



連続プラズマ発生装置の製作とプラズマの磁場特性 調査

| | |
|-------|--|
| メタデータ | 言語: jpn 出版者: 公開日: 2016-02-18 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 藤川, 泰輔, 當村, 一郎 メールアドレス: 所属: |
| URL | https://doi.org/10.24729/00007540 |

連続プラズマ発生装置の製作とプラズマの磁場特性調査

藤川泰輔*, 當村一朗**

Production of a Continuous Plasma Generator and Properties of the Magnetic Plasma

Taisuke FUJIKAWA* and Ichiroh TOHMURA**

要旨

近年、原子力発電の安全性が問題視されている中で、それに代わるクリーンな発電方法として核融合が注目されている。しかし、核融合反応に大きく関わるプラズマの磁場に対する特性はまだ研究段階で、明らかになっていない点が多いため実用までは至っていない。そこで、本研究ではプラズマ発生装置を製作し、磁場環境下でのプラズマの振る舞いを調べることを目的とした。プラズマを発生させる放電には連続的であり、大気圧下でも行え、必要な電圧、電流が低いことから針-平板電極コロナ放電を採用した。今回、針電極の周りに観測される膜状のグローコロナに磁場を作用させることを目的として装置を製作したが、このプラズマ発生装置では針から払子状に光が伸びる払子コロナの観測しかできなかった。しかし、より発光部の大きい払子コロナが断続的に発生していたので、装置は製作できたと判断し、以下ではこの装置で研究を行うことにした。磁場中のプラズマの挙動を観察するために、ネオジウム磁石2つを使用して放電と直交する方向に磁場を作用させた状態で放電させると、磁石のない場合に比べ発光部が拡大しているように見えた。このことから数十[mT]程度の磁場でもプラズマ中の電子に磁気ドリフトを起こさせることができるという結論が得られた。

キーワード: 核融合, プラズマ, コロナ, 磁場, ドリフト

1. 緒言

現在では、プラズマディスプレイや、空気清浄器などで身近な存在になったプラズマであるが、言葉自体は知っていてもどのようなものなのか知らない人は多いのではないだろうか。物質の三態として固体、液体、気体の3つの状態が知られているが、気体にエネルギーを与えると気体中の分子は原子に解離し、さらにそれが電子とイオンに電離して荷電粒子を含んだ気体になる。その状態をプラズマといい、通常の気体とは大きく異なった性質を持つため物質の「第四の状態」とも呼ばれている。

プラズマは蛍光灯や空気清浄器などの身近な電化製品のほかにも、濡れ性の向上や撥水加工などの表面処理や、素早く鋼板を切断できるプラズマ切断機として利用されており、莫大なエネルギーを生み出すことのできる核融合の実現を目指し、更なる研究も進んでいる。特に、核融合はエネルギー不足を解消するクリーンな発電方法として注目されており、ウランやプルトニウムではなく、

水素を燃料として使うので、核分裂を用いる原子力発電に比べて放射性廃棄物のレベルを大きく下げることができる。しかし、核融合は反応を起こすために必要な温度、圧力が核分裂に比べ高いため技術的にハードルが高く、中でも高温高压のプラズマを封じ込める技術の開発が困難を極めている。核融合においてプラズマを閉じ込める方法に磁場を用いた制御があるが、プラズマの磁場に対する特性はまだ研究段階で、明らかになっていない点が多い。また、プラズマの磁場による制御法は核融合以外でも求められる技術であり、電子をより広範囲に拡散させ、プラズマによる電気集塵の効率を上昇させたり、照射する方向をより正確に制御することで、プラズマ加工の精度を向上させたりできると考えられる。

そこで、磁場中でのプラズマの振る舞いを知ることが今後の技術開発に役立つと考え、本研究ではプラズマ発生装置を製作し、どの程度の磁束であれば磁場がプラズマに影響を与えるのか、プラズマを希望の方向へ動かすための磁場を作用させる方向や、プラズマを発生させるために電極に加える電圧の正・負によって異なる振る舞いをするのか調べることを目的とする。

以下、2章では実験装置の仕様や動作について、3章では実際に磁場を作用させた場合のプラズマの挙動について

2015年8月17日 受理

*2014年度 総合工学システム専攻 機械工学コース

**機械システムコース

(Dept. of Technological Systems: Mechanical Systems Course)

て述べ、4章では全体をまとめる。

2. 実験装置

2.1 装置の仕様 プラズマジェットのような瞬間的にプラズマを発生させる装置は構造が簡単だが、本実験では核融合等に用いられるプラズマの性質を知ることとを目的としているため、放電を行い、連続的にプラズマを発生させることができる装置を作る必要がある。プラズマを発生させる放電には、火花放電、コロナ放電、グロー放電、アーク放電などいくつかの種類があるが、連続的であること、大気圧下でも行えること、必要な電圧、電流が低いことから針 - 平板電極コロナ放電を採用した。

針側に正の直流電流を流した場合に現れる正コロナにはいくつかの形態がある。まず、ごく微弱なグローコロナが発生し、 $[\mu\text{A}]$ 程度の電流が流れる。この時針先端が薄い光の膜で包まれた形となる。針側と平板電極との距離がある程度以上もうけられていると、針正電極より長く伸びた形のコロナが音を発して明滅する(ブラシコロナ)。これがさらに発達すると、細い光条が陰極にまで達し、明滅を繰り返す払子(ストリーマ)コロナとなる^[1]。

一般的に正コロナは膜状、ブラシ、払子の順に発達するとされているが、大気圧下ではストリーマ放電の後にグロー放電が起こるとい説もある^[2]。

また、大気圧下で放電を開始させるには非常に大きな電圧が必要となる。放電に必要な電圧 V と気圧 p と電極間距離 d の積 pd にはパッシェンの法則^[3]と呼ばれる関係があり、 V は気体によって決まるある pd の値で最小となり、それより pd が大きくても小さくても V は上昇することが知られている。電極間距離を小さくすると放電の様子が観測しにくくなるため電極間距離を $5[\text{mm}]$ にし、放電に必要な電圧が約 $1000[\text{V}]$ になるよう真空ポンプ(図 2-1)を用いて装置内の気圧を下げることにした。

今回は、針電極の周りに観測される膜状のグローコロナに磁場を作用させることを目的として装置を設計した。

電極の材料は銅、内部で発生するオゾン等のガスが外に漏れることのないようガラス管、キャップで密封している。ガラス管の材料はホウケイ酸ガラス、キャップはナイロンである。導線には $6600[\text{V}]$ の高電圧まで耐えられるスズメッキ軟銅導線を使用し、針電極にはその芯線を尖らせて使用している。平板電極と導線を接続するために、導線の先につないだ圧着端子を接触させ、ネジとナットを用いて固定してある。

2.2 装置の運転実験 針電極を正とし、放電を行っている様子を図 2-2 に示す。真空ポンプを用いて圧力を

$1[\text{kPa}]$ 以下に下げ、電圧を $900[\text{V}]$ まで上昇させると、火花音とともに針電極から青白い払子状の光が平板電極に向かって伸び、明滅を繰り返した。放電する瞬間、電圧は $600[\text{V}]$ まで下降し、 $10[\text{mA}]$ の電流が流れた。



図 2-1 真空ポンプ (TASCO TA150CS-21)



図 2-2 放電の様子 ((a) 放電時 (b) 非運転時)

2.3 装置に対する考察 今回製作した装置では払子コロナの発生を確認することができたが、グローコロナを観測することはできなかった。そこで、グローコロナの発生するコロナ放電の条件を考えてみる。

向かい合う一対の電極がガス中に置かれ、両電極に電圧を加えていき、火花電圧以上の電圧になると持続放電電流が流れ、電極近傍に希薄なプラズマあるいは空間電荷が発生し、その領域の導電性が増すので、その領域における電位差は小さくなる。これはパッシェンの法則を考えた場合の電極間の距離 d が小さくなったことに相当する。すなわち局所的希薄プラズマあるいは空間電荷の発生は、両電極を近づけると同様な効果を得る。したがって、実効的な換算電極間距離 pd は放電の開始によって小さくしようとするといえる。ここで、換算電極間距離 pd がパッシェンの法則^[3]における火花開始電圧の最小値を与える $[pd]_{\text{最小値}}$ より左側にあるとする。すなわち、 $pd < [pd]_{\text{最小値}}$ とする。放電が開始し、持続電流が流れると上に述べたように電極間距離 d が実効的に小さくなり、 pd も小さくなる。問題にしている換算電極間距離の領域では pd の減少とともに火花開始電圧が上昇するので、放電を維持するのに必要な電圧が高くなる。この正抵抗特性により、 d がある程度小さくなると放電を維持できずにコロナ放電は終了する。コロナ放電が終了すると d は本来の電極間距離に戻ろうとするので、 pd が大きくなり

再度コロナ放電が開始される。そのため pd は火花開始電圧が加えられた電圧と等しくなるような一定の値をとり、コロナは発生と消失を繰り返し、安定な放電が維持される^[1]。

これが針電極の周りに膜状のグローコロナが発生しそれが維持される理由だと考えられる。 $pd > [pd]_{\text{最小値}}$ の場合であってもコロナの発生により、 pd が減少し $pd < [pd]_{\text{最小値}}$ の範囲に移行するか、実効的な電極間距離 d が限りなく小さくなり、プラズマが電極に接触したところで、これ以上コロナが発達せずスパークしてしまうと考えられる。

では、なぜこの装置ではグローコロナが発生しなかったのだろうか。次のような理由が考えられる。おそらく $pd > [pd]_{\text{最小値}}$ の範囲、もしくは $[pd]_{\text{最小値}}$ 付近で放電を開始させた場合にグローコロナが発生し、ここから電圧を上昇させることで pd が減少し、 $pd < [pd]_{\text{最小値}}$ の範囲に移りブラシコロナや払子コロナへ発達していくと考えられる。しかし、今回の実験では装置内の圧力を下げるために真空ポンプを使用しており、そのポンプは圧力を 2[Pa] まで下げることができるものであった。そのため圧力が極めて低くなり $pd < [pd]_{\text{最小値}}$ の範囲で放電が開始してしまう。よってグローコロナの発生がなく、初めから払子コロナが発生したのだと考えられる。

この装置では持続的なグローコロナは発生しなかったが、より発光部の大きい払子コロナが漸続的に発生したので、連続プラズマ発生装置は製作できたと判断し、以下ではこの装置で研究を行うことにした。

3. 実験結果および考察

3.1 実験の概要 プラズマに磁場を作用させるために今回は図 3-1 に示すネオジウム磁石を使用する。これを 2 つ使い放電と垂直な方向に磁場を作用させる。磁石は $\phi 10[\text{mm}] \times 10[\text{mm}]$ と小型で軽量のためテープを使い固定している。磁場安定化放電というコロナ放電を安定化させるために磁場を作用させる方法では、数十[mT]以上の磁場で電子の動きを制御している^[2]。測定器を使用して調べた結果、ネオジウム磁石表面の磁束密度は 400[mT]程度で、ガラス管の直径 (25[mm]) だけ離れた距離では、中心の磁束密度は 60[mT]程度であったためプラズマに変化を及ぼすには十分であると考えられる。

磁石が向かい合う方向からでは、磁石が映り込んでプラズマを撮影することができないため、2つの磁石を通る軸線に対し垂直な方向と 45°傾けた方向から高速度カメラで撮影を行い、磁場の作用していない状態との変化を調べる。高速度カメラと装置の位置関係を図 3-2 に示す。

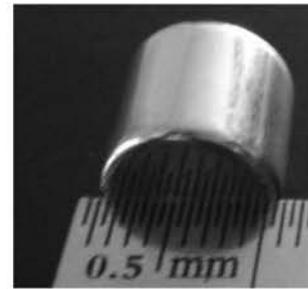


図 3-1 ネオジウム磁石



図 3-2 装置に対する撮影方向

3.2 実験結果および考察 装置に 1kV の電圧をかけて、ポンプを使い圧力を下げた状態で、秒 1000 コマの速さで連続的に約 4 秒間撮像し、その中から発光が認められる画像を選んだものを図 3-3 に示す。また、シャッタースピードを 1/1000 秒にして撮影した画像は発光部分以外が真っ黒なため、電極の位置やプラズマの大きさを把握しやすくするために、シャッタースピード 1/25 秒で撮影した装置の中心部を図 3-4 に示す。磁石は引き合う方向に取り付けてあり、右が S 極を内側に、左が N 極を内側にしている。この時、磁力線の方向は左から右 (N 極から S 極へ向かう方向) へ直線的に向かっていると仮定しておく。

磁場が作用していない場合、電子は電場によって電極へ向かう方向へ加速される。針電極が正のときは図 3-5 のように払子型になろうとする。針電極が負の場合も電子の向きは反転するが、同じく払子型になろうとする。図 3-3 を見ると、針電極が正・負のどちらの場合も磁石を取り付けているときは磁石を取り付けていないときに比べ、発光部が変形していることがわかる。この発光部の変形は電子の磁力線への巻き付きによるものだと考えられる。

プラズマの磁場へのドリフト (荷電粒子の回転中心の移動) には磁場に直交する電場によるもの (電子と正イオンは同じ方向にドリフトする) と、磁場の不均一さによるもの (電子と正イオンのドリフトは逆向き) がある^[4]。数十[mT]程度の磁場ではイオンに影響を及ぼすことはな

い^[2]ので、電子の動きだけに注目する。今回は電極間に電位差が存在し、磁石を用いて磁場を作用させているので、磁場の強さが一様ではなく、磁石に近づくほど強くなっていたので両方のドリフトについて考える必要がある。

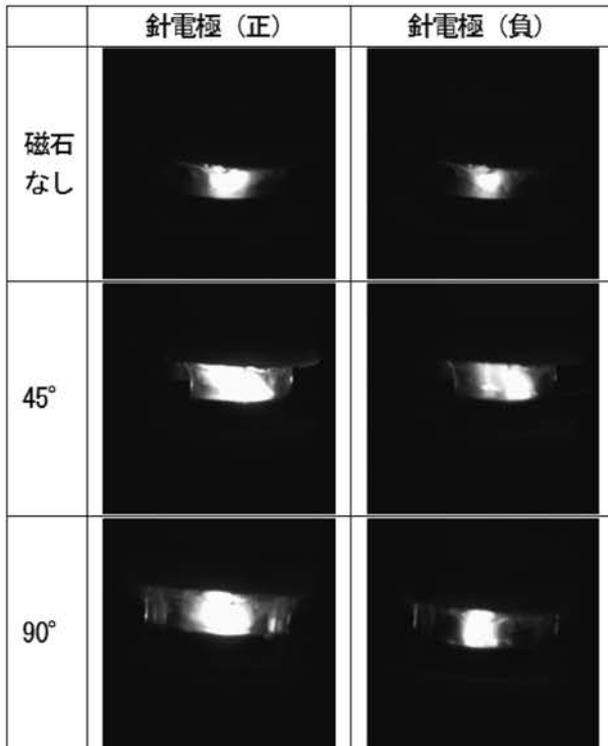


図 3-3 高速度カメラで撮影したプラズマ



図 3-4 高速度カメラで撮影したプラズマ発生装置

まず、磁場と直行する電場による電子のドリフトについて述べる。ドリフトは磁場に垂直な方向に生じるので、最も変化がわかりやすい磁場と平行な方向から見た電子の動きを考える。N 極を手前側にし、磁場に平行な方向から見た場合、磁束密度 B は手前から奥へ、針電極が正の場合、電場 E は針電極から平板電極へ向かう方向に生じるので、電子は図 3-6 のように全体が右にドリフトすると考えられる。針電極が負の場合は電場の向きが逆になるので、電子は左へドリフトする。

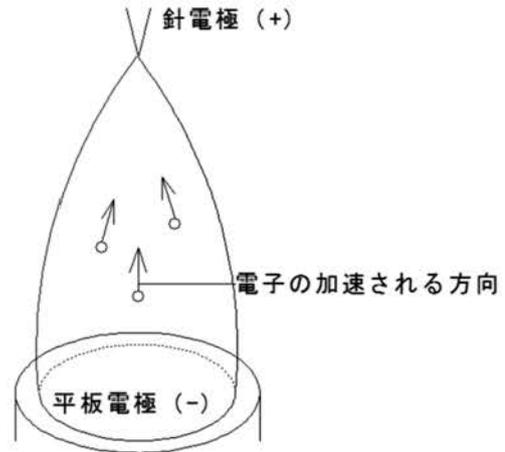


図 3-5 電場による電子の加速方向

次に、不均一磁場による電子のドリフトを考える。N 極を手前側にして、磁場に平行な方向から見た場合、磁束密度 B は手前から奥へ、 $\text{grad} B$ (∇B) は外側から中心へ向かう方向である。そのため電子は、図 3-6 のように中心より上側では右方向に、下側では左方向に、右側では下方向に、左側では上方向にドリフトする。よって図 3-7 のように払子形型は傾いた円柱のような形になる。

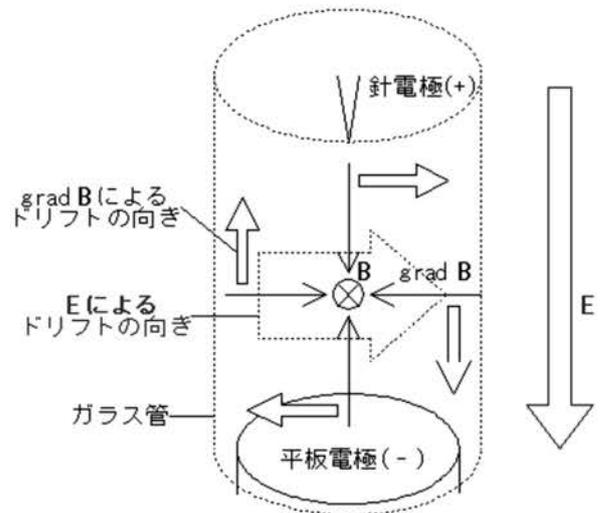


図 3-6 磁場に平行な方向から見た電子のドリフト

磁場に平行な方向からでは発光部が平行四辺形に見えるはずである。図 3-3 の 45°の結果を見てみると、磁石なしのものでは円形だった発光部が平行四辺形に近いように見える。これは部分的に磁場に平行な方向から見た発光部が見えているからだと考えられる。さらに 90°の結果では、発光部が大きくなっているように見

える。ドリフトによりカメラの近くに電子が集まった結果、大きく見えたと考えられる。

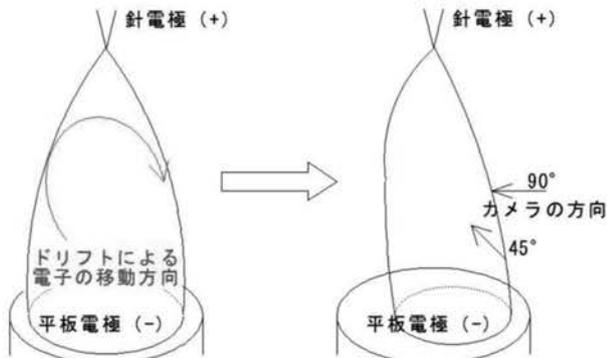


図3-7 ドリフトによる発光部の変形

針電極の正・負で図3-3の磁場を作用させた結果を見比べると、針電極が正の場合の発光部が負の場合に比べて大きく見える。磁場に垂直な方向から見た場合、針電極が正だと電場によるドリフトが手前側を向いているのに対し、針電極が負では奥側を向いているのでカメラとの距離により大きく見えるのではないかと考えられる。

よって、小さなネオジウム磁石でもコロナ放電で発生したプラズマに磁気ドリフトを起こさせることができるといふ結論が得られた。

3.3 課題 磁場によるプラズマ中の電子の制御を応用すれば、広い範囲にプラズマを届かせることや、一方向からのみ電子を射出できるようになる。それにより、コロナ放電を使った電気集塵の効率上昇や、プラズマ加工の精度向上が期待される。そのためには、正確な磁束密度の勾配や強さ、プラズマの位置を測定する必要がある。

また、低温プラズマでは質量の小さな電子の温度のみが高く、イオンの温度は低いためプラズマが外壁に与える影響を考慮しなくて済んでいたが、磁場によるプラズマのコントロールが最も必要とされている核融合の場合では、イオンの温度も高い高温プラズマを扱っているため、イオンも制御しなければイオンの衝突によって外壁が摩耗してしまう。よってより強い磁場をかけ、電子と同様にイオンも制御する必要がある。さらに、図3-5のように磁場の不均一さによるドリフトでは、電子とイオンでドリフトの向きが逆になってしまうので、制御のためには電子とイオンでドリフトの向きをそろえられる、磁場と直交電場によるドリフトで制御する方法が適していると考えられる。また、高温プラズマは低温プラズマとは異なり、ガス密度が時間と空間で均一と仮定できない

ため、同じようにドリフトが起きるのか確認することも必要だと考える。

4. 結語

本研究では磁場がプラズマに与える影響を調べるために、プラズマを連続的に発生させることのできる装置の製作を行った。プラズマを発生させる放電方法には簡単に行えることから針-平板電極コロナ放電を採用した。今回、針電極の周りに観測される膜状のグローコロナに磁場を作用させることを目的として装置を製作したが、このプラズマ発生装置では針から仏子状に光が伸びる仏子コロナの観測しかできなかった。しかし、より発光部の大きい仏子コロナが漸続的に発生していたので、連続プラズマ発生装置は製作できたと判断し、以下ではこの装置で研究を行うことにした。

磁場中でのプラズマの挙動を観測するために、表面の磁束密度が400[mT]、装置の半径だけ離れた位置での磁束密度が60[mT]程度の小型のネオジウム磁石を2つ用いて放電と垂直な方向に磁場を作用させた。高速度カメラで磁石がある場合とない場合の放電の様子を撮影し、発光部に変化が起こるのか調べた。磁場に対し垂直な方向と45°傾いた方向から発光部を撮影すると、針電極に正・負どちらの電圧をかけた場合でも、磁石のない場合に比べ発光部が拡大しているように見えた。

この発光部の変化に対し、まず磁場と直行する電場による電子のドリフトについて考察した。手前から奥へ向かって磁力線が伸びているとき、針電極が正で磁場に平行な方向から見た場合、電子は全体が左にドリフトし、針電極が負の場合は電場の向きが逆になるので、電子は右へドリフトする。つまり、針電極が正の場合は負の場合よりカメラ側で発光が起こるので、正の場合が大きく見えたと考えられる。

次に不均一磁場による電子のドリフトについて考察した。手前から奥へ向かって磁力線が伸びているとき、時計回りに電子はドリフトすると考えられる。そのためカメラを45°傾けて撮影したものは発光部が平行四辺形型に変形していると考えられ、磁場に平行な方向から見ると、発光部は最も平行四辺形型に見えると考えられる。磁場に垂直な方向から見た場合はカメラに近づく方向に電子が多く集まるようにドリフトが起こるので、発光部が拡大して見えたと考えられる。よって数十[mT]程度の磁場でも十分にプラズマ中の電子に磁気ドリフトを起こさせることができるといふ結論が得られた。

なお、研究当初はグローコロナの発生を目標にプラズマ発生装置を製作したが、仏子コロナを発生させるものが出来上がった。そのため仏子コロナを対象に研究を行ったが、プラズマの発生が漸続的で発光時間がごく短く、

高速度カメラでも一度の発光に対し一枚の画像しか得ることができず、連続的なプラズマの動きを観測することができなかった。しかし、今回の研究で小さな磁石でも磁気ドリフトを起こすことに成功したので、レギュレータなどで圧力を調整しグローコロナを発生させた場合でも、今回と同じ実験方法が利用できると考えられる。そして、グローコロナに対し磁場を作用させることで、磁場中でのプラズマの時間的变化が観測でき、磁場がプラズマに与える影響をより詳しく調べることができるだろう。

参考文献

- [1]高村 秀一：プラズマ工学入門 第 5 章, 120-153 頁, 森北出版, 1997.
- [2]Jen-Shih Chang : 大気圧プラズマの物理と化学, 682-692 頁, J.Plasma Fusion Res. Vol.82, No.10 (2006).
- [3]高村 秀一：プラズマ工学入門 第 4 章, 82-119 頁, 森北出版, 1997.
- [4] 高村 秀一:プラズマ工学入門 第 7 章, 182-224 頁, 森北出版, 1997.