

ラングミュアプローブ特性からのデジタル処理による プラズマパラメータの自動計測

大庭 巧*・篠田裕一**・崎山智司***・福政 修***

Automatic Measurement of Plasma Parameters by Digital Data Processing from Langmuir Probe Characteristics

Takumi OHBA, Yuuichi SHINODA, Satoshi SAKIYAMA and Osamu FUKUMASA

Abstract

We have developed an automatic measurement system of plasma parameters (i.e. electron temperature T_e , space potential V_s , floating potential V_f , electron density N_e) including the electron energy distribution function (EEDF) by means of the digital data processing from Langmuir probe characteristics. In order to overcome the problems of conventional probe analysis, this system has an efficient algorithm not only for smoothing the V_p - I_p characteristics but also for determining T_e reasonably. It is also confirmed experimentally that this system enables us to determine plasma parameters without artificial errors in a rapid time.

1. はじめに

現在、プラズマ診断の一つとしてラングミュアプローブ法があり、これによりプラズマの特徴を表わすプラズマパラメータ (電子温度 T_e , 電子密度 N_e , 空間電位 V_s , 浮遊電位 V_f , エネルギー分布関数 $F(V)$) を求めることが広く行われている。

このプローブ法の特徴としては、プローブのおかれた位置でのプラズマパラメータが測定されるので、空間的分解能 (プローブの幾何学的大きさ程度) に優れ、手法として簡便であること等があげられる。しかし、実際には測定されたプローブ特性を解析してはじめてプラズマパラメータが得られる、プラズマの擾乱及び A/D 変換時には離散的雑音が生じること、計測後のデータ処理に時間がかかりすぎることなど問題点もいくつか指摘されている。それをまとめると、

- (1) 波形の雑音 (電子電流の雑音, A/D 変換時のプローブ信号の数値の不連続による雑音) の処理問題
 - (2) データ処理の手間が煩雑で、時間がかかり、人為的誤差が生じる
- のように表わされ、是非とも解決しなければならない問題である。

そのため、近年、これらの問題点の改善策として、コンピュータを用いて計測及び処理を行う種々の方法が提案されている¹⁻⁶⁾。しかし、プラズマパラメータの決定精度が良ければデータ処理に時間がかかり⁷⁾、また逆にデータ処理に時間がかからないですむと、プラズマパラメータの決定精度が悪くなる⁸⁾というようにそれぞれの方法には一長一短がある。

本研究では、データ処理時間の短縮、人為的誤差の削除を目的とし、プラズマパラメータ及び電子エネルギー分布関数の自動計測システムの開発を行った。そして、波形の雑音除去には区間変化移動平均法を用い、データ処理の煩雑さ、人為的誤差の削減にはコンピュータによるデジタル処理で、これらの問題を改善することを試みコンピュータプログラムを作成した。更にこのシステムを低温プラズマに適用し、その妥当性並

*大学院電気工学専攻

**電気工学科 (現 新日本製鉄)

***電気電子工学科

びに有効性を確認した。以下にその結果を述べる。

なおここでは、電子温度 T_e 、電子密度 N_e 、空間電位 V_s 、浮遊電位 V_f をプラズマパラメータと呼ぶことにし、電子エネルギー分布関数と区別して扱っている。

2. 実験装置

2.1 プラズマ源

Fig. 1 に実験装置の概略⁷⁾を示す。放電容器は直径162mm、長さ300mmのステンレス製円筒型容器である。また、容器外周にはフェライト永久磁石(表面磁束密度約1 KGauss)を並べ、16極のカusp磁場を構成しプラズマを閉じ込めている。

放電は、この容器を陽極とし、熱陰極(タングステン、直径0.5mm、長さ100mmを2本直列に接続)との間の直流アーク放電により水素プラズマを生成している。測定は、放電電圧 $V_d=80V$ 、放電電流 $I_d=2A$ 一定とし、ガス圧力 $P=1 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3} \text{Torr}$ の範囲でプラズマを生成し行った。プラズマパラメータ及び電子エネルギー分布関数の測定は、軸方向に可動なラングミュアプローブにより行った。

2.2 プラズマパラメータの自動計測システム

Fig. 2 にプラズマパラメータ自動計測システムの概略を示す。このシステムは、まず Function Generator から発生した1 Hzの正弦波を Amp.により $\pm 20V$ まで増幅し、この正弦波電圧をプローブ電圧 V_p としてプローブに印加する。このときプラズマからプローブに流れる電流(プローブ電流)を I_p とし、 I_p 並びに V_p を12bitのA/D変換器(TR9403)でデジタル値(1024点)に変換し、GP-IBを通してコンピュータ(PC-9801

RX, CPU 80286, クロック周波数 12MHz)に取り込み、プローブ特性(V_p-I_p 特性)を得る。

2.3 電子エネルギー分布関数測定回路

電子エネルギー分布関数 $F(V)$ は、プローブ電流 i_p の二次微分 i_p'' を測定し、ドルベスティン法⁸⁾による次の式から求められる。

$$F(V) = 4 \cdot V^{1/2} \cdot i_p'' / \{N_e \cdot (2e/m)^{1/2} \cdot e^2 \cdot S\}$$

ただし、 $V = |V_p - V_s|$ (V_p はプローブ電圧、 V_s は空間電位)、 N_e は電子密度、 S はプローブ表面積、 e 、 m はそれぞれ電子の電荷、質量を表わす。

Fig. 3 に電子エネルギー分布関数測定回路を示す。この回路を用い、交流重畳法により i_p'' を求める。

まず、Function Generator から発生した0.01Hzの正弦波を Amp.により $\pm 45V$ まで増幅し、これと直列に負の直流電圧を加えて $-80V \sim +10V$ まで可変とし、これをプローブ電圧 V_p とする。このプローブ電圧 V_p に、発振器(OSC.)で $V_{p-p}=2V$ 、 $f=1kHz$ の正弦波交流をコイル(T)を介して重畳する。この時、測定により得られる i_p の二次高調波成分をロックインアンプにより位相検波することで i_p'' を得ている。この i_p'' と V_p を12bitのA/D変換器(TR9403)でデジタル値(1024点)に変換し、GP-IBを通してコンピュータ(PC9801 RX, CPU 80286, クロック周波数 12 MHz)に取り込む。

3. デジタルデータ処理

プラズマパラメータの求め方⁹⁾は、まず Fig. 4 に示す V_p-I_p 特性からイオン電流 I_{is} の接線①を引き、電子電

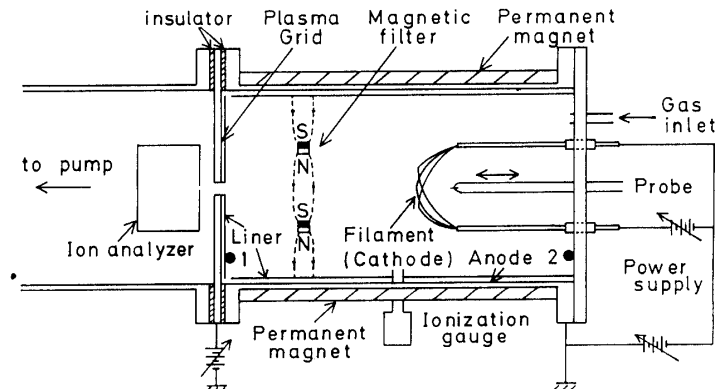


Fig. 1 Schematic diagram of the multicusp plasma source equipped with the movable magnetic filter and the plasma grid.

流 $I_e (= I_p - I_{is})$ を求める。更に、この I_e の対数を求め接線②と接線③を引き、その交点の電位から空間電位 V_s 、接線③の傾きの逆数から電子温度 T_e を求める。この手順は普通手動処理によって行われる。

我々は、これをデジタル技術によるコンピュータプログラムで自動的に算出する方式に取り組んだ。その方式でもっとも重要となる項目は、プローブ特性の雑音除去と電子温度の決定である。

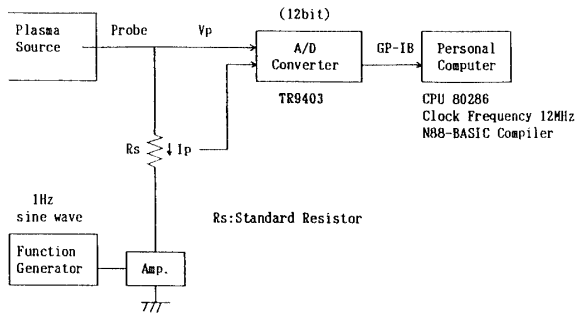


Fig. 2 Automatic measurement system of plasma parameters.

ここでは、まずプログラムのフローチャートについて説明し、次に問題となる雑音除去と電子温度の決定について述べる。

3.1 フローチャート

Fig. 5 にプラズマパラメータの自動計測システムのデータ処理のフローチャートを示す。処理の手順は次の通りである。

1) データの入力

A/D 変換器から取り込まれた V_p-I_p 特性のデータを入力する。

2) データの雑音除去

測定されたデータの雑音を区間変化移動平均法で除去する。

3) 接線①を求める

V_p-I_p 特性のデータをもとに最小二乗法よりイオン電流 I_{is} を表わす接線①を引き、電子電流 $I_e (= I_p - I_{is})$ を求める。

4) I_e の対数の計算

電子の振舞がマクスウェル分布であると仮定した場合、

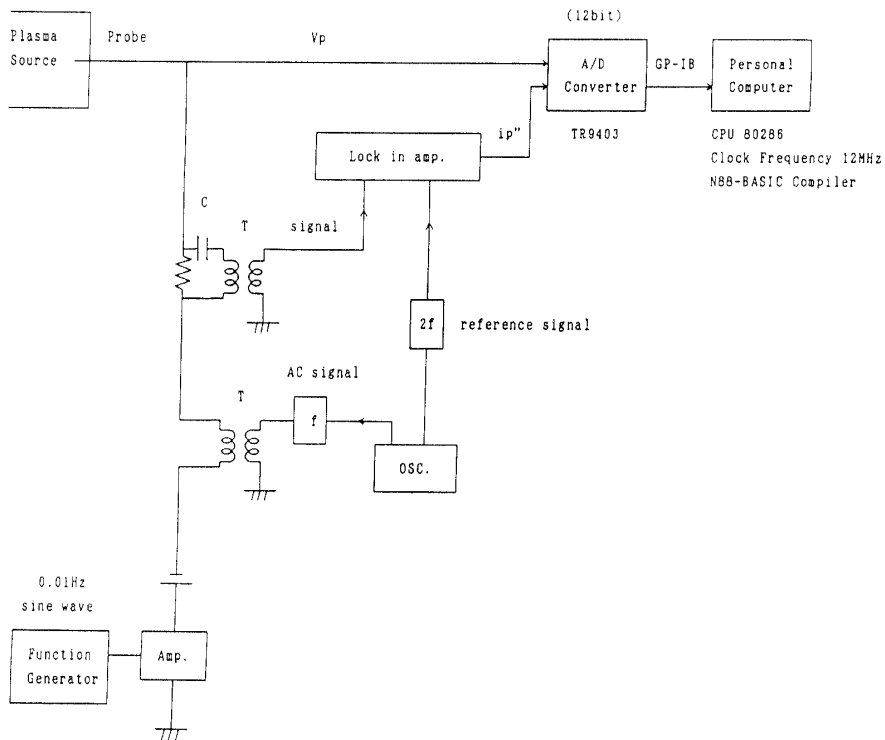


Fig. 3 Block diagram of the probe circuit measuring electron energy distribution function.

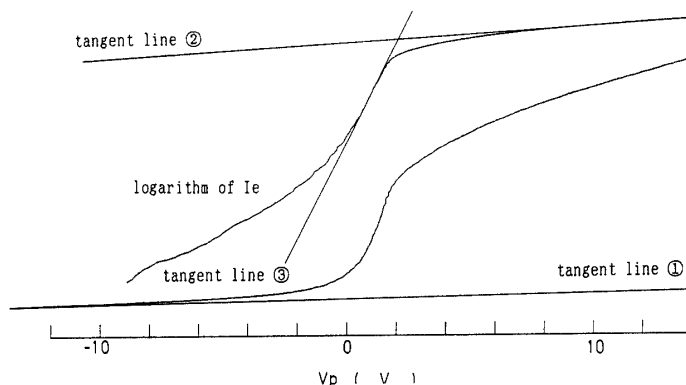


Fig. 4 A series of the data processing.

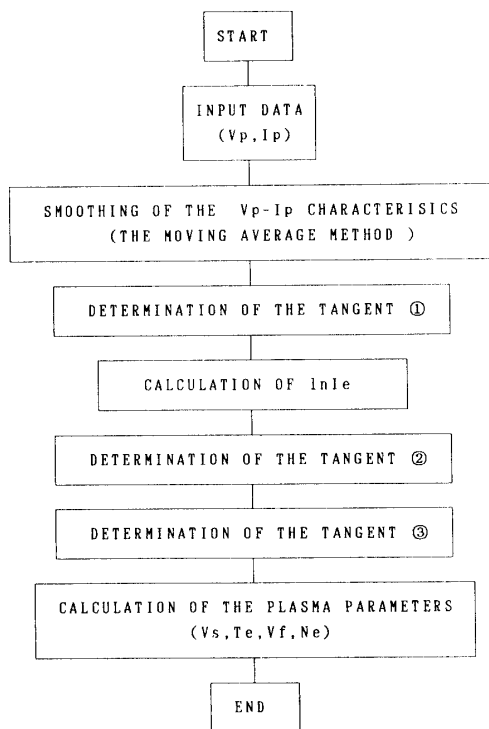


Fig. 5 Flow diagram of the probe data processing.

$$I_e = I_{e0} \cdot \exp(-eV/kT_e)$$

(I_{e0} : 電子飽和電流, k : ボルツマン定数)

が減速電界領域で成り立つ。従って、両辺の対数をとると、

$$\ln I_e = \ln I_{e0} - eV/kT_e, \text{ ただし } V = V_p - V_s$$

となり、この式の傾きから T_e が求まる。よって、 I_e の

対数を計算する。

5) 接線②を求める

電子飽和電流の接線である接線②を I_e の対数のデータをもとに最小二乗法により求める。

6) 接線③を求める

電子温度 T_e を決定する接線③を I_e の対数のデータをもとに最小二乗法により求める。

7) プラズマパラメータの計算

接線②と接線③の交点の電位から空間電位 V_s , 接線③の傾きから電子温度 T_e が求まり、電子密度 N_e は、次の式から求まる。

$$I_{e0} = 1/4 \cdot N_e \cdot e \cdot (8kT_e/\pi m)^{1/2} \cdot S$$

3.2 区間変化移動平均法

測定されたデータには、通常電子電流の雑音、A/D変換時のプローブ信号の数値の不連続による雑音などの様々な雑音が混入し、データ処理を困難にしている。従って、その雑音を除去し、データ処理をスムーズに行なう必要がある。

そのため、我々は区間変化移動平均法を提案し、雑音除去を試みた。この区間変化移動平均法の原理図を Fig. 6 に示す。まず、測定された V_p - I_p 特性の一次微分 ip' をとる。そして、波形の変化 (ip') が小さいところ (A) では平滑する点を多くとり、波形の変化 (ip') が大きいところ (B) では平滑する点を少なくとり雑音除去を行う。

この区間変化移動平均法が、一般に用いられている他の平均法とどのように違うかを比較するために、

- 1) 平滑する点数が一定である単純平均法
- 2) 波形の変化量に応じて平滑する点数を変える区間変化移動平均法

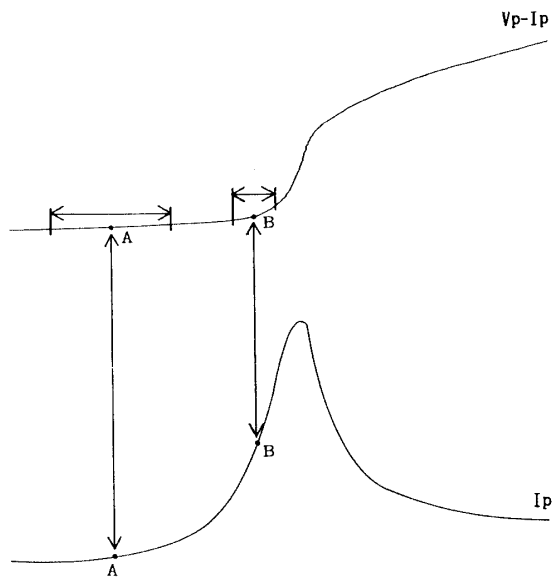


Fig. 6 Fundamentals of the moving average method.

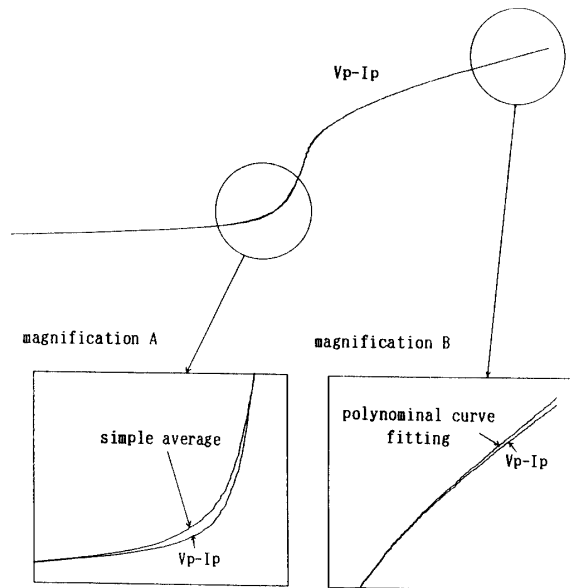


Fig. 7 Comparison between some average methods.
 magnification A: simple average and measured V_p-I_p
 magnification B: polynomial curve fitting and measured V_p-I_p

3) 測定波形が多項式曲線で表わせると仮定して多項式で近似する多項式適合法¹⁰⁾の3つの平均法について平滑化を試み、比較を行った(平滑化点数は12点)。その処理精度の結果を Fig. 7

Table. 1 The time required for averaging data processing (12 data points).

simple average (s)	moving average (s)	polynomial curve fitting (s)
1	2	4

に、処理時間の結果を Table. 1 に示す。

Fig. 7 からわかるように、単純平均法では、波形の立ち上がり付近に歪みが生じ、電子温度の決定に影響を与える。また、多項式適合法(再帰法¹⁰⁾を使用では波形の尾部に歪みが生じ、空間電位の決定に影響を及ぼす。処理精度においては、区間変化移動平均法が最も良い。一方処理時間に関しては、単純平均法、区間変化移動平均法が速い。以上から、処理精度、処理時間の点で最も優れた区間変化移動平均法を用いた。

従って、この方式を適用することにより、雑音除去処理を速く、精度よく行うことが実現でき、区間変化移動平均法は、プローブ特性の雑音除去に最適であると考えられる。

3.3 電子温度の決定法

電子温度 T_e の決定とは、つまり Fig. 4 における接線③の決定である。接線③の決定は、プラズマパラメータの決定に大きく影響を及ぼし、処理の中で最も重要であるといっても過言ではない。

この接線③の決定法は、これまでの研究例でいくつか報告されている。その一つは、市販されているデータ処理のプログラム⁵⁾である。それによると、接線③は人間が目で見ても直線にのるデータの範囲を判断して決定するものである。しかし、この方法では初心者の人為的ミス等、個々の人間による人為的誤差を含んでしまう。

また、最小二乗法と分散の値によって接線③を決定する例¹⁾では、プローブ電圧 V_p が負になる方(減速電界領域)へ最小二乗するデータの数を1点ずつ増やしていき、それぞれのデータの点数の時の接線を探し、その接線と I_e の対数との分散が最も小さくなる時の接線を接線③としている。この方法では、接線③の決定精度は良いが、分散と最小二乗の計算を繰り返すため処理時間がかかるという欠点を持っている。

更に、プローブ電流とその一次微分との比から電子温度を求める方法²⁾も提案されているが、精度の点で劣る。

そこで、本処理では今までの手動による処理の経験から接線③にのるデータの電圧範囲は最低でも1Vはあるとして、減速電界領域付近での直線にのるデータから最小二乗法により予め接線③を引いておく。そして、より正確に接線③を求めるために、最初求めた接線③を補正して最終的な接線③を決定する方式をとった。

この方式により、正確で、処理時間が極めて短く、また人為的誤差の少ない接線③を求めることができた。

4. 結果と検討

本自動計測システムから算出されたプラズマパラメータの精度、データ処理時間について手動処理と比較して報告する。また、電子エネルギー分布関数の自動計測結果についても報告する。

4.1 プラズマパラメータ

Fig. 8にプラズマパラメータの処理結果の一例を示す。放電条件は、 $V_d=80V$ 、 $I_d=2A$ 、 $P=1.4mTorr$ 、プラズマグリッドからの距離は $L=15cm$ である。この例で熟練者の手計算（手動計測）の結果を基準として自動計測の結果との差の割合を計算すると5%になっている。更にプローブ電流 I_p が $0.5mA \sim 30mA$ の範囲での測定結果については、 $\pm 8\%$ 以内の値になっていることがわかっている。

ここで、これまでの手動による処理結果の信頼度は

人為的誤差から二桁程度であり、上で述べた $\pm 8\%$ 以内の誤差は問題にはならない。従って、プラズマパラメータの自動計測の結果と手動計測の結果にほとんど差はなく、十分精度の良いものだといえる。

処理時間については、自動計測処理時間が約15秒、手動計測処理時間が約6～8分、3.2節で述べた最小二乗法と分散により接線③を求める方法は約2分である。このことから、自動計測処理時間は、これまでの手動計測処理時間の1/20以下、3.2節で述べた最小二乗法と分散から接線③を求める方法による処理時間の1/8になっており、大幅なデータ処理時間の短縮が実現できた。

また、低密度、低温では波形の立ち上がりの変化が大きくなり、接線③を求める上で手動計測処理が困難となる。そのときの例をFig. 9に示す。放電条件は、 $V_d=80V$ 、 $I_d=2A$ 、 $P=2.4mTorr$ 、 $L=1cm$ である。この例は接線③の傾きが大きく、手動処理時には誤差が大きくなる。しかし、この場合に対してもプログラムは適切に対応している。

従って、このプログラムは精度の点、データ処理時間の点から本プラズマ源を用いた低温プラズマに対して有効であるといえる。

4.2 電子エネルギー分布関数

プラズマ中の粒子の状態をみる上で電子エネルギー分布関数の測定は欠かせない。そこで、2.3節で述べた

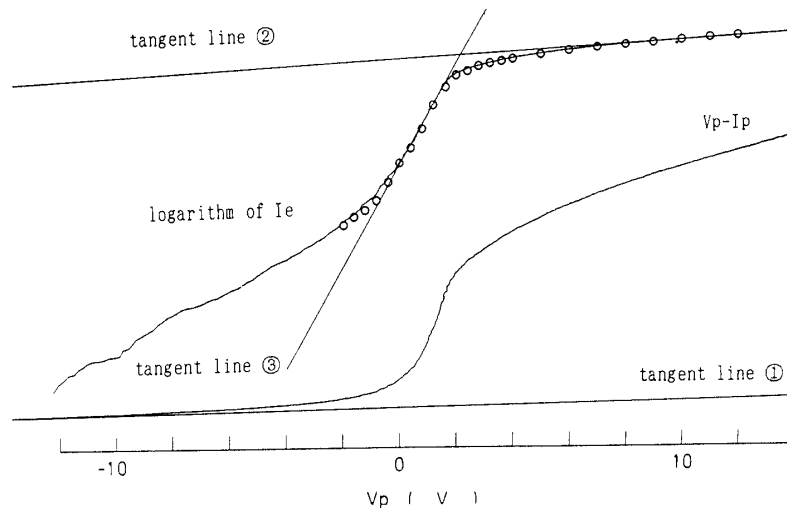


Fig. 8 Comparison between automatic data processing result and manual data processing result (typical example). solid line: automatic data processing result. ($V_s=2.15(v)$, $T_e=1.13(ev)$) plot: manual data processing result. ($V_s=2.04(v)$, $T_e=1.04(ev)$)

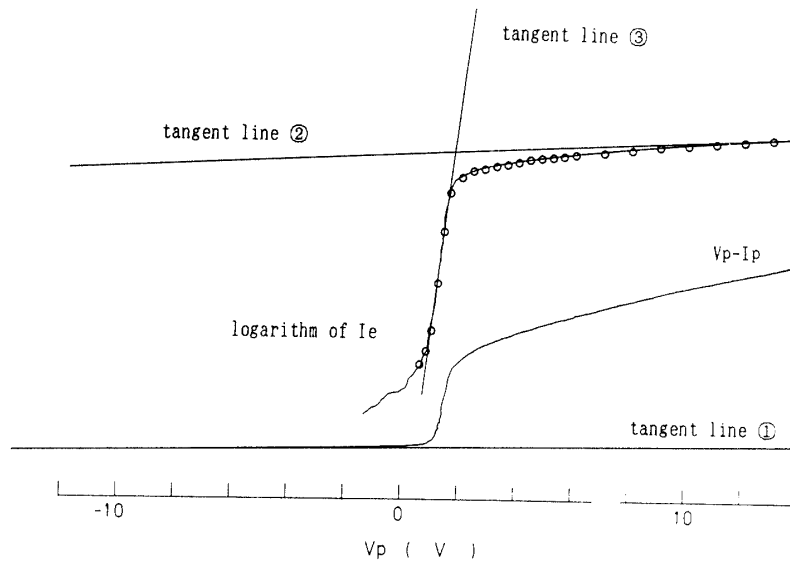


Fig. 9 Comparison between automatic data processing result and manual data processing result (the example where the slope of tangent ③ is steep). solid line: automatic data processing result ($V_s=1.79(v)$, $T_e=0.24(ev)$). plot: manual data processing result ($V_s=1.65(v)$, $T_e=0.24(ev)$).

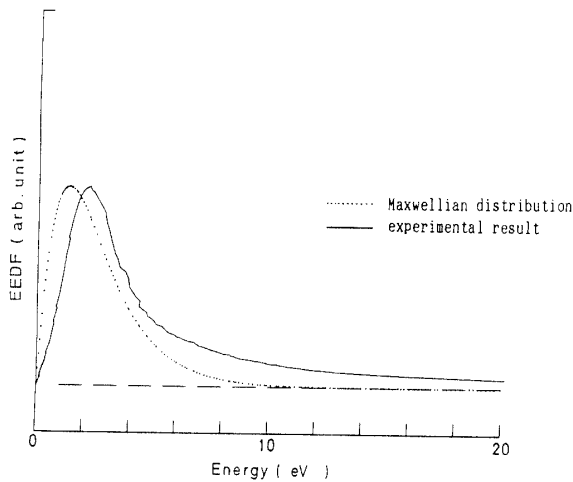


Fig. 10 Electron energy distribution function of H_2 plasma.
solid line: experimental result.
dotted line: Maxwellian distribution of $T_e=1.32ev$.

自動計測用測定回路で求めた電子エネルギー分布関数の一例を Fig.10に示す。放電条件は、 $V_d=80V$, $I_d=2A$, $P=1.4mTorr$, $L=13cm$ である。実線は自動計測処理結果であるが、参考のためにプローブ特性より得られた電子温度 $T_e=1.32eV$ をもとにして求められるマクスウェル分布を点線で示した。このマクスウェ

ル分布は、次式より求めている。

$$F(V) = \alpha \cdot V \cdot \exp(-V/kT_e)$$

V はエネルギー (eV), α は測定した電子エネルギー分布関数のピークの高さにマクスウェル分布のピークの高さをあわせて求めている。

この自動計測処理結果とマクスウェル分布を比較すると、自動計測処理結果の波形のピークの方がマクスウェル分布の波形のピークよりも高エネルギー側にあり、両者は一致していないことがわかる。これは、低エネルギー電子は、プラズマ中の再結合によって失われるので測定した電子エネルギー分布関数はわずかに高エネルギー側にずれるためではないかと考えられる。また、低温低密度のプラズマでは、実際に測定された電子エネルギー分布関数はマクスウェル分布より高エネルギー側にシフトすることが確認されており¹¹⁾、我々の求めた電子エネルギー分布関数が正しいことを示唆しているといえる。

5. おわりに

コンピュータを用いたプローブ法によるプラズマパラメータ及び電子エネルギー分布関数の自動計測システムの開発を行った。

以下にその結果を要約する。

(1) 区間移動平均法によりプローブ特性の雑音除去処理を精度よく行うことが実現できた。

(2) この自動計測システムのデータ処理時間は、
・手動によるデータ処理時間の1/20以下
・最小二乗法と分散を用いた方法による処理時間の1/8

となっており、データ処理時間の大幅な短縮が実現できた。

(3) コンピュータを用いたデジタル処理によりデータ処理の煩雑さを軽減し、初心者的人為的ミス等、人為的誤差を含まずに計測処理ができる。

(4) マクスウェル分布との比較を踏まえて、電子エネルギー分布関数測定についてその正しさが確認された。

以上、プラズマパラメータ、電子エネルギー分布関数測定に対して、この自動計測システムが十分有効で、かつ妥当性を持っているといえる。

謝 辞

この研究テーマに関心を持って頂くとともに御討論頂いた本学の内藤裕志助教授に感謝する。また、実験に御協力頂いた大学院生酒井広隆君（現 中国電力）、細田雅之君、聴講生の高木英幸君に感謝する。

参 考 文 献

- 1) F. Fujita and H. Yamazaki, Jpn. J. Appl. Phys. 27, 1477(1988).
- 2) M. B. Hopkins and W. G. Graham, Rev. Sci. Instrum. 57, 2210(1986).
- 3) M. B. Hopkins and W. G. Graham, Rev. Sci. Instrum. 58, 475(1987).
- 4) K. F. Shoenberg, Rev. Sci. Instrum. 49, 1377(1978).
- 5) Plasma Probing System(PMS-8800),日本高周波社製.
- 6) K. Shimizu and H. Amemiya, J. Phys. E. 9(1976).
- 7) 福政, 内藤, 酒井, 高木: 電気学会プラズマ研究会資料 EP-91-9(1991).
- 8) M. J. Druyvesteyn: Z. phys, 64. 790(1930).
- 9) 堤井信力: プラズマ基礎工学, 内田老鶴圃(1986) P.121.
- 10) 南茂夫: 科学計測のための波形データ処理, C Q 出版 (1986) P.60.
- 11) J. E. Heidenreich III and J. R. Paraszczak, J. Vac. Sci. Technol. B6, 288(1988).

(平成3年4月15日受理)