

電極間の部分放電により発生する電磁波の周波数解析

長町 峰志・平田 智之・上野 秀樹・中山 博史 (電気系工学専攻)

柿花 邦彦 (関西電力)

Frequency Analysis of Electromagnetic Waves Caused by Partial Discharge in Electrodes

Takashi NAGAMACHI, Tomoyuki HIRATA, Hideki UENO, Hiroshi NAKAYAMA

(Department of Electrical Engineering and Computer Sciences)

and Kunihiko KAKIHANA (Kansai Electric Power Co. Inc.)

Abstract

The investigated electrode configuration was composed of a needle electrode and a plane electrode. The discharge inception voltage rose as the gap length increased. This change on the discharge inception voltage should be affected by changing the electric field. When the electromagnetic wave was measured using a spectrum analyzer, the electromagnetic waves with around 150 MHz were detected in oil. While, the waves with around 50 MHz were detected in air. In addition, the appearance of the discharge images was observed with the image-intensified still camera.

Key words : partial discharge, electromagnetic wave, transformer

1. はじめに

現在、わが国において電力機器は電力供給の基盤として位置づけられ、変圧器やガス絶縁開閉装置(GIS)などの変電機器は、中心的な役割を担っており、数多くの機器が日夜運転されている[1]。このような状況の中で、安定した電力供給を確保していくために、事故を未然に防止するための予測保全の観点からの機器診断技術の開発と適用が要請されている。変圧器、GIS等の内部での絶縁異常要因の中で、最も問題となるのは微小な金属異物の存在であり、それに起因する部分放電(Partial Discharge)による診断技術が幅広く検討されている[2]。

複合誘電体を有する電極配置に高電圧を印加すると、電界強度の大きいところで局所的な放電が生ずる。これを部分放電と呼ぶ[3]。部分放電の検出方法(PD測定技術)としては、部分放電の発生にともない生じる高周波電圧・電流[4]、電磁波[5]、光[6]、音波[7]を検出する電氣的、光学的、音響的方法などがある。その中で、部分放電による放射電磁波の測定[5]あるいは音波[2, 7]の測定による機器外部からの部分放電検出、劣化診断技術の研究開発が進められており、特に検出できる機器の範囲が広い点などから外部に放射される電磁波を計測する手法が注目されている。高電圧回路と切り離された測定であり運転停止が不要であること、アンテナあるいはこれに代わるセンサなどは低電圧側あるいは機器と切り離された形で設置することができるため、測定が容易であること、またスペクトラムアナライザの中心周波数をS/Nの良い任意の周波数に選定することが容易であるため、高感度に測定できる利点を有するためである[8]。しかしその反面、部分放電からの信号が極めて微弱であり、外部から機器に伝搬・侵入してくる外部ノイズとの分離が技術確立の必要条件となってくる。

本実験では、問題とされている変圧器のブッシング油中における微小な金属異物を針-平板電極で模擬し、故障の原因となる放電を再現した。そこで油中で発生する部分放電による電磁波の周波数特性を解明するため、放射電磁波の周波数特性、放電の観測、電流パルスの測定を努めた。さらに比較として大気中でも同様の測定を行った。

2. 実験方法

本実験で用いた電極構成を Fig.1 に示す。針電極、平板電極によって構成されている。針電極には曲率半径が約 $35\mu\text{m}$ 、平板電極には直径 50mm の黄銅製平板を用いた。Fig.1 のように平板電極の上部には絶縁破壊を防止するため $100\times 100\text{mm}^2$ 、厚さ 0.5mm の硼珪酸ガラスを配置した。このガラスの体積抵抗率は約 $10^{12}\Omega\cdot\text{m}$ 、表面抵抗率が $10^{11}\Omega$ 、比誘電率が 7.0 である[9]。針電極先端からガラス上部までの距離をギャップ長 g として、ギャップ長を $g=0, 1, 3\text{mm}$ と変化させて測定を行った。本実験では、ギャップ長を変化、つまり、電界を変化させることによって電磁波の周波数特性や電流波形への影響について調べた。この電極系をアーク放電により劣化させた絶縁油(高圧絶縁油 K, 新日本石油㈱)で満たされたビーカーに浸漬し、部分放電における電磁波スペクトルの測定、部分放電の観察、電流パルスの測定を行った。

Fig.2 に実験回路図を示す。電源は交流電源(60Hz)を用いた。ネオントランス(電流容量 20mA)とブロッキングコイル 10.1mH を介し、放電部には分圧用コンデンサ C_1 , C_2 を並列に接続し、デジタルオシロスコープ(DL-1540, 150MHz, 横河電機(株))にて、コンデンサ C_2 の電圧を測定した。ここで用いたコンデンサ C_1 , C_2 はそれぞれ 1034pF, $2\mu F$ である。また、放電部に直列に検出抵抗 25Ω を接続した。また、検出抵抗に並列にハイパスフィルタ(1kHz 以下遮断)を接続し、フィルタを介してデジタルオシロスコープを用いて電流波形を測定した。ハイパスフィルタの回路定数については電源周波数をカットし、高周波数である放電パルスのみを観測できるように定めた。放電により発生した放電パルスが最初に生じた瞬間を放電開始と定め、その時に印加した電圧を放電開始電圧と定めた。部分放電の様子はイメージインテンシファイア(XX1500, Philips Ltd.)を接続した一眼レフカメラ(AE-1, Canon Ltd.)を用いて露光時間 1 秒で撮影した。いずれの撮影においても、数回撮影を行い、最も多く観測された放電の様子を採用した。

放電部から垂直距離約 0.45m, 水平距離約 0.10m の位置にモバイル用ディスコーンアンテナ(第一電波工業(株), D120, 周波数域 25~1300MHz)を配置して放電による電磁波を受信し、パーソナルコンピュータで周波数解析を行った。

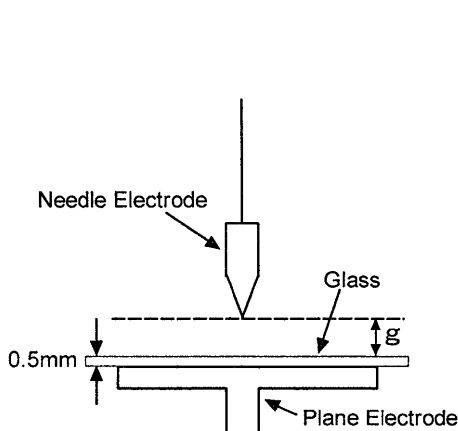


図 1 電極構成図
Fig.1 Electrode configuration

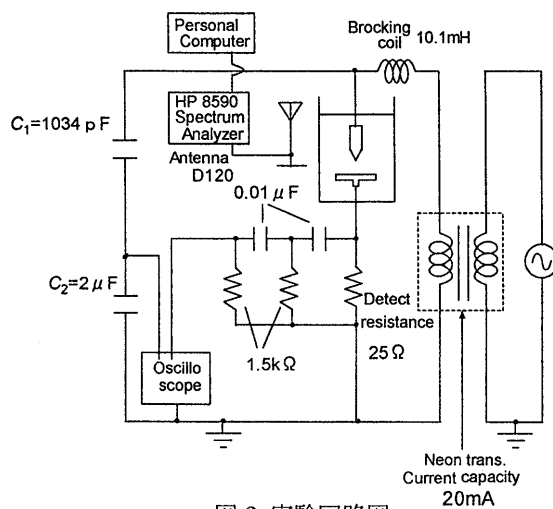


図 2 実験回路図
Fig.2 Experimental circuit diagram

3. 実験結果

3.1 放電開始電圧のギャップ長依存性

油中、大気中の測定の際に、ギャップ長を変化させると放電開始電圧が変化する。そこで、各条件の放電開始電圧を測定した。

Fig.3 に各々の放電開始電圧のギャップ長依存性を示す。Fig.3(a)は油中、Fig.3(b)は大気中の測定結果である。測定は同一条件で 5 回行い、その平均値を最大値及び最小値とともに図中に示した。どちらの条件においてもギャップ長が大きくなるにつれて放電開始電圧は上昇した。油中のときの放電開始電圧は順に 10.9, 11.2, 12.2kV となる。放電開始電圧の上昇率はそれぞれ 0.3, 0.5kV/mm となり、ギャップ長が大きくなるにつれて放電開始電圧は上昇した。大気中のときの放電開始電圧は順に 1.3, 1.7, 1.8kV となり、上昇率は 0.4, 0.05kV/mm となり、ギャップ長を増加させると飽和する。後述の実験における印加電圧は部分放電が実際に発生するように本放電開始電圧をもとに設定した。

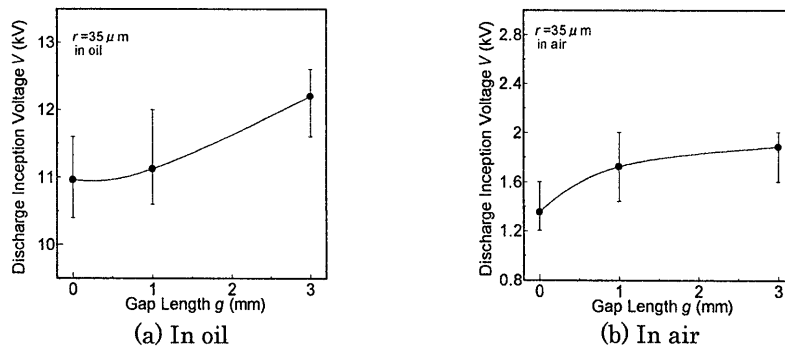


図 3 放電開始電圧のギャップ長依存性
Fig.3 Discharge inception voltage dependence on gap

3.2 部分放電から放射される電磁波強度の周波数特性

3.2.1 油中の場合

本研究の測定において、シールドルーム等の中で行っていないために外部ノイズ電磁波が混入してくる。そのために、部分放電からの放射電磁波と外部ノイズ波を区別する必要がある。Fig.4 は外部ノイズ電磁波の周波数特性を示す。縦軸は電磁波強度(mV)、横軸は周波数(MHz)である。電磁波を測定するのを20回繰り返し、電磁波強度の数値を周波数毎に積分したものを図中に示した。周波数が約77MHzで2.9mVのピークが観測された。電磁波の強度に変化はあるが、周波数に変化はないためこのピークを外部ノイズとする。なお周波数85MHzにピークをとる電磁波が混入しているが実験をするさい、無視できる大きさのピークであるため外部ノイズとはしなかった Fig.5 に油中における電磁波強度一周波数特性を示す。まず、ギャップ長 $g=0\text{mm}$ 、印加電圧 $V=12.4\text{kV}$ のスペクトルでは、ギャップ長が小さいほど電磁波スペクトルは全体的に大きくなっている。電磁波はどの周波数帯でも観測されるが、特に周波数 $f=50, 150\text{MHz}$ 近傍で電磁波が頻繁に観測されており、ギャップ長が小さくなるにつれて電磁波が観測される頻度も増えている。また、 $f=150\text{MHz}$ 近傍の電磁波強度に着目すると、発生頻度が高くなり、積分された電磁波強度も大きくなる。 $g=1, 3\text{mm}$ でも同様の特性が見られるが、 $g=3\text{mm}$ の電磁波強度は弱い。印加電圧 $V=12.4\text{kV}$ と $V=13.6\text{kV}$ を比較すると、どのギャップ長でも印加電圧が大きい方が電磁波強度は全体的に大きい結果となっている。また、電磁波が観測される頻度も増えており、 $f=50, 150\text{MHz}$ 近傍で電磁波が特に頻繁に観測されている。

Fig.6 に大気中における電磁波強度一周波数特性を示す。 $V=4.0\text{kV}$ の図を見ると、油中のときと同様にギャップ長が小さいほうが電磁波強度は大きくなっており、電磁波が観測される頻度も増えている。電磁波が観測される周波数帯は油中のときとは違い、 $f=150\text{MHz}$ 近傍では電磁波は観測されず、 $f=50, 100\text{MHz}$ 近傍で電磁波が観測された。印加電圧 $V=4.0\text{kV}$ と $V=5.0\text{kV}$ を比較すると、油中と同様に印加電圧が大きいほうが電磁波強度は全体的に大きくなり、電磁波が観測される頻度も増えている。

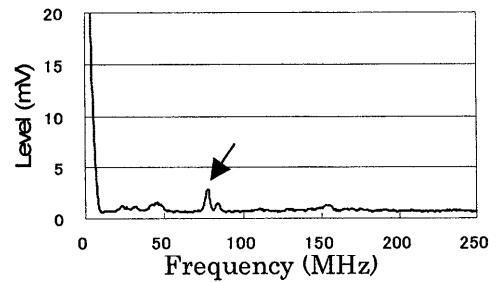
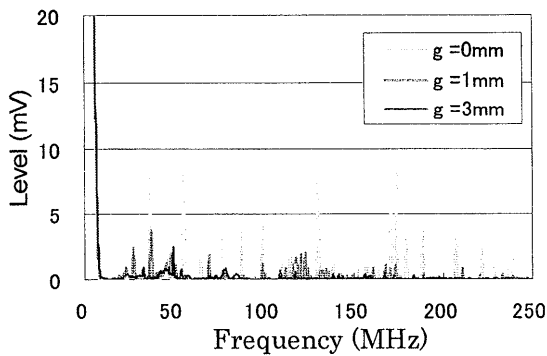
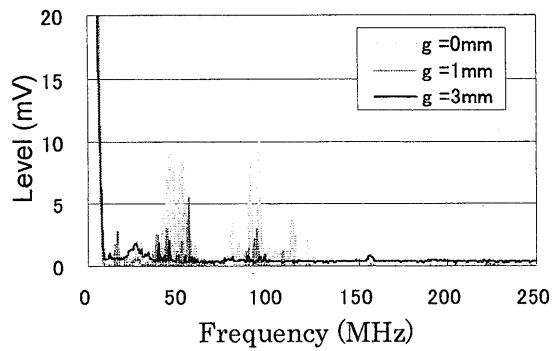


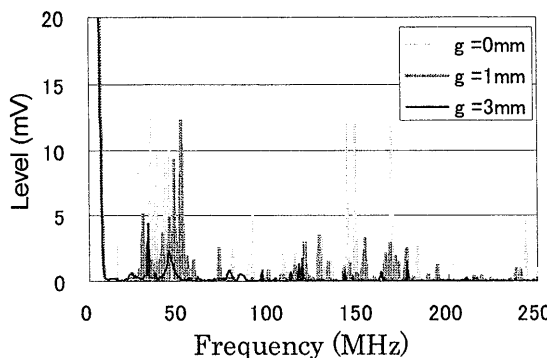
図4 外部ノイズ電磁波強度一周波数特性
Fig.4 Level of background electromagnetic wave -Frequency characteristics



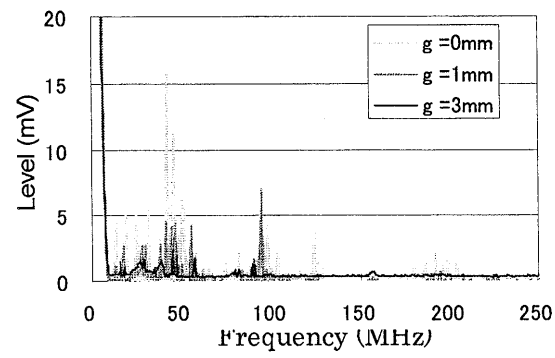
(a) $V=12.4\text{kV}$



(a) $V=4.0\text{kV}$



(b) $V=13.6\text{kV}$



(b) $V=5.0\text{kV}$

図5 電磁波強度 - 周波数特性(油中)

Fig.5 Level of electromagnetic wave -Frequency characteristics in oil

図6 電磁波強度 - 周波数特性(大気中)

Fig.6 Level of electromagnetic wave -Frequency characteristics in air

3.3 部分放電の観測

周波数と電磁波強度の関係のほかに、実際に針-平板電極間で生じている放電の様子についてイメージインテンシファイアを接続したカメラを用いて調べた。油中における正面からの放電の様子を Fig.7, 大気中における正面からの放電の様子を Fig.8 に示す。針電極下部にある線はガラス上部である。左端には印加電圧を示しており、油中では、上からそれぞれ $V=12.0, 13.6, 14.8\text{kV}$, 大気中では上からそれぞれ $V=2.0, 4.0, 5.0\text{kV}$ である。露光時間はすべて1秒である。また、Fig.7(a), Fig.8(a)は放電の発光の広がりを目盛を表記した。

まず、Fig.7(a)の $g=0\text{mm}$ では、針先端からガラス表面を沿う沿面方向への放電が確認された。放電は印加電圧の増加に伴って伸びていった。Fig.7(b)の $g=1\text{mm}$ では、針先の放電と沿面方向へと伸びる二つの放電の形態が見られ、沿面の伸びは印加電圧の増加に伴って大きくなる。Fig.7(c)の $g=3\text{mm}$ では、放電開始電圧の関係から $V=12.0\text{kV}$ では放電は確認できなかった。放電が発生してからは針先からガラスへと進展し、沿面へ伸びた。

次に、大気中では、Fig.8(a), (b)の $g=0, 1\text{mm}$ は油中のときと同様の放電が観測された。しかし、Fig.8(c)の $g=3\text{mm}$ では、針先からガラスへと放電が進展したものの、沿面放電はほとんど確認できなかった。Fig.8(c)の $V=2.0\text{kV}$ のようにガラス上部より下の発光はガラスによって反射したものである。これは、全ての写真に当てはまる。

放電の様子と放射電磁波の関係は確認されなかったが、油中、大気中ともに印加電圧を増加させるまたはギャップ長を小さくすることにより、沿面方向への放電の伸びが増加している。次の節で詳しく述べるが油中、大気中ともにどのギャップ長においても印加電圧を増加させるまたはギャップ長を小さくすると、電流パルスは大きくなっている。つまり、電流パルスと放電の伸びにも関係があると考えられる。

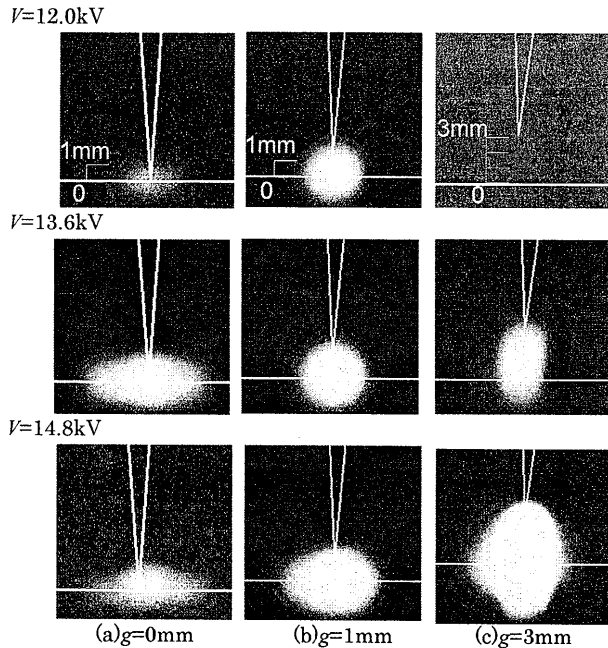


図7 正面からの部分放電の様子(油中)

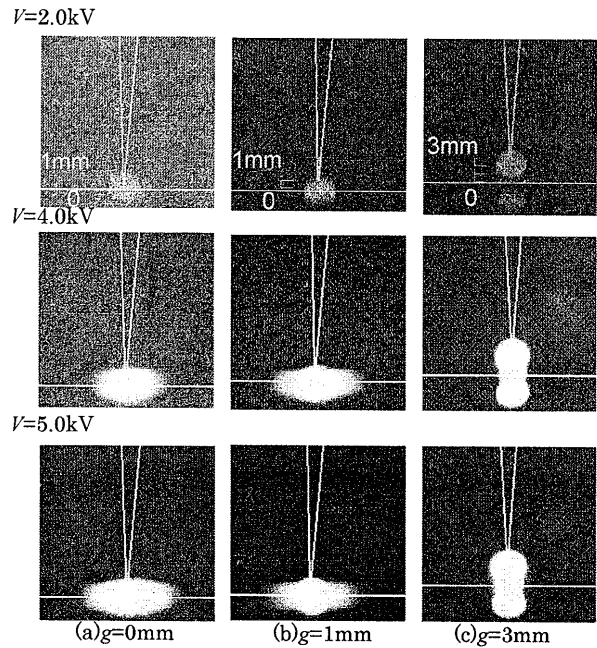


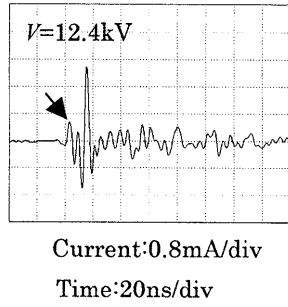
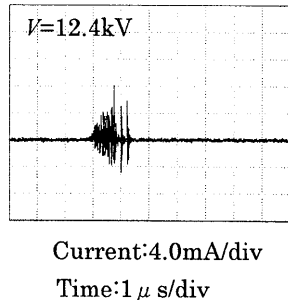
図8 正面からの部分放電の様子(大気中)

Fig.7 Partial discharge images in oil viewed from front Fig.8 Partial discharge images in air viewed from front

3.4 油中と大気中の電流パルスの比較

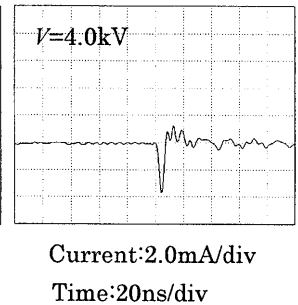
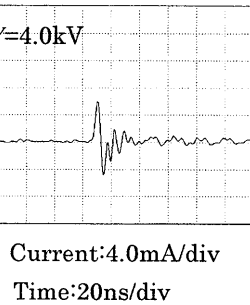
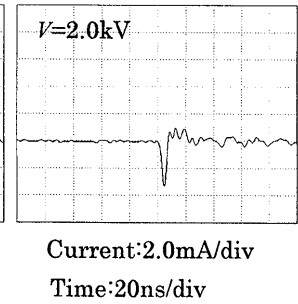
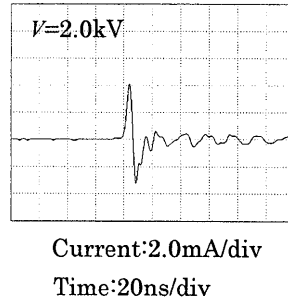
Fig.9 に油中における $g=0\text{mm}$, $V=12.4, 13.6\text{kV}$ の正, 負の電流パルスを, Fig.10 に大気中における $g=0\text{mm}$, $V=2.0, 4.0\text{kV}$ の正, 負の電流パルスを示す。油中の電流パルスにおいて $V=12.4\text{kV}$, タイムスケールが $1\mu\text{s/div}$ の正の電流パルスをみると、複数のパルスが重なったような電流パルスが観測された。これは油中の正の電流パルスの特徴と考えられる。そこで、油中の電流パルスの立ち上がり時間、電流パルスのピーク値は、タイムスケール 20ns/div の電流パルスの矢印で示した最初のパルスを測定した。

電流パルスのピーク値を比較する。油中の正の電流パルスは $V=12.4\text{kV}$ のとき 0.5mA , $V=13.6\text{kV}$ のとき 1.0mA である。正極性の電流パルスのピーク値は印加電圧を上昇させるにつれて大きくなったが、負極性の電流パルスは印加電圧を上昇させても電流パルスの大きさはほとんど変化しなかった。大気中の正の電流パルスは $V=2.0\text{kV}$ のとき 4.0mA , $V=4.0\text{kV}$ のとき 6.0mA となり、油中のときと同様に印加電圧を上昇させるにつれて電流パルスは大きくなった。また、負極性のパルスも油中と同様に印加電圧を上昇させても電流パルスはほとんど変化しなかった。油中と大気中の電流パルスを比較すると大気中のほうが正, 負の電流パルスのピーク値は油中よりも大きかった。



(a)Positive (b)Negative

図9 油中の電流パルス (g=0mm)
Fig.9 Current pulse in oil



(a)Positive (b)Negative

図10 大気中の電流パルス
Fig.10 Current pulse in air

Fig.11 に油中の, Fig.12 に大気中の電荷量の印加電圧特性を示す。油中ではギャップ長 $g=0\text{mm}$ のとき印加電圧を増加させると $V=12.4\text{kV}$ で 2.6pC , $V=13.6\text{kV}$ で 3.2pC , $V=14.4\text{kV}$ で 5.0pC と電荷量は増加したが, 負極性では電荷量はほとんど変化しなかった。印加電圧 $V=13.6\text{kV}$ のときギャップ長を変化させると, 正極性ではギャップ長 $g=0\text{mm}$ では 3.2pC , 1mm では 2.2pC , 3mm では 1.9pC となりギャップ長が小さいほど電荷量は大きくなった。負極性の場合では電荷量はほとんど変わらなかった。大気中も油中のときと同様の特性をとり, 印加電圧を増加させるにつれて正極性では電荷量は増加したが負極性ではほとんど変化がなかった。ギャップ長を変化させた場合でも油中のときと同様に正極性ではギャップ長が小さいほど電荷量は増加したが, 負極性ではほとんど変化しなかった。

Fig.13 に油中の Fig.14 に大気中の電流パルスの立ち上がり時間の比較の図を示す。油中の電流パルスの立ち上がり時間が $V=12.4\text{kV}$ のとき正極性では 3.1ns , 負極性では 3.7ns , $V=13.6\text{kV}$ では正極性は 3.1ns , 負極性は 2.5ns となり電流パルスの立ち上がり時間は同じくらいである。印加電圧を上昇させても立ち上がり時間は正極性, 負極性とも

同じぐらいの値となった。大気中の電流パルスの立ち上がり時間は $V=2.0\text{kV}$ のとき正極性では 7.5ns , 負極性では 6.2ns , $V=4.0\text{kV}$ では正極性は 6.2ns , 負極性は 6.2ns となり正極性, 負極性の立ち上がり時間は同じくらいである。印加電圧を上昇させても油中のときと同様に正極性, 負極性ともに立ち上がり時間は同じぐらいの値となった。油中と大気中を比較すると, 油中では印加電圧やギャップ長を変化させても正, 負の電流パルスの立ち上がり時間は $2\sim 6\text{ns}$ で, 大気中では電流パルスの立ち上がり時間は正, 負ともに $4\sim 10\text{ns}$ である。放射される電磁波は電極間の部分放電が原因であり, 電流パルスの立ち上がり時間から電磁波の周波数を計算すると油中のほうが高周波数のため, 油中での電磁波が大気中の時と比べて高い周波数帯で観測されるのはこの立ち上がり時間の違いによるものと考えられる。

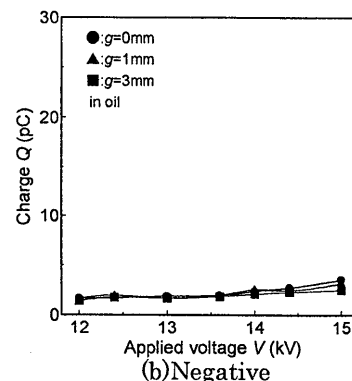
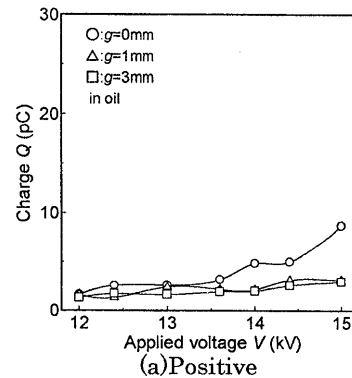


図11 電荷量の比較 (油中)

Fig.11 Comparison of charge (in oil)

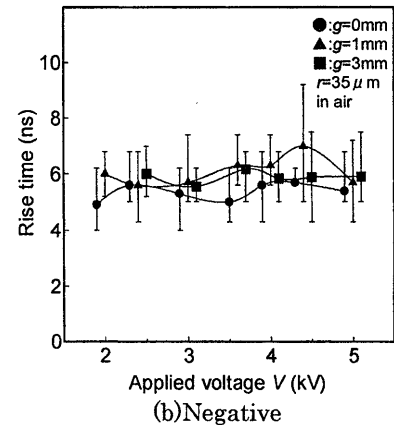
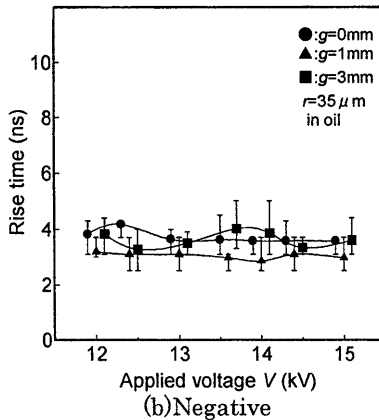
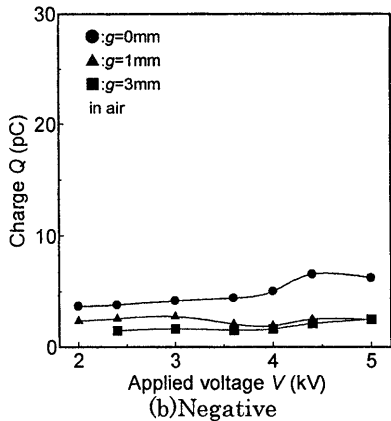
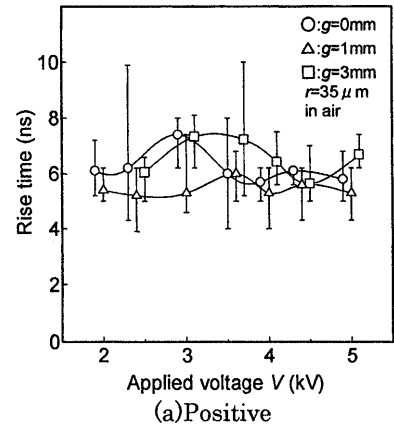
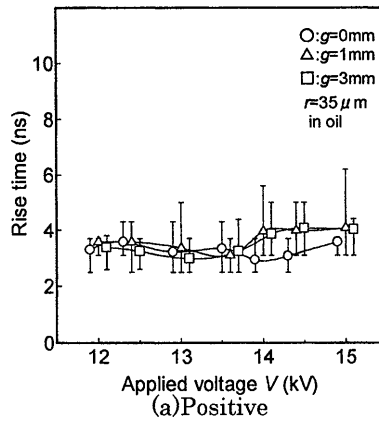
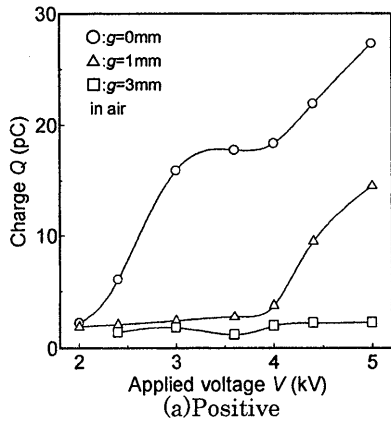


図 12 電荷量の比較 (大気中)
Fig.12 Comparison of charge
(in air)

図 13 立ち上がり時間の比較
(油中)
Fig.13 Comparison of rise time
(in oil)

図 14 立ち上がり時間の比較
(大気中)
Fig.14 Comparison of rise time
(in air)

4. 検討

以上の結果から、部分放電から生じる放射電磁波と電磁波強度、電流パルスの関係について考察する。平等電界の場合、大気中の絶縁耐力は約 30kV/cm [10]に対し、絶縁油中では約 187kV/cm [11]となり絶縁耐力が約 6 倍異なる。油中と大気中の放電開始電圧に違いが出たのはこのためであると考えられる。油中の正、負極性の波形の違いについては今回の報告では乗せませんでした。負極性の場合でも正極性と同じように複数のパルスが重なったような波形が見られる場合が稀にあるため、負極性の場合では正極性と比べて電流パルスのピーク値が小さいため、波形が異なるように見えるのではないかと考えているが、今後も検討を重ねる必要がある。絶縁油中での正の電流パルスのピーク値が大気中の電流パルスのピーク値と比べて小さいのは正の電流パルスのピーク値は図中の矢印で示した最初の波形を測定したためであり、タイムスケールが $1\mu\text{s/div}$ の電流パルスと正の電流パルスを比べるパルスのピーク値は同じくらいの値であった。電荷量が正極性が負極性よりも大きかったのは負極性では針が負極のため、移動度の小さい正イオンの作用により局部的に安定な放電が生じて放電の進展性は弱いものに対して、正極性では針が正極なため、移動度の大きい電子が対極側から衝突電離を起こしながら針へと向かうため、放電の進展性は強い。正極性と負極性の電荷量を比べると正極性の電荷量のほうが大きいのはこの放電の進展性の差であると考えている。

放射電磁波の周波数解析において、油中では $f=150\text{MHz}$ 近傍に電磁波が観測されたが、大気中では $f=150\text{MHz}$ 近傍で電磁波は観測されなかった。電磁波は部分放電が原因であると考えられている。これは、部分放電中の伝導電流や変位電流が波源になると考えてよく、放射電磁波の特性は、電流パルスのピーク値や立ち上がり時間に依存すると考えられている[12]。3.4 節にも示したように油中と大気中において、正の電流パルスは大きく異なる。油中の正の電流パルスは複数のパルスが現れており、油中の電流パルスは気中の電流パルスと同じタイムスケールでは波形全部が収まらなかった。油中と大気中の電流パルスの立ち上がり時間を比較すると、油中での立ち上がり時間は正、負ともに約 $2\sim 6\text{ns}$ で大気中の場合では、正、負ともに約 $4\sim 10\text{ns}$ となり油中の立ち上がり時間は大気中の立ち上がり時間と比べると半分ぐらいの時間である。立ち上がり時間から周波数を計算すると、油中で約 $60\sim 175\text{MHz}$ 、大気中で約 $35\sim 90\text{MHz}$ ぐらいとなり、実験結果と同じぐらいの値となるため、油中での部分放電によって発生する電磁波が約 150MHz の周波数帯で観測できたのに対して、大気中では観測できなかったのはこの立ち上がり時間の違いによるものであると考える。

液体中の絶縁破壊理論は大別して衝突電離が液体中で実際に生じて破壊に至る電子的破壊説と、その前に気泡が発生し気泡中で衝突電離が生じて放電に至る気泡破壊説の2つがある。液体中の放電では高電界が加えられる油の体積が増すため、油中に含まれる不純物や気泡などから放電が開始する確率が増す体積効果と、電極表面上に存在する放電しやすい点が増すことによる面積効果を考える必要がある。絶縁油の場合では高電界における油の分解ガスの影響から体積効果が著しいと考えられている。実験結果より油中での電磁波は150MHz付近の周波数帯に加えて、大気中のときと同様に50MHz、100MHz付近の周波数帯でも観測されることや、油中での電磁波が観測される頻度は印加電圧が低いときは50MHz、100MHz付近の周波数帯で電磁波が頻りに観測され、150MHz付近ではあまり観測されず、印加電圧を上昇させると150MHz付近で電磁波が頻りに観測されることから、油中での印加電圧が低い、またはギャップ長が小さいときに $f=150\text{MHz}$ 近傍で電磁波があまり観測されず、50MHz近傍で頻りに観測されたのは電極間の電界が低いため、電子的破壊による放電はほとんどおきず、油中に存在する気泡や不純物による放電が頻りに起こる。また、印加電圧を上昇させるまたはギャップ長を小さくした場合は、電極間の電界が高くなり気泡や不純物による放電に加えて、電子的破壊による放電も頻りに発生しているため、 $f=150\text{MHz}$ 近傍で電磁波が頻りに観測されたのではないかと考える。

5.まとめ

油中、大気中において部分放電から生じる放射電磁波の諸特性について調べた結果を以下にまとめる。

- (1) 油中、大気中のどちらの条件でもギャップ長 g を0mm, 1mm, 3mmと大きくすると油中のときの放電開始電圧は順に10.9, 11.2, 12.2kVとなり、大気中のときの放電開始電圧は順に1.3, 1.7, 1.8kVと放電開始電圧は上昇した。
- (2) 油中における電磁波強度一周波数特性から、印加電圧を増加させることによって電磁波の発生する周波数帯域が広くなり、電磁波強度も強くなる。さらに、周波数 $f=150\text{MHz}$ 付近の電磁波が頻りに出るようになり、ピークが大きくなっている。大気中でも同様の特性となったが $f=150\text{MHz}$ 付近の電磁波は観測されなかった。油中では気中で観測された50MHz、100MHzの周波数帯に加えて150MHzの周波数帯でも電磁波が観測されており油中での部分放電を検出するさいには、150MHz付近の周波数帯を観測することで気中での部分放電の電磁波との区別がついた。
- (3) 部分放電の観測から、油中では放電の沿面方向への伸びは印加電圧の増加に伴い大きくなった。ギャップ長を小さくしても放電の伸びは大きくなった。大気中では、 $g=3\text{mm}$ のとき沿面への伸びが見られなかったこと以外は油中と同様の特性が得られた。
- (4) 油中と大気中の電流パルスと比較すると大気中のほうがパルスのピーク値が大きく、電荷量も油中よりも大きい。立ち上がり時間を比較すると、油中のほうが立ち上がり時間は早かった。立ち上がり時間を計算すると実験結果と同じぐらいの値となり、油中の電磁波の周波数特性は電流パルスの立ち上がり時間と関係があることが示唆された。

参考文献

- [1] 大久保仁：「電力機器の診断技術の現状と今後の課題」, 電学論 B, Vol.119, pp.434-437(1999)
- [2] 小迫雅裕・大塚信也・松久高志・匹田幸幸：「GIS 内の部分放電およびフリー異物により発生するラム波の時間周波数解析」, 電学論 B, Vol.122, pp.719-724(2002)
- [3] 鶴見策朗・河野照哉・山本充義・河村達雄：「高電圧工学」, 電気学会, p.137(1984)
- [4] R.Bartnikas："Partial Discharge：Their Mechanism, Detection and Measurement", IEEE Trans. DEI.Vol.9, p.763(2002)
- [5] A.G.Sellars, J.MacGregor and O.Farish："Calibrating the UHF Technique of Partial Discharge Detection using a PD simulator", IEEE Trans.DEI.Vol.2, p.46(1995)
- [6] Y.Tian, P.L.Lewin, D.Pommerenke, J.S.Wilkinson and S.J.Sutton："Partial Discharge On-line Monitoring for HV Cable Systems Using Electrooptic Modulators", IEEE Trans.DEI.Vol.11, p861(2004)
- [7] L.Peyraque, C.Boisdon, A.Beroual and F.Buret："Statics Electrification and Partial Discharges induced by Oil Flow in Power Transformers", IEEE Trans.DEI.Vol.2, p.40(1995)
- [8] 松本聡：「電力エネルギー分野における最新のセンシング・監視・診断・保守技術」, 電学論 B, Vol.126, pp.574-577(2006)
- [9] 上野秀樹・渡部克典・中山博史：「 N_2/SF_6 , N_2/O_2 混合ガス中における沿面放電特性」, 静電学誌, Vol.23, pp.266-271(1999)
- [10] 林：「高電圧プラズマ工学」, p.39(2001)丸善
- [11] 林：「高電圧プラズマ工学」, p.48(2001)丸善
- [12] ガス絶縁機器における部分放電現象と検知技術調査専門委員会：「ガス絶縁機器における部分放電現象と検知技術の最新動向」, 電気学会技術報告, 982, p.11(2004)
- [13] 電気学会通信教育会：「高電圧工学」, p.49(1989)オーム社