



Title	大気圧直流グロー放電における発光の自己組織化メカニズムに関する研究
Author(s)	宮崎, 俊明
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16844号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16844
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99689
Type	doctoral thesis
File Information	Toshiaki_Miyazaki_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 宮崎 俊明

学 位 論 文 題 名

大気圧直流グロー放電における発光の自己組織化メカニズムに関する研究
(Studies on the self-organization mechanism of luminous patterns in atmospheric-pressure DC glow discharges)

従来プラズマの研究は、主に真空を想定したような低ガス圧環境で行われてきた。しかし、この10~20年ほどにおいて、大気圧下でプラズマを安定的に生成できる技術が開発され、「大気圧プラズマ」という研究分野が確立した。大気圧プラズマは、真空という制約から解放され、空気中や水の存在する環境でも生成可能であるため、医療・農業・水処理など応用分野は多岐にわたる。近年積極的にこれら応用研究が進められている一方で、以下のような課題も存在する。

- プラズマの制御性に困難さがある
- 界面での現象が複雑で理解が不足している

大気圧プラズマにおいてメカニズムが未解明の現象もいくつか存在し、その1つが、本研究で扱う大気圧直流グロー放電生成時にある条件下で陽極表面に観測される発光の「自己組織化」である。

自己組織化とは、動物の体表模様や氷の結晶などに代表される自発的に模様ができる現象であり、さまざまな分野に共通して現れる。数学的には、A.Turing の提唱した「反応拡散系」と呼ばれる2変数の連立微分方程式を適切に解くと、さまざまな模様が解として得られることが知られている。その2変数は物質の密度であり、反応および拡散しながら密度変化することで模様ができる。本研究では、直流グロー放電において陽極表面に観測される発光の自己組織化を扱うが、反応拡散系における2変数および反応・拡散のプロセスを理解することでメカニズムが理解できるはずである。このメカニズムが解明されることで、大気圧プラズマに関する課題の解決に貢献できる可能性があり、さらに現在行われている他分野の自己組織化に関する研究への寄与も期待できる。

直流グロー放電での自己組織化は、もともとは「空気中で液体陽極を用いた際に水面に発光の自己組織化が観測された」と報告された現象であり、海外グループの研究も含めてそれに類似した研究が多数報告される一方で、以下のような点はよく理解されていなかった。

- この現象は液体電極に特有の現象なのか
- 放電中のどのようなガス種が重要であるのか
- 放電自体がどのような状態になっているのか

そのため、自己組織化のメカニズム自体に関する報告はほとんどされていないのが現状である。大気圧プラズマでは、プラズマサイズが小さいことに起因して従来の真空プラズマでの手法の適応が難しいため、プラズマ自体の理解が進んでいないことに原因があると考えられる。そこで本研究では、主にレーザー計測を用いてプラズマ自体の診断を行い、この自己組織化メカニズムの解明を目指す。放電は空気中で生成したものに加えて、チャンバー内でガス雰囲気制御した環境で生成したものを扱った。

第1章では、研究の背景、目的および意義について述べている。大気圧プラズマおよび自己組織化に関する一般的な理解について述べ、プラズマ分野における発光の自己組織化の現状を整理して

いる。先行研究に基づき考えられる自己組織化メカニズムを説明できるモデルを2つ示している。1つは、 O_2 ガスの存在が重要という事実から、「負イオン」に着目したモデルであり、電子と負イオンの密度が反応拡散系における2変数であると予想している。もう1つは、「中性粒子」と電子を予想したモデルである。1つ目のモデルでは、プラズマの密度は一様で、模様の発光部は電子、非発光部は負イオンが占めていると仮定しているが、2つ目のモデルではプラズマ密度自体が分布しており、非発光部にはプラズマがないと仮定している。以下3~6章において、この2つのモデルを検証してメカニズムについて考察していく。3,4章で空気中の放電、5,6章でチャンバーを用いた放電を扱っている。

第2章では、本研究において用いた放電の生成装置ならびに生成方法を紹介し、レーザーを用いた計測法および発光分光法の原理についても述べている。

第3章では、負イオンに着目して空気中の放電を診断した結果および考察を述べている。模様のできる条件およびできない条件で負イオン密度が数倍程度しか変わらず、 O_2 以外の SF_6 や CO_2 といった電氣的負性ガスを放電周囲に流した条件で模様ができなかった結果から、負イオンの存在と自己組織化形成の間には直接的な因果関係がないという結論を出したことを述べている。

第4章では、空気中の放電において「ガス温度」に着目して放電を診断した結果および考察を述べている。模様のできる電極間距離が大きく ($d > 5 \sim 6$ mm)、放電電流の大きい ($I > 30 \sim 40$ mA) 条件では、ガス温度は約 2500~3000 K 程度まで上昇していた。それに対し模様のできない条件 ($d < 5$ mm, $I < 30$ mA) でのガス温度は約 1500~2000 K 程度であった。この結果から、「ガス温度」が模様形成条件を整理できる重要なパラメータの1つである可能性があることが分かったことを述べている。

第5章では、He のみを導入したガス雰囲気制御した条件で生成した放電を診断した結果および考察を述べている。チャンバー内でガス圧を変化させた結果から、ガス圧と電極間距離が模様形成に影響を与えるパラメータであると分かり、それらの積である「pd 積」により模様のできる条件が整理できることが分かった。模様ができる pd 積の大きい条件では、換算電界 E/N が小さくなり、電子エネルギーも低くなることが予想される。さらに、発光分光により得た放電のスペクトルからも、再結合プラズマである可能性が示唆された。再結合プラズマでは、電子と正イオンの再結合 ($AB^+ + e \rightarrow A^* + B$) により発光が生じる。このとき電離 (電子と正イオンを生成) は、準安定状態の $He(He^M)$ によるペニング効果 ($He^M + AB \rightarrow He + AB^+ + e$) により生じていると考えられる。空気中での実験のガス温度の影響と合わせて、 He^M と模様形成との関係についても述べている。

第6章では、電子および Rydberg 状態の $He_2(He_2^{Ryd})$ の密度が反応拡散系における2変数に当てはまると予想したモデルの構築を目指した結果および考察について述べている。モデルに必要なガス温度および He^M 密度分布を計測した結果を述べ、発光分光の結果と放電中の粒子のレーザー方程式を利用した反応モデルを用いて電子・ He_2^{Ryd} を含む粒子密度を計算した結果についても述べている。その結果から、電子・ He_2^{Ryd} 密度を2変数とした反応拡散系の形をした連立偏微分方程式が得られたため、この章で構築したモデルが直流グロー放電の自己組織化を再現できるモデルとして利用可能であることが示唆された。最後に空気中の放電との共通点および、空気中の放電における自己組織化メカニズムに関する考察も述べている。

第7章では、各章で得られた成果を総括して結論としている。また、今後の課題として構築したモデルを用いた実際の計算解析および空気中の放電における具体的なモデル構築の必要性を挙げている。