

## SEMINAR REPORT

電磁波放射源可視化装置の開発と  
電気エネルギー機器の絶縁診断への応用

九州工業大学大学院工学研究院  
電気電子工学研究系  
電気エネルギー部門  
准教授  
大塚 信也 氏

我々は電磁波放射源を可視化して位置標定する装置を「電磁波カメラ」と呼んでいますが、電気エネルギー分野では電磁波をどういった観点で見ているか紹介し、その後本装置の「可視化コンセプト」と「基本構成」、最後に「実施例」を紹介します。

## 研究室紹介

我々の研究室では電気工学的アプローチにより世の中に安心・安全をもたらすことを目的として、「電気エネルギー機器の環境調和と高度化・新機能創出」に取り組んでいます。

図1に大塚研究室(高電圧電気エネルギー・電磁環境研究室)を示します。

- High-voltage electric energy and electromagnetic environment laboratory  
研究室テーマ:  
「電気エネルギー機器の環境調和と高度化・新機能創出」  
→ 電気工学的アプローチによる安心安全な社会構築
- 部分放電現象の電気・光学的先端計測
  - 電気エネルギー機器の異常検出や絶縁診断に関する技術開発
  - 直流システムの放電現象と複合センサによる診断評価技術開発
  - 新しい動作原理に基づく自己回復性ヒューズの開発と応用
  - CFRP翼を持つ次世代航空機の耐雷技術に関する研究
  - 電磁波放射源可視化装置(電磁波カメラ)の開発
  - 送電アクセサリーのコロナフリー設計技術の開発
  - プリント基板におけるESD現象と対策技術
  - 3次元電界解析や電磁波伝搬解析(FDTD)、電磁過渡現象解析(EMTP)などの解析技術など

〈図1〉大塚研究室(高電圧電気エネルギー・電磁環境研究室)

我々の研究室では、電力機器の異常時に発生する放電を検

出・評価することによる異常検出や絶縁診断の技術開発を行っています。

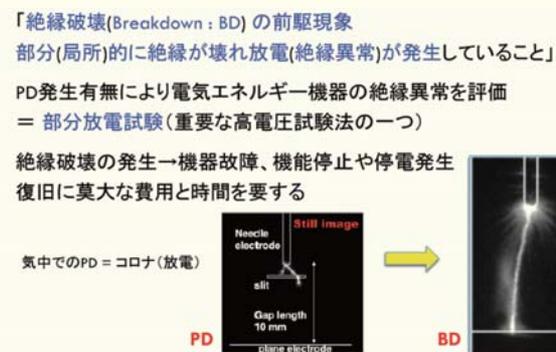
最近では炭化繊維強化プラスチック(CFRP)の翼を持つ次世代航空機の耐雷技術に関する研究やプリント基板における静電気放電(ESD)現象の検討を始めています。何れの研究も電気絶縁異常箇所や放電発生場所がわかること、特に見えることは重要であるため「電磁波カメラ」の開発を始めました。

静電気現象は目視が重要だということから、電磁波カメラの開発を始めました。

電力機器は部分放電による電磁波を感度よく検出することで異常診断を行います。この検出は、VHS帯ではノイズなどが多く、SHF帯では測定機器が少し特殊で高価であることから、通常UHF帯を対象として行われています。いわゆるUHF法と呼ばれる手法が主流で、我々もこのUHF法の研究を行っています。

## 研究の背景

我々は電磁波が出る原因を理解するために部分放電を詳しく研究しています。図2に「部分放電(partial discharge=PD)とは？」を示します。



〈図2〉部分放電 (partial discharge=PD) とは？

部分放電とは絶縁破壊の前駆現象です。絶縁されている電極間で絶縁物が部分的(パーシャル)に放電している状態で、これが伸びていくと、電気的な短絡事故や故障の発生となります。

従って、完全に壊れる前の部分的な放電を感度良く検出することで、機器の異常や絶縁性能を評価できることとなります。この絶縁診断の核心になるのが部分放電現象です。

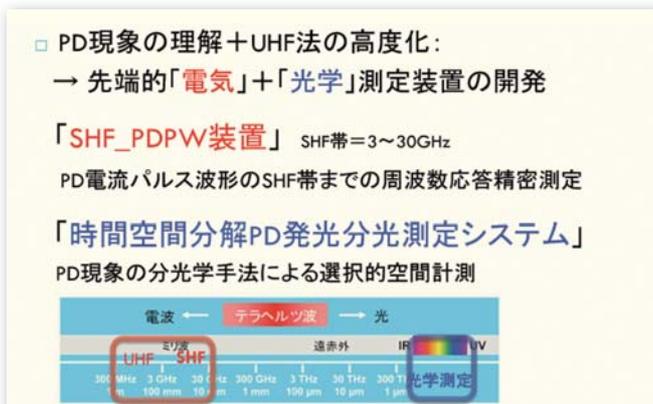
電力システム、電気エネルギー機器は社会のインフラで非常に大事ですので、高性能化・高品質化、低ライフサイクルコストが求められています。そのためには部分放電をきちんと検出し診断を行うことが大事です。部分放電の検出には現在 UHF 法が主流になっています。

今後、電気自動車、航空機、スマートグリッドなどの電気機器モーター、制御機器、電力ケーブルで構成されている機器が増えますので、その信頼性維持と評価が重要になります。非接触で評価して異常の発生位置を知るためにも放射電磁波源の可視化は重要です。

また、電子機器などの EMC 対策のためには電磁ノイズの放射源探索が重要です。そういう電磁波の発生源も目視できるようにすることが我々の目的です。

電磁波の振幅値は遠方界では電流の時間変化に比例します。従って、放電で放射される電磁波を理解するには電流の波形が特に重要です。電流の時間変化で強度が決まるので、正確な電流パルス波形を知る必要があります。特に変化の大きい立ち上がりの波形をいかに計測できるかが重要になります。

図3に本研究で行っている「先端 PD 計測装置の開発」のコンセプトを示します。



〈図3〉先端 PD 計測装置の開発のコンセプト

我々の研究室では、部分放電現象を理解することと、UHF法を高度化するという意味で、部分放電現象を電氣的と光学的に計測する先端的な装置を作りました。

作ったのは、SHF\_PDPW装置という、SHF帯(3~30GHz)までの周波数レスポンスのある放電電流パルス波形を測定できる装置です。

現在はオシロスコープなどの計測器の性能が著しく向上しているため、電流波形を数十 GHzの帯域まで測定できます。従って、放電の元である電離現象を電氣的に非常に正確に観測できるようになりました。一方、空間的にはどの様に放電しているか判りません。従って、光学測定も必要になります。放電は時間的、空間的にどのように伸びているかは光学測定で判ります。このように、電氣的と光学的な同期計測技術が部分放電現象の理解には必要です。

最近の高性能オシロスコープには、例えば帯域が32GHz、サンプリングが80GHzで、12.5psecの立ち上がり時間が測定できるものがあります。こういう装置をうまく使えば、部分放電の

電流パルス波形をサブナノ秒以下で測定できます。

問題は、そこまで高周波のものを検出するディテクターが無いことです。そのために、放電源を直接50Ω系に持って行くことでオシロの性能を活かした測定をしようと考えて作ったのが、SHF\_PDPW装置です。

帯域が1GHzとか3GHzのオシロでは、数n secの非常に速い放電パルスが取れますが、我々のSHF\_PDPW装置を使い、同じ現象を1GHz、3GHz、8GHz、13GHz、20GHz、32GHzと帯域を広げていって測定すると、単発のパルスと思っていたのが、実は複数のパルスが含まれた信号であったり、波形の立ち上がり時間はさらに短いパルスであることなどが判ってきました。

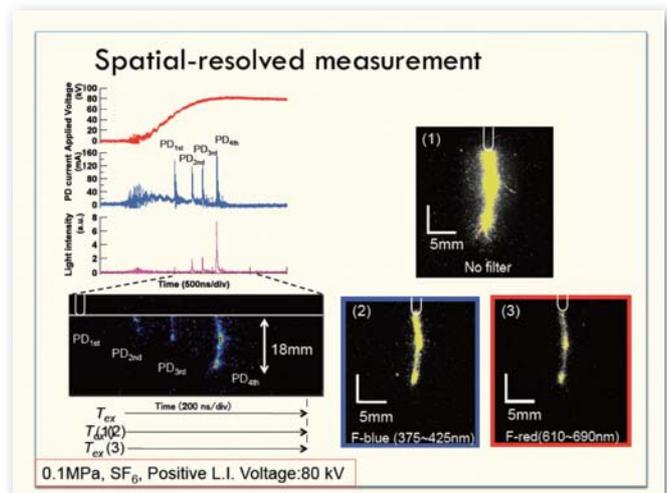
放電には正極性放電と負極性放電があります。高電界の方に電子が向かって電離が沢山発生するのが正放電です。例えば、同一電極系でも正極性では複数の放電が発生しますが、負極性では一発(単発の放電)しか発生しないことがあります。従来、1GHzの帯域では正も負も同じと思われていたのが、帯域を広げると正放電と負放電は全く違い、もっと速い現象であり、電流も大きいことが判ってきました。こういう放電のソースが判ると、出てくる電磁波が計算で推定できるようになります。

雷が落ちる時に雷が伸びて行く発光の様子を光学装置で観測するのも一つの見える化です。それぞれの分子の発光に対応する光学フィルタを通すことで、どんな分子がどこで光っているのかわかることができます。

例えばフッ素の乖離が起きる特別なガスの場合は、ストリーマ放電やリーダ放電を特定の青色や赤色の光学フィルタを用いることで空間的に識別したり、どこでどのように発光しているかが判ってきました。

このように、電氣的な手法と光学的手法の両方の技術を併用して観測することで、放電現象自体はかなり判ってきました。

図4「空間分解計測(Spatial-resolved measurement)」は、SF6という一般の電力機器で使われているガスに窒素ガスを入れて混合ガスにした時に、窒素とSF6の光っている位置を空間的に分光することができた例です。



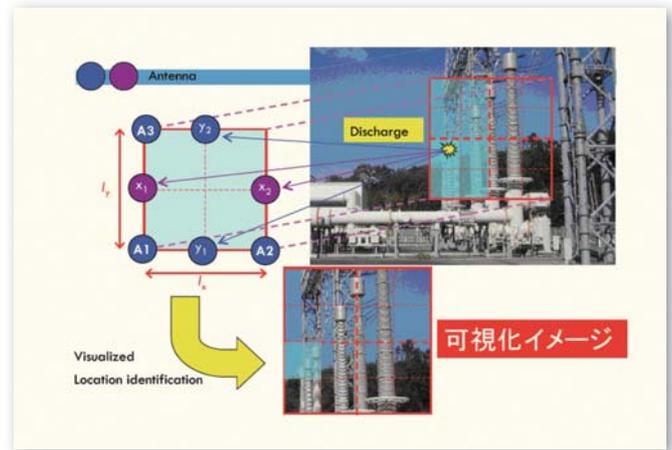
〈図4〉空間分解分光計測 (Spatial-resolved measurement) の一例

光学フィルタを適さない通常の発光体観測(1)から窒素の光だけを青色フィルタを通してとり出すと、窒素の光は真ん中にはぼーぼーにあり(同図(2))。一方、同図(3)は赤色フィルタを通した結果で、濃淡がある、すなわち強度の強い位置があること

がわかります。このように、真ん中に赤い波長を有する発光があるというように空間的にどんな波長の発光があるかということが判ってきました。こういう光の可視化、空間的な分光的識別も可能になってきています。

放電現象をきちんと理解した上で、放電が起きている場所を可視化技術で理解することは非常に有効です。

私が可視化技術、電磁波カメラの研究を行いたいと思ったのは、以上のような研究のためだけではなく、電波の使用が禁止されている領域や、大学入試での携帯電話による不正防止、テロ対策などのために、携帯電話の電源を入れたままの人がいないかや電波を出す機器を持っている人がいないかを、目視で確認できればと思ったこともきっかけの一つです。



〈図5〉可視化手法

## 可視化コンセプト

本可視化の原理は非常に単純です。タイムドメインで電磁波波形を測定し、そのアンテナ間の到達時間差で対象空間の領域を分割します。この分割手法は後述します。

もう一つ大事なコンセプトが「トレジャーハンティング(宝探し)ではない」ということです。普通、可視化はどこから出ているかを見つけるのが目的です。しかし、我々は電力機器を診断したいと思っていますので、例えば変電機器や電気自動車から放電や異常な電波が出ていないかというように対象は決まっています。

色々な機関でアンテナを用いて位置標定をしています。これらは、時間差で位置標定をしたり、フェイズドアレイで方向や角度を出したりすることで、空間座標や距離を出しています。そのような方法での評価結果は普通の人には直には判りませんので、新しい位置標定手法として可視化を提案したいと考えています。

可視化のコンセプトとは、特定の対象物から電磁波が出ているか検出・評価し出していると評価されれば画像上に発生位置を表示するというものです。

本可視化のもう一つの特徴は、我々はタイムドメインで測定しますので、時間的な発生状態の変化を表示することができるということです。

到達時間差による対象領域の空間分割は次のように行います。x軸とy軸の直交するように配置したアンテナ対を用いてx軸のある領域、y軸のある領域を特定します。その交点が面として出てきます。その面の中に放射源があると特定するのが我々の可視化のコンセプトです。

もう少し簡単に説明すると、左右にセンサーがあり、電磁波が両方のセンサーに同時に届けば、電磁波の発生源は中心軸上にあり、右のセンサーに先に届けば、電磁波の発生源は中心軸より右側の領域にあるということです。さらに、y軸で、同様に上下どちらが早いかを評価すれば面が区切られて特定されていくという単純なアイデアです。

図5「可視化手法」で具体的に本手法を説明します。

x軸とy軸上にアンテナをセットします。例えば放電により電磁波が発生したとします。この図の場合は、x軸では中心より左の領域にあるのでアンテナx1で早く電磁波が検出されます。y軸では中心より下の方にあるので、アンテナy1で早く電磁波が検出されます。これで異常の発生した領域が判ります。必要に

応じて、到達時間差などに基づきこの中をさらに細かく分割すれば、さらに空間分解能高く評価できます。これが電磁波カメラのコンセプトです。

領域分割の考え方は、単純には到達時間差の正・負で空間は $2 \times 2$ の4分割されます。さらに到達時間差などに基づきその分割をさらに半分にすると $4 \times 4$ の16分割ができ、さらに細分化すると、 $8 \times 8$ で64分割の領域ができることになります。実用上は背後の風景(対象機器)画像上に表示するため16分割位で十分だという感触は得ています。

## 可視化装置の基本構成

我々の電磁波カメラは、基本的には、アンテナ、画像カメラ、測距用機器と、それを解析・表示する本体で構成されています。

その他に、動作検証用の放射源として、実際に放電を起こして電磁波を発生させる可搬型放電放射電磁波源も開発しています。弁当箱程度の大きさで、バッテリー駆動です。この装置の高電圧発生端子に対象とする絶縁系で作られた放電源を置いて実放電を起こすことができます。気中放電や絶縁油中放電あるいは沿面放電などを模擬できており、急峻なパルスを発生させることができます。実際に測定した結果、GHz帯の成分を持つ電磁波を放射できることを確認しています。

我々は指向性が良好なホーンアンテナを使っています。このような市販のアンテナは一般に高価ですので、電磁波カメラ用に自分達でGHz帯に感度を有するホーンアンテナや、ループアンテナなどを作っています。

我々が作ったホーンアンテナは、市販のアンテナに対して指向性もそれ程変わらず、価格も1/4～1/5程度に抑えられています。ゲインは少し小さいのですが、同程度の周波数レスポンスを持っています。

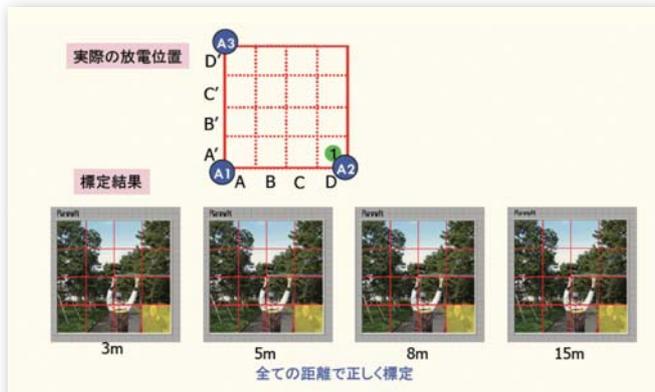
## 実施例(基礎特性)

### 1) 屋外での距離、複数発生源、遮蔽効果

放電源の位置を標定することができることを実験で確認しま

した。また、時間差を求める時に検出波形のピークなのか、しきい値なのか、積分するのか、その他の方法のどれがよいのかというように検討を行っており、時間差の求め方をうまく決めることできちんと評価できることが判りました。

図6に屋外で1つの放射源を用いて放射源の距離を変えたときの「放電①の16分割した可視化の結果」を示します。

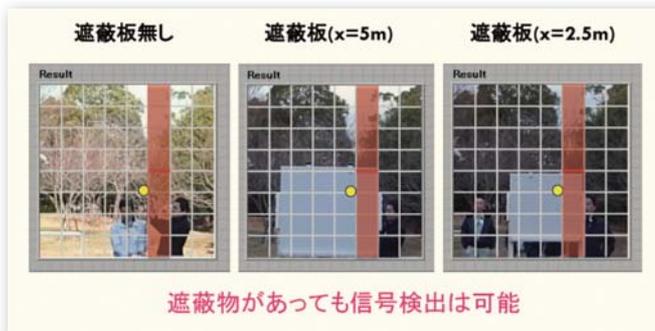


〈図6〉16分割可視化結果の一例(発生源①)

①の位置に放射源を置いた時に、1番と2番のアンテナA1とA2ではA2に先に電磁波信号が届きます。1番と3番のアンテナA1とA3ではA1に先に届きます。これから放射源は右半分と下半分の領域にあることになりませんが、結果を16分割で標定すると黄色で示した領域であると示されました。放射源からアンテナまでの距離を3m、5m、8m、15mと変えてもきちんと放射源の位置を標定できました。

放射源の前に遮蔽物がある場合でも、回折現象があるので電磁波は回り込んで取れます。

図7「遮蔽物の影響(試験)」は実際に放射源の前に金属性のプレートを設置して実験した結果です。同図は空間64分割をした場合のx軸のみで標定した(赤色が標定位置)結果です。



〈図7〉遮蔽物の影響(赤色領域がx軸での標定結果)

ESDガンの先端位置を黄色のポイントで表示すると、遮蔽物があっても発生源があることを評価できています。なお、遮蔽板無しの結果でESDガンの位置と標定結果が少しずれているのはEWSGガンは手で持っていたために、測定中に位置が少しずれたためと思われる。

## 2) 光電界センサーの使用

光電界センサーのメリットは、①非接触測定、②測定フィールドを乱さない、③検出高周波信号の長距離伝搬、④小型・軽量といったところにあります。神奈川県産業技術センターが開発した光電界センサーを使って、ホーンアンテナと比較測定した結

果、いずれも測定距離に反比例して特性が出ており、両方ともきちんと使えることが判りました。光電界センサーはまだ感度が良くないので、機会があれば光電界センサーの高感度化の研究がしたいと思っています。

ノイズ研究所の協力を得て神奈川県産業技術センターの敷地で、光電界センサーを2つ配置して行った実験では、放射源の位置が5mの場合でも、10mの場合でも、放電源があると判っているものから出た電磁波は原理的にきちんと検出できることを確認しました。

## 実施例 (応用・検証)

### 1) ダイナミック特性の評価

時間変化するパルス放射電磁波の発生頻度や個数、強度(最大値や積算値あるいは平均値)、周波数帯域などを表示することで、ダイナミック特性を評価できます。

評価する時の表示の仕方を工夫しました。例えば発生強度はマスの中の表示の大きさで表します。小さな表示は小さな信号で、大きな表示は大きな信号になります。頻度は色で表示します。青は少ない、黄色では少し多くなった、赤は頻繁であるといったことが評価できる装置にしました。なお、強度と頻度の表示はユーザの要求により、この反対とすることもできます。

ダイナミック特性の評価例として実験を2つ実施しました。

一つは、異なる複数発生源の場合としてピエゾ素子と、ESDガンを使った場合の発生頻度と発生源の位置を変えた実験を行いました。

ESDガンから電磁波を出すと非常に強い電磁波が出てきます。普通のオシロスコープではトリガーをかけると一つの波形しか測定できません。ファストフレームという信号が発生している時間だけを細かく連続して複数回測定すると、最近のオシロスコープの機能を使い、最初にトリガーがかかった後に異なる波形の信号が沢山出ていることが判りました。トリガーイベント40回で測定した場合、ESDガンは11回しか撃っていません。

次にピエゾ素子で同じことを行った場合も複数の波形が出てきます。ピエゾ素子の場合はトリガーイベント40回の測定で17回動作させていました。

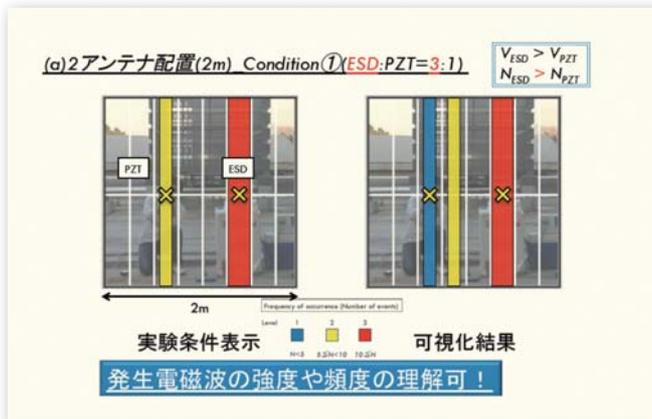
このような測定からESDガンの方がピエゾ素子よりも発生強度は、同じか、強いということも判りました。

A/D変換器にオシロスコープを使う場合、2チャンネル使う時と3チャンネル使う時でサンプリング周波数が変わってきます。3チャンネルの場合はサンプリングが落ちて精度が悪くなります。精度の良いものと、多少精度が悪いけれど実際に空間を見たいということで、2アンテナ(x軸分割)と3アンテナ(x,y軸分割)に分けて実験を実施しました。

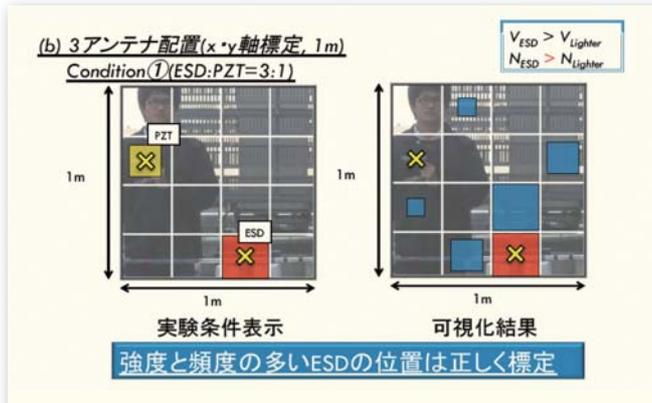
アンテナをx軸だけに置いた時の結果が、図8の「(a)x軸標定の結果」で、アンテナをx軸とy軸に置いた時の結果が、図9の「(b)x・y軸標定の結果」です。

もう一つの実験として、ESDガンを手で持ちながら動かしていった時に発生位置が時間的に変化しているのがきちんと見えるかという、放射源の位置が時間変化する実験を行いました。

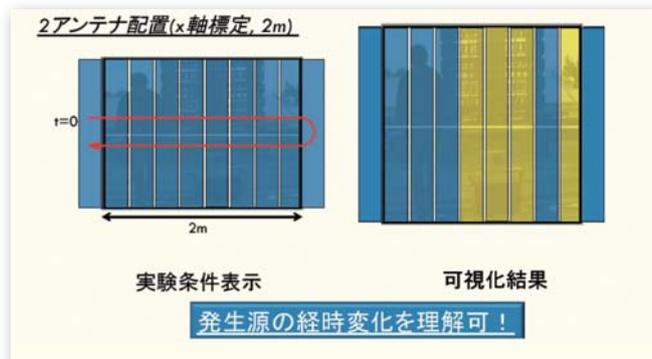
学生がESDガンを持って、行って戻ってくる動作を、トリガー



〈図8〉(a)x軸評定の結果



〈図9〉(b)x・y軸標定の結果(2つの放射源の可視化評価)



〈図10〉時間変化する発生源位置の実験結果(x軸標定)

イベントが40回になるまで行った結果が、図10の「時間変化する発生源位置の実験結果」です。同図ではわかりにくいかもしれませんが、画面上で時間変化位置を表示していくとどのように発生源が移動しているかよくわかります。

図10のx軸のみでの標定だけでなく、x・y平面で分けた場合の実験も行いました。その結果、発生源の移動する軌跡が評価できました。

## 2) シールドボックスの評価

全面、両側面、上面の4面が透明のシールドボックスを、E&Cエンジニアリング株式会社と共同で開発しています。ESDガンをこのシールドボックスの中に入れた時のシールド特性や電磁ノイズの発生場所を調べました。

可視化を行った結果シールドボックスからの発生は確認されず、ESDガンとケーブルで接続されている操作部本体と接地抵抗部から発生していることが判りました。そこで、その本体を金属の金網で囲ったり、接地を別の場所から取ったりして、改善が必要な場所を特定して対策することができました。この取組みにおいてもやはり発生場所を見える化することは非常に効果的な手法だと実感しました。

## 3) 電力機器の評価

電力会社の変電所で、高電圧ブッシングからのコロナを観測しました。コロナの発生を測定する装置は市販されています。市販装置でもコロナの発生は判りますが、発生場所は判りませんので、3アンテナ配置して測定しました。波形から発生している面を予測し、距離に対して時間差を考慮すると位置が標定されますので、この領域を10m×10mで分割して評価することで実際の発生場所を特定しました。これも可視化で判った例です。

## まとめ

本日は、電磁波放射源を可視化する必要性和重要性を、電力機器や電気エネルギー機器の絶縁診断や異常検出・評価、EMC対策、あるいはセキュリティ分野の観点から示しました。

本電磁波放射源可視化装置のコンセプトは到達時間差による領域分割と非常に単純ですが、宝探し(トレジャーハンティング)ではありません。診断を目的とした装置です。

時間領域測定によるダイナミック特性評価ができることなど、オリジナリティと主要な特徴を説明しました。これは特許申請している技術です。

ESDガンやピエゾ素子を用いた基礎的な可視化実施例を示すとともに、応用・検証例として複数放射源や発生位置が時間的に変化する場合の表示手法や、その可視化結果を示しました。

開発中の透明シールドボックスでのノイズ源評価への適用例、さらには実変電所での高電圧ブッシングにおけるコロナ発生位置の可視化など、適用例を説明し、本装置の有効性を示しました。

本可視化装置や研究室の研究内容に興味のある方は、ご連絡、お問い合わせをお待ちしております(e-mail: ohtsuka@ele.kyuteck.ac.jp)