

令和五年度 修士論文

単電極方式による大気圧アルゴンプラズマジェットの生成
と分光診断

指導教員 佐藤 守彦 准教授

群馬大学大学院理工学府 理工学専攻

電子情報・数理教育プログラム

尾内 亮太

目次	
第1章 序論.....	3
1.1. はじめに.....	3
1.2. 研究の背景.....	3
1.3. 大気圧低温プラズマジェットとは.....	3
1.4. 研究の目的.....	4
第2章 原理.....	5
2.1. プラズマの密度および温度 ^{1,2)}	5
プラズマ密度.....	5
プラズマ温度.....	5
2.2. プラズマの分類 ³⁾	5
2.3. 各種プラズマの電離過程 ^{4),5)}	6
熱平衡プラズマ.....	6
非平衡プラズマ.....	7
(a) 電離進行プラズマ(Ionizing Plasma).....	7
(b) 再結合プラズマ(Recombining Plasma).....	7
2.4. 大気圧低温プラズマの発生 ³⁾	8
2.5. プラズマの発光メカニズム ⁷⁾	8
2.6. 元素同定方法.....	9
第3章 実験に用いた材料および機器.....	10
3.1. 原料ガス及び流量制御装置.....	10
原料ガス.....	10
流量制御装置.....	10
3.2. プラズマジェットノズル ⁹⁻¹³⁾	11
3.3. 高電圧電源.....	11
第4章 実験方法と結果.....	12
4.1. プラズマジェットの生成 ¹⁴⁾	12
従来の方法によるプラズマジェットの生成.....	12
単電極方式によるプラズマの生成.....	12
4.2. 分光測定方法.....	13
4.3. 電極から位置依存性.....	13
4.4. 流量依存性.....	15
4.5. 伸長特性.....	18
4.6. 従来の方法との比較.....	19
第5章 結論.....	20
5.1. まとめ.....	20

5.2.今後の課題.....	20
謝辞.....	22
参考文献.....	23

第1章 序論

1.1. はじめに

物質の状態は内包するエネルギーが低い順に「固体」、「液体」、「気体」の3つの状態が存在する。これを物質の3態や3相というが、この中で最もエネルギーの高い気体にさらにエネルギーを加え続けると、気体原子から電子が飛び出す。これを「電離」という。プラズマは、この電離した気体の状態のことを指し、しばしば物質の「第4の状態」と言われ、全体では電氣的に中性であることが知られている。

身近なプラズマ技術といえば、エネルギー開発に使用される高圧熱プラズマを除けば、蛍光灯やプラズマディスプレイなどが例に挙げられる。これらのプラズマは低温プラズマや低気圧プラズマと呼ばれている。この低温プラズマの実験を行うには真空容器や真空ポンプなどの実験設備が必要である。

一方、それに対して、大気圧で生成されるプラズマでは一般的に電子やイオン、中性子などの粒子密度が高いため粒子間の衝突が盛んとなることから温度が高くなることが一般的に知られている。

近年では、先の例のどちらでもない、大気圧であるにも関わらず、気体温度が低いプラズマの研究が盛んにおこなわれている。本研究では、数あるプラズマ発生方式の中で比較的装置構成が簡単であるジェット方式を採用した。また、様々あるプラズマ診断方法の1つである分光計測を行いそのスペクトルから元素同定等の解析を行った。

1.2. 研究の背景

1980年代、大気圧グロープラズマの開発により He などのガスを封入した容器に低周波高電圧を与えることで長時間かつ安定的にグロープラズマを得ることができるようになる。

近年、その研究をもとに医療分野や表面処理などの応用研究も盛んにおこなわれるようになる。また、プロセッシング方式には電極から離れているプラズマジェット方式が注目され、医療応用などの期待が寄せられている。

1.3. 大気圧低温プラズマジェットとは

大気圧低温プラズマジェット(An Atmospheric Pressure, Low Temperature Plasma Jet)とは、He などのガスを流した石英管等の円筒形の誘電体に、低周波高電圧(数 kHz~数十 kHz、数 kV~数十 kV)を印加しプラズマジェットを得る方式である。その周波数から LF プラズマジェット(Low Frequency Plasma Jet)と言われることもある。大きな特徴として、

① 低温である

ガス温度がおおよそ室温程度であるため熱に弱い物質に照射が可能。照射した物体に熱的ダメージがほとんどない。

② 高密度である

大気圧で生成するため真空系で発生させるプラズマに比べて高密度なプラズマが生

成可能。

③ 装置構成が簡単である

真空系を用いないため、その分費用が安価となり実験を行いやすい。1-1 で述べたような容器や真空ポンプなどの機材が不要で金銭的に安価で実験を行いやすい。等の特徴があげられる。

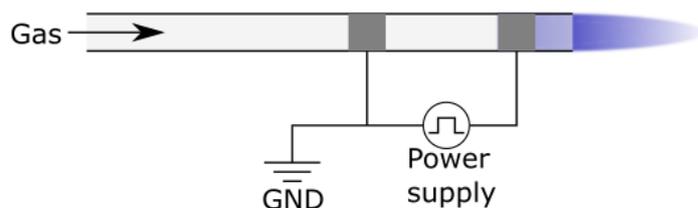


図 1-1 大気圧低温プラズマジェットの概略図

1.4. 研究の目的

本研究室では銅管を放電電極として大気圧アルゴンプラズマジェットを生成することはできていた。しかし、この方式は短絡放電が発生するなどの問題点がある。これらの問題点が解消できる単電極方式による大気圧低温プラズマの生成及び分光診断が本研究の目的である。

第2章 原理

2.1. プラズマの密度および温度^{1,2)}

プラズマの状態を表す指標として密度と温度がある。この温度と密度はデバイ長やプラズマ振動数などのプラズマを記述する多くのパラメータでこの値を用いて書き表される。

プラズマ密度

プラズマは電子、正または負イオン、中性原子・分子(不純物も含む)から構成されている。プラズマの構成粒子について、単位体積当たりの粒子数を“密度 $[m^{-3}]$ ”と定義している。プラズマは電氣的に中性な性質を持つため、電子密度 n_e 、 k 種のイオンの価数を z_k 、密度を n_k として次の条件が成り立つ。

$$n_e = \sum_k z_k n_k \quad (1.1)$$

プラズマ温度

温度という概念が成り立つには、厳密にはその系が熱平衡状態であることが前提である。これに対して、我々が生成し得るプラズマは厳密な意味での熱平衡からは程遠い。しかし、ある粒子群の粒子相互間の平均衝突時間より十分に長い時間スケールで現象が変化していて、その瞬間ごとに、粒子群の速度分布が Maxwell-Boltzmann 分布に従っているとき、その粒子群の“温度(T)”を定義することができる。その温度を用いれば、いろいろな現象やプラズマのふるまいを単純な式に記述できて有用である。プラズマに対するエネルギーの注入の仕方により、電子は電子温度、イオンはイオン温度、としてそれぞれ別の温度を持つことが多く、また温度が異方性を持つこともある。

2.2. プラズマの分類³⁾

プラズマ中では、電子、イオン、中性ガスの各粒子が衝突しあっている。電子温度 T_e 、イオン温度 T_i 、中性ガス温度 T_g とすると圧力との関係で定性的に図1-1のようにあらわされる。低圧では衝突頻度の小さい場合は T_e は数万度の高い状態に維持イオン温度はほぼガス温度と等しい値をとり、室温に近い状態となる。このような $T_e \gg T_i \cong T_g$ の状態のプラズマを非平衡(または低温)プラズマと呼んでいる。一方、圧力が上昇するにつれて、衝突頻度が増加するため、大気圧付近では数千度の温度で一致するようになる。このように $T_e \cong T_i \cong T_g$ となった状態を熱平衡(または熱)プラズマという。しかし、1.2.項のプラズマ温度にて述べたとおり、「温度という概念が成り立つには、厳密にはその系が熱平衡状態であることが前提である」ため、プラズマ生成におけるエネルギーの注入時間が衝突による温度の緩和時間よりも十分に短いとき、高い圧力においても熱平衡に至らず過渡的な非平衡プラズマが形成される。本研究で使用する大気圧プラズマジェットは非平衡プラズマの一種である。

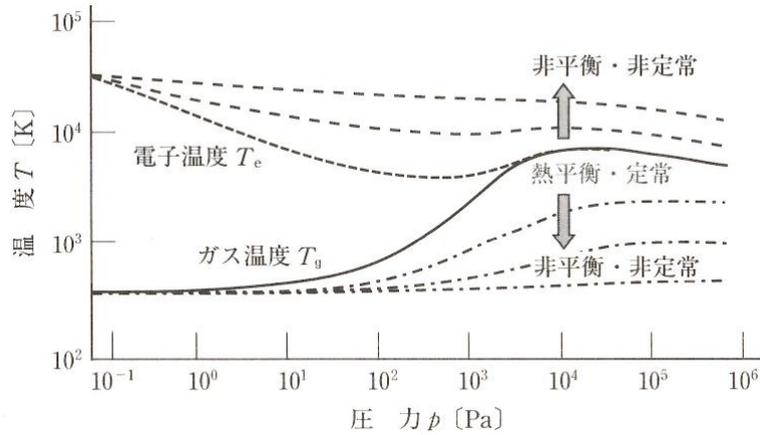


図 1-1：プラズマ中の電子温度 T_e とガス温度 T_g の圧力 p に対する依存性³⁾

2.3. 各種プラズマの電離過程^{4),5)}

熱平衡プラズマ

熱平衡状態のプラズマは Maxwell-Boltzmann 分布に従う。この時、 z 価イオンの準位 i の占有密度 $n_z(i)$ は次のようにあらわされる。

$$\frac{n_z(i)}{n_z(1)} = \frac{g_z(i)}{g_z(1)} \exp\left(-\frac{E_z(i)}{kT}\right) \quad (2.1)$$

$g_z(i)$ ：準位 i の統計的重率, $E_z(i)$ ： z 価のイオンの準位 i の基底状態からのエネルギー
 k ：ボルツマン定数, T ：温度

また、 z 価のイオン密度はサハ(Saha)の式

$$\frac{n_z n_e}{n_{z-1}} = 2 \frac{B_z}{B_{z-1}} \left(\frac{2\pi m k T}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{V_{z-1}(1)}{kT}\right) \quad (2.2)$$

$V_{z-1}(1)$ ： $z-1$ 価のイオンの電離エネルギー, m ：電子の質量, h ：プランク定数
 で表すことができる。また、 B_z は分配関数であり、

$$B_z(T) = \sum_i g_z(i) \exp\left(-\frac{E_z(i)}{kT}\right) \quad (2.3)$$

である。よって、 $z-1$ 価のイオンの励起準位の占有密度は z 価のイオン密度と次式で表すことができる。(サハ・ボルツマンの式)

$$\frac{n_z n_e}{n_{z-1}} = 2 \frac{g_z(1)}{g_{z-1}(1)} \left(\frac{2\pi m k T_e}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{I_{z-1}(i)}{kT}\right) \quad (2.4)$$

n_e ：電子密度, $I_{z-1}(i)$ ：準位 i の電離エネルギー

以上のように、熱平衡状態において電離励起過程は簡単な式で表すことができる。大気圧プラズマの多くが、温度分布や密度分布が空間的勾配によって一様でなくなることが多く、プラズマ中の各点で局所的な熱平衡状態となる。その状態のことを局所的熱平衡状態(Local

Thermodynamic Equilibrium, LTE)と呼ぶ。大気圧プラズマにおける熱平衡状態は基本的にLTEを指し、LTEにおいても式(2.1)~(2.4)を適用することができる。

非平衡プラズマ

我々が、実験を行う場合に発生させるプラズマは、多くの場合熱平衡に至らない過渡的な非平衡プラズマとなる。(第1章 1.3.)この時、プラズマの電離状態は以下の「電離進行プラズマ」と「再結合プラズマ」のいずれかの状態をとっている。

(a) 電離進行プラズマ(Ionizing Plasma)

プラズマ中のイオン密度比 n_{z+1}/n_z が電子温度 T_e で決められる電離平衡値 $[n_{z+1}/n_z]_{eq}$ よりも小さい場合、プラズマは平衡値に達するまで電離される。このようなプラズマを電離進行プラズマという。電離進行プラズマではイオンの占有密度は主に励起と電離によって決められる。このようなプラズマから放出される放射スペクトルは電離平衡より電離度の低いイオンからのスペクトルとなる。

(b) 再結合プラズマ(Recombining Plasma)

電離プラズマとは逆に、 n_{z+1}/n_z の値がその時の電子温度で決められる電離平衡値 $[n_{z+1}/n_z]_{eq}$ よりも大きい場合、プラズマ中では再結合過程が主要なプラズマとなる。温度の高いプラズマの中心で生成されたイオンが温度の低いプラズマの周辺に移動した場合には再結合状態がみられる。温度が高い場合には電子衝突による励起が主要となり、スペクトルは電離平衡よりも温度の高いプラズマからのスペクトルとなる。温度が低い場合には準位の占有密度は主に再結合過程によって決まる。本研究において生成されるプラズマは、プラズマを生成する電極間部分は比較的熱平衡状態に近く、ノズル先端から大気中に放出されるプラズマではそれ以上エネルギーの注入が行われなため、ほとんどが基底準位方向に向かう再結合過程のみとなり、熱平衡状態の成立しないアフターグロー部は再結合プラズマとなる。

2.4. 大気圧低温プラズマの発生³⁾

大気圧で低温プラズマを発生させる方法は、①著しい不平等電解を形成する「コロナ放電方式」、②短パルス電圧(<数 μs)を印加する「パルス放電方式」、③電極間に誘電体などの絶縁物を挿入する「バリア放電方式」に大別できる。3つの方式を個々に独立して使用するわけではなく、組み合わせて使用されることが多い。

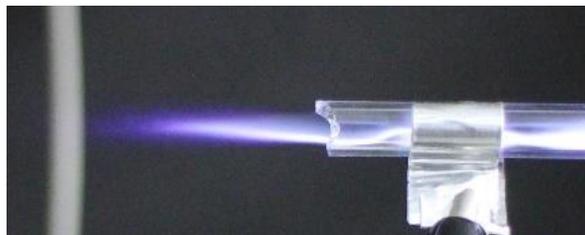


図 2-1 大気圧低温プラズマジェットの写真

2.5. プラズマの発光メカニズム⁷⁾

プラズマの原子過程には様々なものがある。原子はそれぞれ固有のエネルギー準位を持っており、励起原子はある確率(LTE および熱平衡プラズマではサハ・ボルツマンの式に従う)で別のエネルギー準位に遷移する。この時、再結合過程で高エネルギー準位から低いエネルギー準位に遷移する際、その差分のエネルギーを光として放出する。これが発光の正体である。発光線の振動数 ν あるいは波長 λ と準位間のエネルギー差 ΔE 間で、プランク定数 h 及び光速 c を介した次のような関係がある。

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \Delta E \quad (2.5)$$

エネルギー準位は離散的に存在するため、発光線の波長も離散的となる。また、エネルギー準位の分布はそれぞれの原子固有のものであるから、発光線の散らばり(波長または振動数)は一意的にある一つの原子が対応することとなる。これはイオンまたは分子であっても同じことである。よって、この性質を利用して元素を同定することができる。

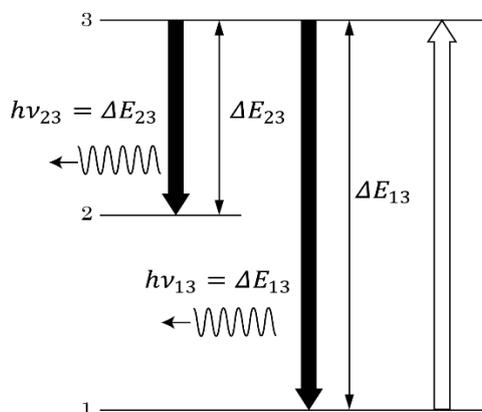


図 2-1 プラズマの原子過程

2.6. 元素同定方法

前項 2.5.より、プラズマの発光スペクトルは原料気体の元素のエネルギー準位ごとに観測されることが分かった。しかし、対象物の分光測定をして線スペクトルを取得したとしても、得られるデータは各波長の相対強度のみでその線スペクトルがどの元素から由来しているものかわからない。そこで、波長の発光スペクトルを既知のものとするためにデータベースを用いる。幸いにも多くのデータベースは無料で一般公開しているため、誰でも閲覧することができる。本研究に用いたデータベースは NIST(National Institute of Standards and Technology)のスペクトルデータベース⁸⁾を用い、これと対象物のデータと突き合わせることでより元素同定を行うことができる。

第3章 実験に用いた材料および機器

大気圧低温プラズマジェット発生装置は単純で大きく 3 つの部位に分かれている。①原料ガス及び流量制御装置、②プラズマジェットノズル、③高電圧電源である。以下各部位について述べる。

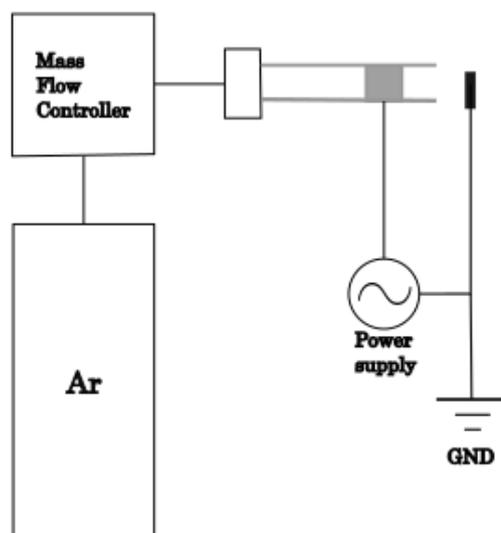


図 3-1 大気圧プラズマジェット発生装置の概略図

3.1.原料ガス及び流量制御装置

原料ガス

一般的に原料ガスには He や Ar などの希ガスを使うことが多い。本研究では原料ガスについてはより安価である Ar を使用した。

流量制御装置

流量制御装置には HORIBA 製の FULL-SCALE 6.5L/min の Mass-Flow-Controller(図 3-1)を使用した。



図 3-2 Mass-Flow-Controller

3.2. プラズマジェットノズル⁹⁻¹³⁾

プラズマジェットノズルには、円筒形誘電体に石英管を使用して、電極形状によって数種類ある。今回はもっとも単純な、円筒形誘電体に内径 4.15mm、外径 6.15mm、全長 50mm の石英管を使用し、幅 10mm のアルミニウムテープを噴出口から 10mm の位置に巻き付けたものを電極として使用した。(図 3-3)



図 3-3 プラズマジェットノズル

3.3. 高電圧電源

大気圧低温プラズマを発生させるために最も入手が困難な部品は電源であることは間違いない。本研究では安定して高電圧の生成が可能なオゾン発生用高電圧電源(ロジエ電子,LHV-10AC、出力電圧約 9kV、周波数約 9kHz)を使用した。



図 3-4 オゾン発生用高電圧電源

第4章 実験方法と結果

4.1 プラズマジェットの生成¹⁴⁾

従来の方法によるプラズマジェットの生成

本研究室ではこれまでに銅管を放電電極とした大気圧低温プラズマジェットの生成は行っていた。この方法では銅管に高電圧を印加することによりコロナ放電が発生し、それを起点として誘電体バリア放電によりプラズマジェットが生成されている。

この方法では Ar ガスの有無にかかわらず放電が発生するため、安定してプラズマジェットの生成、維持が可能である。しかし、プラズマジェットの発生中に銅管と設置電極の間で誘電体を挟んだ短絡放電が発生するため、実験を行った後に発熱が確認された。

このことより、従来の方法はプラズマジェットを生成することは容易であるが、電力効率は良くないと考えられた。そこで、接地電極を用いず電力効率を改善できる単電極方式によるプラズマジェットの生成を検討した。



図 4-1 従来のプラズマジェットノズル

単電極方式によるプラズマの生成

単電極方式は従来の方法から接地電極を除いたものであり、図 4-1 のプラズマジェットノズルから設置電極、及び先端の石英管を外すだけで短絡放電を発生させないプラズマジェットを生成できた。しかし、高電圧を印加している銅管から直接ジェットが出ていて接地がされていないため使用用途が限られてしまう。よって石英管の周りに電極を配置することが求められる。

高電圧電極を石英管の外に配置したことにより、電圧を印加した際にコロナ放電が発生しなくなった。起点となっていたコロナ放電が発生しないため高電圧を印加しただけでは放電が開始せず、プラズマジェットを生成できなかった。

そこで北野らの方法を参考にし、接地電極をガス流の中に入れることで放電を発生させ、プラズマジェットを生成した。

図 4-2 にプラズマジェット生成時の様子を示す。図 4-2 より、ジェットの放電とは別に高電圧電極と真鍮製のコネクタの間に放電が確認された。

比較のために石英管の長さを 300mm にして電極とコネクタの距離を十分に離し、放電が発生しないようにして実験を行ったところ、プラズマジェットは発生するものの維持は出来なくなった。

このことより、コネクタ、及び発生している放電はプラズマジェットを維持するために重要な役割を果たしていると考えられる。

この放電がプラズマジェット維持を助ける理由としては、放電によりイオンなどが発生し、ジェット部分での放電が起きやすくなるからだと考えられる。

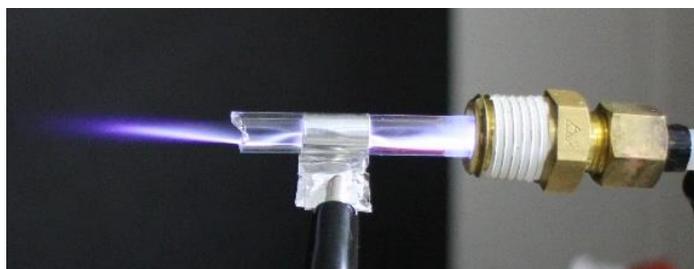


図 4-2 実際の放電の様子

4.2 分光測定方法

プラズマ診断において発光分光計測は比較的簡単であり、図 4-1 のように発生させたプラズマに、分光器の光ファイバーを近づけてスペクトルを取得してやればよい。

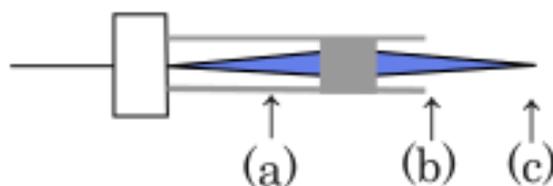


図 4-3 分光測定方法

4.3.電極から位置依存性

本実験では、条件を表 4-1 のように設定し、測定点を図 4-2 の(a)~(c)点の3点におけるスペクトルを測定した。

図 4-4(a)では原料ガスの Ar のほかに OH ラジカルが観測された。OH ラジカルは、ガラス管及びチューブ内に付着した水分子が、プラズマ中の電子によりプラズマ化したものだと考えられる。また、OH ラジカルの方が Ar よりもスペクトルが明らかに大きい。この結果から、水分子が Ar よりも電離エネルギーが小さいため、主ガスである Ar スペクトルよりも多くの水分子がプラズマ化されたことが理由であると考えられる。

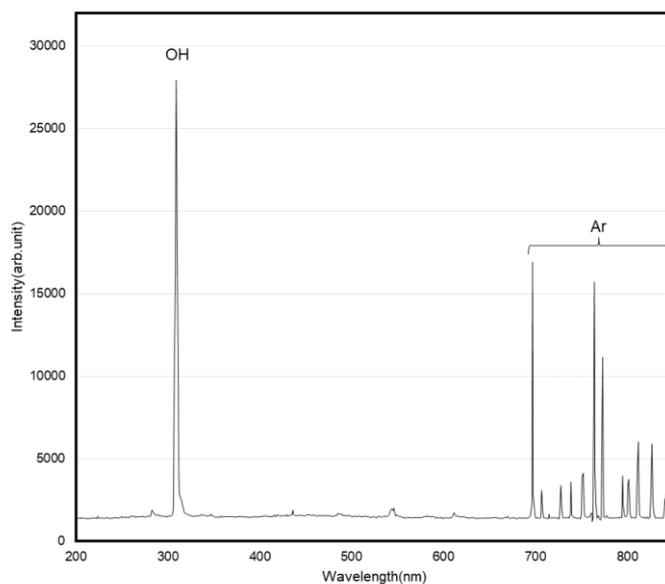
図 4-4(b)では、(a)で観測されたガス主のスペクトルは小さくなり 310nm-430nm の範囲に窒素分子のスペクトルが新たに確認された。これについては、大気中に噴出したプラズマにより、空気中の窒素が励起されたことにより発生したと考えられる。

図 4-4(c)では、主に窒素分子のスペクトルが観測され、原料ガスである Ar、及び OH ラジカルは微量が観測された。

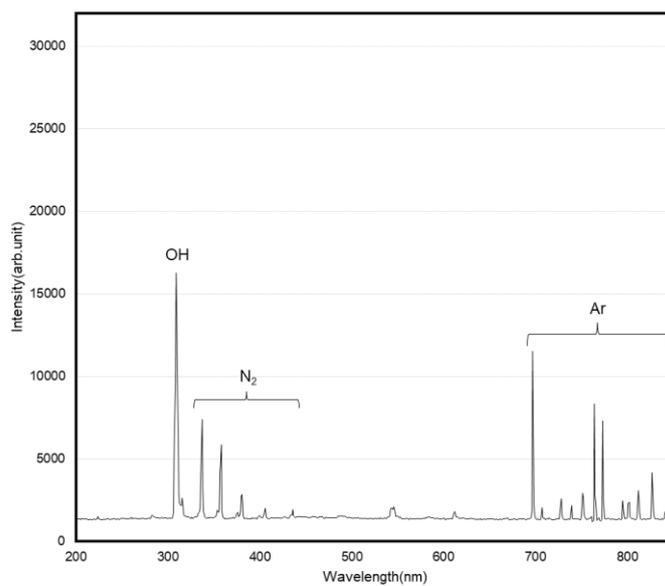
以上の結果より、大気圧低温プラズマジェットは、電極からの距離によって得ることのできる励起種が異なるため、実用の際に注意が必要だと考えられる。

表 4-1 測定条件

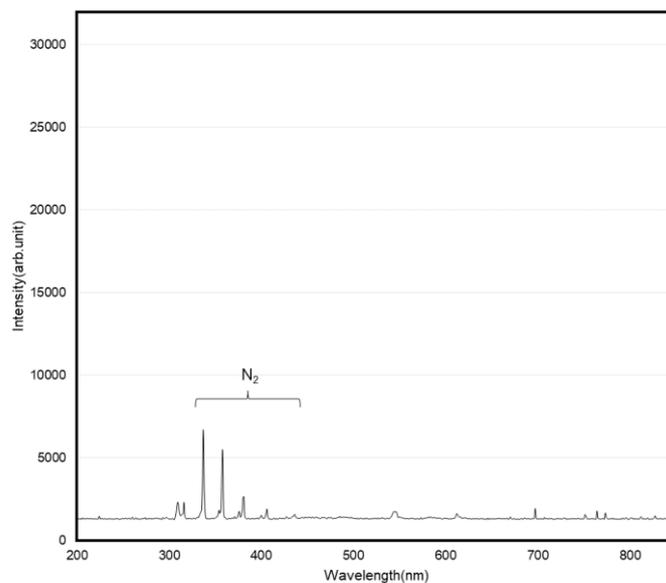
流量 [L/min]	測定点 (図 4-3)	スペクトル波形 (図 4-4)
4.0	(a)	(a)
4.0	(b)	(b)
4.0	(c)	(c)



(a)



(b)



(c)

図 4-4 各点におけるスペクトル波形

4.4. 流量依存性

本実験では、条件を表 4-2 のように設定し、流量を 1.0L/min~6.0L/min まで変化させスペクトルを測定した。

流量が 1.0L/min~1.9L/min の間はプラズマジェットは発生したものの維持はされなかった。このことから、プラズマジェットの維持にはある程度の密度の Ar 分子が必要だと考えられる。

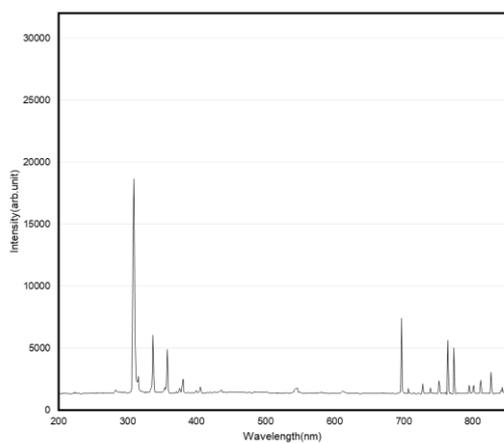
図 4-5 に各流量における発光分光スペクトルを示す。図 4-4 において観測された波長には変化は無く、流量が増えるにつれて発光強度に変化が見られた。

図 4-6 に主なスペクトル線の流量依存性を示す。観測されたスペクトルの強度は流量の増加とともに OH ラジカルは弱くなり、Ar は強くなった。この結果に対する考察は、OH ラジカルの起源が 4.3 節の考察通り石英管やチューブ内の水分子である仮定すると、以下のことが図 4-6 から読み取ることができる。

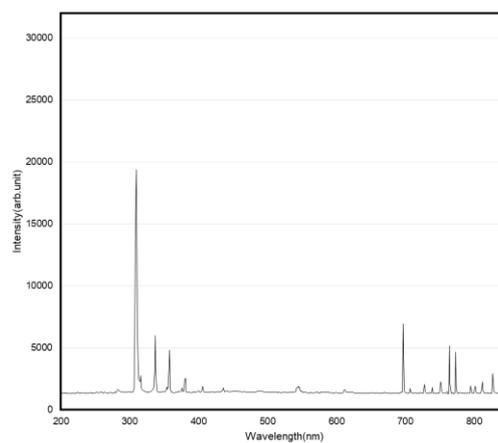
図 4-6 によると流量が 2.0L/min~4.0L/min の間は OH ラジカルのスペクトルのほうが大きい。これは 4.3 節と同様の考察が出来る。4.5L/min~6.0L/min の間では Ar のスペクトルのほうが大きくなった。これに関しては、原料ガスである Ar は増加するに対して、OH ラジカルの元となる水分子は量が限られているためだと考えられる。

表 4-2 測定条件

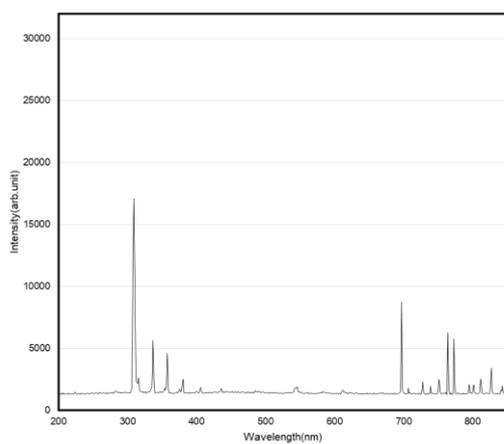
流量 [L/min]	測定点 (図 4-3)	スペクトル波形 (図 4-4)
1.0	(b)	/
1.5	(b)	
2.0	(b)	(a)
2.5	(b)	(b)
3.0	(b)	(c)
3.5	(b)	(d)
4.0	(b)	(e)
4.5	(b)	(f)
5.0	(b)	(g)
5.5	(b)	(h)
6.0	(b)	(i)



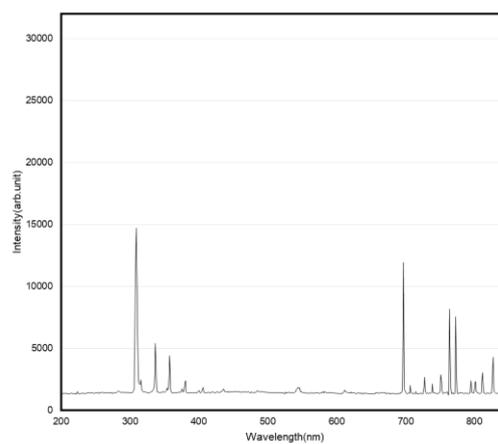
(a)2.0[L/min]



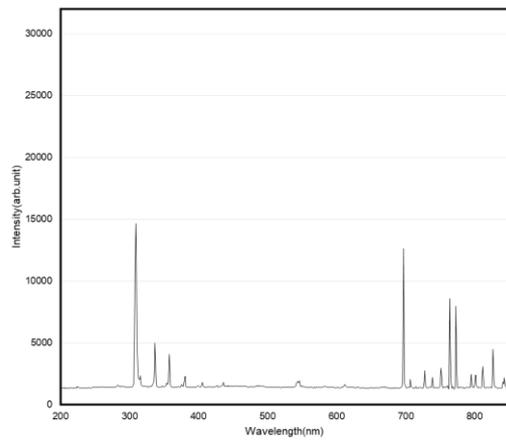
(b)2.5[L/min]



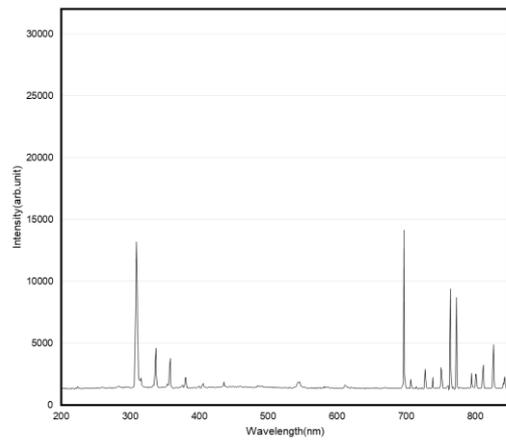
(c)3.0[L/min]



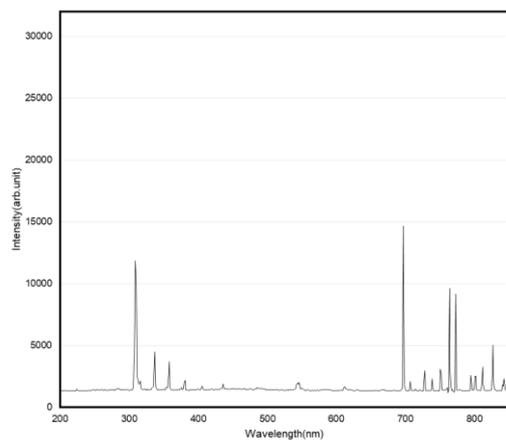
(d)3.5[L/min]



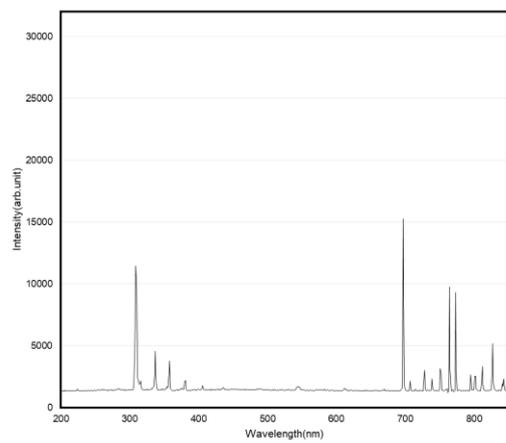
(e)4.0[L/min]



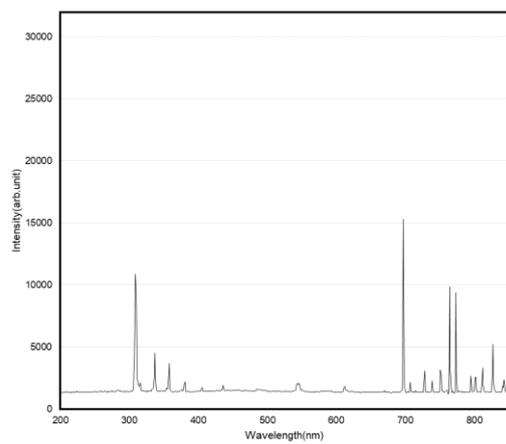
(f)4.5[L/min]



(g)5.0[L/min]



(h)5.5[L/min]



(i)6.0[L/min]

図 4-5 各流量における発光分光スペクトル

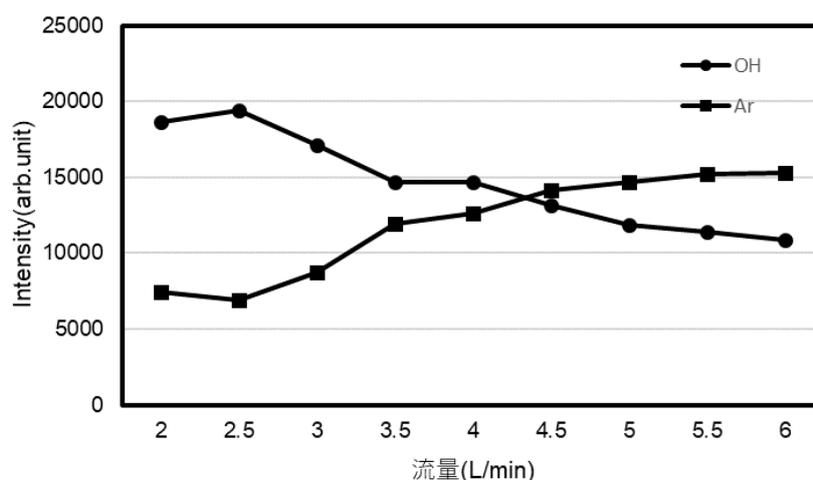


図 4-6 主なスペクトル線の流量依存性

4.5. 伸長特性

本実験では、図 4-3 の(b)点から(c)点の長さをプラズマジェットの高さとして流量を 2.0L/min~6.0L/min まで変化させ測定を行った。

表 4-3 に測定の結果を示す。表 4-3 より流量の変化によりプラズマジェットの高さに変化はほぼ確認されなかった。

このことより、単電極方式による大気圧低温プラズマジェットはプラズマジェットが維持できる最低限の原料ガス流量があればジェットの長さは変化しないと考えられる。ジェットをより長くするためにはプラズマジェットノズルの形状、電源の電圧を変化するなどが必要だと考えられる。

表 4-3 プラズマジェットの伸長特性

流量 [L/min]	プラズマジェットの長さ [mm]
2.0	22
2.5	22
3.0	22
3.5	23
4.0	23
4.5	22
5.0	22
5.5	23
6.0	23

4.6.従来の方法との比較

単電極方式での大気圧低温プラズマの生成は、以前本研究室で行った銅管を放電電極とする方法とプラズマジェットの状態が変化すると考えられた。

そこで、従来の方法でプラズマジェットを生成、分光診断を行った。

図 4-8 に分光測定の結果を示す。図 4-8 より観測されたスペクトルに強度の差は確認されたが、スペクトルの種類は同様であった。

このことより、単電極方式によるプラズマジェットを照射した際には、従来の方法で生成したプラズマジェットと同様の効果が得られると考えられる。

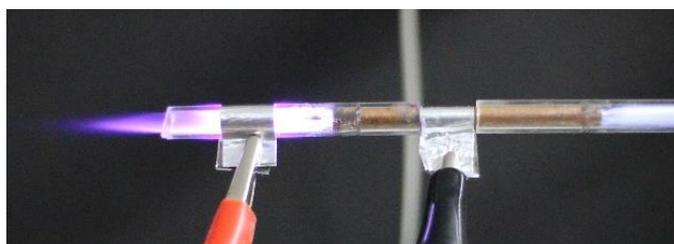


図 4-7 従来の方法によるプラズマジェットの写真

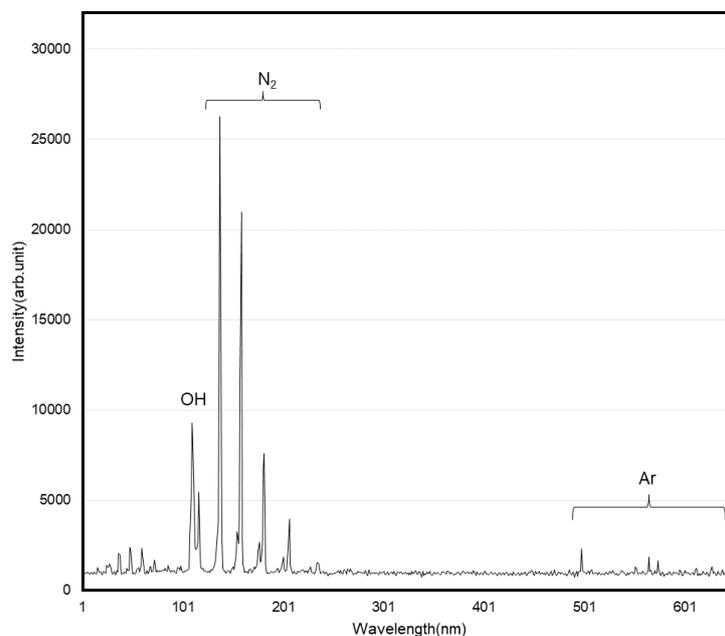


図 4-8 従来の方法での発光分光スペクトル

第 5 章 結論

5.1.まとめ

本研究では、原料ガスに Ar を使用した単電極方式による大気圧低温プラズマジェットとの生成、発光分光計測を行い以下のような実験結果を得た。

(1) 単電極方式による大気圧低温プラズマの生成

接地電極をガス流の中に入れ放電を起こすことでプラズマジェットを生成できた。また、今回実験で使用した大気圧低温プラズマ発生装置では、真鍮製のコネクタが重要だと考えられる。コネクタがアースの代わりとなりプラズマを発生することによりプラズマジェットの維持を助けていると考察したが、詳しい原理は不明である。

(2) 電極から位置依存性

大気圧低温プラズマジェットは、石英管から大気中に噴出される際に周囲の気体を励起し、やがて基底状態に戻ることが確認された。

(3) 流量依存性

大気圧低温プラズマジェットは、流量によって波長の長さが変化することはないことが確認された。流量の増加とともに強度が変化することが確認された。

(4) 伸長特性

単電極方式による大気圧低温プラズマジェットでは流量によってプラズマジェットの長さは変化しないことが確認された。

(5) 従来の方法との比較

単電極方式による大気圧低温プラズマジェットと従来の方法による大気圧低温プラズマジェットでは照射した際に得られる効果は同じだと考察できた。単電極方式ではプラズマジェットが電極と接触していない、短絡放電が発生しない。従来の方法ではプラズマジェットの生成が容易であるとそれぞれ利点があるため用途によって使い分けることが必要だと考えられる。

5.2.今後の課題

本研究の実験結果より、今後の課題、展望は次のことがあげられる。

(1)他のガス種による分光評価

本研究では、数あるガス種の中で Ar を使用したが、ほかに N₂ や Air などでも大気圧低温プラズマの発生が確認された研究報告もあるため、他のガス種による分光評価を行うこ

とで、本研究結果と比較することができる。

(2)大気圧低温プラズマ発生装置の改良

本研究では、電圧を印加しただけではプラズマジェットを発生させることはできず最初に接地電極を用いて放電を起こす必要があった。他の方法で放電の補助、または放電電圧を低下することが出来ればより安定してプラズマジェットを生成できると考えられる。

謝辞

本研究の遂行と論文作成にあたり、多くのご指導・ご教示くださいました佐藤守彦准教授に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) プラズマ・核融合学会編「プラズマの生成と診断」コロナ社(2004).
- 2) 関口忠編「現代プラズマ理工学」オーム社(1979).
- 3) 神原伸志編集代表「大気圧プラズマ反応工学ハンドブック反応過程の基礎とシミュレーションの実際」NTS(2013).
- 4) 日本学術振興会プラズマ材料科学第 153 委員会編「大気圧プラズマ基礎と応用」オーム社(2009).
- 5) 沖野晃俊「大気圧気流安定化無極性プラズマに関する研究」東京工業大学博士論文(1994).
- 6) プラズマ・核融合学会編「プラズマ診断の基礎」名古屋大学出版会(1989).
- 7) Goto Motoshi, Murakami Izumi and Fujimoto Takashi : “Light, Plasma, and Microscopic Processes”, Journal of plasma and fusion research, **79**, 12 pp.1287-1296 (2003).
- 8) National Institute of Standards and Technology, Atomic Spectra Database, <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>.
- 9) 北野勝久、谷口勝成、酒井 道、高木浩一、浪平隆男、服部邦彦「大気圧プラズマジェットをつけてみよう」J.Plasma Fusion Res. **84**,(2008) pp.19-28.
- 10) 赤松 浩、金田知大、市川和典「簡単に始められる大気圧低温プラズマジェットの実際」神戸高専研究紀要,第 50 号,(2012)pp.87-92.
- 11) 野寺祐生、石丸和博：「大気圧マイクロプラズマジェットの特性に及ぼす同軸二重管構造の効果」, 日本機械学会倒壊支部第 65 期総会・講演会講演論文集(2016)No.163-1.
- 12) 佐々木良太、熊谷 航、宮原秀一、嶋田隆一、堀田栄喜、沖野晃俊：「表面処理用大気圧大型リモートプラズマ源」, 電学論 A, **129**,12 号,(2009)pp.903-908.
- 13) 高村紀充, 王 斗艶, 浪平隆男：「大気圧ミストプラズマの生成とその諸特性」, 静電気学会誌,**38.1** ,(2014)pp.22-27.
- 14) 北野勝久, 浜口智志, 青木裕紀：プラズマ生成装置およびプラズマ生成方法, 国際公開番号 WO2008/072390 A1.