

プラズマ計測

1 目的

プラズマテレビでおなじみとなったプラズマは、“第4の物質状態”といわれている。物質の状態は圧力と温度で異なっており、“物質の三態”といえば固体、液体、気体のことである。1気圧下での水を例にとると、0℃以下では固体、0–100℃間では液体、100℃以上では水蒸気、すなわち気体となる。この水蒸気をさらに加熱していくと、水の分子は解離して水素原子と酸素原子の状態になる。さらに加熱して1万度以上になると、原子は電離して正または負のイオンと電子に分かれて自由に運動するようになる。このような状態では元の物質と全く異なった性質を示し、ほぼ同数の負電荷を持った粒子と、正電荷を持った粒子が混在し（準中性状態）自由に動き回る状態をプラズマと呼んでいる。

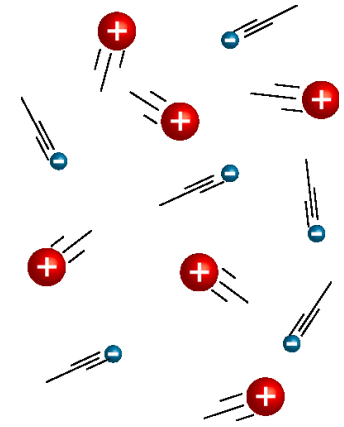


図1 プラズマの概念図

プラズマを利用するには、プラズマの特性を知る必要がある。特性として、プラズマの密度や温度がある。プラズマの応用分野は広く、未来のエネルギー源として期待される核融合炉や、小惑星探査機“はやぶさ”のイオンエンジン、集積回路や半導体デバイスの製造、薄膜太陽電池の制作、オゾンの発生やフロン等の有毒ガスの分解などの環境工学など、さまざまである。しかも、各分野で利用されるプラズマの温度や密度は広範囲に及び、その性質は大きく異なっている。たとえば核融合では密度が高く (10^{20} 個/ m^3) 温度が高い (一億度) プラズマが必要であるが、蛍光灯には低密度 (10^{16} 個/ m^3)、低温 (一万度) のプラズマが必要となる。このように用途によって最適なプラズマの特性が異なるため、プラズマの特性を把握することがきわめて重要であり、そのために行うのがプラズマ計測である。

本実験では、電子サイクロトロン共鳴 (Electron cyclotron resonance: ECR) プラズマ発生装置を用いてアルゴンガスのプラズマを生成し、その中へ静電プローブ (ラングミュアプローブ) を挿入し、電子温度・密度等のプラズマパラメータの計測を行い、プラズマの性質を学ぶことを目的とする。

2 原理

2.1 ECR プラズマ

真空中の磁場におかれた電子は、ローレンツ力によって磁力線に巻きつくようにサイクロトロン運動と呼ばれる回転運動を行う。空間的に一様な磁場のもとでの荷電粒子の運動方程式は次式で表される。

$$m_e \frac{dv}{dt} = ev \times B \quad (1)$$

ここで m_e は電子の質量， v は速度ベクトル， e は電荷量 (素電荷)， B は磁束密度である．この時の荷電粒子の回転半径を r_L とすると，

$$r_L = \frac{m_e v_{\perp}}{|e|B} \quad (2)$$

と表される． r_L をラーマー半径という． v_{\perp} は電子の B に対する垂直な速度成分の大きさである (粒子に働くローレンツ力に寄与する速度は磁場に垂直な成分のみであり，磁場に平行な速度成分 v_{\parallel} と B との外積は 0 となり，等速運動となる)．回転の方向は，外部磁場の向きに対して荷電粒子の回転によってできる磁場が常に逆を向くような方向である．従って，電子は，磁場に対して右回りの回転運動をする．この回転運動の角周波数を ω_c とすると，

$$\omega_c = \frac{|e|B}{m_e} \quad (3)$$

と表され，この ω_c をサイクロトロン角周波数という．

荷電粒子は電場 E によって加速され，特に電子は E と逆向きに加速される．したがって，磁場中の電子の回転方向と逆向きに，回転する速さが等しい電場をかけると，電子は電場からエネルギーを吸収し絶え間なく加速する．この現象を電子サイクロトロン共鳴 (ECR) という．ECR プラズマ発生装置では，マイクロ波を使って電子を加速する電場を生成する． $\omega_c > \omega$ である強磁場側から入射したマイクロ波はプラズマ中を浸透し，電子サイクロトロン波と呼ばれる短波長の右回り円偏波を励起する．この電子サイクロトロン波は弱磁場側へ伝播し， $\omega = \omega_c$ となる層で急激に減衰しエネルギーが電子に吸収される．これが共鳴層で，電子の旋回方向とマイクロ波電場の偏波面が図 2 のように常に一致するため，電子が絶え間なく加速されることによって説明される．本実験では，2.45 GHz のマイクロ波を使用しており，磁束密度 $B = 0.0875$ T で ECR が生じる．共鳴層でエネルギーを得た電子は磁力線にまわりつきながら次々と，周辺の中性粒子と衝突して中性粒子を電離させる．その結果生じた電子もまた，ECR によって加速され電離に寄与する．この繰り返しで生成されるプラズマが ECR プラズマである．そのため，比較的大容量で高密度のプラズマが生成される．

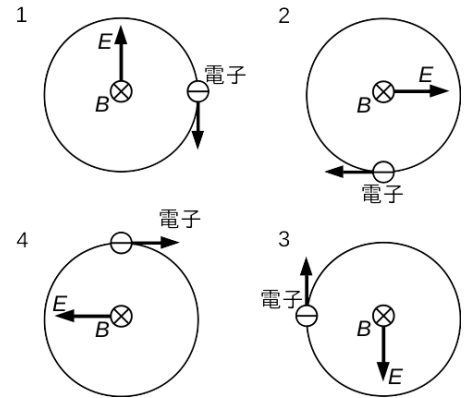


図 2 電子サイクロトロン共鳴の概念

2.2 静電プローブ (ラングミュアプローブ)

プラズマの計測法にはプラズマから放射される X 線や可視光などの電磁波の計測，レーザーやミリ波，中性粒子やイオンを照射して，それに対する反応を計測する手法や電極をプラズマに挿入し，そこに流れる電流を計測するプローブ法など様々な方法が存在する．それぞれに一長一短があるが，本実験では静電プローブ法により測定する．静電プローブによるプラズマパラメータの測定は探針法と呼ばれ，プラズマ中に微小な電極を挿入し，そこから電流を取るによってプラズマ中の荷電粒子密度・温度・エネルギー分布等の情報を局所的に求める方法である．本実験では，図 3 に示した直径 1 mm，長さ 10 mm の円筒形ラングミュアプローブを使用する．プローブの先端部電極の材質は，融点が高いタングステンを用いている．

このプラズマ中のプローブに外部から電圧を印加すると、プローブ電流 I_p はプローブ電圧 V_p と V_s との差 ($\Delta V = V_s - V_p$) によって変化する。プローブ電流 I_p の振る舞いはおおまかに3つに分類される。プローブが空間電位 V_s にあるときは、周囲のプラズマと全く同電位であるので、プローブにはプラズマ粒子の熱運動による熱拡散電流が流入する。プローブ表面の単位面積を単位時間内に通過する電子の個数を Γ_e とし、また、電子の速度がマクスウェル分布則に従うとすれば Γ_e は、

$$\Gamma_e = \int_0^{\infty} v dn(v) = n_e \sqrt{\frac{k_B T_e}{2\pi m_e}} = \frac{1}{4} n_e \langle v_e \rangle \quad (4)$$

となる。ただし n_e : 電子密度, k_B : ボルツマン定数, T_e : 電子温度, m_e : 電子質量である。 $\langle v_e \rangle$ は電子の熱運動平均速度で、

$$\langle v_e \rangle = \sqrt{\frac{8k_B T_e}{\pi m_e}} \quad (5)$$

と表される。よって、プローブに流れ込む電子の電流は

$$I_{es} = \frac{1}{4} e S n_e \langle v_e \rangle = \frac{1}{4} e S n_e \sqrt{\frac{8k_B T_e}{\pi m_e}} \quad (6)$$

同様に、プローブに流れ込む正イオンの電流は

$$I_{is} = \frac{1}{4} e S n_i \langle v_i \rangle = \frac{1}{4} e S n_i \sqrt{\frac{8k_B T_i}{\pi m_i}} \quad (7)$$

ただし、 e を素電荷、 S をプローブ表面積、 n_i はイオン密度、 m_i はイオン質量、 $\langle v_i \rangle$ は正イオンの熱運動平均速度である。プローブには電子電流とイオン電流が同時に流入するが、 $m_i \gg m_e$ のために T_i が T_e に比べてはるかに大きくない限り $\langle v_e \rangle \gg \langle v_i \rangle$ が成立する。よって $I_{e0} \gg I_{i0}$ となるため、プローブには電子電流が流れる。プローブ測定においては電子電流の方向を便宜上正の方向とする。

プローブの電位が周りのプラズマの電位よりも正、すなわち $\Delta V < 0$ の領域ではイオンはプローブ表面から追い返され、電子は逆に引き寄せられるため、プローブ表面には電子鞘 (電子シース) が形成され、正電圧の増加に伴い電子電流は増大する。これが図4の



図3 プローブ外形

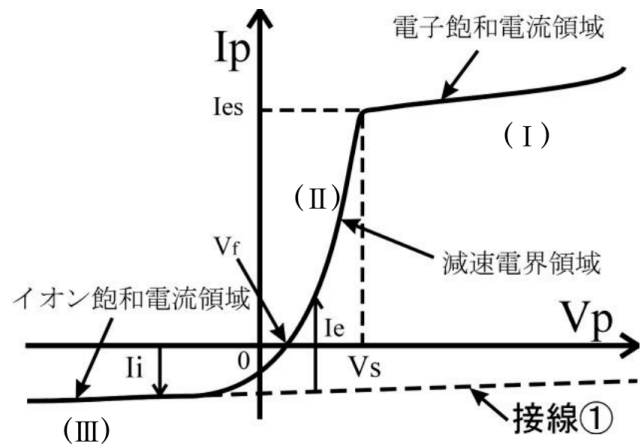


図4 電流-電圧特性

(I) の領域である．この領域では正電圧を極端に増やすと，プローブを電極とした放電状態が始まり，電流が急激に増大し，プローブが焼損破壊される恐れがあるので注意が必要である．空間電位 V_s より負の電圧を印加すると，プラズマに対してプローブはマイナスのポテンシャルとなるため，負に帯電している電子は減速される．結果として，この電位差 ΔV に打ち勝つ運動エネルギーを持つ電子のみがプローブ表面から流れ込み， ΔV 以下の運動エネルギーしかもたない電子はプローブ表面に形成された電場によって追い返され，電子電流が減る．一方で，イオンは引き寄せられ，イオン電流は増加する．しかしながら電子電流はイオン電流に比べて断然大きいので，見かけ上依然として電子電流が流れる．この領域において，無衝突プラズマかつ電子は統計的に等方的な速度分布 $f(v)$ に従って運動しているとする． v から $v + dv$ の範囲の電子密度は $f(v)dv$ である．電子はシース端ではプローブ表面の法線に対し角度 θ で入射する．速度 v の電子は $v \cos \theta \geq v_{\min} = (2e\Delta v/m)^{1/2}$ においてプローブに入っていける．よってプローブに流れ込む電流 I_e は表面積 S ，密度 $n_e f(v)dv$ ，速度成分 $v \cos \theta$ ，速度空間の寸法 $2\pi v \sin \theta v d\theta$ の積によって決まる．よって電子電流 I_e は， $0 \leq \theta \leq \cos^{-1}(v_{\min}/v) = \theta_{\max}$ ， $v_{\min} \leq v \leq \infty$ での積分で表される．

$$\begin{aligned}
I_e(\Delta V) &= en_e S \int_{v_{\min}}^{\infty} dv \int_0^{\theta_{\max}} d\theta 2\pi v^3 f(v) \sin \theta \cos \theta \\
&= 2\pi en_e S \int_{v_{\min}}^{\infty} v^3 f(v) dv \frac{1}{2} [1 - \cos^2 \theta_{\max}] \\
&= \pi en_e S \int_{v_{\min}}^{\infty} v^3 \left(1 - \frac{v_{\min}^2}{v^2}\right) f(v) dv \quad (8)
\end{aligned}$$

実際の粒子は様々な向きに運動するので，速度の大きさだけについて考える場合，異なった向きの粒子を全部勘定に入れなければならない．従って， n_e 個のうち速度の絶対値が v と $v + dv$ の間に入る数は速度空間で原点を中心とする半径 v 厚さ dv なる球殻の中にはいる速度点の数に等しいので，この球殻の体積 $4\pi v^2 dv$ をかけて $F(v)dv = 4\pi v^2 f(v)dv$ を代入する．

$$I_e(\Delta V) = \frac{1}{4} en_e S \int_{v_{\min}}^{\infty} v \left(1 - \frac{v_{\min}^2}{v^2}\right) F(v) dv. \quad (9)$$

電子のエネルギー分布関数をマクスウェル分布と仮定すると $F(v)$ は，

$$F(v) = 4\pi \left(\frac{m_e}{2\pi k_B T_e}\right)^{3/2} v^2 \exp\left(-\frac{m_e v^2}{2k_B T_e}\right) \quad (10)$$

$E = \frac{1}{2} m_e v^2$ とおくと，

$$\begin{aligned}
I_e(\Delta V) &= \frac{1}{4} en_e S \sqrt{\frac{8k_B T_e}{m_e \pi}} \int_{e\Delta V}^{\infty} \left(1 - \frac{e\Delta V}{E}\right) \left(\frac{E}{k_B T_e}\right) \exp\left(-\frac{E}{k_B T_e}\right) \frac{1}{k_B T_e} dE \\
&= \frac{1}{4} en_e S \sqrt{\frac{8k_B T_e}{m_e \pi}} \exp\left(-\frac{e\Delta V}{k_B T_e}\right) \\
&= I_{es} \exp\left(-\frac{e\Delta V}{k_B T_e}\right). \quad (11)
\end{aligned}$$

式 (11) より，図 4 の (II) の領域で示されるように，プローブ電位 V_p が空間電位 V_s から離れて小さくなるほど，すなわち負にいくほど電子電流は減少し，浮動電位 V_f の点でプローブ電流は

0 になる．これはこの点でイオン電流と電子電流が釣り合っているからである．さらに負にすると，電子電流はさらに減少するので，プローブには正のイオン電流が流れるようになる．これが図 4 の (III) の領域である．プローブ電位が十分に負である領域では電子はポテンシャルで追い返されるためプローブに流れ込むことは困難であるため，プローブ電流 I_p は I_i と等しいと見なしでよい．

2.3 解析手法

式 (11) の両辺で自然対数を取り，さらに V_p で微分すると $\ln I_{e0}$ は定数なのでゼロとなり， $\Delta V = V_s - V_p$ であるため，

$$\frac{d}{dV_p} \ln I_e = \frac{e}{k_B T_e} \quad (12)$$

よって電子温度 T_e を求めようとするとき，測定されたプローブ電流をイオン電流と電子電流に分け，電子電流の対数を電圧 V_p に対して微分すれば求まる．

まずはプローブ電流から電子電流を推定する必要がある．プローブを十分に負に印加した領域では前述の通り，プローブ電流はイオン電流と見なせるので，その領域で図 4 に示す接線①を引き，これを I_i と見なして， I_p と I_i の差から I_e を求める．理論上では円筒プローブではプローブ電圧のルートに比例するが，端効果により円筒が楕円状になるため，結果的に電圧に比例すると考えられる．プローブ電流からイオン電流の補正を行い得られた I_e の自然対数を Y 軸に， V_p を X 軸にプロットする． T_e の値は， $V_p < V_s$ 領域の I_p の勾配より求めるが，勾配を求めるための接線②の引き方で値が大小する． I_e の値が小さい領域では， I_e がイオン電流の補正によって大きく変化する．また， T_e は通常最小になるように決定するので， I_e の値が大きい，すなわち， V_s に近い部分に接線を引き，その勾配から T_e を求める．

プラズマ空間電位 V_s において，図 4 のように，電子が減速される減速電界領域から電子飽和電流領域へと折れ曲がりを生ずるはずであるが，実際は図 5 に示すように穏やかな曲線を描く．これはプローブそのものがプラズマを乱しているために起こるものと考えられている．はっきりした曲がり角がないため，正確な空間電位 V_s を求めるには，いろいろと困難が多い．しかし過去の研究結果から，空間電位は減速電界領域の電子電流が直線からずれ始めた点であるとされている．しかしこれも曖昧なため，およその空間電位を知るために図 5 に示すように，減速電界領域の電子電流の近似直線②と飽和電子電流部分に接線③を引き，2本の接線が交わる点を V_s とする．

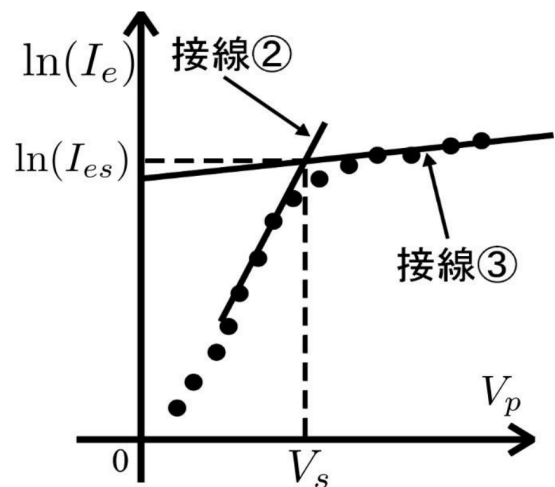


図 5 電流-電圧特性

電子密度 n_e は，式 (6) を用いて電子飽和電流および電子温度から算出するのが一般的である．しかし磁化プラズマにおいてはプローブの電子電流は磁場の影響を受けるためイオン飽和電流から算出したほうが便利である．しかしながらイオン温度 T_i の測定は困難であるため，式 (7) から

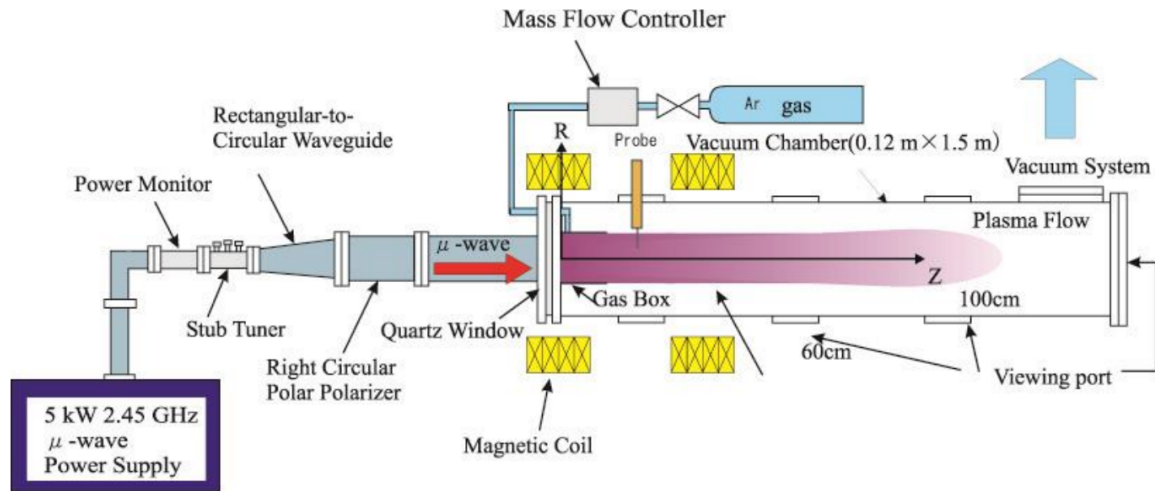


図 6 実験装置概略図

の算出は難しい．幸いにもイオンシースの生成条件は電子温度によって決まるため，先に求めた T_e の値と、図 4 から得られるイオン飽和電流 I_{is} から，式 (13) を用いて求める．空間電位 V_s から T_e の半分に相当する負電位になるとイオンシースが形成され，このとき流入するイオン飽和電流は次式で与えられる．

$$I_{is} = n_e e S \left(\frac{k_B T_e}{m_i} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{1}{2} \right) \quad (13)$$

イオン飽和電流から電子密度を求めるのは便利な方法ではあるが十分な注意が必要である．というのもプローブに流れる電流には何らかの理由でプローブ表面から 2 次電子放出があると，見かけ上のイオンビーム電流が流れるからである．

3 実験装置

図 6 に実験装置の概略図を示す．ECR プラズマ生成実験装置は，内径 40 cm，長さ 100 cm の真空容器，2.45 GHz マイクロ波電源（最大出力 1500 W，連続発振），導波管，ガスボックス，永久磁石，および真空排気装置より構成されている．実験にはアルゴンガスを使用する．2.45 GHz のマイクロ波が電源より連続モードで供給され，アイソレーター，パワーモナタ，スタブチューナー，導波管，および石英窓を介して真空容器内へ導入される．ECR 領域 (0.0875 T) は，設置した電磁石による磁場内に形成され，プラズマが生成される．プラズマパラメータ測定に使用するラングミュアプローブは，プローブ印加電源に接続されており，プローブ電圧と電流-電圧変換されたプローブ電流は，それぞれ X-Y レコーダの X 軸，Y 軸に入力され記録される．

4 実験手順

1. 冷却水を流す
2. 真空ポンプを起動させる

3. 電源を入れる
4. アルゴンガスの配管に設置されたレギュレータを操作し、マスフローコントローラーに 1.5 気圧程度の背圧を与える。
5. 配管途中のバルブを開く
6. マスフローコントローラーを設定し、8–10 sccm のアルゴンガスを導入する。
7. マイクロ波電源を操作し、マイクロ波を真空容器内に導入し、ECR プラズマが点火することを確認する。
8. プラズマが点火したら、パワーモニターで反射がゼロになるようにスタブチューナーを調整しながら、マイクロ波入力電力を 100–500 W 程度に調節する。
9. プラズマが安定したら、プローブに印加する電圧を変化させ、電流-電圧曲線を記録する。
10. 測定がおわったら、速やかにマイクロ波出力を絞り、マイクロ波電源を切る。
11. アルゴンガスを止め、ポンプを止める。

5 実験結果の解析

1. 得られた電流-電圧データをグラフに描画し、図 4 に示した接線①を引く。
2. 電流-電圧曲線の減速電界領域および電子飽和電流領域の値を読み出し、プローブ電圧 (V_p)、プローブ電流 (I_p)、接線①から求めたイオン電流 (I_i)、および I_p から I_i を差し引いた値 ($I_e = I_p - I_i$) を表にまとめる。さらに、 $\ln I_e$ を計算し、表に追加する。
3. V_p と $\ln I_e$ をグラフにプロットし、図 5 のような、 I - V グラフを作成する。
4. プロットしたグラフに図 5 の様に接線②、③を引き、交点からプラズマ空間電位を求める。
5. 接線②の傾きから電子温度を求める。
6. 電流-電圧曲線 (接線①) からイオン飽和電流 (I_{is}) を読みとり、電子密度を求める。

余裕があれば

7. 電子飽和電流から求めた電子密度とイオン飽和電流から求めた電子密度をそれぞれ求め、差異があれば、どのような原因でこの差が生じるのかを考察する。
8. 今回用いたアルゴンガスは、産業界でどのように使われているか。
9. プラズマの医療・農業・宇宙分野への応用例を一つ、その原理と効果を調べ、まとめる。

6 レポートの書き方

特にレポートの形式として決まった規定は無いが、おおよそ以下の内容で作成する。表紙には実験題目、報告者、共同実験者、日時を書く。レポートの内容には以下を必ず含める。

1. 目的
何を測定し、何を知らなければならないのかを簡潔に書く。
2. 原理
本実験がどのような原理によっているのか、理論を説明する。上の”目的”を達成するため

に何を測定し、測定値をどう解析して結果、結論を導くのかを説明する。適宜、図を含めてわかりやすく説明する。教科書の丸写しは不要。

3. 実験装置・器具

実験に使用した装置、器具を可能な限り詳細に説明する。測定の精度もわかる範囲で記述する。

4. 実験方法

上の”原理”で何を測定するか等は説明しているので、ここでは、どの装置をどのように使用して結果を得たのかを書く。基本的に、実験方法は過去形で書く。

5. 測定結果

測定によって得られた結果（生のデータ）を書く。今回の実験であれば、測定で得られた印加電圧に対応する電流（電圧）値である。この測定値は物理量なので、有効数字を考慮して、単位を必ず書く。そして、その生データを処理することで得られた計算結果を書く。データが多い場合、数値を列挙するのではなく、表にまとめる。ここで計算結果の図（グラフ）も載せる。

- 図を書くときは、図の通し番号・表題を”図の下”に書く。複数の図をまとめるのではなく、それを説明する文章の近くに配置する。
- 表を書くときは、表番号と表題を”表の上”に書く。

6. 結論

上記の”目的”に対して、どのような結論が得られたのかを具体的に示す。

7. 検討と考察

得られた結果と結論が妥当なのかどうかを考え、考察する。複数の異なる条件で実験を行った場合、結果の違いやその評価、異なる手法で結果を導いたときの評価等も含める。もし結果が妥当でないと判断した場合、考えられる理由や改善点などを述べる。

注意!

データ解析とグラフを描画するために各自パソコンを持参してください。データ処理にエクセルまたは python(numpy, scipy, matplotlib) を使用しますので、どちらかは必ずインストールしておいてください。山本研究室のホームページに本実験の手引きの PDF ファイルがあります。

<http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/lecture-j.html>

参考文献

1. 堤井 信力, 現代のプラズマ工学, ブルーバックス B-1158, 講談社.
2. 高村秀一, プラズマ理工学入門, 森北出版.
3. 雨宮 宏, 4. 静電プローブでプラズマを探る, プラズマ・核融合学会誌, 第 69 巻 8 号, pp.934-938 (1993).
4. 赤崎 正則, 村岡 克紀, 渡辺 征夫, 蛸原 健治, プラズマ工学の基礎, 産業図書.
5. 堤井 信力, プラズマ基礎工学, 内田老鶴圃.

6. 林 泉，プラズマ工学，朝倉書店．

Nomenclature

S = surface area of probe = $3.22 \times 10^{-5} \text{ m}^2$

e = electronic charge = $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$

k_B = Boltzmann's constant = $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

m_e = electron mass = $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$

m_i = ion mass (Argon) = $6.63 \times 10^{-26} \text{ kg}$