

# 電気工学的アプローチによる 安心安全な社会構築

工学研究院電気電子工学研究系 教授 大塚 信也



## はじめに

今回はこのような研究紹介の機会をいただきましてありがとうございます。

私の研究室では、タイトルにある「電気工学的アプローチによる安心安全な社会構築」を研究室の理念として、「電気エネルギー機器の環境調和と高度化・新機能創出」を研究室テーマとして、教育・研究活動を行っております。2023年度は、大学院生8名（博士後期課程4名、前期課程4名）、学部4年生4名、ポスドク1名の13名の学生が所属しています。これまでに、研究室から

は電力会社や電力機器メーカーをはじめ、自動車、重工、鉄鋼、化学、資源・材料、電子機器・家電、輸送などのあらゆる分野に卒業生が巣立っており、各分野で活躍しています。

研究室のコアフィールドは電力・電気エネルギーに関する高電圧、電気絶縁、および放電現象の電気・光学的先端計測やセンシングと信号処理、解析に基づく放電発生・進展・破壊機構の解明と電力機器の診断技術に関する領域です。このコア領域をベースに、近年は、EMC領域やIoT/AI技術、新材料、高電界応用など技術分野を展開しています（図1）。少し具体的に書くと、放電源や電磁ノイズ発生源の探索技術、複合材（炭素繊維強化プラスチックCFRP）航空機の耐雷技術と燃料タンク内可燃性ガスの放電着火現象の評価・解明（図2は米国の雷撃試験所で実際のCFRP航空機の供試体

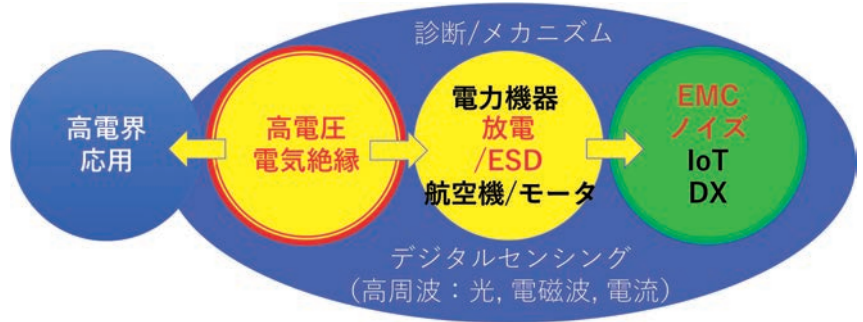


図1 コア技術と技術分野の展開

を用い、SAE規格に基づく燃料タンク内を模擬した環境で雷撃試験を実施した際の、供試体金属ファスナで発生したスパークにより着火した瞬間を撮影した写真です）、家電製品の防火安全技術、インバータのよ



図2 CFRP 航空機供試体を用いた雷撃試験によるスパーク着火の様子

うなパワエレ機器の放射ノイズの発生メカニズムや検出評価・抑制技術、絶縁・導電性・電磁シールド・ナノ

繊維等の新材料の特性評価と応用、シングルボードコンピュータ(SBC)を用いたセンシングと制御、電力需要の評価と予測など、分野や領域を超えた横断的な取り組みをしております。特に、実社会および国際的な連携を重視しており、産学連携や国内外の大学間連携をはじめ、製造工場や発電所などでのフィールド試験や設備見学、あるいは電力(特に部分放電やガス絶縁機器)や航空機雷撃試験の国際規格に関する取り組みにも国際大電力システム会議(CIGRE) SCDI (Materials and Emerging



図3 教育と研究は両輪

Test Techniques) や米国のSAE (Society of Automotive Engineers: 自動車技術者協会) International of AE2 (Lighting Committee) のメンバーとして積極的に参加しています。これら取り組みは、「研究と教育は両輪」との考えのもと、研究の進め方や最新の研究技術動向や規格動向、会議での合意形成の仕方など、学生教育にも反映しております(図3)。以下では、代表して2つの研究テーマを紹介します。

**部分放電(PD)現象の先端計測とスマート保全のための診断技術**

電気はクリーンで様々なエネルギー

ギー形態に効率よく変換できる二次エネルギー源であるとともに、デジタル情報通信化社会を担う重要な社会基盤です。また、社会で脱炭素化やデジタル化が進められている中、電力分野でも再生可能エネルギーの導入とともに安価で品質の良い電力を安定して供給することが求められています。壊れない電力機器の実現や電氣的事故を未然に防止するために、あるいは電力機器の品質管理や出荷試験として、絶縁破壊の前駆現象である部分放電(PD: Partial discharge)現象の理解やPDを検出・評価するPD試験やPD診断が行われています。

筆者はこれまでに、PD現象の理解や、PD発生と発生から絶縁破壊に至るまでのPD進展のメカニズム解明のため、PD現象の先端計測システムとして電氣的・光学的に特徴的な計測システムを構築しています。前者の電氣的システムは、アナログ帯域33GHzや70GHzの超広帯域デジタルオシロスコープ(OSC)を用いてSHF帯(3-30GHz)あるいはEHF帯(30-300GHz)の一部まで周波数応答がある、あるいはピコ秒オーダーの

時間応答で急峻なパルスが測定できる「超広帯域PD電流パルス計測装置(SHF\_or EHF\_PDPW装置)」です。一方、後者の光学的システムは、フレイミングカメラと光電子増倍管(PMT)と光学フィルタ、及びストリークカメラと分光器を用いた「時間空間分解PD発光分光測定システム」です。これら特徴的な2つの先端計測システムにより、ピコ秒オーダーのPD電流パルス波形とPDの空間的な広がりや進展を分光学的に空間および時間分解して詳細に計測できるようになりました。例えば、図4はSF<sub>6</sub>ガス中のPD進展の様子を観測した非常に貴重な結果です。同

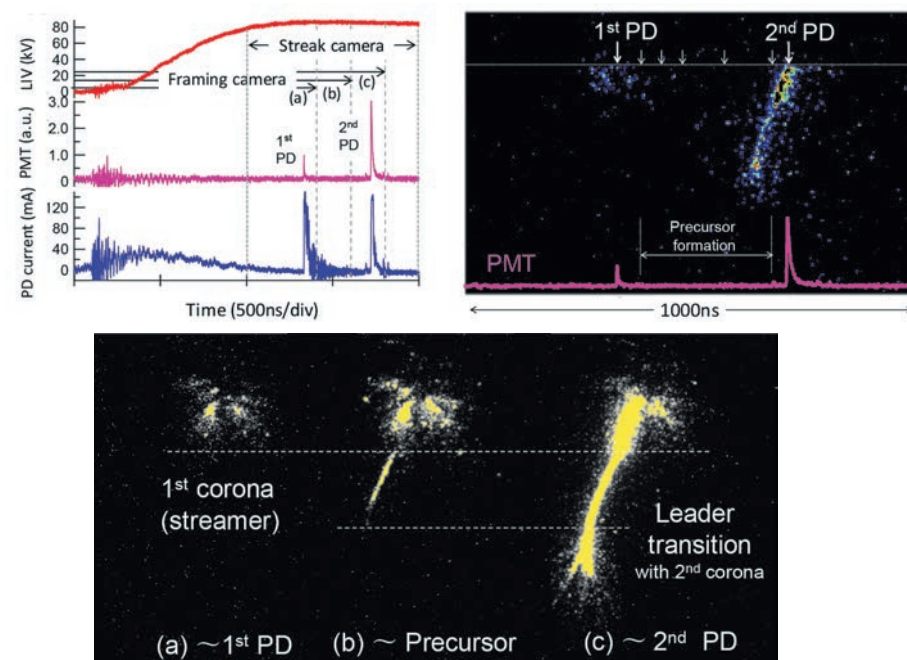


図4 時間空間分解PD発光分光測定システムにより観測されたSF<sub>6</sub>ガス中のプリカーサ放電を介したストリーマーリーダ放電転移現象

図は正極性雷インパルス電圧印加時のSF<sub>6</sub>ガス中でのPD進展現象を、時間空間分解PD分光測定システムを用いて観測したものです。ストリーマ放電からリーダ放電へ転移して進展する過程でプリカーサと呼ばれる放電形態を介した現象観測に成功し

たものです。PD 電流と発光強度の時間変化および空間的な放電形態の変化と進展の関係が明らかとなり、これらからの知見は絶縁破壊メカニズムや絶縁診断における特徴量決定に貢献するものです。

他方、超広帯域 PD 電流パルス計測装置により SF<sub>6</sub> ガス中の PD 電流パルス波形を測定すると、図 5 に示されるように（同図では 32 GHz 帯域のデジタル OSC を使用）、汎用的な 1 GHz 帯域の OSC では観測できなかった特徴的な急峻な波形が取得されました。即ち、当然ですが計測系の性能により PD 電流波形の形状や特にパルスの立ち上がり時間に大きな相違があり、数 GHz 帯域の計測系では真の PD 現象観測には十分でないことが明らかになりました。少し専門的になりますが、正極性 PD は複数のパルスが重畳した波形形状であり、これに対し負極性 PD では単発パルスであることが明確に観測されました。これは、図 6 に模式的に示した衝突電離現象の極性効果が観測されたもので特段特異な現象ではありませんが、絶縁耐力の高い絶縁物中 PD 現象では、このような基礎

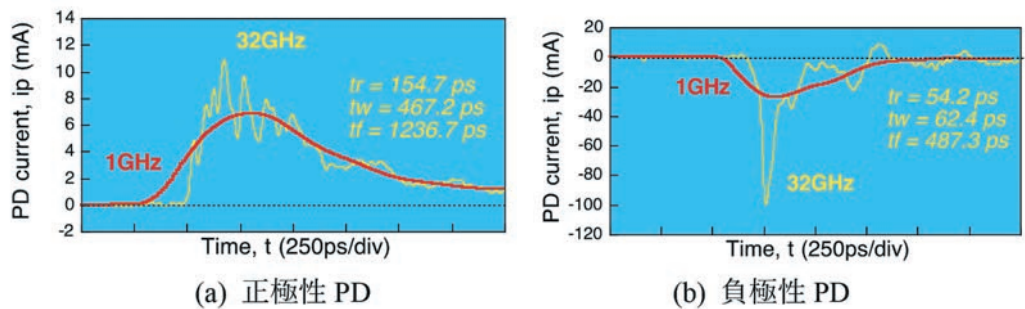


図 5 超広帯域 PD 電流パルス計測装置により観測された SF<sub>6</sub> ガス中の PD 電流パルス波形の極性による相違

的な現象でも正確に測定できない、本装置の必要性を示す結果です。図 7 に、SF<sub>6</sub> ガスと鉱油中の PD 電流パルスの立ち上がり時間を異物形状の変化に相当する放電電極の電

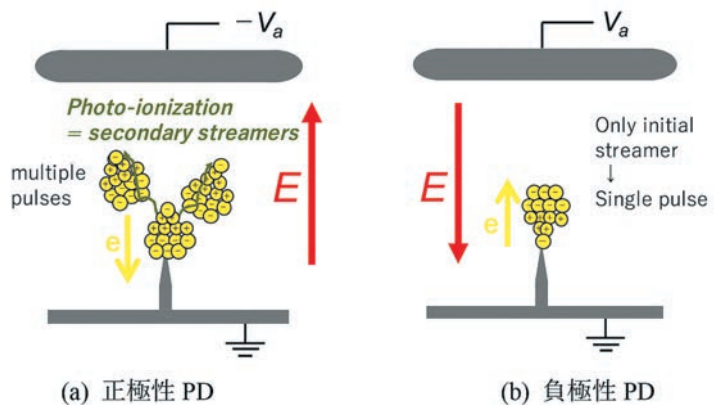


図 6 衝突電離現象の極性効果の模式図

界利用率依存性でまとめた結果を示します。このような代表的な絶縁物中の立ち上がり時間特性を超広帯域計測により比較した結果はこれまでにはなく、この結果も重要で貴重な成果です（図中のグレーの帯は理論的な立ち上がり時間であり、黒色シンドルの実測値とよく一致していることがわかります）。同図に示されるように、鉱油中の立ち上がり時間は SF<sub>6</sub> ガス中よりも小さく、10 ps

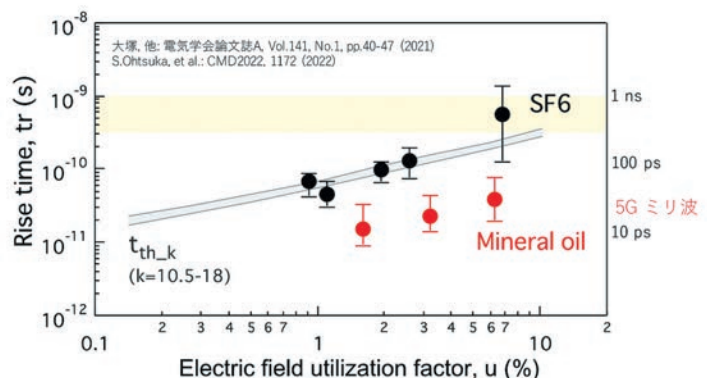


図 7 SF<sub>6</sub> ガスと鉱油中 PD 電流パルスの立ち上がり時間の電界利用率依存性

前後の急峻なパルスが発生することもあることがわかりました。このような PD 電流波形が取得されると、FDTD 法などの数値解析より放射される電磁波や機器内部を伝搬する電磁波特性を検討できます。そのため、機器構造と絶縁物種類による PD 電流を考慮した絶縁診断の最適化に向けた解析も行なっています。また、図 7 の結果から、鉱油中 PD から放射される電磁波の周波数帯域

は、5G通信のミリ波帯と一致することもわかりました。この結果は、電力機器の絶縁異常による放電放射電磁波は5G通信に影響する可能性があることを示唆しており、デジタル変電所などで5G通信を使用する場合には注意が必要であることもわかりました。

このように、本先端計測装置を用いて電力機器の主絶縁媒体である気体、液体、固体あるいはゲルや真空等の各相の基本的なPD電流特性を体系的に調べ、波形のデータベースを構築することで、壊れない電力機器の絶縁設計や放電物理に基づく最適な絶縁診断システム構築に向けた研究に反映させることを考えています。このような経験と専門性から、われまじくCIGRE D1.37 (Maintenance and Evaluation of Measuring Procedures for Conventional and Unconventional Partial Discharge Testing) やDI.66 (Requirements of PDM System for Gas Insulated Systems) に参加して将来的にIEC規格に反映される電力分野でのデファクトスタンダードとなる技術ブローシユアの作成や、SAE

InternationalのAE2コミッティでSAE ARP5416 (航空機雷撃試験方法)の改定、国内の電気学会「開閉装置一般要求事項標準特別委員会」委員としてのJEC規格改定、電気協同研究会の学識経験者としての委員会参加など学術的な社会活動もなっています。

さらに、電力機器診断に関しては、教育面・国際連携の観点から、中東UAEのカリファ科学技術大学(KUST)、統合前のアブダビ石油大学(PI)と油ガス田における電力システムの信頼性向上に関する共同研究を行っています(2013年にMOU締結)。当初は、東京大学、宇都宮大学と共同で経産省資源エネルギー庁の補助金事業の一環として実施していましたが、2018年からは本校単独での実施となり、現在は日本エネルギー経済研究所(IEEJ)の日UAE産学連携スキームのプロジェクトの一つとしても活動しています。本プロジェクトに関しては今後、学内のIoTや宇宙に係する先端基幹研究センターと協力して、宇宙機とIoT技術を用いたスマート保全のような研究に展開できない

かと検討しているところです。  
**スマホ電波検出によるプライバシーを考慮した人流計測とその応用**

コロナ禍による社会的ニーズによりスタートした最近の研究を紹介します。本研究は、国土交通省の3D都市モデルに関するプロジェクトPLATEAUのユースケース事業として実施したものです。本学IoT

ネットワークイノベーション実証研究センターのメンバーと共同で、プライバシーを考慮した人流計測として、スマホの4G/LTEとWi-Fiの2つの通信信号に基づく評価を、JR小倉駅とスペースワールド駅で測定の時刻と場所を変化させて実証試験を行いました。この評価は、4G/LTEの通信信号を用いた評価手法に絞る経緯も含めて紹介します。

まず、COVID-19が発生した当初、密を避けることが望まれました。そこで、駅やビルなどが密集する場所の混雑状況を、プライバシーを考慮して、即ち画像によらない方法としてスマホの電波に基づき評価できないかとの相談を国交相の担当者から受けました。これは、筆者の放電

放射電磁波検出による電力機器診断や電磁ノイズ源の位置標定に関する研究成果や特許技術に基づくものでした。スマホ電波検出による人流計測のアイデアは、4G/LTEのアップリンク信号を選択的に検出し、その積算強度と人数を紐付け、積算強度の時間変化を評価することで人流を推定するものです。本研究ではリアルタイムスペクトラムアナライザ(RTSA)とアップリンク信号の周波数帯域をカバーするアンテナならびに増幅器を用いた計測システムを構築しました。図8に測定の様子を示すように、本実証試験では5組の計測システムを用いて実施しました。なお、現地測定は、北九州市や警察、JR九州などの協力、承認を得て実施しました。

一例として、JR小倉駅の1Fコンコース周辺での測定結果を図9に示します。同図のグラフは1組のRTSAで測定した周波数スペクトルの時間変化です。横軸は時間(10分間の測定)で、縦軸は周波数(全体で40MHzの帯域)です。2つの帯の色が変化していることがわかると思いますが、これは2つの通信会社の

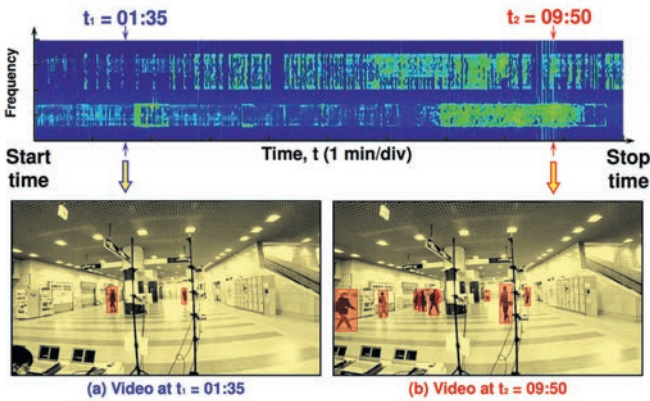


図9 RTSAを用いて測定したスペクトル強度の時間変化と歩いている人数の様子

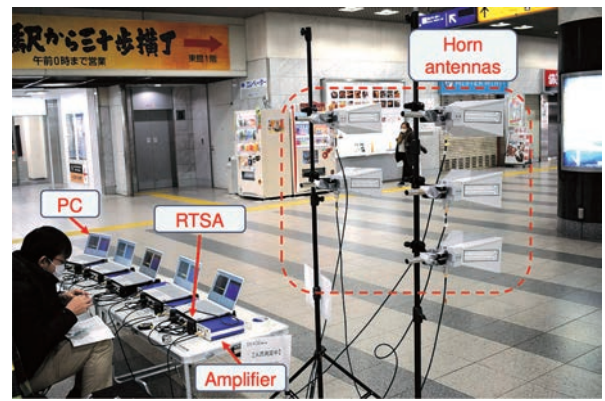


図8 JR小倉駅でのスマホ電波検出による人流測定の様子

アップリンク信号の強度が時間変化していることを表しています。青色はバックグラウンドレベルで、緑色の箇所は信号強度が強いことを表しています。2つの写真がありますが、これは測定開始から1分35秒後（時刻 $\alpha$ ）と9分50秒後（時刻 $\beta$ ）の人の流れの様子です（赤枠が人の位置で、画面左手前に改札口があり奥が駅屋外に通じるドアがあります）。前者よりも後者の方が歩いている人の数は多いことがわかりますが、その時刻前後のスペクトル結果を見ると、後者の方が信号強度の強い緑色の塊が続いていることがわかります。即ち、スペクトル強度と人数は相関があります。なお、この結果は駅に列車が到着する前後の測定に相当し、時刻 $\alpha$ の周囲は乗車のために駅に向かう人流、時刻 $\beta$ の周囲は下車して駅外に向かう人流が観測されていると解釈できます。この結果は、1つの通信帯域だけの結果ですので、実際はシステム全体の測定結果を積算して評価することになります。システム全体の積算強度と人数の相関関係に基づくマスターカーブを用いて人流を推定した結果の一例を図10

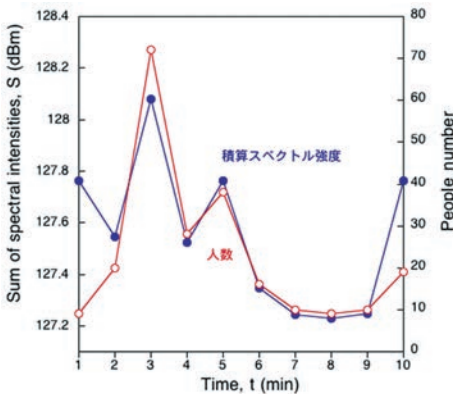


図10 人流評価のための1分間ごとの積算スペクトル強度と通過人数の関係

に示します。同図に示されるように、積算強度と測定場所を通過する人数にはよい一致が見られます。一部に一致していない箇所もありますが、これはスマホの使用状態（通話とチャット、待ち受け等では強度が異なる）や歩行経路のランダムさによるものだと思います。場所や時刻を変えた測定では、それぞれの環境での人数の相違や時間変化が観測でき、思った以上に評価できる手法を実現できました（本手法は特許出願済み）。この技術は、プライバシーを考慮して人流を評価できるものですが、どのような空間条件で人の滞留が起こるか、あるいは人の流れが良いかなどを定量的に評価できるた

め、ビジネスやイベントでは集客しやすいように、災害時や非常時あるいは駅やバスターミナル、複合施設など混雑しやすい場所では人を如何にスムーズに移動させるかなど、目的に応じた都市設計を行うための基礎データとなることも期待されます。現在は、このスマホ電波を検出できる技術を応用して、試験会場などでのスマホ不正使用を検出する技術として検討を進めております。応用や活用のアイデアや本技術に興味がある方がおられましたらご連絡いただけますと幸いです。

代わりに

紙面の都合もあり、代表して2つの研究内容を紹介しましたが、この他にも様々な研究を行っています。「世の中に Positive impact を与える」ことを目指し、個人的に興味があるテーマと共に社会が要求しているテーマの両方をオリジナルなアイデアと研究手法で取り組んでいます。これら研究は、共同研究だけでなく学会・委員会や規格活動など国内外の様々な関係機関、関係者からの協力、ご支援を受けて実施しており

ます。改めて感謝申し上げます。

最後に一言。現在、大学院工学府・工学部教育方法等開発室（FD室）の室長を務めておりますが、学生の気質や講義の方法もCOVID-19前後で大きく変化していると感じております。デジタル化やオンラインの便利などころや利点は引き続き活用しつつ、in personでの交流が再開された現在、教育に関して新たな取り組みが求められています。また、ChatGPTなど新たなツールも登場し、その使用是非が議論されておりますが、使用されたことがあればその回答の「怪しさ」はご存じのことと思います。ChatGPTの回答の論理構造は正しいのですが、内容の「怪しさ」は専門知識がないとわからないものです。やはり大学の専門教育は重要だと思えます。大学教育に求めていることや皆様の職場でコロナ後に取り入れた参考になる社員教育がございましたら、忌憚のないご意見とともにご教示いただけましたら幸いです。明専会を通じた大学・在校生と卒業生・企業との繋がりを活かした交流を学生教育に反映できればと願っております。