

1 実験条件

実験日時 2011（平成 23）年 11 月 13 日木曜日 午後 1 時～午後 4 時

天気 晴

気圧・気温・湿度 省略

2 実験の目的

気体放電の物理的機構を学ぶとともに、放電によって生成されたプラズマの基本的な性質を静電プローブ測定により理解する。

3 実験の原理

3.1 パッシェンの法則

図 1 のように、低気圧の気体中に 2 個の平行平板電極において、それらに電圧をかけた場合に起こる放電現象について考える。陰極面から最初に i_0 の電子電流が流れ出た時、電子は分子と衝突しながら電離を繰り返すことにより、指数関数的に増加して陽極面に達する。一つの電子が電界方向に単位長さだけ進む間に起こる電離の数（衝突電離係数）を α とすると、電子の数 N の増加は、距離 x に対して、

$$\frac{dN}{dx} = \alpha N \quad (1)$$

と表される。この解を電流に直すと陽極面に達する電子流は、

$$i(d) = i_0 e^{\alpha d} \quad (2)$$

で与えられる。 d は電極間距離である。電子の増加分だけイオンも増加しており、このイオンは陰極面に $i_0(e^{\alpha d} - 1)$ のイオン電流として到達する。

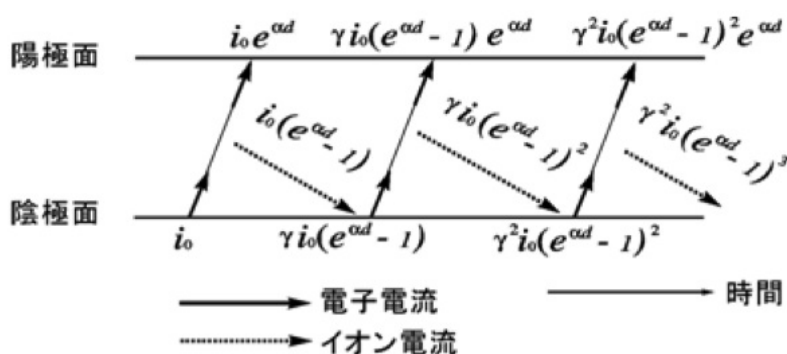


図 1 低気圧下の電極間で生ずる気体の電離現象

イオンは気体分子の電離に対しては無力であるが、陰極にあたると電子を出す能力を持つので、この作用によって生ずる電子は再び気体を電離することになる。もともと電子（1 次電子）を加速してこれを固体表面に

当てると、固体表面から新たな電子（2次電子）が放出される。この現象を電子の2次電子放出という。1次電子をイオンに置き換えてもやはり電子の放出は起こる。これをイオンによる2次電子作用という。（イオンによる2次電子放出量は電子による量の1/100程度であるが、イオンのエネルギーはさほど大きなものを要求しない。）従って、イオンによる2次電子放出率を γ とおくと $\gamma i_0(e^{\alpha d} - 1)$ の2次電子電流が作り出される。この2次電子も上で述べたのと同じような衝突電離を繰り返して、陽極面で $\gamma i_0(e^{\alpha d} - 1)e^{\alpha d}$ の電流となる。これらの過程は等比級数的に繰り返されて、陽極面での電子電流の合計は数学の等比級数の和の公式を用いて次のように表される。

$$i_0 e^{\alpha d} + i_0 e^{\alpha d} \gamma (e^{\alpha d} - 1) + i_0 e^{\alpha d} \{\gamma (e^{\alpha d} - 1)\}^2 + \dots = \frac{i_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)} \quad (3)$$

上式で分母が0になるとき、すなわち

$$\alpha d = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) = \Phi = \text{const} \quad (4)$$

の時には自統放電の条件となり放電が開始する。

衝突電離係数 α は、Townsend（タウンゼント）によって経験的に、電界 E 、圧力 p に対して以下のような依存性を持つことが知られている。ただし V ：電極間電圧、 A, B ：定数で、表1に示すように気体の種類によって異なる値を持つ。

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp \left(-\frac{Bp}{E} \right) = A \exp \left(-\frac{Bpd}{V} \right) \quad (5)$$

表1 パッシェンの法則における $A \cdot B$ の値

Gas	A	B	E/p	C	D	E/p
	$m^{-1}Pa^{-1}$	$V/(mPa)$	$V/(mPa)$	$m^{-1}Pa^{-1}$	$V/(mPa)^{1/2}$	$V/(mPa)$
He	2.26	25.6	15.0 - 113	3.31	12.1	75.2
Ne	3.01	75.2	75.2 - 301	6.17	14.7	188
Ar	9.02	135	75.2 - 451	22.0	23.1	526
Kr	12.8	180	75.2 - 752	26.8	24.5	677
Xe	19.5	263	150 - 602	49.1	31.3	903
Hg	15.0	278	113 - 451			
H ₂	3.76	97.7	113 - 451			
N ₂	9.02	257	75.2 - 451			
N ₂	6.62	207	20.3 - 150			
Air	11.3	274	75.2 - 602			
CO ₂	15.0	350	376 - 752			
H ₂ O	9.77	218	113 - 752			

したがって式4・5より以下の式が導かれる。

$$V = \frac{Bpd}{\ln \left(\frac{Apd}{\Phi} \right)} \quad (6)$$

この式は放電開始電圧が圧力と電極間距離との積に依存することを示しており、パッシェンの法則と呼ばれる。特徴的なのは、放電開始電圧 V が最小となる pd の値が存在し、その値は図2に示すように、気体の種類、電極の材質によって異なることである。

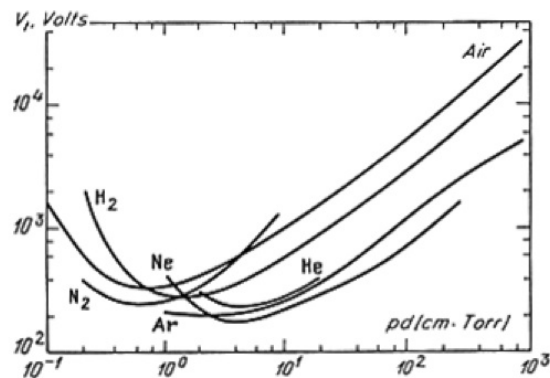


Fig.7.2. Breakdown potentials in various gases over a wide range of pd values (Paschen curves) on the basis of data given in [7.1, 2]

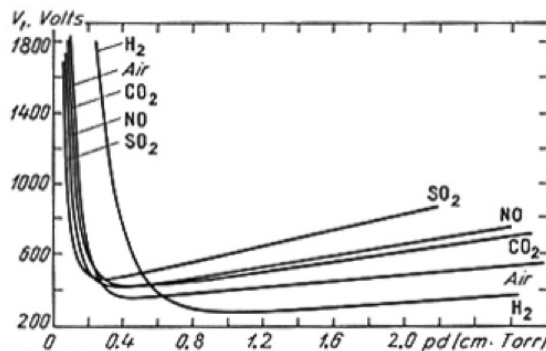


Fig.7.3. Paschen curves on an enlarged scale [7.3]

図2 パッシェンの曲線

3.2 直流グロー放電

グロー放電は電流が安定して流れ続ける自続放電の一種で、電極間のギャップが全て絶縁破壊される全路破壊に区別される。特に低気圧中で電流が小さい場合に安定して観察される現象である。図3にグロー放電を行う実験機器の概略図を示す。真空に引かれたガラス管の両端に金属電極を置き、高電圧をかけるとはじめは細い青みがかった火花が見え、さらに電圧をかけていくと赤紫色がかった帯状の発光が観察される。ただし、部位によって光り方が異なるので、陰極側からそれぞれ「アストン暗部 (ADS)」「陰極グロー (CG)」「陰極暗部 (CDS)」「負グロー (NG)」「ファラデー暗部 (FDS)」「陽光柱 (P)」「陽極暗部 (ADS)」「陽極グロー (AG)」のような名称で呼ばれる。

図4に各物理量が位置によってどう変化するかを表した。上から順番に「輝度」「電位」「電界」「電流密度」「電荷密度」「正味の空間電荷密度 ρ 」である。正味の空間電荷密度のグラフを見ると、強いクーロン力を受けて正イオンが陰極に強く引き寄せられ、電子は反発されるので、陰極の周りに $+$ が集中していることが分かる。すると、負グローと陰極の間では短距離の間に急激な電圧降下 V_c が起こる。これを陰極降下と呼ぶ。結局、この陰極降下の影響で陰極に強い電界が生じるのである。陰極から少し離れた負グローでは電離による電子の数が増して正負の電荷が釣り合う部分があり、ファラデー暗部で一旦電界が0となる。さらに陰極から離れた陽光柱では正負の電荷が打ち消し合って、正味の空間電荷密度が0となるので、電界も一定値をとる。陽

極周辺では正イオンが反発されるので若干電界が強まるが、陰極周辺ほど顕著ではない。以上の原理から図 4 中にあるような電界分布のグラフが導かれる。

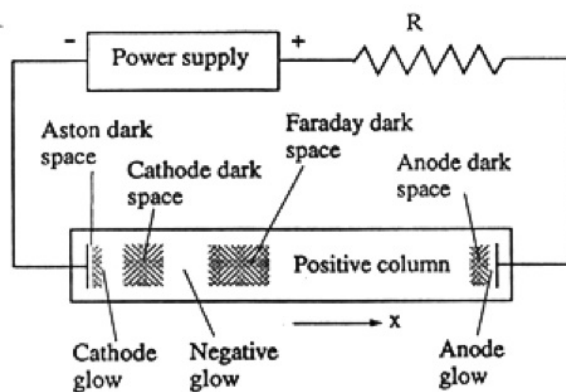


図 3 グロー放電の概略図

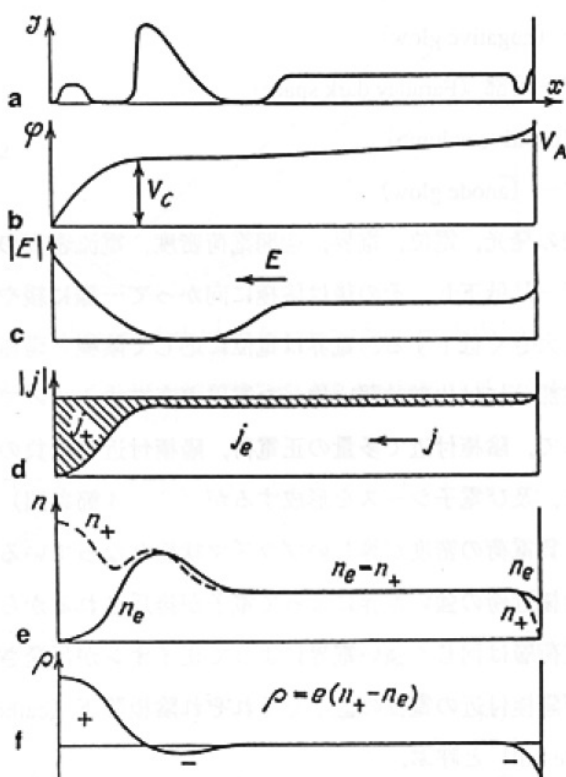


Fig. 8.2. Glow discharge in a tube and the distribution of: (a) glow intensity, (b) potential ϕ , (c) longitudinal field E , (d) electronic and ionic current densities j_e and j_+ , (e) charge densities n_e and n_+ , and (f) space charge $\rho = e(n_+ - n_e)$

図 4 グロー放電における各物理量の軸方向分布

3.3 静電プローブ (シングルプローブ) 測定原理

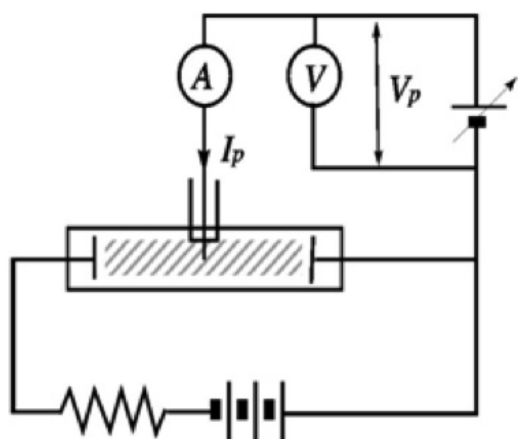


図5 プローブ測定の概略図

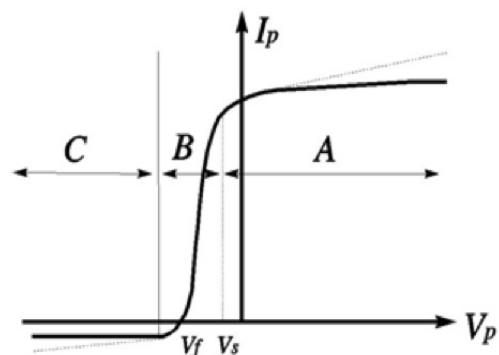


図6 シングルプローブの電流電圧特性

プローブは普通小さい電極をプラズマ中に挿入し、プラズマに対し正又は負のバイアス電圧 V_p を加えてプローブに流れる電流 I_p の特性を調べる。図5はグロー放電に対する測定装置の概略図である。図6は典型的なプローブの電流電圧 ($I_p - V_p$) 特性である。この特性の定量的な理論は複雑であるが、最も簡単な磁界が弱く、シース (sheath) の厚さがプローブの大きさに比べて小さい場合を考える。図6の特性は正負の電流に関して非対称性を示すが、この原因は、電子はイオンより熱運動の速度が速いので、プローブに流れる電子電流はイオン電流より遥かに大きいことによる。以下領域を A・B・C の3つに分けて詳しく述べる。

3.3.1 A 領域

プローブ電圧 V_p がプラズマと同じ電圧 (空間電位) V_s と等しくなると、電場がプローブの周りに出来ない。そのため荷電粒子 (イオンと電子) が熱運動でプローブに入る。 V_p が V_s より正に増やしていくと、電子はプローブの方に加速され、イオンは反発される。このようにプローブの周囲が正電圧にあるためイオンが反射され、電子のみ存在する薄い層がプローブに接して形成されたものを電子シースという。プローブの周囲の電子シースの外側では殆ど電場の無い状態になり、 $V_s < V_p$ では、熱運動に従って全ての電子がプローブに入り、電子電流は飽和する。これを電子飽和電流という。これを I_{es} とすると、

$$I_{es} = \frac{1}{4} S n_e \langle v_e \rangle \quad (7)$$

と表される。ただし S : プローブ前面のシースの表面積、 e : 電子の電荷 ($=1.602 \times 10^{-19} \text{C}$)、 n_e : 電子密度、 $\langle v_e \rangle$: 電子の平均速度である。1/4の因子はシースの表面で密度が半分になること、及び表面の法線に対する方向余弦の半球での平均の値が1/2となることによる。

平面プローブでは、 S は殆どプローブ表面積と等しいが、円柱状プローブでは、 V_p の上昇に従い、電子シースの厚さが厚くなるため表面積は増大して、図6の点線のように I_{es} は斜めに上昇する。この時は、 $V_p = V_s$ で、 S = プローブの表面積となる。Maxwell 速度分布に従う電子については、式7は、

$$I_{es} = S n_e \left(\frac{k_B T_e}{2\pi m} \right)^{1/2} \quad (8)$$

となる。ここで k_B : ボルツマン定数 ($k_B = 1.381 \times 10^{-23} [J/K]$)、 m : 電子の質量 ($m = 9.109 \times 10^{-31} [kg]$) である。

3.3.2 B 領域

プローブ電圧 V_p を下げていくと V_s 以下で電流が減少する。 $V_p - V_s = V$ が負になるため電子電流 I_e は徐々に減るとともに、イオン電流 I_i が流れる。 I_e が減るのは、遅い成分をもった電子は負の電圧 V のためにプローブに流入することが出来なくなり、 $mv_1^2/2 = -eV$ で与えられる v_1 より大きい速度成分の電子のみプローブに入る。従って V の電圧の時の I_e は、

$$I_e = Sen_e \left(\frac{k_B T_e}{2\pi m} \right)^{1/2} \exp \left(\frac{eV}{k_B T_e} \right) \quad (9)$$

となる。プローブ電流 I_p は電子電流 I_e と反対方向に流れるイオン電流 I_i との差であるから $I_p = I_e - I_i$ であり、これと式 9 より、

$$I_p + I_i = I_e = Sen_e \left(\frac{k_B T_e}{2\pi m} \right)^{1/2} \exp \left(\frac{eV}{k_B T_e} \right) \quad (10)$$

又上式は、式 8 より、

$$I_p + I_i = I_{es} \exp \left\{ \frac{e(V_p - V_s)}{k_B T_e} \right\} \quad (11)$$

更に、 V_p を下げると図 6 にて、 $V_p = V_f$ のところで、 $I_p = 0$ となる。この時の V_f を浮遊電位 (floating potential) という。 $V_p = V_f$ では $I_e = I_i$ であり、電流は消しあっているため、絶縁して $I_p = 0$ になるように挿入した物体と同じ電位である。放電管のガラス壁等はこの電位であるが、 $V_f < V_s$ だからプラズマに対しては負に帯電している。 $V_p < V_s$ では、幾らかの電子が反発され、イオンより数が減り、プローブ周辺には薄いイオンシースが作られている。

3.3.3 C 領域

V_p を更に下げると、 $V = V_p - V_s$ は負の大きい電位となり、速い速度を持つ電子でさえプローブに入らなくなる。イオン電流は、C 領域で平面電極では一定の値 $I_p = I_i$ となる。これをイオン飽和電流 I_{is} という。円柱状プローブでは、電子飽和電流と同様に、イオンシースが厚くなるために、表面積が増大し、 I_i は V_p を負に増すに従い、図 6 の点線のように下がる。

3.4 電子温度 T_e と電子密度 n_e の測定

式 11 の両辺の対数をとると

$$\log(I_p + I_e) = \text{const} + \frac{e(V_p - V_s)}{k_B T_e} = \text{const}' + 11,600 \frac{V_p}{T_e} \quad (12)$$

となる。ここで V_p は [V]、 T_e は [K] の単位である。従って、図 6 の $I_p - V_p$ 特性より、 I_i を定め、更に V_p に対して $\log(I_p + I_i)$ をプロットすれば、図 7 のようなグラフが得られる。

そのときの傾斜が $11,600/T_e$ を与え、これより電子温度 T_e が求められる。また、電子密度 n_e に関しては、式 8 より、

$$n_e = 4.02 \times 10^{15} \frac{I_{es}}{S T_e^{1/2}} \quad (13)$$

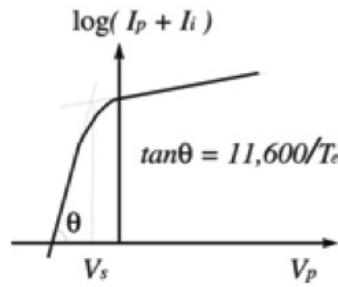


図7 電子温度の決定方法

ここで、 I_{es} は [A]、 S は [m^2]、 T_e は [K]、 n_e は [m^{-3}] の単位である。図7の折れ曲がり点の電圧 V_s における電子飽和電流 I_{es} とプローブ表面積 S と T_e により、式13から、 n_e が求められる。イオン電流は電子電流より遥かに小さく、更に詳しい理論ではイオン電流 I_i は式8のような式、即ち $I_i = Sen_i \langle v_i \rangle / 4$ (n_i はイオン密度、 $\langle v_i \rangle$ はイオンの平均速度) とならず、電子温度にも依存する。この為、イオン温度 T_i を求めることは困難である。プローブ測定に関しては、ここで説明したシングルプローブの他にダブルプローブ測定法など種々のものがある。測定対象のプラズマが時間的変動する場合の測定には注意を要する。また、強磁場中において、電子はイオンに比べて磁場影響を受けやすく、A領域の電子飽和電流領域は抑制される。そして空間電位 V_s 見かけ上小さく測定される。この場合、 V_s は V_f と T_e から評価し、 n_e はC領域のイオン飽和電流領域に直線フィッティングして、この V_s まで外挿して I_{is} を求めて評価する。

4 使用器具及び装置

- 実験装置 (図8)

あらかじめ油回転ポンプ (Rotary pump, 到達真空度～数 Pa) でステンレススチールの真空容器 (直径 50.5mm, 長さ 420mm) 及び 2つのガラスの真空容器 (内径 42mm, 160 長さ及び 200mm) 内をほぼ数 Pa まで排気しておいた。

- 筆記用具・実験レジュメ・実験ノート

5 実験結果

はじめに以下の手順で実験装置の準備を行った。最初にストップバルブが閉じられていることを確認し、リークコックを閉じた。次にロータリーポンプのスイッチを入れ、1分程度暖気運転を行った。真空バルブをあけ、ピラニ真空計のスイッチを入れた。そうして真空度が 3Pa 迄下がったら、ニードルバルブの目盛が零であることを確認し、ストップバルブを開いた。ピラニ真空計を見ながら、慎重にニードルバルブを左にゆっくり回し、真空容器内に空気を流入させ。圧力が 30～40Pa 前後になるようにニードルバルブを調節した。

実験1：放電開始電圧の測定 1. 放電管 A を用いて実験を行った

2. 感電に注意しながら図8を参考にして結線した

3. 電極間距離 d ($5 \cdot 10$ mm) をパラメータにし、ニードルバルブを調整して空気の圧力 p を変化させて、放電開始電圧 (V_{st}) を測定した。この時、 pd [$m \cdot Pa$] 積は 0.2 ～10 の範囲で計測した

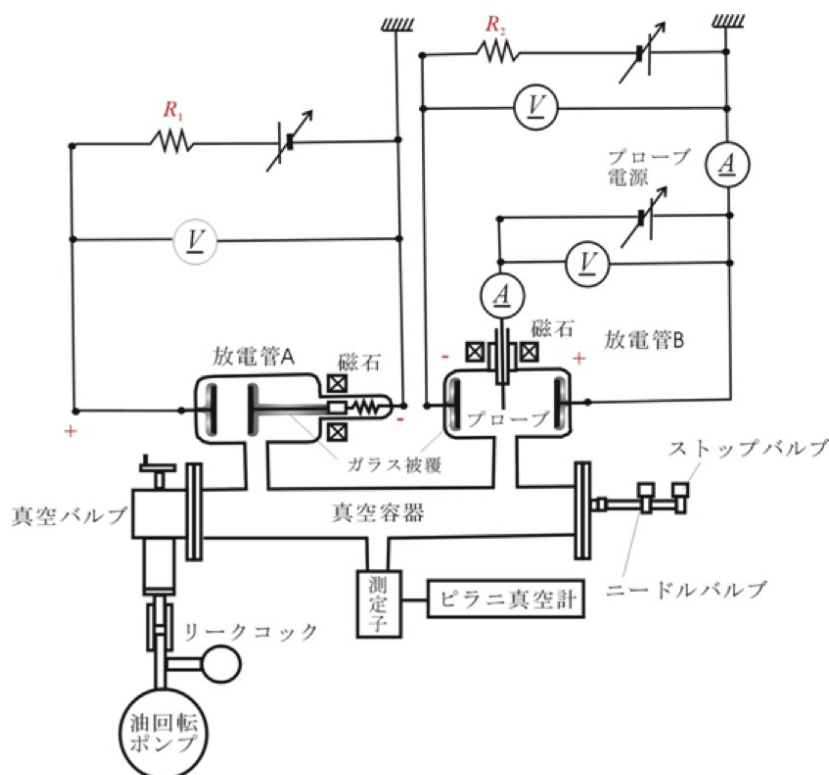


図8 実験装置概略図

4. 高圧電源の電流調節つまみを最低位置から半回転している（目盛り 0.5(10mA)）こと、電圧調整つまみがゼロであること、並びに極性切り替えつまみが output off であることを確認した
5. 極性切り替えつまみを正にして、電極間に徐々に、高圧電源より、電圧を印加して、放電開始した時点における電圧を読み取った。放電開始後は、速やかに印加電圧を下げた
6. 実験結果を片対数グラフにプロットし、図2のようなパッシェンの法則のグラフが得られることを確認しながら計測した
7. 電極間距離は、磁石で動かして設定し、ガラス管の取扱は慎重に行った

以上の実験手順の結果、表2・3のようになった。ただし電極材料は銅、電極直径は 38[mm]、動作ガス種は空気であった。 Φ は式6を変形した

$$\Phi = 11.3pd \exp\left(-\frac{274pd}{V}\right) \quad (14)$$

から、 Υ は式4を変形した

$$\gamma = \frac{1}{e^{\Phi} - 1} \quad (15)$$

から求めた。 $A \cdot B$ の値は表1から Air の行を読みとり、 $A=11.3$ 、 $B=274$ とした。

表2・3より、図2に倣って放電開始電圧 V_{st} -pd 積のグラフ、すなわちパッシェンの曲線を描いたところ図9のようになった。ただし、厳密にはパッシェンの法則が成り立つのは E/p が 75.2~602 の区間のみである。

表 2 実験 1 : 実験結果 ($d=5[\text{mm}]=0.005[\text{m}]$)

電極間距離 $d[\text{m}]$	気圧 $P[\text{Pa}]$	Pd 積 $[\text{Pa} \cdot \text{m}]$	放電開始電圧 $V_{st}[\text{V}]$	E/p	Φ	Υ
0.005	40	0.2	760	3800	2.10	0.139
0.005	60	0.3	500	1667	2.88	0.0597
0.005	80	0.4	410	1025	3.46	0.0325
0.005	90	0.45	400	889	3.74	0.0244
0.005	100	0.5	380	760	3.94	0.0198
0.005	125	0.625	380	608	4.50	0.0112
0.005	150	0.75	370	493	4.86	0.00779
0.005	175	0.875	370	423	5.17	0.00570
0.005	190	0.95	370	389	5.31	0.00496
0.005	225	1.125	400	356	5.88	0.00280
0.005	250	1.25	400	320	6.00	0.00249
0.005	300	1.5	420	280	6.37	0.00171
0.005	400	2	480	240	7.22	0.000735
0.005	500	2.5	520	208	7.57	0.000518
0.005	600	3	590	197	8.42	0.000221
0.005	700	3.5	620	177	8.42	0.000220
0.005	800	4	670	168	8.80	0.000150
0.005	900	4.5	720	160	9.17	0.000104

表 3 実験 1 : 実験結果 ($d=10[\text{mm}]=0.01[\text{m}]$)

電極間距離 $d[\text{m}]$	気圧 $P[\text{Pa}]$	Pd 積 $[\text{Pa} \cdot \text{m}]$	放電開始電圧 $V_{st}[\text{V}]$	E/p	Φ	Υ
0.01	30	0.3	600	2000	2.96	0.0549
0.01	40	0.4	450	1125	3.54	0.0298
0.01	60	0.6	400	667	4.50	0.0113
0.01	70	0.7	390	557	4.84	0.00799
0.01	80	0.8	380	475	5.08	0.00627
0.01	90	0.9	390	433	5.40	0.00452
0.01	100	1	380	380	5.49	0.00413
0.01	125	1.25	390	312	5.87	0.00283
0.01	150	1.5	410	273	6.22	0.00199
0.01	175	1.75	430	246	6.48	0.00153
0.01	200	2	460	230	6.87	0.00104
0.01	300	3	550	183	7.61	0.000498
0.01	400	4	620	155	7.72	0.000446
0.01	500	5	680	136	7.53	0.000534
0.01	800	8	870	109	7.28	0.000692

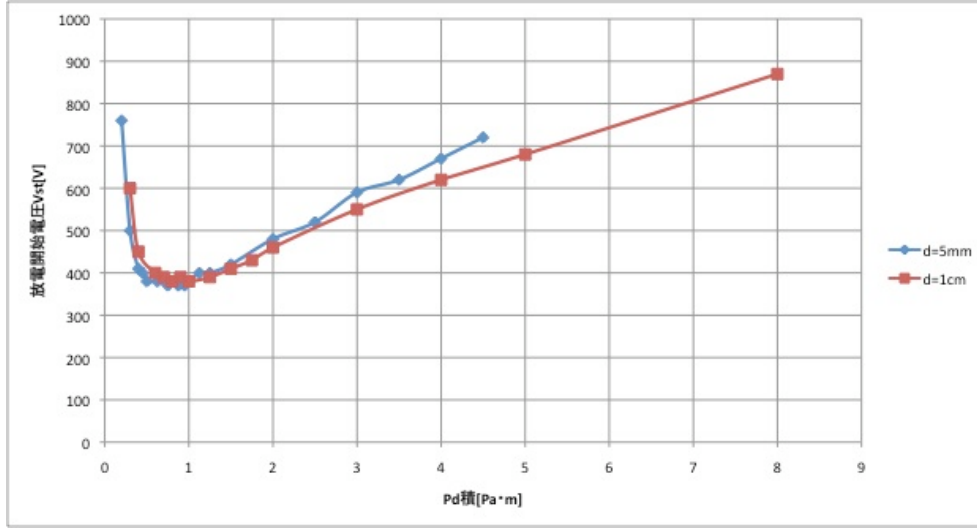


図9 パッシェンの法則

実験2：シングルプローブ測定 図10のような平面プローブを直流グロー放電プラズマ（陽光柱プラズマ）に挿入した。プローブの大きさは直径 2.0[mm]であった（可動距離 45[mm]）。このプローブと陽極との間にプローブ電圧 V_p を印加して、プローブに流れるプローブ電流 I_p （但し、電子電流を正とする）を図8のような回路で測定した。 $V_p = -50 \sim 40$ [V]、 $I_p = -1 \sim 1000$ [μ A] とし測定レンジ並びに極性に注意した。ガス圧力は 40[Pa] を保ち、放電電流を 5.0[mA] として実験を行った。得られた測定結果は図11のようになったが、イオン電流 I_i の大きい領域に接線を引いた点線が I_i を表しており、これから電子電流 $I_e = I_p + I_i$ を求めた（図11の両矢印部分）。 $I_{ew} \cdot V_s$ は傾きが急激に変化する点を読み取った。

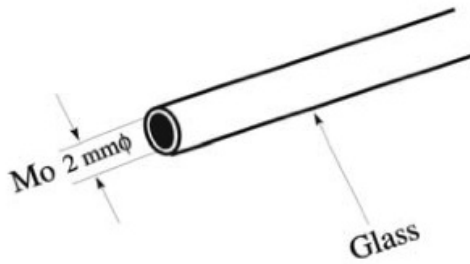


図10 シングルプローブ概略図

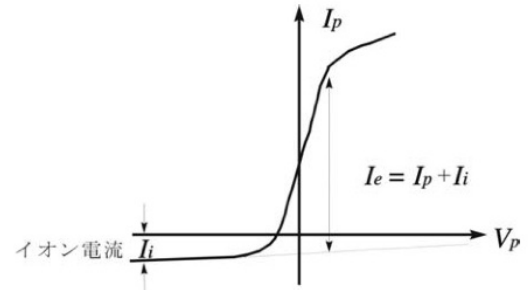


図11 電子電流 I_e とイオン電流 I_i

9の両辺の対数をとると

$$\log I_e = 0.434 \frac{e(V_p - V_s)}{k_B T_e} + \log \left[S e n_e \left(\frac{k_B T_e}{2\pi m} \right)^{1/2} \right] \quad (16)$$

となるので、 $I_e - V_p$ を片対数グラフにプロットすると、立ち上がり直線部の傾きから電子温度 T_e が

$$T_e = 0.434e \left(\frac{V_2 - V_1}{k_B} \right) = (V_2 - V_1) \times 5035 [K] \quad (17)$$

で決まる。ただし $V_1 \cdot V_2$: 立ち上がり直線部分の電子電流が一桁変わるときの V_p の値 ($V_1 < V_2$)。
 n_e は式 8 より、

$$n_e = 4.02 \times 10^{15} \frac{I_{es}}{ST_e^{1/2}} [m^{-3}] \quad (18)$$

と求められる。ただし I_{es} : [A]、 S : [m^2]、 T_e : [K] である。

以上の手順を追った実験結果を表 4 に示す。

これをグラフにしたものが図 12 である。さらに片対数グラフにプロットしたものを図 13 に示す。これよりプラズマの空間電位 V_s は -10.0[V]、飽和電子電流 I_{es} は 1.28[A] と求められた。

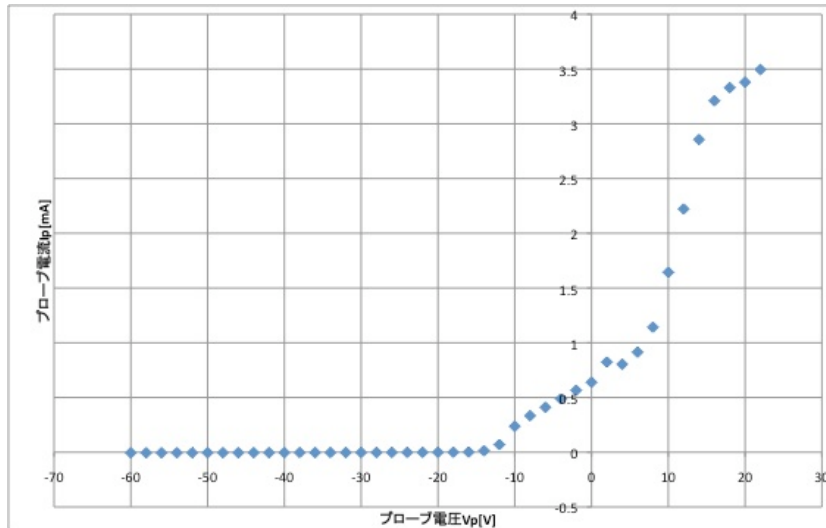


図 12 $I_p - V_p$ 特性

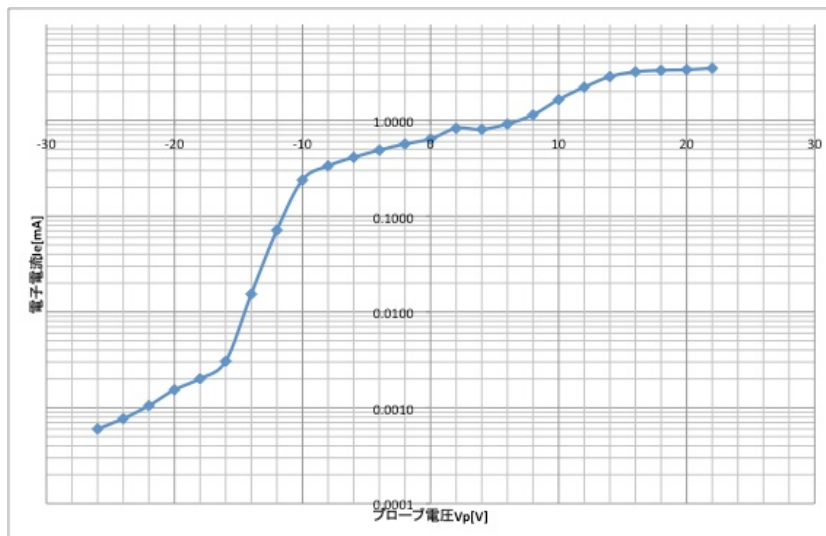


図 13 $I_p - V_p$ 特性 (片対数プロット・一部)

実験後以下の手順で実験装置の停止を行った。最初に電圧を 0 にし放電を中止した。ニードルバルブを

表 4 実験 2 : 実験結果

プローブ電圧 V_p [V]	プローブ電流 I_p [mA]	電子電流 I_e [mA]
-60	-0.00527	0
-58	-0.00510	0
-56	-0.00496	-3.0×10^{-5}
-54	-0.00479	-3.0×10^{-5}
-52	-0.00461	-2.0×10^{-5}
-50	-0.00448	-6.0×10^{-5}
-48	-0.00425	0
-46	-0.00407	1.0×10^{-5}
-44	-0.00389	2.0×10^{-5}
-42	-0.00369	5.0×10^{-5}
-40	-0.00349	8.0×10^{-5}
-38	-0.00327	0.00013
-36	-0.00304	0.00019
-34	-0.00281	0.00025
-32	-0.00257	0.00032
-30	-0.00233	0.00039
-28	-0.00207	0.00048
-26	-0.00178	0.00060
-24	-0.00144	0.00077
-22	-0.00099	0.00105
-20	-0.00033	0.00154
-18	0.00031	0.00201
-16	0.00153	0.00306
-14	0.014	0.015
-12	0.070	0.071
-10	0.237	0.238
-8	0.3335	0.334
-6	0.4105	0.411
-4	0.4878	0.488
-2	0.566	0.566
0	0.639	0.639
2	0.824	0.824
4	0.804	0.804
6	0.914	0.914
8	1.142	1.141
10	1.644	1.643
12	2.222	2.221
14	2.856	2.855
16	3.210	3.209
18	3.330	3.329
20	3.380	3.378
22	3.495	3.493

右に回して止め、ガラスの放電管をしばらく冷却した。圧力が下がり、実験開始時の到達圧力に達することを確認してからピラニ真空計のスイッチをオフの状態にし、ストップバルブを閉め、直ちに真空バルブを閉めた。油回転ポンプのスイッチを切り、リークコックを開けて油回転ポンプ内を1気圧にした。

6 検討

1. 電子温度 T_e を求める。式 17 に $V_1=-14.5[\text{V}]$ (@0.01mA)、 $V_2=-11.5[\text{V}]$ (@0.1mA) を代入すると $15105[\text{K}]$ となった。
2. 電子密度 n_e を求める。式 18 に $I_{es}=1.28[\text{A}]$ 、 $S=3.14 \times 10^{-6}[\text{m}^2]$ 、 $T_e=15105[\text{K}]$ を代入すると $2.92 \times 10^{18}[\text{m}^{-3}]$ となった。
3. グロー放電の電界ポテンシャルの成り立ちについては、実験理論「直流グロー放電」の項で述べたとおりである。
4. 実験 1 において得られた二次電子放出係数 γ からそのエネルギー依存性について考察する。パッシェンの法則が成り立つ範囲で $E=V/d$ よりエネルギーを求め、二通りの電極間距離 d について γ をプロットすると図 14 のようになった。

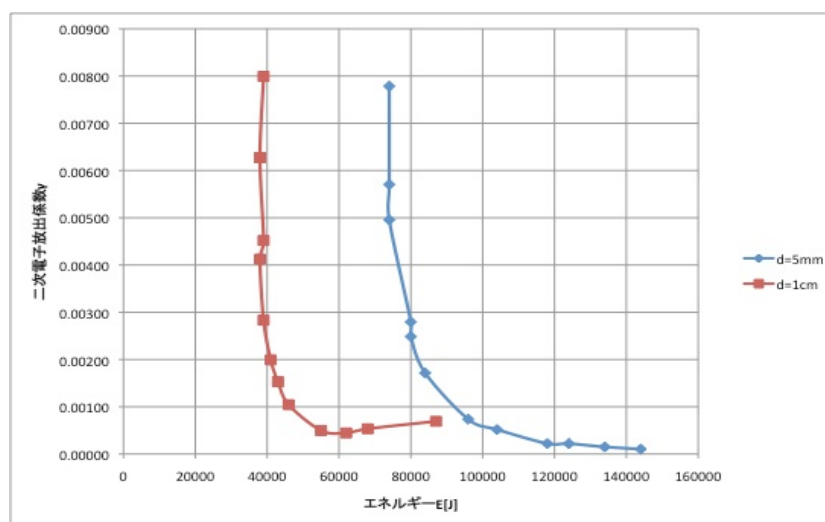


図 14 二次電子放出係数 γ のエネルギー依存性

グラフより、エネルギー（電界）が大きくなると γ が急激に減少することが分かる。また電極間距離が短いほどグラフが左にシフトしていることが分かる。 γ はイオンが固体表面にぶつかって新たな 2 次電子を叩き上げる確率を表すパラメータであるから、同じエネルギーを与えたとしても電極間距離が短いほうが電界が強くなるため、イオンが陰極にぶつかる可能性が高くなり、その結果 γ の値が大きくなっているのだと考えられる。

5. 放電自続の条件は次のようにして求められる。陰極降下中では強い電界によって正イオンが加速され、陰極にぶつかって電子をたたき出している。この電子は電解を受けて正イオンと逆方向に加速され、気体分子と衝突し電離を引き起こす。この際生じた正イオンが前に述べた正イオンの元になる。以上のサ

イクルから、放電が連続して行われるには次の条件を満足する必要がある。「陰極から放出される電子 1 個が陰極降下中で衝突電離によって発生する正イオンの数は、これらの正イオンが陰極に衝突して放出する電子の数が、ちょうど 1 個であるだけの数である。」

この条件を立式する。1 個の電子が陰極降下が存在する範囲 d 内を通過する間に衝突電離によって生ずる正イオンの数は

$$\exp\left(\int_0^d \alpha dx\right) - 1 \quad (19)$$

である。ただし α : 衝突電離係数。すると陰極にぶつかる正イオン 1 個あたり γ 個の電子が放出されるとすれば、上記で述べた条件は

$$\gamma \left\{ \exp\left(\int_0^d \alpha dx\right) - 1 \right\} = 1 \quad (20)$$

と表される。仮に 1 次元として積分を計算すれば $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$ となり、式 3 で分母を 0 とした式、すなわち式 4 が示される。

6. 実験 1 で電極間距離によってパッシェンの曲線がずれた理由は、電極間距離 d の誤差、放電開始電圧 V_{st} の読み取り誤差、圧力 p のばらつきが考えられる。この実験をさらに正確に行うためには、 V_{st} を複数回計測してその平均をとることが挙げられる。

7 結論

1. 放電開始電圧と pd 積の間にはパッシェンの法則が成り立つ。ある pd の値で電圧が極小値をとり、その値は気体の種類や電極材料によって異なる。
2. 直流グロー放電は陰極側で電離が活発に行われることで放電が持続し、人間の目では発光として観察することができる。
3. プローブ測定で得られる電流－電圧特性から電位温度と電子密度を求めることができる。

8 謝辞

最後になったが、実験に協力してくれた班員の 6 人と、丁寧に指導して下さった先生方・TA の方々に感謝申し上げたい。

9 参考文献

- 実験テキスト「A7. プラズマの基礎実験」
- 「大阪大学物理学実験 2008」大阪大学物理教育研究会編 学術図書出版社 第 2 版第 1 刷 第 2 編
- 「電離気体論」電気学会通信教育会著 電気学会 初版
- 「 \LaTeX 2_ε 美文書作成入門 改訂第 4 版」奥村晴彦著 技術評論社 第 4 版第 6 刷

以上