

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：17104

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2017

課題番号：26630115

研究課題名(和文)超広帯域放電電流波形を用いたスパコンによる超信頼性電力機器開発法の新提案

研究課題名(英文) New proposal of development method of innovative power apparatus with a super high reliability by supercomputing with super high frequency wide band discharge currents

研究代表者

大塚 信也(OHTSUKA, Shinya)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：60315158

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、電力機器診断の最適化をもたらす革新的機器開発法を提案することであり、事故や故障のない極めて信頼性の高い賢い電力システム構築に機器レベルで貢献することである。電力機器の代表的な絶縁媒体中の放電電流波形を超広帯域計測技術を用いて取得し、特に、電力ケーブルに適用を拡大し、電力ケーブル劣化モデルにおける部分放電電流波形を取得して特徴量を検討した。放射電磁波の発生伝搬をFDTD解析した結果、最適なセンサ仕様やセンサと機器の配置等を明らかにでき、目的とする診断技術の新しい開発方法の方法論を提示、検証できた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to propose the innovative development method for power apparatus that brings the best diagnostics method and consequently contributes to construct the smart power system with highly reliability without faults and accidents in the system. We investigated the discharge current waveforms for the typical insulation media, especially for the power cable solid insulator, with the super high frequency wideband measurement system we have developed and extracted the feature values in view of the diagnostics. According to the FDTD analysis for propagation properties of discharge-emitted electromagnetic waves based on the measured current waveforms, it was achieved that optimal sensor specification and sensor arrangement in the apparatus were shown by the calculation. This result suggests that we can propose the new methodology to develop the innovative diagnostic system for the power apparatus and exhibit it.

研究分野：電力、高電圧・電気絶縁、診断、超高周波計測、電磁界解析、センシング

キーワード：電力機器 部分放電 診断 電磁波 大規模解析

### 1. 研究開始当初の背景

計測機、特にオシロスコープ OSC の高性能化が進んでおり、現在 30GHz、100GS/s を超える高性能 OSC が市販されている。2004 年頃に英国で先駆的に放電電流波形の広帯域計測が試みられ、その当時最高の 13GHz 帯域 OSC を用い 35ps の立ち上がり波形が観測され、放電現象は非常に高速の現象であることが示され、この分野の研究者に衝撃を与えた。放電電流波形の広帯域計測は、放電物理現象の理解や破壊メカニズムの解明の観点からも重要な取り組みである。さらに、近年は電力機器の信頼性向上のための絶縁診断の観点から、特に放電放射電磁波に基づく手法が注目されている（同手法は UHF 法として IEC 規格が制定作業中である）。この放射電磁波の理解は、放射源である放電電流波形の正確な測定とその現象理解が必須である。そこで筆者らは、2011 年ごろから計測器メーカーと共同で帯域 30GHz を超える最新の OSC を用いて放電電流波形を超広帯域で計測できる装置 (SHF\_PDPW 装置) を構築し、SF<sub>6</sub> ガスや代替ガス、絶縁油中でより高速の立ち上がり時間 24ps や 8ps という波形を世界に先駆け観測し、放電現象は従来提示されたものより更に高速現象であることを示した。放電電流波形があれば、それに基づき放射される電磁波や機器内を伝搬する電磁波の様相を数値解析的に解析でき、その結果に基づき最適なセンサ仕様やセンサ配置などを提案できる着想を得た。また、取得できた超広帯域データを使用し、且つ変電所などの数 10m 規模の電力機器を対象にするには、スーパーコンピュータ等を用いた大規模計算を実施する着想に至った。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、電力機器診断の最適化をもたらす革新的機器開発法を提案することであり、事故や故障のない極めて信頼性の高い賢い電力システム構築に機器レベルで貢献することである。筆者はこれまでに世界に先駆けて 30GHz 前後の超広帯域の放電電流波形を測定できる装置を構築し、電力機器の代表的な絶縁媒体中の放電電流波形を取得している。この波形データを入力信号として、スーパーコンピュータ等の大規模コンピュータにより変電所等の数 10m の実電力設備規模で、放電放射電磁波の伝搬特性を高時間・高空間分解解析による大規模計算する。この結果に基づき、最適なセンサ仕様、機器構成、およびセンサと機器の配置を明らかにすることを目指す。また、この一連の検討方法を機器開発法として一般化し、将来の機器設計の標準ツールとなるよう目指す。

### 3. 研究の方法

(1) 変電所等の実電力設備の電力機器診断を目的としているため、まず密閉機器を対象に主要機器であるガス絶縁開閉器の主絶縁媒体ガスである SF<sub>6</sub> ガスや代表的な SF<sub>6</sub> 代替ガスとしての大気や CO<sub>2</sub> ガス、電力用変圧器の主絶縁液体である鉱油やシリコン油等を対象に、欠陥や異常状態を模擬した不平等電界を形成する電極系で部分放電現象を測定し、大規模計算に使用する電流波形特性を検討した。特に、絶縁液体の場合は、絶縁特性への影響の大きな水分混入時の検討も実施した。さらに、解析対象機器を当初目的の変電所密閉機器から、2016 年 10 月末に都内に大停電をもたらした電力ケーブルに適用を拡大することとした。そのため、電力ケーブル劣化モデルにおける部分放電電流波形を超広帯域計測によりデータ取得し、劣化評価の指標となる特徴量を検討した。

(2) これら電流波形を用いて、FDTD 法による大規模計算を行い、診断に適したセンサの周波数帯域やセンサの設置場所などを検討した。これらの結果に基づき電力機器診断の最適化をもたらす新しい革新的機器開発方法の妥当性を検討した。

### 4. 研究成果

(1) 超広帯域計測装置による放電電流波形の測定 ガス絶縁開閉器の主絶縁媒体ガスである SF<sub>6</sub> ガスや代表的な SF<sub>6</sub> 代替ガスとして注目されている大気や CO<sub>2</sub> ガスの部分放電電流波形を同一電極系で、超広帯域計測装置を用いて測定した。特に、針電極の先端形状やギャップ長を変え電界利用率  $u$  を変化させて調べた。その結果、図 1 に示されるように、電流波形の立ち上がり時間  $tr$  はガス種により顕著に異なり、利用率  $u$  が小さい程、即ち小さく先端の尖った異物ほど急峻なパルスとなることがわかった。特に SF<sub>6</sub> ガスでは急峻で 50ps 前後の  $tr$  を有するのに対し、CO<sub>2</sub> ガスでは 300ps 前後、大気では 1ns 前後と大きく異なる。この結果は、放射電磁波の周波数帯域や出力値に関係することになる。

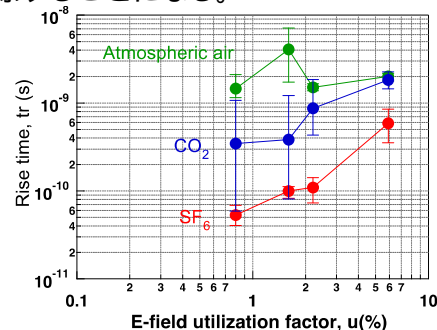


図 1 各ガスの部分放電電流波形の立ち上がり時間の電界利用率依存性 (負極性放電)

このような急峻な電流パルス形成のメカニズムを、臨界電界内の電離領域における

電子の移動度に基づくものとして電界計算とストリーマ理論に基づき検証した。その結果、図2に示されるように、SF<sub>6</sub>ガスにおける超広帯域で計測された立ち上がり時間  $t_{m\_SHF}$  (赤丸プロット) は、青色の帯で示される理論値 (電離指数  $k = 10.5 \sim 18$  で計算)  $t_{th\_k}$  とよく一致しており、通常の1GHz帯域での計測値に相当する  $t_{m\_1GHz}$  (白丸プロット) では理論値とは一致しないことが示された。即ち、急峻な立ち上がり時間を有するパルスは電離領域での電子の移動により形成され、この現象の測定には数10psオーダの時間応答が必要である。なお、図中の黄色のバー  $t_c$  は、参考にした電離領域を光が移動する時間であり、黒のバー  $t_{th\_PDIV}$  は実験での部分放電開始電圧に基づき求めた結果である。この結果は測定値とよく一致しており、 $t_{th\_k}$  で見られた利用率  $u$  の大きな時の測定値との相違は、実験での部分放電開始電圧が理論値より大きかったことに起因していることがこの結果から説明できた。

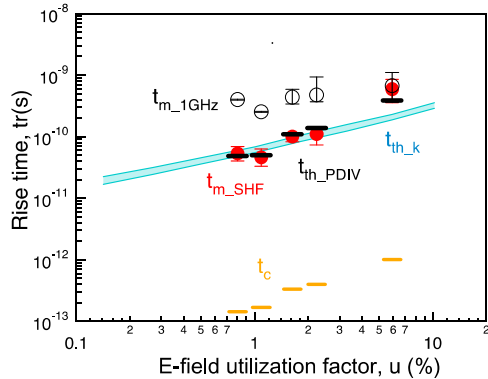


図2 SF<sub>6</sub>ガス中部分放電電流波形の立ち上がり時間の電界利用率依存性と理論値との比較

ガス絶縁機器以外にも、電力用変圧器の主絶縁液体である鉱油やシリコン油等を対象に、同様の検討を行った。シリコン油では粘性の異なる場合の特性も検討した。また、これ以外の冷却性能が高く粘性は低く、絶縁耐力が高い絶縁油に関する検討も実施した。これら絶縁油はガスよりもより急峻な電流パルスの発生が認められたために、超広帯域測定装置の帯域をさらに拡張して実施した。これにより10ps以下のパルスが発生していることが確認された。また、絶縁液体への水分混入の異常状態を模擬した実験を鉱油やシリコン油で実施し、部分放電開始電圧ならびに絶縁破壊電圧の低下特性と水分混入量との関係を明らかにした。この時の部分放電電流波形の特徴も明らかにした。

さらに、電力ケーブルへの適用拡大としてXLPE固体絶縁物に針電極を刺して異物欠陥やボイド欠陥等の劣化モデルを作成し、同様の実験を実施した。その結果、XLPE固体絶縁物中のボイドや電気トリ発生時の部分放電電流波形は、図3のような立ち上がり時間が数100psオーダの高周波成分を有していることを明らかにした。この結果は、通常電

力ケーブルの診断では伝搬時の減衰が大きいため低周波領域での信号検出が行われているが、異常部位近傍であれば原理的に高周波信号の検出は可能であることがわかった。

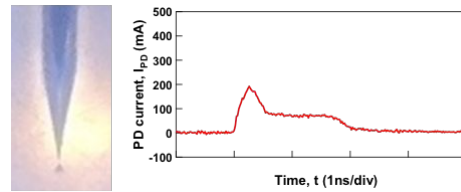


図3 電気トリ発生時のXLPE針刺しサンプルでの部分放電電流波形の一例

以上のように、本研究により電力機器の主要な気体、液体、固体絶縁物におけるそれぞれの典型的な部分放電電流波形を取得することができた。これにより、電力設備を対象とした大規模数値解析の際の入力信号源の基礎となるデータベースを構築できた。また、電力ケーブル劣化モデルでボイドから電気トリ発生時の電流波形形状は変化が認められ、劣化評価の指標となる特徴量が得られた。この電流の特徴量が放射電磁波にどのように反映されるか、それに基づくセンサ仕様や配置をFDTD法による大規模計算により検討した。

(2) FDTD法による大規模計算と革新的機器開発法の提案 超広帯域計測装置により測定された電流波形に基づき、FDTD法による大規模計算を実施した。まず、それに先立ち、解析モデルにガウス波で近似した模擬電流を入力して、解析モデルの計算可能性や妥当性を検証し、入力電流波形と放射電磁波の周波数特性の関係を明らかにした。この後、実際の測定波形に基づき解析を実施し、電磁波の放射特性や伝搬特性を検討して、これら信号を最適に検出、評価するためのセンサ仕様や配置などを詳細に解析的に検討した。

解析モデルとして、ガス絶縁閉閉機器GISの母線部や電力ケーブルを対象とし、電圧階級の異なるサイズを変えたモデルを複数構築した。そのモデルで放射電磁波特性ならびに伝搬電磁波特性を、入力電流波形とセンサ位置を軸方向と系方向で変化させて検討した。その結果、電力機器形状に基づき支配的となる周波数特性は異なり、センシングに適した機器毎の周波数帯域を明らかにした。また、これに対応するセンサとして、感度よく検出できるセンサ周波数帯域とセンサ位置を明らかにできた。

特に、電力ケーブルの劣化モデルで、電気トリ発生有無での電流波形の特徴量の相違に基づき放射電磁波の相違が評価できることを解析的に明らかにし、その特徴量を検出、評価する手法を提案できた。この提案手法を検証するための検証実験を行ない、解析結果と一致する結果が得られた。



即ち、本研究が提案している「劣化状態に基づく電流波形の相違や特徴量を解析して放射される電磁波を最適に検出、評価する」診断技術開発の方法論が検証できた。この結果は、電力機器の各種絶縁物の劣化状態に対応する電流波形を超広帯域測定により取得していると、大きさや形状、構造の異なる個々の電力機器にカスタマイズされた診断技術の開発が原理的に可能となることを意味している。このように診断技術の新しい開発方法の方法論を提示、検証できたため、本研究の目的は達成された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計20件)

Keisuke Yoshida, Super High Frequency Components of Partial Discharge Current Pulse Waveforms and the Emitted Electromagnetic Waves Measured with the SHF\_PDPW System, The 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH2015), 2015

Wataru Tomoeda, Steep Rise Time Properties of PD Current Pulse Waveform in Gaseous and Oil Insulations Measured with the SHF\_PDPW System, The 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH2015), 2015

小坪俊勝, XLPE 針刺しポイドモデルにおける PD 電流波形の超広帯域計測とその電流波形に基づく放射電磁波特性に関する基礎検討, 電気学会誘電・絶縁材料/電線・ケーブル合同研究会, 2018

小坪俊勝, SHF\_PDPW 装置により測定した PD 電流パルス波形を用いた FDTD 法による XLPE 電力ケーブル中 PD 放射電磁波伝搬特性に関する基礎検討, 平成 29 年度 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2017

山内辰浩, 70GHz から 1GHz 帯域の複数オシロスコープを用いた等価同期計測評価システムによる鉱油中 PD 電流波形評価に関する基礎検討, 平成 29 年度 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2017

大塚信也, 70GHz オシロスコープを用いた超広帯域計測による絶縁油中部分放電電流波形の基礎特性, 第 37 回絶縁油分科会研究発表会, 2017

友枝渉, ポイドを有する XLPE モデルサンプルの PD 電流パルス特性と FDTD 法による放射電磁波伝搬特性に関する基礎検討, 電気学会放電・絶縁材料・高電圧研究会, 2017

小坪俊勝, CO<sub>2</sub> ガス中負極性 PD 電流パルス波形の立ち上がり時間とピーク値に針電極先端形状が及ぼす影響に関する検

討, 第 69 回電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2016

吉田圭佑, EHF 帯までの超広帯域測定による粘度 10cs のシリコン油中負極性 PD 電流パルス波形の立ち上がり時間の測定帯域依存性第 68 回電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2016

小坪俊勝, 金属異物近傍の電界分布が SF<sub>6</sub> ガス中 PD 電流パルス波形の立ち上がり時間に及ぼす影響に関する基礎検討, 平成 28 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2016

吉田圭佑, EHF 帯までの超広帯域測定による鉱油中 PD 電流パルス波形の ps オーダ立ち上がり時間の検討, 平成 28 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2016

友枝渉, 部分放電電荷量校正器の出力波形が放電特性評価に及ぼす影響, 平成 28 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 2016

小坪俊勝, 金属異物先端形状が大気および SF<sub>6</sub> ガス中 PD 電流パルス波形の立ち上がり時間に及ぼす影響の基礎検討, 平成 28 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 2016

小坪俊勝, FDTD 解析による入力電流波形形状が放射電磁波波形に及ぼす影響の基礎検討, 平成 28 年電気学会全国大会, 2016

吉田圭佑, シリコン油中 PD 現象及び PD 電流パルス波形の粘度依存性, 第 68 回電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2015

吉田圭佑, 水分混入が鉱油中 PD 電流パルス波形およびその放射電磁波波形に及ぼす影響の超広帯域計測による検討, 第 46 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, 2015

松本卓也, 超広帯域計測による PD 電流パルス波形の立ち上がり時間形成に関する基礎検討, 平成 27 年電気学会全国大会, 2015

松本卓也, SHF 帯までの超広帯域測定に基づく鉱油中 PD 電流パルス波形とその放射電磁波波形の関係, 平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2014

友枝渉, 部分放電電流波形とその放射電磁波波形の周波数成分に関する関係の基礎検討, 第 67 回電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2014

松本卓也, 超広帯域電流波形計測による鉱油中部分放電現象に水分が及ぼす影響の検討, 第 67 回電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2014

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大塚 信也 ( OHTSUKA, Shinya )

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：60315158

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：

(4) 研究協力者

( )