

氏名	ささもと りょう 佐々本 凌		
学位の種類	博士（工学）		
報告番号	甲第 1964 号		
学位授与の日付	令和 5 年 3 月 16 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当（課程博士）		
学位論文題目	発光分光法と分光画像診断法を用いて評価した大気圧 Hermstein グローコロナ放電の電界の空間分布測定に関する研究		
論文審査委員	(主 査)	福岡大学	教授 花井 正広
	(副 査)	福岡大学	教授 根葉 保彦
		熊本大学産業ナノマテ准教授 リアル研究所	浪平 隆男

## 内 容 の 要 旨

SF<sub>6</sub>ガスは高い電気絶縁能力を有し、人体に対して無害であることから、多くの電力設備で長年用いられている。しかしながら、SF<sub>6</sub>ガスは、CO<sub>2</sub>ガスの約 23500 倍の高い地球温暖化係数を有する。そのため、長年、SF<sub>6</sub>ガスの代替ガスの調査が行われている。近年、代替ガスとして、自然由来の窒素ガスや空気などが注目されているが、これらを電力設備で使用するには、窒素ガスや空気中で発生する部分放電を理解する必要がある。電力設備内で発生する部分放電は、電力設備内の誘電体の劣化を引き起こし、最悪の場合、電力設備の故障に繋がる可能性がある。故障や事故を未然に防ぐためには、部分放電が絶縁破壊に至る過程を理解する必要がある。つまり、絶縁破壊現象に影響を与える放電の電界、温度、湿度など様々な要因を把握する必要がある。特に電界は、放電の形成や進展に大きな影響を与えるため重要な要因である。

本研究では大気圧中の Hermstein グローコロナ放電の電界の計測を行った。この放電の電界の研究報告は、シミュレーション解析結果がほとんどであり、受動的な分光計測手法を用いた空間の電界の実験報告例は少ない。本研究は測定対象に影響を与えない利点を有する発光分光法と分光画像診断法の 2 つの分光計測手法を用いて放電の電界を明らかにしたものであり、大きく 4 つの研究から構成されている。

第 1 の研究は、大気圧下における窒素の固有のスペクトルバンド帯の発光強度比と電界の関係を明らかにすることを目的としている。電界に関係している窒素のスペクトルバンド帯の発光強度比は、1st Positive System Band(3, 1) (FPS(3, 1))と 2nd Positive System Band(0, 0) (SPS(0, 0))の発光強度比 FPS(3, 1)/SPS(0, 0)である。そこで、電

界中にレーザを照射することで、均一な電子発光群(電子スウォーム)を発生させ、その電子スウォームの発光から FPS(3, 1)と SPS(0, 0)の発光強度のピーク値を発光分光法で計測し、発光強度比と電界の関係を明かにした。ここで導出される電界は換算電界と呼ばれ、圧力 P で除した E/P とガス密度 N で除した E/N の二通りが表現されるが、近年 E/N で表記されるのが一般である。実験から得られる換算電界は E/P であるため、E/N に変換するには理想気体方程式  $P = NkT_g$  (N: 気体密度, k: ボルツマン定数,  $T_g$ : 気体温度) を用いる必要がある。スウォームの気体温度は放電管内の温度と等価とみなし、E/N に変換を行い、E/N の上昇に伴って発光強度比が減少する結果を得た。

第2の研究は、第1の研究で得られた関係を用いて放電の電界値を明らかにすることを目的とする。放電は棒対平板電極の棒電極側に直流の正極性高電圧を印加することで、棒電極先端に発生させることができる。放電の発光強度比は発光分光法で測定した。放電の E/N を導出するためには、放電の気体温度を考慮しなければならないが、放電の  $T_g$  は窒素の 2nd Positive System Band (0, 0) (SPS(0, 0)) のスペクトルから導出できる。この  $T_g$  の測定結果から放電の E/P を E/N へ変換した。その結果、放電が発生から絶縁破壊に至るまでに、E/N は最小値を持つことが明らかになった。しかしながら、導出された値は分光器の測定領域の空間的平均値であり、放電中の E/N の空間分布を明らかにできない問題がある。

第3の研究は、第1の研究で得られた発光強度比に分光画像診断法を適応させるためのデータ処理を行うことを目的とする。分光学的診断は、第2の研究で明らかにできなかった空間分布を導出できる。分光画像診断には、狭帯域バンドパスフィルタを観測カメラに装着することで得られる分光画像が必要である。第1の研究から得られた FPS(3, 1)と SPS(0, 0)のスウォームの発光強度に、FPS(3, 1)と SPS(0, 0)に対応する狭帯域バンドパスフィルタの重みづけを行うことで、フィルタを考慮した FPS(3, 1)と SPS(0, 0)のスペクトルを得ることができる。そのスペクトルの発光強度から、分光画像診断で用いる発光強度比と E/P の関係に変換した。

第4の研究は、分光画像診断を用いて放電中の E/N の空間分布を明らかにすることを目的とする。狭帯域バンドパスフィルタを観測カメラに装着して放電を観測することで、放電の分光画像を得ることができる。この FPS(3, 1)と SPS(0, 0)に対応する分光画像から同位置の各ピクセルで発光強度比の計算を行うことで、放電の発光強度比分布を得ることができる。第3の研究から得られた関係を用いて、発光強度比分布は E/P の分布へ変換できる。一方、先行研究より窒素の 2nd Positive System Band (0, 2)の tail (SPS(0, 2)tail)と head (SPS(0, 2)head)の発光強度比  $SPS(0, 2)tail/SPS(0, 2)head$  と  $T_g$  の関係が明らかである。このため、発光強度比の分布を取得することで  $T_g$  を得ることができ、この値を用いて、放電の E/N の空間分布を明らかにした。その結果、棒電極先端の放電は E/N の最小値を持たず、印加電圧の上昇に伴って増加し続けることを明らかにした。また、放電が絶縁破壊に至る直前には、棒電極先端に周囲よりも高い E/N や  $T_g$  の値があることが明らかになった。

本論文では、これら 4 つの研究成果を踏まえて、Hermstein グローコロナ放電が絶縁破壊に至る過程における過程を E/N と Tg の結果から明らかにして結論としている。また、絶縁破壊の起点である E/N と Tg の値は、 $E/N = 270 \times 10^{-21} \sim 340 \times 10^{-21} \text{ Vm}^2$  以上及び  $Tg = 550 \sim 700 \text{ K}$  以上であることを示唆した。

## 審査の結果の要旨

### 1. 審査経過

#### 1.1 博士論文事前審査委員会

令和 4 年 11 月 30 日に開催された博士論文事前審査委員会で、申請者は申請資格に定める「申請者が第一著者である査読付学术论文 1 編(冊)以上の研究業績を有する者」であると確認されたので、審査の結果、申請資格の条件に適合する者であると判定された。

#### 1.2 学位論文類似度判定実施

令和 4 年 11 月 8 日、論文類似判定ソフトにより類似判定を行い、他論文との類似度 1% と低い値が得られ、オリジナリティを有するため、類似度判定は合とした。

#### 1.3 博士課程後期通常委員会

令和 4 年 12 月 7 日に開催された博士課程後期通常委員会で、主査予定者の花井 正広から申請者の経歴、研究業績、論文名、論文の内容と副査予定者の説明を行い、審議の結果、申請論文の受理と審査委員が提案どおり承認された。

主査 花井 正広 教授

副査 根葉 保彦 教授、熊本大学産業ナノマテリアル研究所 浪平 隆男 准教授

#### 1.4 審査会

##### (1) 第1回

日 時：令和4年12月21日（水）15：00～16：20

場 所：オンライン（Webex）

申請者本人から申請論文の内容説明を受け、審査委員から次とおり質疑並びに指示があった。

- 1) これまでの研究報告から測定対象の放電について、これまで理論的にどこまで明らかになっていたのか、今回の研究でどこまで明らかにしたのかを明確にする。
- 2) 放電の温度変化について、棒電極の温度の要因と熱伝導の影響のどちらが大きな要因となっているのか。

- 3) 既に報告されている発光強度比による電界測定の方法に比べて、今回おこなった発光強度比による電界測定の優位性は何かを加える。
- 4) スウォームが進展することによる電界への影響は検討したのか。
- 5) 換算電界E/NとE/Pの違いは何か。また、どのような定義なのか。
- 6) 電極構造から得られる電子電流波形及び電圧波形について、数値解析等で同様な波形が得られるのか算電界E/NとE/Pの違いは何か、またどのような定義なのか。

これらの質疑について申請者は全て口頭で明確に回答した。このため審査会は1回とし、指摘事項およびコメントも参考にして公聴会までに修正をおこない主査、副査に提出、確認することとした。

#### 1.5. 公聴会

日 時：令和5年1月30日（月）14：00～15：30

場 所：4号館1階 多目的ホール

公聴会では申請者を含め35名が参加した。申請者による約55分の発表の後、出席者の7名から質疑があり、申請者は全ての質疑に対する確かな回答を行った。

主な質疑応答の内容は次のとおりである。

- 1) FPS (3, 1) と SPS (0, 0) の発光強度比が、なぜ換算電界の上昇に伴って減少するのか？  
⇒エネルギー準位から考えると、発光強度比の分母側の SPS (0, 0) は FPS (3, 1) よりも高準位にある。そのため、換算電界が増加することで、相対的にエネルギー量も上昇すると考えられる。この結果、分母が換算電界の上昇に伴って増加するため、発光強度比は換算電界の上昇に伴って減少することになる。
- 2) 絶縁破壊の直前は、チャンネルが形成して破壊に至るのか？  
⇒今回の測定に関しては、絶縁破壊の直前については計測できていないが、チャンネルが形成されたとしても、形成と同時に火花破壊に移行していると考えられる。それよりも、今回の測定から得られた結果では、空間電荷の中和が影響していると考えられる。
- 3) 放電の温度と電界のパラメータは、絶縁破壊に至る要因としてどちらが大きな要因を占めるのか？  
⇒電界と温度はどちらも相互な関係を持つため、一概には言えないが、放電の成長に深く起因するのは電界であるため、最終的には電界のパラメータが大きな要因を占めていると考えられる。
- 4) プラズマの状態によって、化学反応など窒素の発光強度は変化するのはではないか？  
⇒発光強度はクエンチングなどや上位準位からの遷移したエネルギーなどの影響を受けることがある。しかし、今回の手法では、基底状態からの遷移を前提とした測定方法なので、それらの影響を無視している。厳密には、クエンチングや上位準位からの遷移を想定しないといけないが、現状ではそこまで考慮した内容には至って

いない。

- 5) 今回の測定は、窒素分子の発光を使っでの計測でしたが、他のガス種でも同様な分析ができるのか？例えば、アルゴンガスなどの反応性プロセスなどで評価できないのか？

⇒窒素以外にも、アルゴンガスの発光強度比などを用いて電子温度を導出する手法がある。その手法は、2線強度比比較法と呼ばれている。その手法も同様に発光強度比から算出できるので、フィルタを用いて測定することが可能であれば、プロセスガス中の電子温度も測定することが可能である。

- 6) 電極の間隔によって、放電中の電子やイオンの振舞いは変化するのか？

⇒ギャップ長 5, 10, 15mm の測定条件によって得られた結果から、振舞いが変化すると考えている。ギャップ長が 10, 15mm では電荷の中和が影響しており、ギャップ長 5mm では正のイオンが少ないことが影響していると推定している。

- 7) 分光画像診断の結果において、全体の発光から算出した放電の平均気体温度が減少しているのはなぜか？発光強度の面積増加が効いているのか？

⇒発光強度の面積増加が影響していると考えられる。その他、物理的要因としては、1つは棒電極温度自体が放電の温度を抑制していること、2つめは放電の熱伝導が影響して、棒電極先端以外の温度は冷やされやすいことが考えられる。

公聴会終了後、4号館1階多目的ホールにおいて、申請者のエネルギー・環境システム工学に関する専門知識および英語能力について、学位論文、筆頭著者論文および国際学会プロシーディングの口頭発表内容の審査をおこない、いずれも合であると判定した。

## 2. 審査委員の結論

最終審査会において、学位論文は、骨子となる内容が IEEE の論文誌に掲載するなど学術的・社会的意義が国際的に評価されており、新規性・独創性を持ち、先行研究や事実の調査が十分行われ、目的に対応した結論が明確であり、語法・文章表現・引用等が適切であり、各種倫理基準を順守していることを確認した。また、審査会および公聴会では的確な質疑応答をしており、福岡大学大学院工学研究科博士学位申請取り扱い細則第7条の審査基準を全て満足している。これらのことから学位論文と認められる。

以上