (2003)
- [32] 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)
- [33] 高須 登, 木村 茂, 増田 光夫,「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)
- [34] 宮島 清富,「電力設備で生じる放電現象の広帯域電波特性ー劣化した配電用がいしから発生する電波雑音ー」, 電中研研究報告 H07010, (2008)
- [35] 宮島 清富,「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ー低発生頻度パルス性電波雑音の評価手法の提案ー」, 電中研研究報告 H11013, (2012)

- [36]宮島 清富,「連結金具に接触不良のあるがいし連で生じる火花放電の特性」, 電学論 A, Vol.136 No.10 pp.629-634, (2016)
- [37]野田 琢, 三木 貫, 宜保 直樹, 竹中 清,「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)
- [38]清水 康敬, 杉浦 行,「電磁妨害波の基本と対策」, コロナ社, (1995)
- [39]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)
- [40]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)
- [41]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)
- [42]CISPR/TR 16-3 Ed.3.0., “Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods-Part 3:CISPR technical reports” (2010-8)
- [43]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)
- [44]ARIB TR-B14,「地上デジタルテレビジョン放送運用規定」, 一般社団法人 電波産業会, (2002)
- [45]ARIB STD-B31,「地上デジタルテレビジョン放送の伝送方式」, 一般社団法人 電波産業会, (2007)
- [46]川口 英, 辰巳 博章,「地デジ受信機のしくみ」, CQ 出版株式会社, (2010)
- [47]総務省 郵政事業庁 電気通信技術審議会,「第 1 1 7 回電気通信技術審議会議事録」, (1999)
- [48]宮島 清富,「パルス性電波雑音がデジタル地上波テレビ放送に及ぼす影響の評価手法の提案」, 電中研研究報告 H12009, (2013)
- [49]宮島 清富, 横山 茂,「低圧配電線における雷過電圧の測定とその発生メカニズムの検討」, 電中研研究報告 T01026, (2002)
- [50]宮島 清富, 横山 茂,「引込線に重畳する雷過電圧の発生メカニズムの解明」, 電中研研究報告 H04008, (2006)
- [51]竹山 説三,「電磁気学現象理論」, 丸善株式会社, (1962)
- [52]後藤 健一, 山崎 修一郎,「詳解 電磁気学演習」, 共立出版株式会社, (1979)
- [53]五島 久司, 本山 英器, 和田 淳, 新藤 孝敏,「冬季雷を対象とした雷撃電流に伴う磁界の特性に関する検討」, 電中研研究報告 T96063, (1997)
- [54]五島 久司, 本山 英器, 和田 淳, 新藤 孝敏,「冬季雷の高構造物落雷時における雷撃

- 電流と近傍の過渡電磁界特性」, 電中研研究報告 T98012, (1999)
- [55] 仁田 周一, 「電子機器のノイズ対策法」, オーム社, (1986)
- [56] 富田 誠悦, 宮島 清富, 「系統連系用インバータからの電磁妨害(その3) -共振型小型インバータからのTV放送への影響と対策-」, 電中研研究報告 T00008, (2001)
- [57] 富田誠悦, 宮島 清富, 「需要家機器間の電磁両立性に関する研究(1) -伝導性電磁雑音源ならびに伝送線路の特性評価-」, 電中研研究報告 H09011, (2010)
- [58] 科学情報出版, 「月刊 EMC」, 2014 年 12 月号 (No. 320), (2014)
- [59] スマートグリッド・コミュニティの EMC 問題調査専門委員会, 「スマートグリッドにおける EMC 課題」, 電気学会技術報告, 第 1448 号, (2018)
- [60] 住友スリーエムノイズ対策研究会, 「ノイズ対策 シールド材料と手法」, 情報調査会, (1989)
- [61] Gordon W. Mills, "The Mechanisms of the Showering Arc", IEEE Trans. Materials and packaging, Vol.PMP-5, No.1, pp.47-55 (1969-3)
- [62] 沢 孝一朗, 浅川 聡, 上木 忠勇, 宮地 邦夫, 「各種アーク放電の接触抵抗に及ぼす影響」, 信学論 C, Vol. J68-C No.7 pp.540-547, (1985)
- [63] 宮島 清富, 仁田 周一, 武藤 篤生, 「電気接点の機械的挙動と接点間放電の関係」, 信学論 B, Vol.J82-B No.8 pp.1578-1585, (1999)
- [64] S. Nitta, A. Mutoh, N. Yamakoshi, and T. Shimayama, "Generation Mechanism of R. F. Noise on Power Lines", Report of URSI -Environmental and Space Electromagnetics- (Updated Version of Int'l URSI Symp.), pp.392-409 (1992-12)
- [65] 本郷 忠敬「基礎 過渡現象」, オーム社, (1992)
- [66] 王 河元, 「放電」, 共立出版, (1975)
- [67] 電気学会, 「放電ハンドブック」, オーム社, (1975)
- [68] 土屋 金弥, 「電気接点技術」, 総合電子出版社, (1980)
- [69] 武田 進, 「気体放電の基礎」, 東京電機大学出版局, (1990)
- [70] 赤尾 保男, 「環境電磁工学の基礎」, 電子情報通信学会, (1991)
- [71] Henry W. Ott, "Noise Reduction Techniques in Electronic System", Bell Telephone Laboratories Incorporated, (1976)
- [72] A. M. Curtis, "Contact Phenomena in Telephone Switching Circuits", Bell Syst. Tech. J., 19, 99.40-62 (1940)
- [73] 宮島 清富, 仁田 周一, 武藤 篤生, 「シャワリングノイズ波形の発生機構に関する研究」, 日本機械学会 第 34 回学生員卒業研究発表講演会演説前刷集, 95-3-15. 藤沢市, p.129, (1995)
- [74] 宮島 清富, 仁田 周一, 武藤 篤生, 「電気接点の機械的挙動と接点間放電の関係」, 信学技法, EMCJ95-65 pp.57-61, (1995)
- [75] 宮島 清富, 仁田 周一, 武藤 篤生, 「接点表面形状モデルの提案」, 信学技法, EMCJ96-

43 pp.49-56, (1996)

- [76]谷口 修,「機械計測法」, 養賢堂, (1959)
- [77]奈良 治郎,「表面アラサ測定器」, 日刊工業新聞社, (1962)
- [78]S. Nitta, A. Mutoh, and K. Miyajima, “Generation Mechanism of Showering Noise Waveforms -Effect of Contact Surface Variations and Moving Velocity of Contact-”, IEICE Trans. Commun., Vol.E79-B, No.4, pp.468-473 (1996-4)
- [79]K. Miyajima, S. Nitta, and A. Mutoh, “A Proposal on Contact Surface Model of Electromagnetic Relays -Based on the Change in Showering Arc Waveforms with the Number of Contact Operations-”, IEICE Trans. Commun., Vol.E81-C, No.3, pp.399-407 (1998-3)
- [80]武藤 篤生, 仁田 周一, 菅沼 英明, 宮島 清富,「シャワリングノイズと接点供給電圧の関係」, 信学技法, Vol.94 No.457 pp.45-50, (1995)
- [81]A. Mutoh, S. Nitta, H. Suganuma, and K. Miyajima, “”, Proc. Of 1995 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Atlanta Marriott Marquis August 14-18, pp.590-595 (1995)



## 研究業績

### 1. 学術論文

- (1) 宮島 清富, 椎名 健雄, 平田 直樹, 北村 敏夫, 「200kV 直流送電線のコロナ放電およびイオン流の特性」, 電学論 B, Vol.141 No.1 pp.36-42, (2021)
- (2) 宮島 清富, 有馬 卓司, 宇野 亨, 「交流送電線近傍の電子回路の安全離隔距離に関する基礎検討」, 電学論 A, Vol.140 No.11 pp.516-521, (2020)
- (3) 宮島 清富, 田辺 一夫, 「架空送電線表面の超撥水処理によるコロナ騒音低減」, 電学論 B, Vol.121 No.1 pp.136-137, (2001)
- (4) 宮島 清富, 田辺 一夫, 「表面改質した交流架空送電線のコロナ騒音評価」, 電学論 B, Vol. 126 No. 4 pp. 415-420, (2006)
- (5) 宮島 清富, 「連結金具に接触不良のあるがいし連で生じる火花放電の特性」, 電学論 A, Vol.136 No.10 pp.629-634, (2016)
- (6) 宮島 清富, 仁田 周一, 武藤 篤生, 「電気接点の機械的挙動と接点間放電の関係」, 信学論 B, Vol.J82-B No.8 pp.1578-1585, (1999)
- (7) K. Miyajima, S. Nitta, and A. Mutoh, “A Proposal on Contact Surface Model of Electromagnetic Relays -Based on the Change in Showering Arc Waveforms with the Number of Contact Operations-”, IEICE Trans. Commun., Vol.E81-C, No.3, pp.399-407 (1998-3)

### 2. 電力中央研究所 研究報告書

- (1) 宮島 清富, 椎名 健雄, 「スパイラル線の影響を考慮した直流送電線下のイオン流帯電電圧の予測手法の開発 -コロナケージと実規模直流試験線による実験的検討-」, 電中研研究報告 H18012, (2019)
- (2) 宮島 清富, 椎名 健雄, 「架空送電線近傍電磁界の無人航空機に及ぼす影響の基礎検討」, 電中研研究報告 H07010, (2008)
- (3) 宮島 清富, 上野 嘉之, 田辺 一夫, 「表面改質による交流架空送電線のコロナ騒音低減対策手法の開発」, 電中研研究報告 T03021, (2004)
- (4) 宮島 清富, 樋口 貞雄, 立松 明芳, 田辺 一夫, 「低騒音スパイラル線のコロナ特性評価 -酸化チタン溶射によるスパイラル線のコロナ騒音低減法-」, 電中研研究報告 H05004, (2006)
- (5) 宮島 清富, 樋口 貞雄, 田辺 一夫, 「低コロナ騒音スパイラル線の開発と耐候性評価」, 電中研研究報告 H07007, (2008)
- (6) 宮島 清富, 「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-」, 電中研研究報告 H07010, (2008)

- (7) 宮島 清富,「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–」, 電中研研究報告 H11013, (2012)
- (8) 宮島 清富,「パルス性電波雑音がデジタル地上波テレビ放送に及ぼす影響の評価手法の提案」, 電中研研究報告 H12009, (2013)
- (9) 宮島 清富, 横山 茂,「低圧配電線における雷過電圧の測定とその発生メカニズムの検討」, 電中研研究報告 T01026, (2002)
- (10) 宮島 清富, 横山 茂,「引込線に重畳する雷過電圧の発生メカニズムの解明」, 電中研研究報告 H04008, (2006)

### 3. 国際委員会

- (1) 宮島清富,「Characteristics of Spark Discharge on Faulty Insulation」, CISPR B WG2 meeting in Bangkok Thailand, (2012)
- (2) 宮島清富,「Immunity of Digital Terrestrial Broadcasting Against Spark Discharge」, CISPR B WG2 interim meeting in Tokyo Japan, (2013)
- (3) 宮島清富,「An Evaluation Method of BER of Digital Terrestrial Television Broadcasting Signal Using APD of Gap Noise」, CISPR B WG2 meeting in Ottawa Canada, (2013)

### 4. 口頭発表・解説

- (1) 宮島清富, 仁田周一, 武藤篤生,「電気接点の機械的挙動と接点間放電の関係 –シャワリングノイズの発生機構-」, EMCJ95-65, 機械振興会館, 1995-11
- (2) 宮島清富, 仁田周一, 武藤篤生,「接点表面形状モデルの提案 –接点動作回数に伴うシャワリングノイズ波形の変化-」, EMCJ96-43, 機械振興会館, 1996-10
- (3) 宮島清富, 仁田周一, 武藤篤生, Jen-Shin Chang,「誘導性負荷を持つ接点のシャワリングノイズと放電現象」, EMCJ96-122, 機械振興会館, 1996-3
- (4) Kiyotomi MIYAJIMA, Seietsu TOMITA, “Compensating Method of CRT Display Jitter Caused by An External Magnetic Field”,1999 International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC’99 TOKYO, Tokyo, 1999-5
- (5) 宮島清富, 山崎健一, 富田誠悦,「オフィスにおける環境磁界の測定」, 平成 11 年電気学会電力・エネルギー部門大会, pp.523-524, 福岡工業大学, 1999-8
- (6) 宮島清富, 山崎健一, 富田誠悦,「オフィスビル内の環境磁界と CRT 磁気シールド装置の開発」, EMCJ99-122, 東京農工大学, 2000-1
- (7) 宮島清富, 田辺一夫,「架空送電線のぬれ性とコロナ騒音の関係」, EMCJ2000-51, 電力中央研究所泊江研究所, 2000-8
- (8) 宮島清富, 横山茂,「低圧配電線に重畳する雷過電圧の測定」, EMC-01-2, 電気学会電磁環境研究会, 2001-8
- (9) 宮島清富, 横山茂,「電源線に重畳する雷サージの測定」, H13 電気学会 A 大会, 愛媛

大学, 2001-9

- (10)宮島清富, 横山茂, 「低圧配電線における雷過電圧の測定」, EMCJ2002-82, 信学技法, 2002-11
- (11)宮島清富, 横山茂, 「Measurement of Lightning Overvoltages on Low-Voltage Power Distribution Lines」, IWHV2003, 九州大学国際研究交流プラザ, 2003-1
- (12)宮島清富, 横山茂, 「引込線端子電圧に重畳する雷過電圧の発生メカニズムの解明」, H15 電気学会 A 大会, 長岡技術科学大学, 2003-8
- (13)Kiyotomi MIYAJIMA, Kazuo TANABE, “Evaluation of Audible Noise from Surface Processing Conductors for AC Overhead Transmission Line”, 2007 Wiley Periodicals, Inc.
- (14)宮島清富, 「PLC 信号と伝導妨害へのイミュニティ」, EMC 関西'07 セミナー, 2007-10
- (15)宮島清富, 「配電用がいし金具の接触不良箇所から発生する放射電磁波の特性」, IM-08-32, 電気学会計測研究会, 2008-6
- (16)宮島清富, 「放電現象に伴う電磁雑音の APD 測定と TV 放送への影響」, 第 12 回 APD 応用研究会, 2014-10
- (17)宮島清富, 渡邊卓磨, 椎名健雄, 平田直樹, 北村敏夫, 「直流送電線に用いられる電線のコロナ電流特性」, H29 電気学会全国大会, 富山大学, 2017-3
- (18)宮島清富, 椎名健雄, 山崎健一, 「無人航空機の商用周波電界・磁界イミュニティ試験法の検討」, 電気学会 電磁環境研究会 10 月, あきた芸術村, 2017-10
- (19)宮島清富, 「Basic Study on Electromagnetic Field Affecting Unmanned Aerial Vehicles near AC Transmission Lines」, 2018 East Asia Electric Technology Research Workshop, ホテルメトロポリタン仙台, 2018/11/21
- (20)宮島清富, 「架空送電線の点検用ドローンの電磁界影響評価」, 平成 31 年電気学会全国大会 (企業セッション), 2019/03/13
- (21)宮島清富, 椎名健雄, 「架空送電線の保守点検作業に活用されるドローンの電磁界影響評価手法の検討」, 平成 31 年電気学会全国大会 (シンポジウム), 2019/03/12
- (22)宮島清富, 椎名健雄, 「直流送電線近傍電磁界の無人航空機に及ぼす影響の基礎検討」, 電気学会 電磁環境技術委員会, 2020/02/18
- (23)宮島清富, 「架空送電線の点検・診断技術に関する最近の研究開発動向」, 電気学会 電力・エネルギー部門 電線・ケーブル技術委員会, 2019/11/07
- (24)宮島清富, 田辺一夫, 「交流架空送電線の表面改質によるコロナ騒音低減法」, 電気現場技術, Vol.44 No.514, 2005-3
- (25)宮島清富, 「架空送電線のコロナ低減法に挑む」, 月刊エネルギー, Vol.37 No.12 2004
- (26)宮島清富, 樋口貞雄, 小林陽, 田辺一夫, 「表面改質による送電線のコロナ騒音低減対策」, ナノパーティクルテクノロジーハンドブック, 日刊工業新聞社, 2006/04/28
- (27)宮島清富, 「AC Overhead Transmission Line Audible Noise Reduction Measures Using Surface Improvement」, NPT ハンドブック英語版, NPT ハンドブック英語版出版事務

局, 2007-09

- (28)宮島清富,「送電線の撥水化／親水化」, 撥水・撥油の技術と材料, シーエムシー出版, 2008-12
- (29)宮島清富,「ドローンの電磁環境への耐性を評価する試験法を構築」, 電気評論 (特集: 電力中央研究所における研究開発状況), 2019/2
- (30)宮島清富,「電中研におけるドローンの電磁界影響の研究について」, 電気新聞, 2018/9/27
- (31)宮島清富,「架空送電線の保守・点検におけるドローンの活用と電磁界の影響」, 月刊 EMC 11 月号, 2020-11

## 5. 特許

- (1) 宮島清富,「ブラウン管の磁気シールド装置」, 共同出願 (北海道電力, 東北電力, 東京電力, 電源開発), H10/10/14 出願 (平 10-291644), H12/04/28 公開 (特開 2000-125317), 登録番号 3569136 (H16/06/25)
- (2) 宮島清富,「CRT の映像動揺低減装置」, 共同出願 (北海道電力, 東北電力, 東京電力, 電源開発), H12/10/11 出願 (特願 2000-311199), 登録番号 3571285 (H16/07/02)
- (3) 宮島清富,「架空送電線」, 単独出願, H12/08/31 出願 (特願 2000-262940)
- (4) 宮島清富, 田辺一夫,「架空送電線の風騒音低減用装着物」, 特願 2004-025703, 特開 2005-218279
- (5) 宮島清富, 山崎健一, 上村敏,「地絡事故地点検出方法, 装置およびプログラム」, 出願番号 2008-266750, 公開番号 2010-96594