一般論文

放電プラズマ診断のための計測システム

宮	崎	浩	* 1
米	倉	和	也 ^{*2}

Measurement System for Discharge Plasma Diagnostics

Koichi MIYAZAKI^{*1} Kazuya YONEKURA^{*2}

An automatic measurement system for discharge plasma diagnostics was constructed using a personal computer. This system was applied to measurements of spatially resolved emission intensities using Optical Emission Spectroscopy. During measuring places were changed, measured data were taken in a personal computer through an A/D converter board using LabVIEW which is the graphical programming language

1. はじめに

放電プラズマは,半導体の製造や加工など工業的 に広く利用されている。これらのプラズマは弱電離 プラズマであり,電子,イオン,中性粒子が混在し た状態である。電子やイオンだけでなく,中性粒子 への電子衝突で励起,解離,電離が起こり生じた種々 の粒子も,プラズマ中や固体表面での反応過程にお いて重要な役割を担っている。よって,プラズマで 処理して得られた物の性質や性能の向上を図るため には,これらの粒子についても密度やエネルギー状 態を知る必要がある。

このようなプラズマの性質を表す諸量を計測する ことがプラズマ診断であり,プラズマの種類や測定 対象に応じて様々な方法がある。静電プローブ法は, 荷電粒子である電子やイオンの測定法で,荷電粒子 を直接捕捉して電流として計測する方法である。こ れは,最も基本的で,かつ広く用いられている方法 である。しかし,プローブ法は,針状の電極をプラ ズマ中に挿入して電流を計測するので, プラズマを 乱す可能性がある。それに対し,マイクロ波法,発 光分光法は,プラズマには非接触であるので,プロ ーブ法の欠点を補うために用いられている。マイク ロ波法はプラズマ中に適当な周波数のマイクロ波を 入射し,その位相のずれや反射などの現象を利用し て主に 10¹⁴cm⁻³ 以下のプラズマ電子密度を測定する のに適している。また,発光分光法は,10²⁰m⁻³以上 の高温高密度プラズマでは発光強度から電子密度測

定でき,発光粒子の密度や速度分布も測定すること ができるが,非発光粒子を観測できないことが欠点 である。それに対し,レーザー分光法は,非発光粒 子も観測もできる。また,レーザー技術の進歩によ り様々な方法が開発されており,多くの種類の励起 粒子に対して高感度の測定が可能となっている¹⁾。

放電プラズマは時間が経過するにつれて放電電極 に物質が付着するなど、プラズマ内部での現象が変 化してしまうことがある。よって、計測を行う時間 をできるだけ短時間にしななければならない。また、 粒子密度の空間分布を測定する場合など、たくさん のデータを取得しなくてはならない。したがって、 自動的にすばやくデータを取得できるシステムが必 要である。データの集録や計測機器の制御に最適な プログラミング言語として、LabVIEW がある。 LabVIEW では、テキスト行ではなくアイコンを使 用してアプリケーションを作成するグラフィカルな 言語であり、非常に簡単にデータの集録や計測器の 制御を行うことができる²。

本研究では、プラズマ診断法として比較的安価で 適用することができる発光分光法を用いた。測定対 象は水素プラズマとし、集光レンズ、分光器、光電 子増倍管を用いて、発光強度の空間分布を測定した。 測定位置を変えるためにGPIB によってプラズマ発 生装置を載せたステージを制御し、また測定データ の誤差を小さくするためにデータ集録ボードによっ て一つの測定位置でたくさんのデータを取り込んで 平均した。これらをプログラムするのに LabVIEW を用い、短時間かつ自動的に測定を行う装置を製作 し、発光分布強度を測定して測定時間や誤差につい

^{*1} 久留米工業高等専門学校電気電子工学科

^{*2} 久留米工業高等専門学校専攻科生

Copyright 2002 久留米工業高等専門学校

て検討した。

2. 発光分光法によるプラズマ診断

グロー放電によって生ずる弱電離プラズマ中では, 原子や分子は電場で加速された電子が衝突すること で高いエネルギー状態へと励起される。励起された 粒子は,すぐにエネルギーを光として放出して,す なわち自然放射が起きて下位準位へと遷移する。図 1 に,この遷移の様子を簡単に示す。

このような自然放射光を観測することで,光の波 長から粒子種の情報を得ることができ,発光強度か ら粒子密度がわかる。例えば,自然放出の過程では, 粒子が上準位から下準位に遷移するときに放出され る光子のエネルギーは次式で表される。

$$\frac{hc}{\lambda} = E_2 - E_1 \tag{1}$$

ここで,hはプランク定数,cは光速, は自然放 射光の波長, $E_2 \ge E_1$ はそれぞれ上準位と下準位のエ ネルギーである。 $E_2 や E_1$ は,粒子に固有のものであ り, を調べれば粒子種がわかる。また,観測され る光強度Iは次式で表される。

$$I = \frac{N_2 A h c}{\lambda} \tag{2}$$

N₂は励起状態の粒子密度, A は自然放出係数である。よって,自然放出光強度 I は励起状態の粒子密度 N₂に比例し,自然放出光強度を測定すれば粒子密度が求められる¹⁾。

図2に,発光分光法における発光観測系の簡略化 した図を示す。プラズマの分光計測を行うシステム は,まず集光系でプラズマからの光を集光し,分光 器で測定波長の分光を行う。そして,光電子増倍管 で電気信号に変換して観測する。観測される電気信 号の大きさは次式で与えられ,電気信号の大きさか ら発光粒子の密度を求めることができる。

$$S = N_2 V A \frac{\Omega}{4\pi} \eta G e R \tag{3}$$



図1 自然放射の過程



図2 発光観測系の簡略図

S : 信号強度[V]

N₂ : 発光粒子の密度[m⁻³]

- V : 観測体積[m³]
- A : 自然放出係数[s⁻¹]
 - :受光立体角[sr]
 - : 光電子増倍管の光電面の量子効率
- G : 光電子増倍管の電流増幅率
- *e* :電子の電荷[C]
- R : 負荷抵抗[]

3. 放電プラズマ計測装置

本研究の実験に用いた実験装置のプラズマ発生装 置部分を図3に示す。真空容器内の電極には,直径 39mm,電極間隔40mmの平行平板電極を用い,0~ 500V まで変化させることができる直流電源と直列 に電極と抵抗(10k)を接続している。真空容器内の 排気には油回転真空ポンプを使用し,ガスは水素ガ スを用いて,マスフローコントローラーにより流量 を調節して,真空容器側面より導入している。真空 計は,ピラニ真空計を使用した。本実験では,水素 ガスを流入させ(ガス流量75scem),真空容器内圧力 を400Paに設定し,直流電源の電圧500Vを印加し プラズマを発生させた。次に,プラズマ計測装置を 図4に示す。図3で発生させたプラズマの光を真空 容器の窓を通してレンズで集光する。レンズの焦点 距離は350mmである。



図3 プラズマ発生装置図



図4 プラズマ計測装置

集光した光は分光器で分光され,光電子増倍管で アナログ信号として出力される。分光器は光研工業 株式会社の SG100(スリット幅 0.5mm での分解能 4nm)を用いた。光電子増倍管は,浜松ホトニクス株 式会社の R943-02を用い,これに電圧-2000Vを加え た。光電子増倍管から出力されたアナログ信号をデ ータ集録ボードで A/D 変換し,デジタル信号に変換 して,コンピュータで自動的に値を測定した。デー タ集録ボード は,National Instruments 社製 PCI-6024E(分解能 12 ビット,サンプリングレート 200kS/秒)を用いた。また,前に述べたように真空容 器に取り付けたステージは,GPIB 制御が可能である。 LabVIEW を用い,真空容器の移動から計測までを自 動的に行い,短時間での計測を可能にした。この自 動計測装置により,電極軸方向の発光強度分布を計 測した。この計測装置の背景光は 0.04mV であった。 レンズが集光する光は, プラズマからの光だけでな く,外部からの光も含まれる可能性があり, プラズ マを発生させていない状態での計測値 0.04mV を背 景光として測定結果から差し引いた。

発光強度の空間分布は,電極間に発生させたプラ ズマを電極軸方向に真空容器ごと移動させて,発光 強度の観測場所を変えて測定した。本研究の実験で 使用した真空容器は電極間 40mm で 0.5 mm 間隔で 80 点の測定を行った。本計測装置は,電極軸方向へ の真空容器の移動と,信号強度の計測を自動的に行 うものである。フローチャートを図5に示す。

プログラムでは,以下の手順で測定を行う。

- サンプル数,測定距離,測定間隔などの諸条件を 入力する。
- 2) 発光信号強度を測定し、そのデータを配列に格納 する。
- 3) 真空容器を測定間隔に相当する距離移動させる。
- 4) 2), 3)を測定距離分移動するまで繰り返す。
- 5) データをグラフにして画面に出力するとともに, ファイルにデータを保存する。

2)の発光信号強度測定では,光電子増倍管で増幅 した信号をデータ集録ボードで A/D 変換し,パソコ ンに取り込んでその信号を 1,000 回計測して平均を 求めた。真空容器を動かすためのステージは,ステ ッピングモータを搭載しており,GPIB 制御が可能で ある。したがって,パソコンからのコマンドをステ ージコントローラが受信し,その情報に従いステー ジのステッピングモータを駆動させ真空容器を移動 させている。図 6,図7 に自動計測システムのフロ ントパネルと,ダイアグラムの一部を示す。



図5 自動計測のフローチャート



図6 自動計測システムのフロントパネル



図7 自動計測システムのダイアグラム

4. 実験結果及び考察

4.1 測定条件

真空容器内の圧力を 400Pa にし,水素ガスを流入 させ(ガス流量 75sccm),直流電源電圧 500V を印加 し,真空容器内にプラズマを発生させた。水素原子 のバルマー (H)線(波長 656nm)の発光強度分布 を計測した。自動計測装置により,真空容器を電極 間 40mm を 0.5mm 間隔で動かし,波長 656nm の電 極軸方向の発光強度分布を計測した。

本計測システムにおいて,ステージのステッピン グモータの駆動速度は 7mm/秒,A/D 変換のサンプ リングレートは 200kS/秒が上限である。

この条件で一つの測定点でのサンプル数を変化さ せて測定して得られた計測に要した時間と標準偏差 すなわち誤差を,表1に示す。サンプル数が大きく なるほど,計測する時間が長くなるが,誤差は小さ くなっている。

サンプル数による波形の違いを図8に示す。サン プル数が少ないときは誤差が大きく,測定波形が乱 れている。また,データ集録ボードのA/D変換の分 解能は電圧最大値1mV,最小値-5mVを12ビットで 変換するので1.47 µV以下と非常に小さく,A/D変 換時の誤差は無視できると考えられる。サンプル数 1,000以上の誤差は5%未満であり,粒子密度を導く のに影響はない。しかし,測定時間を見るとサンプ ル数10,000以降測定時間が急激に増えていく。よっ て,サンプル数1,000が好ましい値であると考えら れる。

表1	サンプ	ル数の変化は	こよる測定	時間及び偏差
----	-----	--------	-------	--------

サンプル数	計測時間[秒]	標準偏差/平均値
10	18	0.1464
100	18	0.0933
1,000	19	0.0433
10,000	23	0.0144
100,000	65	0.0075

4.2 窓と電極による受光立体角の変化

このプラズマ計測装置は,真空容器の丸い窓から プラズマの発光を集光するのだが,真空容器を移動 させるとレンズの集光できる面積が真空容器の窓に よって図9のように小さくなり,受光立体角が削ら れていく。また,電極付近を測定する場合,真空容 器の窓よりも先に電極によって受光立体角が削られ る。このために,発光信号強度を測定位置に応じて 補正しなければならない。



図8 サンプル数の違いによる信号強度分布の比較



図9 窓とレンズによる受光立体角の変化

しかし,図9は,窓によって受光立体角が削られ る場合にのみ適用される。よって,受光立体角が削 られない範囲,窓によって削られる範囲,電極によ って削られる範囲,のように3つの場合に分けて考 える必要がある。

受光立体角が削られない範囲, すなわち窓とレン

ズが重なるまでの受光立体角の比率 ²/ は1 となる。次に,窓によって削られる場合,削られた 円の面積は次式で表される。

$$S = r^2 \left(\theta - \frac{1}{2} \sin 2\theta \right) + r'^2 \left(\pi - \theta' + \frac{1}{2} \sin 2\theta' \right) \quad (4)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{r^2 - r'^2 + d^2}{2rd}$$
(5)

$$\theta' = \pi - \cos^{-1} \frac{r'^2 - r^2 + d^2}{2r'^2 d}$$
(6)

r:窓の半径 34[mm]

- r':レンズの半径 27.5[mm]
- d:窓の中心軸からレンズ中心軸までの距離[mm]

S: レンズと窓の重なり部分の面積[mm²]

この式によって求められた真空容器の窓によって 削られた受光立体角を ²,削られていないとき の受光立体角を としてその比率 ²/ は計 算される。ここで, ², を求める式は,

$$\Omega = \frac{\pi r'^2}{F^2} = 0.019[sr]$$
(7)

$$\Omega' = \frac{S}{F^2} \tag{8}$$

で表される。ここで F はレンズの焦点距離 350[mm] である。

次に電極により削られる場合を図 10 に示す。式 (7),(8)からわかるように受光立体角の比は面積の 比であるので,レンズの面積と電極によって削られ たときの面積の比より導くことにした。電極により 削られた場合の面積は、図 10 より次式で求められる。

$$S' = R^2 \pi \frac{\pi + 2\varphi}{2\pi} + yR\cos\varphi \tag{9}$$

ここで, y は測定位置から電極までの距離, また R はレンズ半径, 焦点距離, 電極半径から導き出され



図10 電極による受光立体角の変化

る電極端での受光円の半径である。

以上の3つの場合を考慮して受光立体角を計算し た結果を図11に示す。これより受光立体角が削られ ない範囲は,測定位置が絶対値6.6[mm]以下の範囲, 電極によって受光立体角が削られる範囲は,測定位 置が絶対値19.5[mm]以上の範囲,その間が窓によ って受光立体角が削られる範囲であることがわかる。

以上に述べた受光立体角の補正式を自動測定のプログラム中にあらかじめ組み込んでおくことで,あらかじめ補正された結果が瞬時に得られる。図12に受光立体角の補正を行った発光分布強度グラフを示す。





5. まとめ

発光分光法を用いて放電プラズマからの発光強度 分布を測定するための自動計測装置を製作し,水素 ガスの直流放電(電圧 500V,抵抗 10k ,電極間隔 40mm,電極直径 39mm,ガス圧力 400Pa,流量 75sccm) により生成したプラズマに適用した。その結果,電 極間 40mm で 0.5mm ごとの発光強度分布を1点あた りのサンプル数 1,000 で,計測時間 20 秒程度,4% の誤差内で測定を可能にした。さらに,窓と電極に よって光が遮られるために変化する受光立体角につ いて考慮し,その補正式をプログラム中に組み込み, 補正した結果を自動的に求めるようにした。

参考文献

出版センター

- 2) 井上泰典:『LabVIEW グラフィカルプログラム』 P103,108 森北出版株式会社
- 1) 堤井信力・小野茂:『プラズマの分光計測』P166 学会

(2002年11月25日 受理)

~~*~*~*~*~*~*~*~*