

背後電極を有した平板電極間の沿面放電と発光

東原 孝明・上野 秀樹・中山 博史

(電気系工学専攻)

Creeping discharge and light emission characteristics on plane electrodes

Takaaki TOHARA, Hideki UENO and Hiroshi NAKAYAMA

(Department of Electrical Engineering and Computer Sciences)

Abstract

Creeping discharge and light emission characteristics in Ne gas for the configuration with plane electrodes on the dielectric plate with a stripe backside electrode have been investigated. In the case of the configuration without backside electrode, discharge inception voltage increased monotonically with increasing gas pressure. For the configuration with a backside electrode discharge inception voltage decreased when the backside electrode became wide. Moreover, it tended to saturate over 30kPa for the configuration with a backside electrode. By observations of discharge using image-intensified CCD camera, discharge developed along the dielectric plane surface at 30kPa on 60kPa, on the other hand, discharge grew in the gaseous space away from dielectric surface. These facts suggest that the effect of backside electrode strongly depends on their width and gas pressure.

Keywords : creeping discharge, backside electrode, light emission, Ne gas

1. はじめに

沿面放電は異種の誘電体の境界面に沿って発生進展する放電現象である[1]。誘電体表面上の沿面放電は、気中放電に比べて進展しやすく電力機器や電力設備において沿面放電は絶縁破壊を引き起こす原因と考えられ、絶縁設計上、沿面放電を制御することが重要なポイントとなる。また、絶縁物裏面の背後電極の存在によって、沿面放電が進展しやすくなる[2][3][4]ことから、沿面放電の発生と進展を如何にして抑制するのかを目的とした研究は数多く行われてきた[5][6]。

沿面放電の利用・応用を目的とした研究には、NO_x等の環境汚染物質の除去装置やオゾナイザ等が挙げられるが[7]、最近では、沿面放電の発光を利用した表示素子の提案もされ[8][9]、さらなる応用の拡大が期待できる。

ところで、沿面放電と同様に誘電体が介在した放電であるバリア放電の応用として、PDP(プラズマディスプレイ)が挙げられる。カラーPDPはガス放電による発光を利用した表示デバイスであり、放電によって放射される紫外線が各放電セル内壁に塗布された蛍光体を発光させる[10]。本研究では、沿面放電発光を利用した発光デバイスへの可能性の応用拡大を目的としている。しかし、このような応用には沿面放電が樹枝状であることや制御性の欠如など多くの問題が挙げられる。また、沿面放電に関する研究は古くから数多くされているが、沿面放電による発光、とりわけ発光領域や空間の発光領域については不明な点も多く残されている。

そこで、本稿では沿面放電の制御・面状放電発光を目的とした沿面放電の特性について報告する。面状発光を実現させるために平行平板電極を用い、また交流電圧下では背後電極を有する絶縁体表面では沿面放電が発生しやすい[2][3][4]ということから背後電極を有した電極構成とした。これまでの沿面放電の基礎的な特性の解明には、多くの場合背後電極としては面状のものや線状のものが用いられてきた。しかし、オゾナイザや発光を利用した素子に沿面放電を応用する場合、楕形電極やマトリクス電極が用いられることが考えられ、それによりストライプ状に配置された導体が背後電極となる可能性がある。そこで今回は複数の導体で構成されるストライプ状背後電極を用いた。この電極系を用いて交流電圧を印加したときに発生する沿面放電の基礎特性を調べた。特に希ガスで最も放電開始電圧の低いNeガスを用い、放電開始電圧、放電発光の様子、放電発光のスペクトルの測定を行なった。得られた放電発生点、放電路、発光強度等の結果と背後電極の幅やストライプ状の導体位置との関係について検討を行った。

2. 実験方法

2.1 電極構成

本実験で用いた電極構成図を図1に示す。高圧電極(HV electrode)、アース電極(Grounded electrode)にはそれぞれ15mm×21mm、曲率半径884 μ mの銅製平板を使用した。電極間距離は10mm一定である。その下部に、誘電体とし

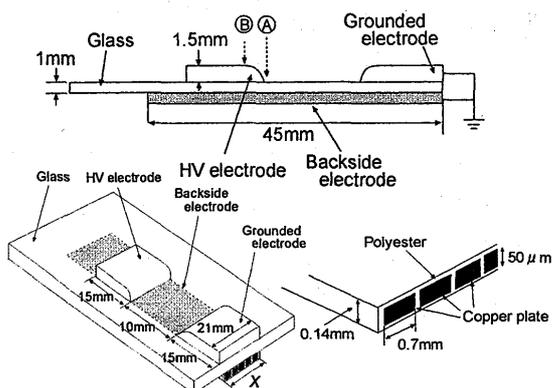


Fig.1 Electrode configuration.

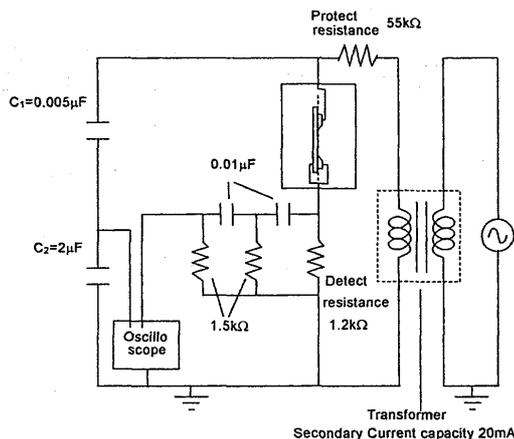


Fig.2 Diagram of experimental

て76mm×52mm, 厚さ1mmの硼硅酸ガラスを配置した。その下に背後電極として、45mm×0.7mm×50 μ mの軟銅箔をポリエステル(比誘電率:約3.3)で絶縁したフラットケーブル(導体幅0.7mm, ピッチ1.0mm)を配置し接地した。背後電極幅 X が1mm(導体数:1本), 10.5mm(導体数:9本), 21mm(導体数:18本)と背後電極がない場合 $X=0$ mmにおいて実験を行った。背後電極はほぼ全体を絶縁テープで覆いガラスとの間に隙間が生じないように貼付けた。

2.2 実験回路図

図2に実験回路図を示す。印加電圧は交流電圧(60Hz)を使用し, トランス, 保護抵抗(55k Ω)を介して, 放電部の電圧を並列に接続した分圧用コンデンサ C_1 , C_2 を用いデジタルオシロスコープにより測定した。電流は放電部に直列に検出抵抗(1.2k Ω)を接続し, 電源周波数成分を除くためハイパスフィルタ(遮断周波数:1kHz)を介して測定した。

実験で用いたトランスの電流容量は20mAであるが, 放電部と並列に配置したコンデンサは結合コンデンサとして挿入しており, 放電時の電流供給はこのコンデンサで行われるため, 放電現象は電源インピーダンスの影響を受けないよう構成している。

2.3 放電発光の撮影及び観測

放電時の発光の様子は黄銅製真空容器に設けられた観測窓(石英ガラス)を通じて行なった。一眼レフカメラ(AE-1, キヤノン)及び高速ゲートイメージンテンシファイアを取り付けたCCDカメラ(C4346, 浜松ホトニクス)を用いて撮影した。一眼レフカメラの場合, 露光時間は1sとした。CCDカメラの場合は, 図3のように露光時間1msとし, 正極, 負極の最後を0.35msずつ(斜線部)除いて16分割して撮影した。CH1が電流波形, CH2が電圧波形, CH3はカメラのシャッター開閉トリガパルスを示す。トリガのパルス幅が露光時間(1ms)である。印加電圧が正から負, または負から正に変るときにオシロスコープよりトリガを発生させ, ディレイジェネレータ(DG535, Stanford Research Systems)を通して, ディレイ時間を1msずつ変化させて撮影した。ディレイ時間0msとしたときの印加電圧極性反転から実際にシャッター開までの遅れ時間は0.2~0.3 μ sである。電圧波形に付けた各番号の時間内での放電発生・進展による発光を撮影した。放電の発光スペクトルの観測は光ファイバ(コア径:400 μ m, 受光角:25.5 $^\circ$)を介して分光器(SA-100, 株式会社ラムダビジョン)によった。受光時間100ms, 計測積算平均10回に設定し各条件5回測定を行った。

3. 実験結果

3.1 放電開始電圧

背後電極の有無やその幅およびガス圧が放電開始電圧にどのような影響を及ぼすか調べた。背後電極幅 X が0mm, 1mm, 10.5mm, 21mmにおける放電開始電圧のガス圧依存性を図4に示す。放電開始電圧の測定は10回行い, その平均値と最大値, 最小値を図に示している。なお, 用いたガラスの表面電荷減衰の時定数は67sであり, 前

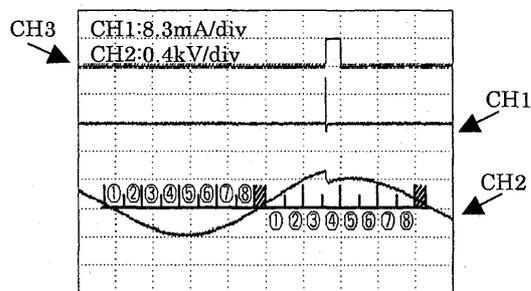


Fig.3 Appearance of taking a

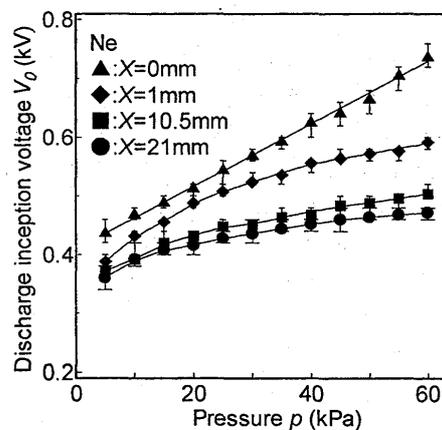


Fig.4 Gas pressure dependence of discharge inception voltage

測定時の放電による残留電荷の影響を避けるため、時定数以上の間隔をあけて測定を行った。

背後電極を有する場合、背後電極のない $X=0\text{mm}$ の場合に比べ放電開始電圧は低下した。背後電極幅 $X=1\text{mm}$, 10.5mm , 21mm のいずれの条件においても、 $X=0\text{mm}$ の場合と同様にガス圧の増加に伴い放電開始電圧も上昇するが、高いガス圧になるにつれて上昇は緩やかとなり、飽和の傾向を示した。

一方、背後電極のない $X=0\text{mm}$ の場合、そのような傾向は見られずガス圧の増加に伴って放電開始電圧は単調に上昇した。

3.2 種々の条件下での放電の挙動

次に、背後電極幅の違いによる放電挙動を調べるため、放電の様子を一眼レフカメラで撮影した。

$X=1\text{mm}$, 10.5mm , 21mm について、ガス圧を 10kPa , 30kPa , 60kPa と変化させたときの一眼レフカメラで撮影した放電の様子を図 5 に示す。図 5(a) は $X=1\text{mm}$, 図 5(b) は $X=10.5\text{mm}$, 図 5(c) は $X=21\text{mm}$ における各ガス圧の放電の様子である。カメラの露光時間は全て 1s である。右が正面から見た放電の様子で、左が同じ条件で撮影した側面から見た放電の様子である。放電の写真の上側が高压電極、下側がアース電極を示す。図中の各電極上の二本の線は図 1 に示したように、電極端 ④ と丸みのある電極位置 ⑤ を示す。また背後電極の位置を点線で示す。

まず 10kPa での正面からの放電挙動を見ると、どの背後電極幅も電極間に広がった淡い放電が確認でき、 $X=1\text{mm}$, 10.5mm では低気圧放電に見られる干涉縞が確認できる。また、側面から見た放電は、誘電体に沿った放電ではなく誘電体から離れ、ガス中で弧を描くような発光となった。

一方 30kPa , 60kPa の正面からの放電挙動をみると、フィラメント状の放電路が確認できる。 $X=1\text{mm}$ では一見フィラメント状の発光には見えないが、発光の明るさと $X=10.5\text{mm}$, $X=21\text{mm}$ の結果から、 30kPa と 60kPa ではフィラメント状の放電路が重なり合って形成されていることがわかる。どの放電も必ず背後電極幅内にみられ、背後電極幅以上の幅を持つ放電は見られない。側面から見た放電は、 10kPa とは異なり図 5(a), 図 5(b), 図 5(c) ともにガス圧が高くなると空間への広がりや押しやられてより沿面に沿うようになっている。

次に一眼レフカメラを用いた撮影は感度の関係で露光時間を 1s と長くしたため、詳細な放電挙動は観測できない。そこで露光時間を 1ms として CCD カメラを用いて放電挙動を観測した。撮影はガス圧 30kPa , 60kPa , $X=10.5\text{mm}$ について、正面方向から行った。電極に交流電圧を印加すると、まず図 6(a) のように交流電圧の正極、または負極ど

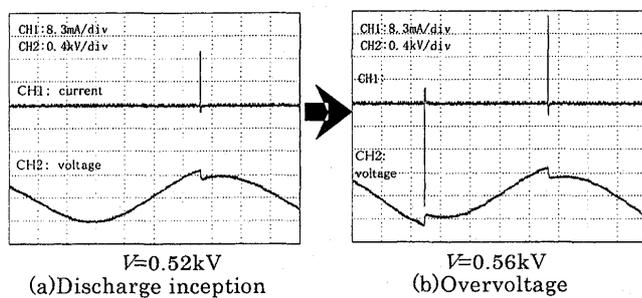


Fig. 6. Waveforms of applied voltage and current

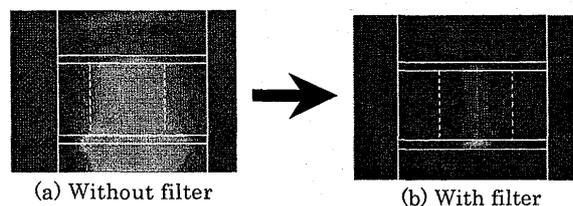


Fig. 7. Pictures of electrical discharge with CCD camera ($X=10.5\text{mm}$, $p=60\text{kPa}$)

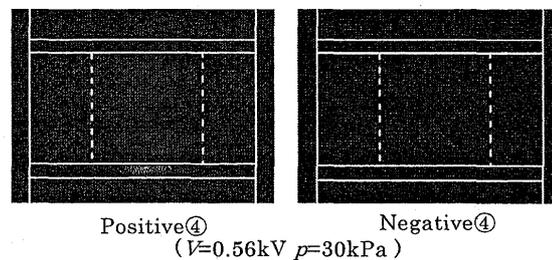


Fig. 8. Picture of discharge ($X=10.5\text{mm}$)

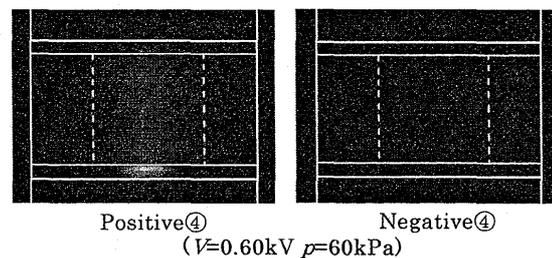


Fig. 8. Picture of discharge ($X=10.5\text{mm}$)

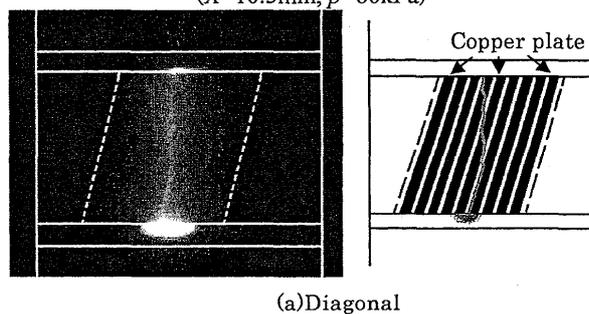


Fig. 9. Picture of electrical discharge for diagonal arrangement of back electrode ($X=10.5\text{mm}$, $p=60\text{kPa}$)

ちらか一方の極性から放電を開始した。さらに図 6(b)に示した過電圧印加時には両極性において放電が生じ電圧降下が見られ、この時の電流は正極性で約 32mA、負極性で約 36mA と大きな差は見られない。また、ガス圧を変えた場合も同様の電流波形となった。すなわち、印加電圧が最大値付近では、複数の放電電流は観測されず、1本の鋭い放電電流ピークが観測された。そこで、本研究ではまず図 6(a)のどちらか一方の極性からの放電の様子を撮影し、背後電極幅、ガス圧の変化による放電の違いを比較、検討を行った。

図 7 は $X=10.5\text{mm}$, $p=60\text{kPa}$ の放電挙動である。図 7(a)は発光が強く放電挙動が観測しにくい。色ガラス(HOYA ND25)、紫外透過可視吸収フィルタ(吸収波長域:400~650nm, HOYA U330)を用いることにより、図 7(b)に示す様に放電の様子が明瞭に撮影でき、以降の撮影はすべてこれらのフィルタを通して行った。

CCD で撮影した背後電極幅 $X=10.5\text{mm}$, $p=60\text{kPa}$, 30kPa での放電の様子を図 8 に示す。 $p=60\text{kPa}$ は 30kPa の放電の様子と比べ強い発光が確認できる。どの放電もつねに同じポイントでは起こらず 正極③, ④, ⑤において顕著に見られた。他の条件においても放電の場所も常に同じ位置からではないが、必ず背後電極の範囲内で生じた。

次に、ガス圧が高いときに見られる放電が背後電極の影響を受けた沿面放電であるか調べるため、背後電極を電極に対して斜めに配置し、そのときの放電の様子を図 9(a)に示す。比較として同じ条件で撮影した背後電極を電極に対して垂直に配置したときの放電の様子を図 9(b)に示す。

放電開始電圧は電極に対して垂直に置いた場合と同じであったが、放電の様子はある点から放電が生じるとフラットケーブルの導体に沿って斜めに伸び、隣の導体に移りながら、ギザギザの経路を通る。特にこれは、 60kPa のとき顕著に確認できた。

このようにフラットケーブルが放電路に影響を及ぼす結果から背後電極を電極に対して垂直に配置した場合の放電はフラットケーブルに沿って放電する沿面放電であると考えられる。

3.3 発光スペクトルの解析

背後電極幅、ガス圧の変化による放電のスペクトルの違いを調べるため、分光器を用いて測定した。印加電圧の変化に伴ってスペクトルの強度も変化するため、本実験では印加電圧は放電開始電圧とした。図 10 に得られたスペクトルを示す。背後電極幅、ガス圧に関係なく、 300nm 付近に 1, 2本の発光ピークと $580\sim 730\text{nm}$ に複数のピークが観測され、エネルギー準位の 3P から 3S への遷移による発光である波長 700nm 付近が最も高い強度を示した。背後電極幅の増大とともに発光強度は弱くなり、またガス圧の上昇する発光強度は強くなった。前項で示した放電挙動は、フィルタの特性からみて、両波長域の光によるものであるが、発光強度から考えて主に後者の波長領域によるものといえ、撮影された発光の強さとも対応している。

最も強い 702nm の発光強度と背後電極幅の関係を図 11 に示す。いずれのガス圧においても、背後電極幅の増加とともに発光強度は低下した。また、ガス圧の上昇とともに強度も上昇することがわかる。ガス圧が低い 10kPa で

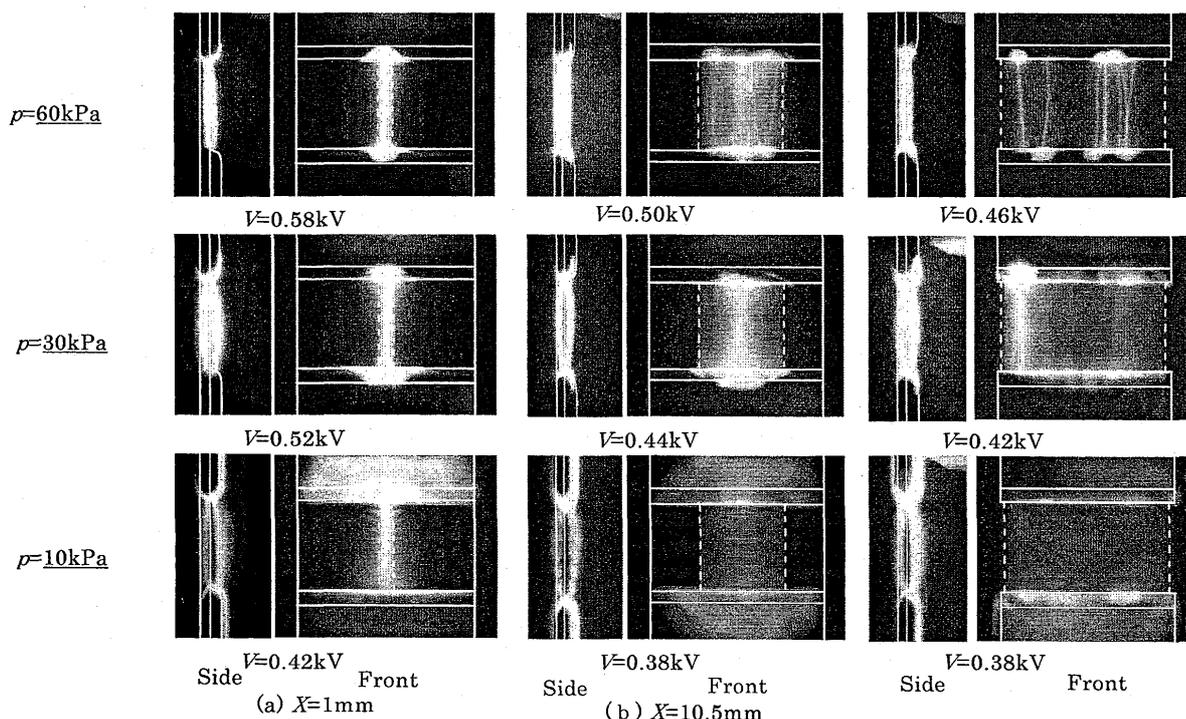


Fig.5. Pictures of electrical discharge with single-lens reflex camera ($X=1\text{mm}$, 10.5mm , 21mm)

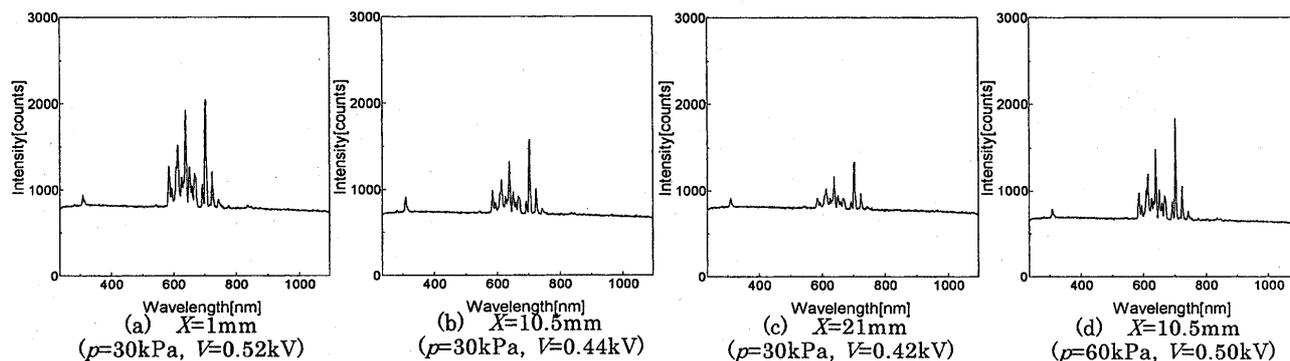


Fig.10. Emission spectra of electrical discharge in Ne gas

は背後電極幅にほぼ均等に広がる淡い赤色の放電，ガス圧を上げることにより濃淡のある放電，赤く強い放電へと変化した目視観察結果と対応しているものといえる。

4. 検討

ストライプ状背後電極を有した平板電極間の放電における背後電極の影響について，放電開始電圧，放電の様子，発光スペクトル解析の結果から考察する。交流電圧下での背後電極を有する絶縁体表面では沿面放電が発生しやすい[2]といわれているように，放電開始電圧は背後電極を配置することで，どの背後電極幅においても背後電極がないときと比べ放電開始電圧は低下した。60kPaの場合で比較すると， $X=1\text{mm}$ のとき 0.58kV， $X=10.5\text{mm}$ のとき 0.50kV， $X=21\text{mm}$ のとき 0.46kV と背後電極を広げたことで $X=1\text{mm}$ と比べてそれぞれ 0.08 kV，0.12 kV 低下するという結果が得られた。これは背後電極を配置した部分の電界が高電界になると考えられ，背後電極幅が広がると背後電極内の導体部分が増え，高電界領域が広くなり，放電開始電圧に違いが出ると考えられる[11]。

また，どの背後電極幅においても放電開始電圧は飽和の傾向を示した。これは図5の一眼レフカメラで撮影した側面の放電に見られるように，30kPa，60kPa 高いガス圧になるにつれ背後電極に沿った放電となる様子や絶縁物裏面の背後電極の存在によって，沿面放電が進展しやすくなる[2][3]という報告から，ガス圧がより高い場合，誘電体に沿った放電となるため背後電極の影響が大きいと考えられる。このため，ガス圧が高くなると放電開始電圧が飽和の傾向を示したと考えられる。

一方，ガス圧が低いとき放電路は沿面に沿わず，徐々に背後電極から離れ，弧を描くような放電となった。このように，電極間の最短を通らずに弧を描く放電はパッシェンミニマムの左側領域で見られるが，本実験の圧力・放電ギャップ積値 $7.5\text{cm}\cdot\text{mmHg}$ から，パッシェンミニマムの右側領域である。他の原因として，アーク放電が挙げられるが，使用した実験回路では数十 mA と電流が低いため，アーク放電で生じたとは考えにくく，今後さらに研究を進める必要がある。

また放電が観測される位置，すなわち放電の発生位置は必ず背後電極を配置した範囲内でランダムであった。これは，背後電極の存在により，背後電極中の導体端部で電界集中が生じるため，端部上部に位置する高压電極端でのみ放電が発生したと考えられる。実際，高電界が放電の発生に起因しているとの報告[7]などから，本実験条件においても背後電極の範囲で発生したと判断できる。しかし，放電の発生点とストライプ状の背後電極中の導体との関係は，フラットケーブルが被覆されていることやケーブル内の導体間隔が 0.3mm であるため特定することはできない。

さらに，背後電極を斜めに配置した場合(図9(a))，沿面放電は背後電極の導体端部あるいは導体に沿って電極間を斜めに進展しようとする。しかし，写真の下方に配置されている対向アース電極による鉛直方向の電界が存在するとともに，導体間隔は 0.3mm と狭くアース電極に近い隣接導体端部の電界集中の影響を受ける。そのため，隣接する背後電極導体を飛び移る経路上の誘電体沿面を進展し，ギザギザ様の放電路を描いているものと考えられる。したがって，放電の進展は放電発生点に関係する導体だけでなく，隣接する導体の影響も受ける。

スペクトル解析の結果からエネルギー準位の 3P から 3S への遷移による波長 $600\sim 700\text{nm}$ 付近の発光が主として得られた。また，ガス圧の上昇に伴う強度の増加，背後電極幅の増加に伴い強度低下が観測された。用いた光ファイバの特性から直径約 25mm の領域の受光が可能であり，電極間全体からの放電発光を計測していると考えられる。通常，

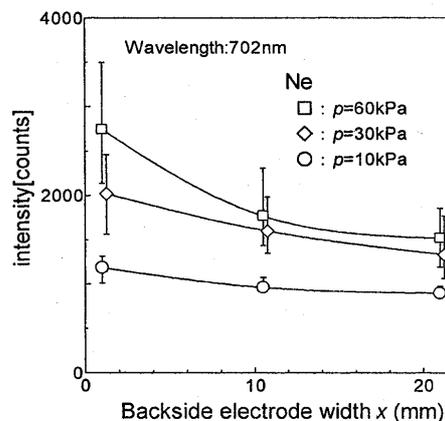


Fig.11. Backside electrode width dependence of emission intensity

発光は荷電粒子の再結合、励起原子・分子の脱励起のエネルギー放出の一環として生じる。したがって、発光強度は荷電粒子、励起原子・分子の数に関係していると考えられる。放電開始時、過電圧時ともに、放電が生じた瞬間に放電電流ピークが観測され、いずれの極性においても、多数の放電電流ピークの発生は観測されなかった。そこで、背後電極幅 $X=21\text{mm}$ 、ガス圧 10kPa の放電開始時の放電電流のピーク値は約 30mA 、 30kPa では2倍の約 60mA 、 60kPa では2.5倍の 75mA の電流となった。このことから、発光強度は放電電流と関係していることを示唆している。

一方、背後電極を狭めた場合、発光強度は増加した。すでに述べたように、背後電極の導体端部での電界集中の影響により導体端部上の誘電体と高圧電極の接する点あるいはその近傍で放電が発生する確率が高くなると考えられる。すなわち背後電極幅を狭めることで背後電極内の導体数が少なくなり、放電が発生する確率の高い領域も限定される。そのため、陰極点の移動が少なく、同じ位置から放電する確率が高くなる。また、発光強度と放電電流の関係が示唆されていることから、放電発生位置の制限によって放電電流が変化し、上述のような発光強度の背後電極幅依存性が現れた可能性もある。しかし、現段階ではその原因は不明であり、ストライプ状背後電極系での電界分布、放電発生位置、放電電流等の詳細な検討が必要である。

5. まとめ

Ne ガス中における、複数の銅箔導体のフラットケーブルによるストライプ状背後電極を有した平板電極間の沿面放電と発光を調べた結果を以下にまとめる。

(1) 背後電極を有する場合の放電開始電圧は背後電極がない場合に比べて低下し、背後電極幅が最も大きい 21mm において放電開始電圧は最も低くなった。これは、背後電極を配置すること、背後電極幅の増大に従い導体が増えるため高電界領域が広がることで説明できる。また、放電開始電圧のガス圧依存性において、背後電極がない場合、放電開始電圧はガス圧の上昇に伴って単調に増大したが、背後電極が存在する場合、飽和の傾向を示し、ほぼ一定の値となった。

(2) 光学的な観測によって、正面から見た放電は必ず背後電極の存在する範囲内で生じたが、特定の位置、領域での発生は認められなかった。背後電極内の導体による高電界領域の存在、特に導体端部における電界集中の影響が関係しているものといえる。また、斜めに背後電極導体が配置された場合、沿面放電は隣接導体を飛び移るようなギザギザ状の放電路が観測された。このことは、沿面放電に対しては、背後電極は平板電極付近での放電の発生だけでなく、放電進展路に対しても影響すること、隣接する背後電極導体の影響も存在することを示している。側面においては、 30kPa 、 60kPa の高いガス圧の条件において誘電体表面あるいは背後電極にそった沿面放電が確認できた。

(3) 放電による発光のスペクトル解析から、 580nm から 720nm の波長域の発光が観測された。また、 700nm 付近の発光が最も強い。この発光の強度は、背後電極幅の増大とともに低下し、背後電極幅一定の条件下ではガス圧の上昇とともに発光強度は増大した。また、発光強度は放電電流と関係していることが示唆されたが、不明な点も多く今後さらに検討が必要である。

(4) 以上の結果から、背後電極を有する平板電極を用いることで面状沿面放電を実現でき、背後電極は沿面放電の制御には有効な手段であることがわかる。

参考文献

- [1] 電気学会放電ハンドブック出版委員会編：「放電ハンドブック(上巻)」, p. 315, オーム社(1998)
- [2] 山野 芳昭・高橋 雄造・小林 繁雄：「背後電極をもつ絶縁物の交流沿面絶縁耐力に及ぼすバリアの影響」, 電学論 109, pp. 211-218 (1988)
- [3] 大木 正路：「沿面放電における背後電極および表面電荷の役割」 静電学誌, 15, pp. 191-197(1991)
- [4] 遠藤 正雄・佐藤 敏郎・佐藤 重範・榊原 剛：「負極性直線状沿面放電の進展特性」, 電学論, 115-A, pp. 845-850(1995)
- [5] 羽馬 洋之・井波 潔・藤井 治久・大石 貴之・吉村 学・仲西 幸一郎：「 SF_6 ガス中正極性沿面放電のリーダの発生と進展」, 電学論, 114-A, pp. 397-406 (1994)
- [6] 東原 孝明・上野秀樹・中山博史：「ストライプ状背後電極を有した平板電極間の沿面放電と発光」, 電学論, 126-C, pp. 1276-1282 (2006)
- [7] 大久保 利一・野本 幸治：「放電プラズマによる最近のオゾン発生技術」, 静電学誌, 19, pp. 369-374 (1995)
- [8] 「プラズマディスプレイ内の放電基礎特性」, 電気学会技術報告書 688, p. 72 (1998)
- [9] 菊池 雄二・鈴木 宏明・遠藤 正雄「低気圧における平面状放電の進展現象」, 放電研究 153, p. 35(1996)
- [10] 和辻 浩一：「DC プラズマディスプレイ」, 電学誌 116, p. 513 (1996)
- [11] 大木 正路・斉藤 茂：「気中沿面放電におけるバリア効果」, 電学論, 108-A, pp. 351-358 (1988)