

E1 前期実験 考察レポート

電気電子工学科 杉田太郎

2024 年 6 月 25 日

1 はじめに

・E1 実験では、平等電界の火花電圧がパッシェン曲線に沿うか、HP のデータを基に理論曲線を算出し、それを比較した。

・また、グロー放電の電圧－電流特性を測定した。
・不平等電解の火花電圧とコロナ電圧についても観察した。

・幾つかのグロー放電発酵をスペクトル分解して気体成分を同定した。

・窒素の SP02 系列のスペクトルに注目することでその振動温度を求めた。

2 検討課題

平等電界の火花電圧

図 1 は、球-球電極を使用し、圧力 p 及びギャップ長 d を変化させて、火花電圧 V_s を測定した。

ここで、ピラニ真空計で 100Pa を測定する際の注意点であるが、真空リークに注意しなければいけない。また、1000Pa を測定するときは、計測間隔が大きい 1100Pa から段々小さくしていくより、計測間隔がより小さい 990Pa から段々大きくしていくべきである。 pd が十分に大きいとき、火花電圧と pd の関係は

$$V_s = Ed = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln\left[\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right]}$$

[1] と式 1 で表すことができる。

(p : 気圧 [Torr],

d : ギャップ長 [cm],

A, B : 定数,

γ : 陰極電極の状態で火花電圧 V_s が変化すること)
ここに、 $A=20, B=365, \gamma = 0.005$ を代入すると、

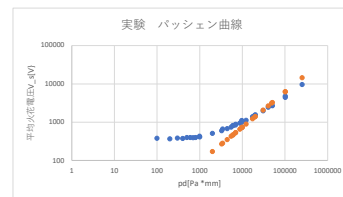


図 1 実験でのパッシェン曲線、青線：パッシェン曲線、橙線：式 1

図 1 のようになる。この時、パッシェン曲線は連続に見えることから、 pd の関数であることに納得できる。(実際は、 γ は定数ではないが、 pd が十分に大きいとき、 γ の変化は小さいことが推測できる。)

pd が十分に大きいときに火花電圧は pd の式で表せられることを確認できた。

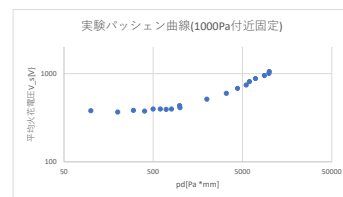


図 2 実験でのパッシェン曲線 (圧力を 1000Pa 付近固定)

図 2 では、ギャップ長が短くなっても、平均火花電圧は理論曲線のように大きくならず、ある一定の電圧値が火花開始電圧になっているとわかる。このとき、球-球電極で十分低気圧であるため、電界が一樣にならないと仮定する。この場合、単純に最も距離が近い、球の先端と球の先端が火花のチャンネルとなりやすいと思われる。したがって、そのチャンネル

に十分な気体分子が存在する瞬間のみ、火花が起きると考えられ、逆にその状態になるまでは火花は起きないと考えられる。もう一度この実験をするのであれば、この電圧にしてから、火花が発生するまでの時間をデータに取り入れる必要があると思う。

グロー放電の観測

ガイスラー管の気圧を 100(-120),667,2667Pa で計測した。その時の電圧－電流特性は図 3 に示す。(電流－電圧特性でないことに注意してください。) また、100Pa のように小さな気圧値では、どこかに空気漏れが発生してしまっていたことによって、少しずつ外気が実験器具に入り込んでしまい、110,120Pa になったのだと考える。

気圧が 100Pa のとき、電流－電圧特性の関係は直線で、微小ではあるが正の比例の関係にあると考えられる。これは電圧を上げるほど、電子は加速されやすくなり、陰極から電子が放出される確率が上がるからだと推測できる。気圧が 667Pa のとき、電圧－電流特性は、直線の負の比例の関係にあると見られるが、実験中の漏れから外気が入り込んでしまったことが原因だと考える。気圧が 2667Pa は、測定点不足のため考察できない。

概して見ると、気圧が大きいほど、同じ電流を流すのに必要とする電圧が大きいことがわかる。そして、おおよそは一定であり、正規グローの範囲内であると推測できる。

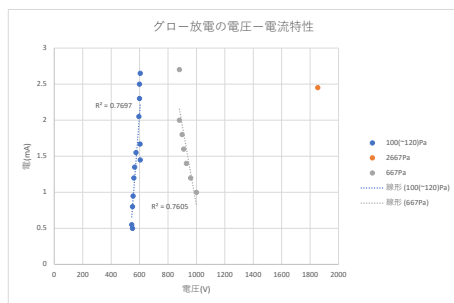


図 3 グロー放電の電圧－電流特性

(ある電圧より上において図 4 のように正グローと融合してしまったため、それ以降は測定できな

かった。)

また、実験中、陰極暗部の厚さは圧力が大きいほど薄くなっていると感じた。

ここでは陰極暗部では、加速された電子が原子と電離反応を起こし、電子を雪崩方式で増やしていく反応が起きている。圧力が大きくなると空気中の原子が増えるので、電子はより短い距離を移動するだけで原子と衝突するようになる。その結果、陰極暗部が小さくなると予想される。

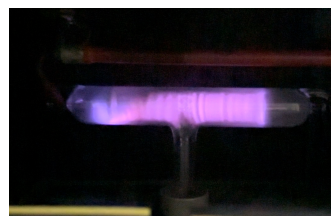


図 4 正グローと負グローの様子

不平等電界の火花電圧と極性効果

大気圧空気中で、円錐-平板電極の放電電圧のギャップ長特性を以下に図 5-図 7 に示す。正の直流電圧と交流電圧について、測定時間がなく、標本点不足により正確な電圧－電流特性を測定できなかった。この時、気温:23.8 度、湿度:50.6%、気圧は 1018.5hPa であった。また、図 5 のような電極形状にて実験が行われるため、極性効果について考える必要がある。

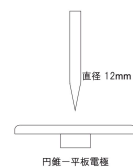


図 5 不平等電界を作る電極形状

[1]

図 6 より、直流電圧は正より負であった方が、火花電圧において同一のギャップ長において開始電圧が大きい。もし先が尖っている電極が正である場

合、電子は加速され。空中で他の原子と衝突することで、正イオンと新たな電子を形成し、また加速し原子と衝突を繰り返すことによって、雪崩のように、ギャップ中に電子と正イオンを作り出す。この時、正イオンは陰極に衝突する際、陰極は平板であることから、真っ直ぐ陰極に加速し、 γ 効果によって、電子を出すことによって、持続的に火花を観測することができる。一方、負である場合、正イオンは先が尖っている陰極の先端付近に集中してしまう。この場合、正イオンの衝突間隔の上昇、陰極の先端の表面上の電子密度の低下によって、安定した火花のチャンネルが形成されず、電圧が高くなってしまふことが考察される。

また、交流電圧の火花電圧は、直流電圧正火花電圧と値が近く、交流電圧の周波数は一連の衝突と電離の反応より十分に遅く、直流電圧負の状態では何も起きず、直流電圧正の状態において、火花が始まると推測できる。

雷インパルス電圧を印加した際、火花が発生するかどうかは、雷インパルス電圧が火花開始電圧を超えた時に、自然電離電子がギャップ中に存在するかどうかである。したがって、火花が発生するかどうかは、確率的なものになるが、正極性の雷インパルス電圧の方が負極性のものよりも火花が発生しやすいことが推測できる。

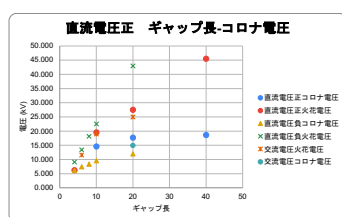


図6 交流電圧 ギャップ長-コロナ電圧

分光計測

以下の図7-図12のように、それぞれの放電管内の気体を同定した。また、中心と端で極端にスペクトルが異なったアルゴンとネオンもそれぞれ図13-14に示す。また、プラズマボールは、ネオンとキセノンで構成されていると推測できる。ネオン、キセノンのピーク値とプラズマボールのピーク値を

元に、各元素の封入割合を計算すると、キセノンが50.11%、ネオンが49.89%であることがわかり、ほぼ半分ずつ封入されていることがわかった。この二つの元素はどちらも希ガスであり、極めて反応性が低いことから、安全性は高いと言える。

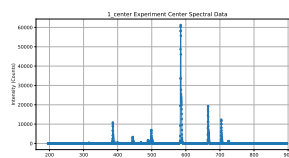


図7 He の中心のスペクトル

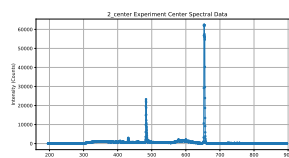


図8 H₂ の中心のスペクトル

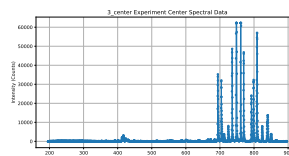


図9 Ar の中心のスペクトル

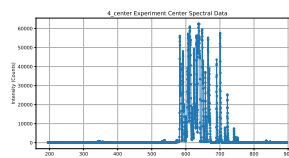


図10 Ne の中心のスペクトル

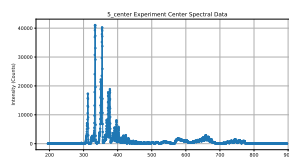


図11 N₂ の中心のスペクトル

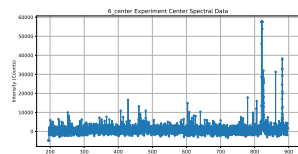


図 12 Xe の中心のスペクトル

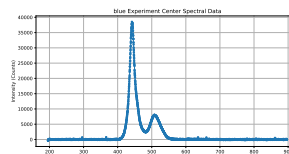


図 17 青のスペクトル

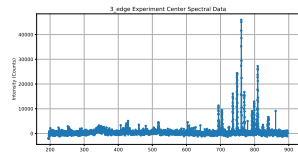


図 13 Ar の端のスペクトル

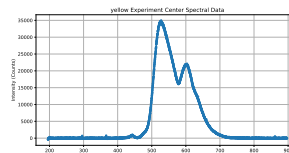


図 18 黄色のスペクトル

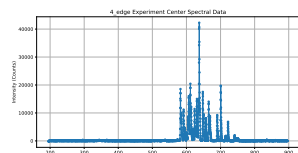


図 14 Xe の端のスペクトル

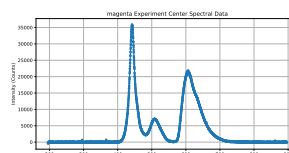


図 19 マゼンタ (明るく鮮やかな赤紫色) のスペクトル

また、図 15 のようなカラーバーの 7 色の発光スペクトルを以下図 16-図 23 に示す。シアンは、緑 + 青。マゼンタは、赤 + 青。白は、赤 + 青 + 緑で構成されていると推測できる。黒は全てのスペクトルを含んでいるとわかる。

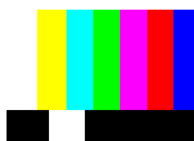


図 15 カラーバー

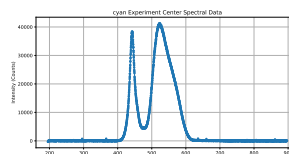


図 20 シアン (やや緑みの明るい青) のスペクトル

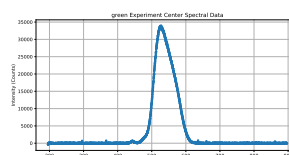


図 21 緑のスペクトル

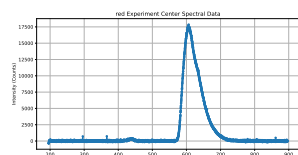


図 16 赤のスペクトル

また、窒素放電管のスペクトルの 300nm-400nm の部分を拡大した図を図 24-25 に示す。

この時、エネルギー差から波長を求めると、以下表 1 のようになる。

しかし、グラフを作成するために使用した元データでは、377.079nm, 372.123nm, 367.781nm, 363.848nm においてピーク値をもち、理論波長のピーク値との差は、 $3.267 \pm 0.115\text{nm}$ の範囲にあ

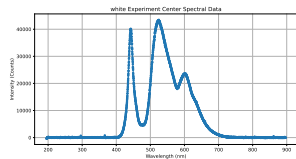


図 22 白のスペクトル

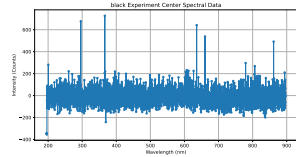


図 23 黒のスペクトル

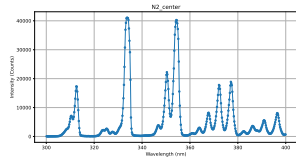


図 24 窒素放電管の中心の 300nm-400nm のスペクトル

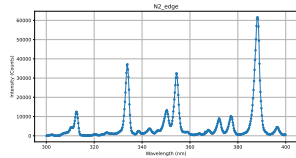


図 25 窒素放電管の端の 300nm-400nm のスペクトル

名称	波長 (nm)
sp02	380.4
sp13	375.5
sp24	371.0
sp35	367.0

表 1 波長データ

り、 3.267nm の誤差は、実験中に机に触れてしまっていたこと、較正が不十分に行われていなかったことに帰因すると思われる。また元データは、およそ 0.22nm 刻みであることから、 $\pm 0.115\text{nm}$ は計測誤差の影響が大きいと推測できる。

TODO 次に、 $C^3\Pi_u$ 準位の振動温度は以下のよ

うな式で示される。

これをプロットすると、図 26 のようになるが、回帰曲線の傾きは、どちらも -0.0003 となっているが、この 3 は丸まっていることに注意してください。これに注意して、それぞれの振動温度を求めると、窒素放電管の中心では 5628K 、端では 4438K となった。(それぞれの傾きは、 -0.00025565 、 -0.00032414)

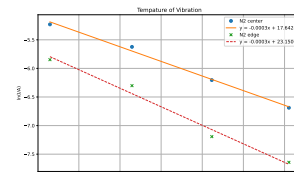


図 26 $C^3\Pi_u$ 準位の振動温度を求めるボルツマンプロット

また、波長ごとの感度を補正してからのスペクトルは図 27 に示す。

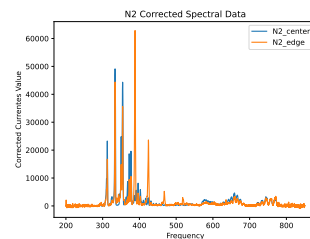


図 27 窒素放電管の端の 300nm-400nm のスペクトル

水素プラズマの H 原子由来のスペクトル同定

水素原子に関して Balmer 系列の $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma, H_\epsilon$ の発光スペクトルの波長のシミュレーション結果は表 2 のようになる。 $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma$ は、それぞれ 9 重、16 重、25 重の縮退となった。但し、 H_ϵ のデータは 409.57nm のみしか出力結果に記されていないかった。実際の波長はそれぞれ、 656nm 、 486nm 、 434nm 、 410nm であり、シミュレーション結果と一致していることが確認できる。しかし、シミュレーション上では、それぞれの発光スペクトルで全て同じエネルギーを取るわけではなく、それぞれのエネルギー帯の幅 (微細な振動準位) を持っているかのように計算されることがわかった。

名称	波長 (nm)
H_{α}	656.14, 655.48
H_{β}	486.08, 485.66, 485.62, 485.07
H_{γ}	433.60, 433.06, 432.58, 431.16
H_{ϵ}	409.57

表 2 波長データ

He 原子の発光スペクトル同定

可視領域における He の発光スペクトルのうち強度が大きい 6 つ (388, 447, 502, 588, 668, 707 nm 近傍) のスペクトルはそれぞれ以下の遷移に対応する。この時、それぞれの軌道が、どれほど縮退しているかに注意してスペクトルを帰属した。

- 388nm のスペクトル: $2^3S - 3^3P$
- 447nm のスペクトル: $2^3P - 4^3D$
- 502nm のスペクトル: $2^1S - 3^1P$
- 588nm のスペクトル: $2^3P - 3^3D$
- 668nm のスペクトル: $2^1P - 3^1D$
- 707nm のスペクトル: $2^3P - 3^3S$

また、これを実験的に得られたスペクトルと比較する。図 1 は、実験中の放電管の様子を示しており、放電管の端は薄ピンク色、中心は薄オレンジ色に発光した。実際に、(388, 447, 502, 588, 668, 707 nm 近傍) のスペクトルが多く見られた。(実験では、385,444,498,584,665,704 に対応した。) また、He の放電管の中心に測定素子を置いたときと、He の放電管の負極に測定素子を置いたときを比較すると、他のスペクトルと比べて 668nm,707nm のスペクトルに大きな変化が見られた。

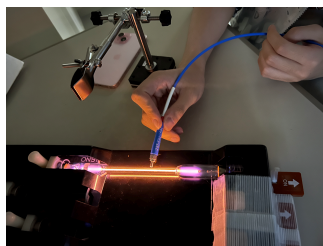


図 28 He の放電管の様子

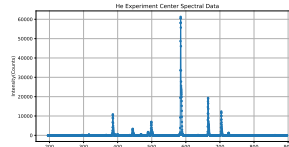


図 29 He の放電管の中心に測定素子を置いたときのスペクトル

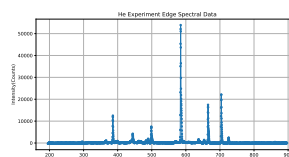


図 30 He の放電管の負極に測定素子を置いたときのスペクトル

シューマンの条件式に基づく火花電圧の予測

パッシェン曲線のシミュレーションは以下図 31 のようになった。この結果から、最小電圧を取る幅が長いのは、ギャップが長いことが分かった。

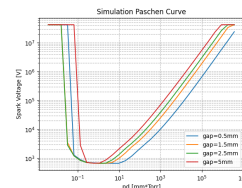


図 31 パッシェン曲線のシミュレーション

この図 32 より実験値とシミュレーション値の傾きは概ね一致したが、電圧が全ての pd において少しずれていることから、外部要因がこのズレに寄与していると予想した。[2] の通り、温度や湿度に依存するものだと推測する。

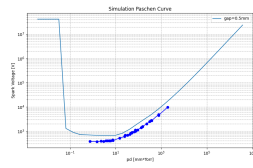


図 32 パッシェン曲線のシミュレーションと実験値の比較

濃青色の曲線は実験値の曲線である。

参考文献

- [1] 東京大学電気電子工学科. 電気電子情報第一前期実験テキスト. E1 気体エレクトロニクス, 2024.
- [2] Daisuke Muto. 巻線の部分放電現象に関する研究. 古河電工時報, 2024.