



Title	放電光スペクトルの分光分析に基づいた乾燥空気中の放電電界強度評価
Author(s)	川野, 涼子; 梅本, 貴弘; 海永, 壮一朗 他
Citation	電気材料技術雑誌. 2016, 25(1), p. 18-25
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/76101
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

放電光スペクトルの分光分析に基づいた乾燥空気中の放電電界強度評価

川野涼子, 梅本貴弘, 海永壮一朗, 吉村学, 武藤浩隆, 釣本崇夫¹,
米田晋也, 菊池祐介, 永田正義²

¹三菱電機株式会社先端技術総合研究所, 〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1

²兵庫県立大学工学研究科, 〒671-2280 兵庫県姫路市書写 2167

EVALUATION OF ELECTRIC FIELD STRENGTH BY USING OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY UNDER PARTIAL DISCHARGE IN DRY AIR

R. KAWANO, T. UMEMOTO, S. KAINAGA, M. YOSHIMURA, H. MUTO,
T. TSURIMOTO¹, S. YONEDA, Y. KIKUCHI, M. NAGATA²

¹ Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corp., 8-1-1, Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki,
661-8661, Japan

² Graduate School of Engineering, University of Hyogo, 2167 Shosha, Himeji, 671-2280, Japan

The electric field strength was evaluated by using the intensity ratio of spectral bands of molecular nitrogen under streamer discharges in dry air at atmospheric pressure. The primary and secondary streamer discharges were observed in the needle-plane electrode by applying the positive impulse voltage. The reduced electric field strength of the primary streamer was 700 Td in this study and the value near the calculated one by simulation analysis.

キーワード：ガス絶縁，ストリーマ放電，電界強度，発光分光スペクトル，乾燥空気

1. はじめに

ガス絶縁機器はコンパクトで信頼性に優れた電力機器であるが、省スペース化や環境負荷低減の側面からより一層の小形化が求められている。機器を小形化する手段のひとつとしてガス絶縁距離の縮小が有効であるため、充填ガスの高ガス圧化や高電圧導体への絶縁被覆による設計電界の高電界化が検討されてきた¹⁾。一般にガス絶縁機器の設計電界は、部分モデルや実規模モデルの絶縁破壊試験や部分放電試験と静電界解析から絶縁破壊電界や部分放電開始電界を導出し、これに一定の裕度を加えて規定される。この手法はガスの放電

電界を間接的に評価しているが、もし放電電界を直接評価することができるようになれば、ガス中放電のプロセスへの理解がより深まり、絶縁設計技術の高度化が期待できる。

放電空間の電界を評価する手法として、プラスマ応用の分野では窒素分子の発光スペクトル強度比を用いる手法^{2)~4)}が考案されている。しかし、これまでの研究ではグロー放電のような発光時間が長い放電は評価されてきたが、ガス絶縁機器の絶縁試験で評価の対象となるストリーマ放電のような単発の放電に対して検討された例はなかった。

そこで筆者らは、発光スペクトル強度比と放電電界との関係が判明している窒素ガスを含む絶縁媒体である乾燥空気を対象に、インパルス電圧印加時の放電電界の評価手法について検討した。大気圧の乾燥空气中に針-平板電極系を設置し、不平等電界下で発生するストリーマ放電に対して発光スペクトル計測と放電電界の定量的評価を行ったので、その結果を報告する。

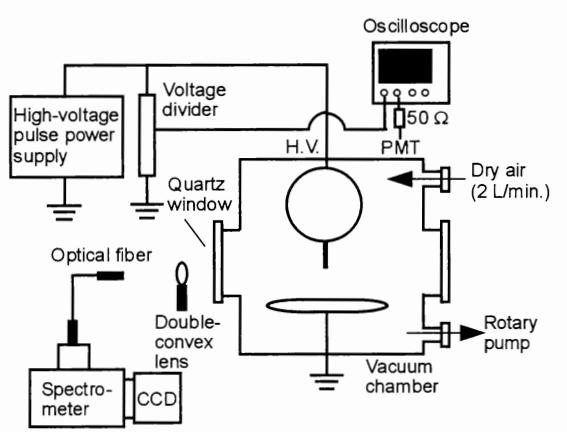
2. 実験装置・方法

図1に実験装置を示す。電極系は球形状の電極(アルミニウム製、直径 50 mm)に針(鉄製、長さ : 15 mm、直径 1 mm、先端曲率半径 : 50 μm)を接続した高電圧電極と接地電極(アルミニウム製平板、直径 : 140 mm、厚さ : 10 mm)による、針-平板電極系を使用した。針-平板電極間のギャップ長は 15 mm とした。針-平板電極を試験タンク内に設置し、2 L/min の流量

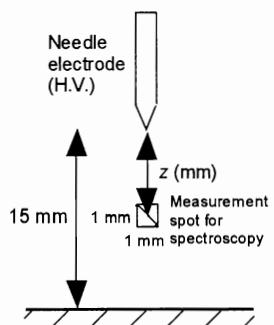
で乾燥空気を供給し、ロータリーポンプで排気しながらタンク内の圧力が 0.1 MPa(絶対圧)となるように調整した。高電圧電極に、高電圧パルス電源を用いて正極性のインパルス電圧(< 20 kV、立ち上り時間 : 1 μs、パルス幅 : 10 μs)を印加した。印加電圧は高電圧プローブ(Tektronix(株)製:P6015A)を用いて測定した。

針電極から平板電極へ向かう方向を z 方向と定義し、針電極先端を $z = 0 \text{ mm}$ とした(図1(b))。放電発光計測では、z 方向の空間分布を得るために、両凸レンズ(焦点距離 150 mm)および光ファイバ(コア径 200 μm, 19 芯)を用いた。空間分解能は 1 mm³ である。また、放電発光の検出に光電子増倍管(浜松ホトニクス(株)製:R960)を用い、その出力信号を印加電圧とともにディジタルオシロスコープ(Tektronix(株)製:TDS2024C, 2 GS/s)にて記録した。発光分光計測は焦点距離 190 mm のツェルニーターナ型分光器(堀場製作所製:TRIAX190)および検出器として CCD((株)堀場製作所製:Symphony ILS)を用いた。分光計測では、ストリーマ放電 1 発分の発光量が小さかったため、高電圧パルス電源を周波数 1 kHz にて動作させ、繰返し発生した放電発光を時間積算した。積算時間は 5 s とした。なお印加電圧は、フラッシュオーバーが発生しない 15 kV 以下で試験を行った。

大気組成の放電による発光からは、窒素分子、窒素分子イオンの電子衝突励起がもたらす分光スペクトルが観測される⁴⁾。本報告では、窒素の第 2 正帯(2, 5)SPS: 波長 394.3 nm と、窒素イオンの第 1 負帯(0, 0)FNS: 波長 391.4 nm のスペクトル強度比から放電空間の電界強度を導出する手法を適用した^{2)~4)}。この方法は(2, 5)SPS と(0, 0)FNS の発生に必要な電子エネルギーの差を利用していい。電子が全て基底状態から励起される場合を仮定したとき、電界強度が強ければ、相対的に励起エネルギーが高い(0, 0)FNS の強度が上昇する。このスペクトル強度比 $R_{391/394}$ と換算電界強度 E/N の関係式が式(1)のように得られる²⁾。縦軸に $R_{391/394}$ 、横軸に E/N としたグラフを図2に示す。



(a) Schematic diagram of the optical observation system



(b) Needle-plane electrode

図1 試験系

Fig.1 Experimental setup

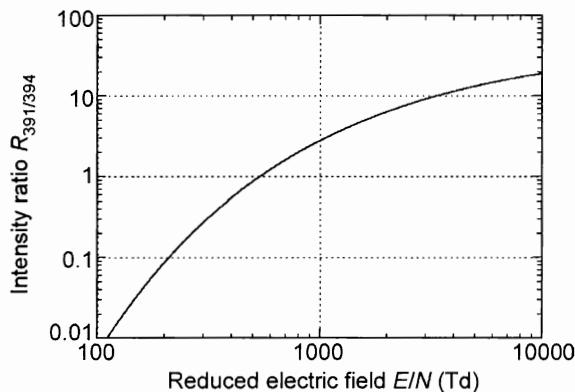


図2 $R_{391/394}$ と換算電界強度の関係¹⁾⁵⁾

Fig.2 Intensity ratio of $R_{391/394}$ as a function of reduced electric field.

$$R_{391/394} = 46 \exp[-89(E/N)^{-0.5}] \quad (1)$$

ここで、 E は電界強度、 N はガス密度を表す。 E/N の単位には Td ($= 10^{-21} \text{ Vm}^2$ 、 0.1 MPa で 0.025 kV/mm) を用いている。式(1)は乾燥空気中の平行平板電極間にて発生させた放電において、電極のギャップ長および圧力を変化させることで E/N を変化させたときの $R_{391/394}$ を測定して得られた実験式である²⁾。本稿ではこの関係式を利用し、 E/N を評価した。

3. 実験結果と考察

3.1. 光電子増倍管による放電発光観測

本試験で観測した放電について説明する。図3に $z = 2 \text{ mm}$ における印加電圧波形と、放電発光の時間依存性を示す。図3より放電発光は、印加圧の波頭付近で発生していることが確認できる。図4に、印加電圧 $8 \text{ kV} \sim 10 \text{ kV}$ における放電発光の時間依存性を示す。はじめの発光の立ち上がり開始時刻を $t = 0 \text{ s}$ とした。いずれの電圧でも、 $t = 20 \text{ ns}$ でピークを持つ放電発光が観測された。また、印加電圧 9 kV 以上では、発光強度が $t = 20 \text{ ns}$ でピークを迎えて一旦減衰するものの、 $t = 100 \text{ ns}$ から再び立ち上がる様子も観測された。一般に大気圧の乾燥空気における絶縁破壊メカニズムは以下のように考えられている。1次ストリーマが針電極の先端近傍より発生し、印加電圧が上昇するに伴い、接地電極に到達する。その後2次

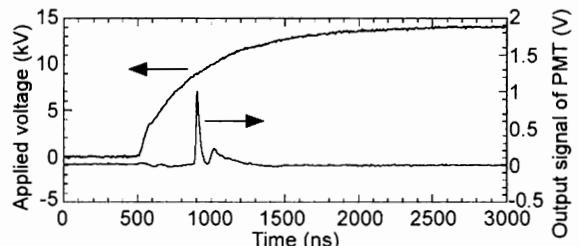


図3 電圧と放電発光の時間依存性⁵⁾

Fig.3 Time variation of applied voltage and optical emission measured with the PMT.

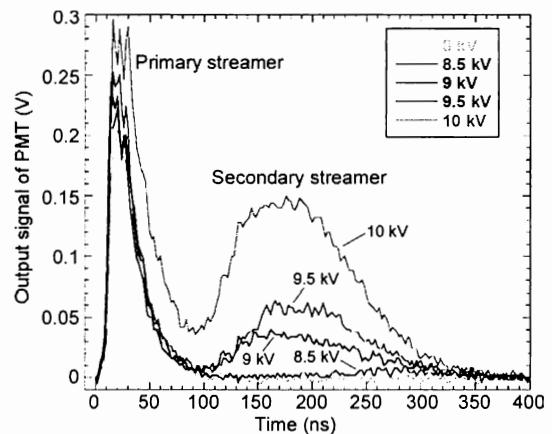


図4 針先近傍の放電発光の時間依存性⁵⁾

Fig.4 Time variation of optical emission measured with the PMT at $z = 2 \text{ mm}$.

ストリーマが針電極の先端近傍から発生して接地電極に到達した後にフラッシュオーバに至る⁶⁾⁷⁾。従来報告されているストリーカカメラを用いたストリーマ放電進展挙動計測結果と比較すると、 $t = 0 \text{ ns}$ で立ち上がる発光は 1 次ストリーマ、 $t = 100 \text{ ns}$ から立ち上がる発光は、2 次ストリーマと考えられる⁸⁾。次節以降で、本試験系でフラッシュオーバが発生しない 15 kV 以下の印加電圧領域において、1 次ストリーマと 2 次ストリーマの 2 つの放電形態に対し発光分光計測を適用した結果を説明する。

3.2. 放電分光スペクトル

図5に、針電極近傍 ($z = 2 \text{ mm}$) における印加電圧 8 kV での放電分光計測結果を示す。過去の大気組成中の放電計測と同様に、今回の測定でも窒素分子由来のスペクトルが観測された⁴⁾。

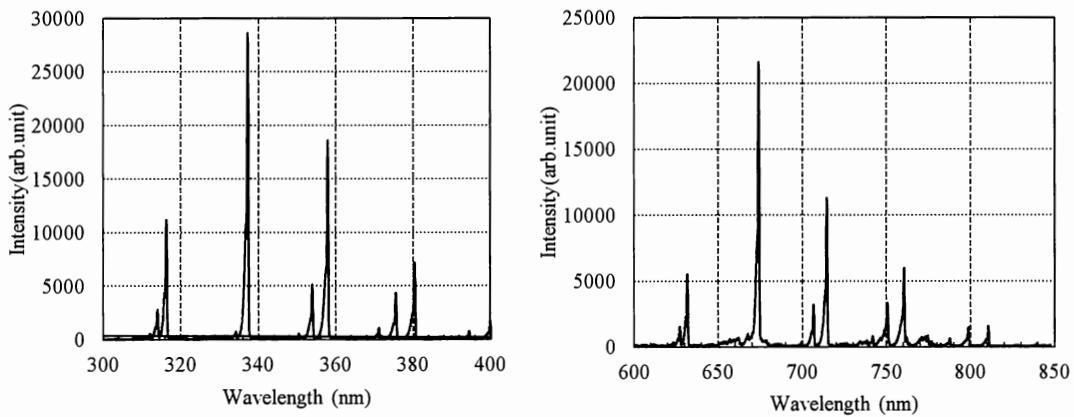


図 5 8 kV 印加時の針先近傍での放電発光スペクトル
Fig.5 Optical emission spectrum of the streamer discharge at $z = 2$ mm.

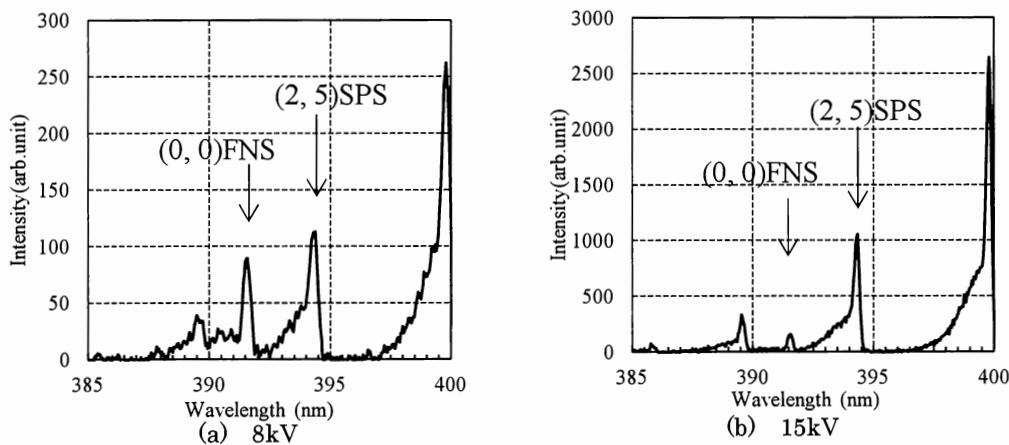


図 6 放電発光スペクトルの電圧依存性
Fig.6 Voltage dependence of optical emission spectrum of the streamer discharge at $z = 2$ mm.

777 nm にピークを持つ酸素原子の発光は今回観測されず、300 nm～400 nm では窒素分子の第 2 正帯 (SPS) に由来するスペクトルが、600 nm～850 nm では窒素分子の第 1 正帯 (FPS) と Herman infrared system (HIR) に由来するスペクトルが見られた。400 nm～600 nm の範囲では、スペクトルはほとんど観測されなかった。窒素イオンの第 1 負帯 (FNS) のスペクトルは 286 nm～587 nm で観測されるが、SPS 等に比較して強度は小さい。そこで、385 nm～400 nm の測定領域を拡大したスペクトルについて、図 6 (a)に印加電圧 8 kV、(b)に 15 kV の結果を示した。どちらの電圧でも、(0, 0)FNS と(2, 5)SPS が観測できた。また印加電圧 15 kV、(2, 5)SPS の発光強度は

8 kV の 10 倍になった。一方で、強度比 $R_{391/394}$ は 8 kV の値の 17% に減少した。これらの結果は、電子密度は増加したが、放電内部の電界は低下したということを示唆している。

3.3. 換算電界強度の空間分布

窒素分子発光スペクトル強度比較法を適用し、換算電界強度 E/N を算出した。針電極先端 ($z = 0$ mm) から平板電極 ($z = 15$ mm) までのガスギャップに対する、 E/N の z 方向分布を図 7 に示す。1 次ストリーマのみが発生した印加電圧 8 kV の結果と、1 次ストリーマと 2 次ストリーマの両方が発生した印加電圧 15 kV の結果である。8 kV の場合、 E/N は平均的に 500 Td (12.5

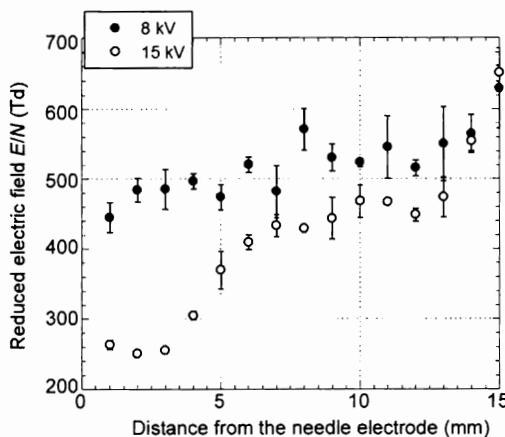


図7 放電電界強度の空間分布⁵⁾

Fig.7 Spatial profiles of the reduced field.

kV/mm) だが、針電極から平板電極に近づくにつれて緩やかに大きくなる傾向が得られた。一方、15 kV の場合は、針電極近傍では 250 Td (6.25 kV/mm) だが、平板電極近傍では 600 Td (15 kV/mm) にまで急激に上昇した。光電子増倍管による計測では、8kV では 1 次ストリーマが針電極の先端から進展を開始すると同時に平板電極近傍でストリーマの発光による光電子放出が原因と考えられる発光が観測されており、放電電界強度において平板電極からの電子供給の影響が考えられる⁵⁾。一方、2 次ストリーマの進展領域は $z = 4$ mm までであるため⁵⁾、15 kV 印加時に針電極近傍では 1 次ストリーマと 2 次ストリーマ両方の発光を観測しているのに対して、 $z > 4$ mm では 1 次ストリーマの発光のみを観測していると考えられる。以上より、印加電圧によって観測しているストリーマの状態が異なるため、E/N の空間分布が異なると推察できる。

3.4. 換算電界強度の電圧依存性

針電極近傍および平板電極近傍において E/N の電圧依存性を調べた。まず針電極近傍 ($z = 2$ mm) における E/N と 2 次ストリーマ発生率の電圧依存性を図 8 に示す。本試験では電圧は単発で印加した。各電圧において 10 回放電させたときの 2 次ストリーマの発生有無を光電子増倍管の信号から判断し、その発生率をプロットしている。電圧

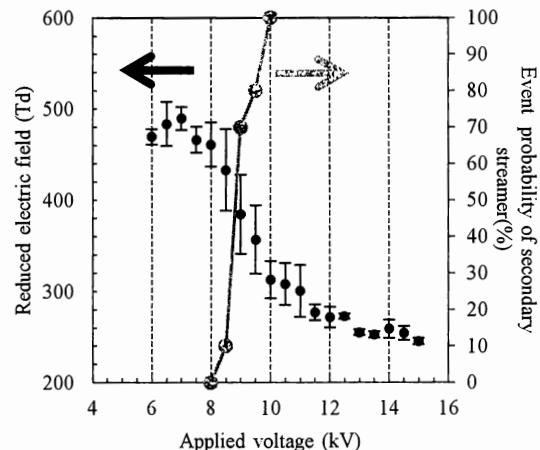


図8 針先近傍の放電電界強度の電圧依存性

Fig.8 Dependence of reduced electric field at $z = 2$ mm on the applied voltage.

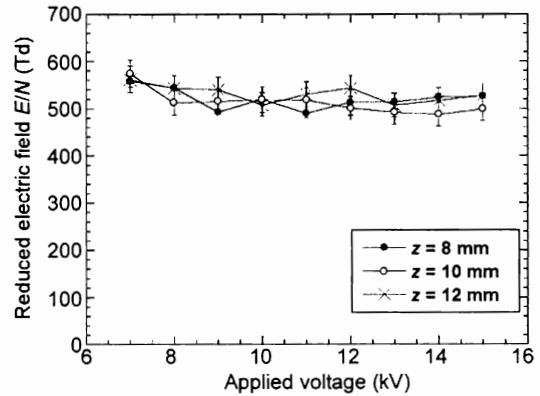


図9 平板電極近傍の放電電界強度の電圧依存性⁵⁾

Fig.9 Dependence of reduced electric field at $z = 8, 10, 12$ mm on the applied voltage.

8 kV 以下の E/N は 500 Td (12.5 kV/mm) 付近であるが、電圧の上昇と共に E/N は低下し、13 kV では 250 Td (6.25 kV/mm) に低下した。光電子増倍管による計測により、8 kV 以下は 1 次ストリーマのみが観測される領域、8 kV~10 kV は 1 次ストリーマに加え 2 次ストリーマが観測されはじめる領域、10 kV 以上は 1 次ストリーマと 2 次ストリーマがいずれも 100% 発生する領域であった。これらのことから、2 次ストリーマの発生率の上昇に伴い E/N が低下していることが分かる。

次に、図9に平板電極近傍 ($z = 8, 10, 12 \text{ mm}$) における E/N の電圧依存性を示す。 E/N は電圧によらず 500 Td (12.5 kV/mm) でほぼ一定値となった。前節で述べたとおり、平板電極近傍は 1 次ストリーマの発光のみを観測しているためと考えられる。

3.5. 換算電界強度の補正

ストリーマ先端は電子とイオンの移動度の差によって正の空間電荷が生じることにより、最大電界が形成される⁹⁾。一方、発光強度はストリーマ先端の最大電界位置よりも内側で最大となるため、放電発光から導出した E/N からストリーマ先端の最大 E/N を導出するには補正が必要である^{2) 10)}。Bonaventura ら²⁾は、ストリーマ放電のシミュレーションにより、スペクトル強度比から導出される電界強度 E_e からストリーマ先端の最大電界 E_s を求める補正係数として $\Gamma = E_s/E_e = 1.4$ を得ている。本研究で導出した 1 次ストリーマの E/N 値 500 Td (12.5 kV/mm) に補正係数 Γ を掛けると 700 Td (17.5 kV/mm) となり、Komuro ら¹⁰⁾がシミュレーションにより導出した 1 次ストリーマ先端の電界 700~1000 Td (17.5~25 kV/mm) とほぼ同程度の値となった。一方、Komuro ら¹⁰⁾は 2 次ストリーマ先端電界をシミュレーションにより 100~120 Td (2.5~3.0 kV/mm) と導出している。本研究では 1 次ストリーマと 2 次ストリーマの両方が観測された針電極近傍の E/N は 250 Td

(6.25 kV/mm) であり、シミュレーションで導出された両ストリーマの先端電界の間の値であったが、両ストリーマを分離して検出していないことを考慮すると妥当な結果であると推察する。

4. まとめ

大気圧の乾燥空气中で針-平板電極にインパルス電圧を印加した際のストリーマ放電に対して、プラズマ応用の分野で電界強度を評価する際に用いられる窒素分子スペクトル強度比較法を適用し、放電空間の電界強度の導出を試みた。結果を以下にまとめる。

- (1) 乾燥空気中のストリーマ放電発光を分光計測して得られたスペクトルは、窒素分子、窒素分子イオン由来のスペクトルと一致した。また、電界強度の導出に必要な(2, 5)SPS (発光ピーク 394.3 nm) と(0, 0)FNS (発光ピーク 391.4 nm) のスペクトルが検出できた。
- (2) 実験で得られた一次ストリーマの(2, 5)SPS と(0, 0)FNS の発光スペクトル強度比から換算電界強度を算出し、先行研究のシミュレーションで得られている補正係数を掛けることにより最大電界を導出した。導出した電界は先行研究の電界強度と概ね一致することを確認し、本手法によってインパルス印加時の放電空間の電界を定量的に評価できることを示した。
- (3) 一次ストリーマと二次ストリーマの両方が発生する針電極近傍では、導出された電界は一次ストリーマの電界よりも低い値となった。これは、二次ストリーマの放電空間の電界が一次ストリーマよりも低いという先行研究のシミュレーションの結果から説明できることを示した。

今後は加圧乾燥空气中の放電や、沿面放電、乾燥空気ガス以外の絶縁ガス中の放電等に適用範囲を広げていく予定である。

参考文献

-
- 1) H. Hama, K. Inami, T. Ootsuka, Y. Shimizu, E. Nagao, K. Oosumi, and M. Yoshimura: "Improvement of SF₆ gas insulation system by applying thick dielectric-layered electrode and its application to high voltage equipment", Gaseous Dielectrics X, (2004) pp. 319-328
 - 2) P. Paris, M. Aints, F. Valk, T. Plank, A. Haljaste, K.V. Kozlov, and H.E. Wagner: "Intensity ratio of spectral bands of nitrogen as a measure of electric field strength in plasmas", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 38, (2005) pp. 3894-3899

- 3) Z. Bonaventura, A. Bourdon, S. Celestin, and V.P. Pasko: "Electric field determination in streamer discharges in air at atmospheric pressure", *Plasma Source Sci. Technol.*, Vol. 20, (2011) 035012
- 4) M. Simek: "Optical diagnostics of streamer discharges in atmospheric gases", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 47, (2014) 463001
- 5) 菊池祐介, 米田晋也, 永田正義, 川野涼子, 梅本貴弘, 海永壮一朗, 吉村学, 武藤浩隆, 釣本崇夫: "窒素分子発光スペクトル強度比を用いた大気圧ドライエアにおけるストリーマ放電の電界強度計測", *電学論 A*, Vol. 136, No.6, (2016), pp.378-383
- 6) H. Kojima, K. Hotta, T. Iwata, N. Hayakawa, N. Yanagita, T. Kato, T. Rokunohe, and H. Okubo: "Influence of Gap Length on Discharge Channel Propagation and Breakdown Mechanism in Air", *Proc. of 17th International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover, Germany, Aug. (2011), 22-26, D-037
- 7) 生田信皓, 牛田富之, 石黒美種: "正ストリーマコロナの進展挙動", *電気学会雑誌*, Vol. 90, No. 9, (1970), pp. 184-192
- 8) 菊池祐介, 田中啓右, 山下尚史, 永田正義, 海永壮一朗, 梅本貴弘, 吉村学, 武藤浩隆, 釣本崇夫: "発光分光スペクトル計測を用いたガス絶縁破壊過程の解明に関する基礎研究 (III)", 平成25年電気学会研究会資料放電・開閉保護・高電圧合同研究会, ED-13-113, SP-13-36, HV-13-74, (2013) pp. 25-29
- 9) 日高邦弘,: "高電圧工学" (2009)
- 10) A. Komuro, R. Ono, and T. Oda: "Effects of pulse rise rate on velocity, diameter and radical production of an atmospheric-pressure streamer discharge", *Plasma Source Sci. Technol.*, Vol. 22, (2013) 045002

(2016年7月8日受理)

著者略歴

川野 涼子



2013年3月大阪大学大学院理学研究科物理学専攻修士課程修了。同年4月三菱電機㈱入社。現在、先端技術総合研究所電機システム技術部サージ・高電界グループ所属。主として、電力機器におけるガス絶縁の研究開発に従事。電気学会員。

梅本 貴弘



2011年3月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月三菱電機㈱入社。現在、同社先端技術総合研究所電機システム技術部 サージ・高電界グループ所属。主として、変圧器、発電機等の電力機器の絶縁技術の研究開発に従事。電気学会員。

海永 壮一郎



2008年3月東京大学理学系研究科物理修士課程修了。同年4月三菱電機㈱入社。現在、先端技術総合研究所電機システム技術部サージ・高電界グループ所属。主として、ガス絶縁・液体絶縁の研究開発に従事。電気学会員。

吉村 学



1992年3月広島大学理学部物理学科卒業。同年4月三菱電機㈱入社。現在、先端技術総合研究所電機システム技術部サージ・高電界グループ所属。主として電力機器におけるガス絶縁・固体絶縁の研究開発に従事。電気学会員。

武藤 浩隆



1985年3月名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻前期課程修了。同年4月三菱電機㈱入社。現在、先端技術総合研究所電機システム技術部主管技師長。工学博士。変圧器、開閉器等の電力機器およびモータ、パワーモジュール等のパワー・エレクトロニクス機器の絶縁技術開発に従事。電気学会員。

釣本 崇夫



1996年3月豊橋技術科学大学大学院工学研究科総合エネルギー工学専攻博士後期課程修了。同年4月三菱電機㈱入社。現在、先端技術総合研究所電機システム技術部サージ・高電界グループマネージャー。工学博士。主として、電力機器およびモータ、インバータ、パワーモジュール等のパワー・エレクトロニクス機器の絶縁技術開発に従事。電気学会員。

米田 晋也

2016年3月兵庫県立大学大学院工学研究科電気系工学専攻博士前期課程修了。主として、ガス絶縁、部分放電基礎研究に従事。



永田 正義

1985年3月大阪大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学後、日本学術振興会奨励研究員。1986年10月姫路工業大学助手、工学部講師、助教授を経て、2004年4月兵庫県立大学大学院工学研究科教授、現在に至る。博士（工学）。主として、核融合プラズマ理工学

およびプラズマ・放電工学の基礎から産業応用研究に従事。プラズマ・核融合学会、応用物理学会、パワーエレクトロニクス学会、電気学会員。

菊池 祐介

2004年3月名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程修了。2004年4月～2006年3月日本学術振興会海外特別研究員（ドイツ・ユーリッヒ研究機構プラズマ物理研究所客員研究員）。2006年4月兵庫県立大学大学院工学研究科助手、2007年4月同助教、2010年4月同准教授、現在に至る。博士（工学）。主として、プラズマ・放電工学の基礎・産業応用研究に従事。プラズマ・核融合学会、日本物理学会、電気学会員。

