直熱形フィラメントによる 2 電子温度放電プラズマ

正 員 山 住 富 也 (中部大)

正 員 今井田 隆 (中部大)

准 員 加 藤 法 之 (中部大)

正 員 池 沢 俊治郎 (中部大)

Two-Temperature Electron Discharge Plasma by Direct Heated Filaments

Tomiya Yamazumi, Member, Takashi Imaida, Member, Noriyuki Kato, Associate,

Shunjiro Ikezawa, Member (Chubu University)

This paper presents the experimental verification on two-temperature electron discharge plasma in a bucket type plasma device. As long filaments (30 cm) are used, there is some point at one side on filaments where the plasma potential V_{sp} is equal to the filament potential ϕ_F . The cold electrons are emitted from the points. At the other side on the filaments, the primary electrons accelerated by $V_{sp}-\phi_F$ ionize the gas atoms. The hot electrons are produced. The density ratio $N(=N_{eh}/N_{ec})$ can be controlled in a wide range of 2.5~17 by both filament current and discharge current. The condition for the two-temperature electron discharge plasma is obtained in the present device: $V < V_{sp} < V - V_F$ and $V_{sp} - V > \text{ionization voltage}$ (V : the discharge voltage, V_F : the filament voltage).

キーワード：2 電子温度プラズマ，直熱形フィラメント，放電電流，エミッション，プラズマ電位

1. ま え が き

近年，核融合では加熱を続けていくと，プラズマが 2 電子温度状態（すなわち二つのマクスウェル分布の重ね合せ）をもつことが明らかにされている。慣性核融合の場合，高温電子（電子温度 $T_h=10 \text{ keV}$ ）と，衝突などでエネルギーを損失した低温電子（電子温度 $T_c=0.1\sim 1 \text{ keV}$ ）からなる二つの異なったピークをもつ分布状態が生じる。2 電子温度プラズマの生成について従来の研究を挙げると，西田らは高周波を用いて高温電子を生成し，温度比 ($T=T_h/T_c$) が高く，密度比 ($N=N_{eh}/N_{ec}$) が 1 より小さい 2 電子温度プラズマを生成した⁽¹⁾。山住らはプラズマ基礎実験の必要性から，ダブルプラズマ (DP) 装置で，密度比が 1 より大きい 2 電子温度プラズマを生成した⁽²⁾。プラズマパラメータの処理能率を上げるため，プローブ信号をシグナルアナライザ（岩通 2100 A）とマイコンを用いてリアルタイム処理した。生成機構は，放電

による高温電子（ソース側）と，放電電圧がプラズマ電位に近い場合フィラメントからエミッションによる低温電子（ターゲット側）を同時に発生させ，放電電流とフィラメント電流で密度比制御を行った。すなわち，ソース側で高温電子を，ターゲット側で低温電子を生成し制御するシステムを開発した。また，その際 DP 装置でなくとも片方のみの放電で，2 電子温度プラズマが生成できることを一部述べた。

そこで本研究では，更にその詳細を調べるため，永久磁石で組んだ一つのバケットタイプの放電室に長いフィラメント（約 30 cm）を張り，フィラメント電圧を大きくとった。このようにすることにより，放電とフィラメントからのエミッションの同時観測を明瞭にでき，2 電子温度プラズマの放電条件を測定し，一つの放電装置でも放電電圧がプラズマ電位に近く，フィラメント電圧が大きい場合は，2 電子温度放電プラズマとなることを検証した。すなわち，プラズマ電位とフィラメント電位との関係と，放電およびエミッシ

ンとの関係をモデル化し、実験で検証した。

2. 実験装置とプローブ処理

〈2・1〉 実験装置 図1に実験装置および測定系を示す。1mφ×2mのチャンバ内を、油拡散ポンプ、油回転ポンプおよび補助ブースタで 2×10^{-6} Torrまで真空にする。ガスはArを用い、ガス圧は $P=1.5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-5}$ Torr一定である。チャンバの中心に永久磁石をステンレス鋼で閉じたパイプで組んだきょう体40 cmφ×70 cm (図2)を設置し、チャンバと

図1 実験装置 (結線1, 2は切換え)
Fig. 1. Experimental setup.

図2 放電きょう体
Fig. 2. Magnet frame sealed by stainless steel pipes.

共にアースする。きょう体内には、1%トリウム入りタングステンのフィラメント(1.5φ)6本をそれぞれ約30 cmの長さで張り、フィラメント電流 $I_F=13 \sim 15$ A (フィラメント電圧 $V_F=34 \sim 37$ V)程度を印加する。そして、きょう体とフィラメント間に放電電圧 V を加え($V=40 \sim 70$ V)、放電状態にしプラズマを生成する。熱電子(低温電子)を放出させるには、フィラメント電位がプラズマ電位と等しいことが期待される。また、放電により高温電子を生成するには、プラズマ電位とフィラメント電位の差が十分大きいことが期待される。 V_F の接続法は2種類あり、 V に対して逆に電圧を与える(V を V_F が打消す接続法)場合(図中1の結線)と、更にフィラメントを負の電位に沈める場合(V と V_F が相加する接続法)である(図中2の結線)。

〈2・2〉 プローブ処理 図3は実験で得られた2電子温度プラズマのプローブ特性の一例である。掃引発振器を用い10秒間周期でのこぎり波形をプローブに印加しプローブ電流をシグナルアナライザに記憶させ、GPIBインタフェースにてマイクロコンピュータ処理すると図3が得られる。飽和する直前に低温電子が流入し、二つ目の傾きが現れる。これらは仮定として二つのマクスウェル分布の重ね合せと考えられるので、上の曲線から高温電子の傾きに当たる直線部分を引き、下の曲線すなわち低温電子の部分のみを取出す。イオン電流は、イオン飽和電流に接線を引き、この処理の初めに差し引いておく。これらの直線およびそのこう配は、マイクロコンピュータで実測値に適合させることができる。

これらの直線の傾きは $(kT_h)^{-1}$ および $(kT_c)^{-1}$ にそれぞれ比例することから T_h , T_c がほぼ正確に求まる。

図3 プローブ信号のマイクロコンピュータ処理
Fig. 3. Micro computer analysis of probe characteristics.

次に、電子密度を求める。図3で電子飽和状態に達する点における電位 V_{sp} をプラズマ電位、 I_{hs} および I_{cs} をそれぞれ、高温電子と低温電子の飽和電流とすると電子密度はそれぞれ

高温電子の密度

$$N_{eh} = 4I_{hs} / \{eS\sqrt{8kT_h/\pi m}\}$$

低温電子の密度

$$N_{ec} = 4I_{cs} / \{eS\sqrt{8kT_c/\pi m}\}$$

m : 電子の質量 9.11×10^{-31} kg

S : プローブの面積 28×10^{-6} m²

となる。従って、温度比 $T(=T_h/T_c)$ および密度比 $N(N_{eh}/N_{ec})$ が求められる⁽²⁾。添字 h, c は、それぞれ hot(高温)電子および cold(低温)電子を示す。

3. 放電モデルとその検証

フィラメントを図4のように1本の抵抗と考えると、フィラメント自身の電圧降下 V_F のため、両端では電位差が生じている。結線1(または2)では、図4(b)[または図4(c)]のように、フィラメントの左端は $V - V_F$ (または V)、右端は V (または $V + V_F$) であり、その左側にフィラメント電圧 ϕ_F がプラズマ電位 V_{sp} と等しい部分があり、右端側では放電を発生している。プラズマ電位とフィラメント電位がほとんど同じになるような左端の場合、放電せずに低温電子をエミッションする。また、プラズマ電位とフィラメントの電位の差が十分大きい右端の場合に放電し、高温電子を生成し続ける。特に放電電圧 V を

図4 2電子温度放電プラズマモデル
Fig.4. Model of two-temperature electron discharge plasma.

低くし、フィラメント電圧を大きくすると、30 cmの長いフィラメントに、放電領域とエミッション領域とが共存しうることが出てくる。

モデルを検証するため、プローブ法を用いて、プラズマ電位 V_{sp} 、高温電子と低温電子の電子温度 T_h, T_c と密度 N_{eh}, N_{ec} 、および温度比 $T=T_h/T_c$ と、密度比 $N=N_{eh}/N_{ec}$ を求める。

$V_F=37$ V, $I_F=14$ A で放電電流 I を変化した場合の測定結果を図5～図8に示す。結線は図1の1の場合である。電子温度は高温電子、低温電子ともに変化せず $T_h=6.3$ eV, $T_c=1$ eV 程度である(図5)。高温電子の電子密度は I と共に上昇し低温電子は一定のため(図6), 密度比 $N(=N_{eh}/N_{ec})$ を求めると図7のようになり、 I が密度比を制御していることがわか

図5 放電電流に対する電子温度(結線1)
Fig.5. Electron temperatures T_h, T_c vs. I .

図6 放電電流に対する電子密度(結線1)
Fig.6. Electron densities N_{eh}, N_{ec} vs. I .

図 7 放電電流に対する温度比、密度比 (結線 1)

Fig. 7. Ratios T, N vs. I .

図 8 放電電流に対するプラズマ電位とフィラメント電位 (結線 1)

Fig. 8. Space potential and filament potential vs. I .

(a)

(b)

図 9 プローブ特性

Fig. 9. Probe characteristics.

る。放電により高温電子放出が起こるのは、プラズマ電位 V_{sp} に対しフィラメントの電位が十分負に沈んでいる場合である。図8にフィラメント電位とプラズマ電位を示す。 $V - V_F$ はフィラメントの一方（図1では左端）の電位で、フィラメントの反対側（右端）では V の電位そのものである。すなわち、1本のフィラメント上にプラズマ電位より高い電位と低い電位が存在することになる。従って、右端とその近傍では、差 $V_{sp} - V$ が Ar ガスの電離電圧 15.76 V より大きい場合は放電が起こり、高温電子を生成する。左端では放電せずにエミッションのみとなり低温電子を放出する。

図 10 放電電流に対する電子温度（結線 2）
Fig. 10. Electron temperatures T_e vs. I .

図 11 放電電流に対する電子密度（結線 2）
Fig. 11. Electron density N_e vs. I .

典型的なプローブ特性を図9に示す。(a)図より(b)図のほうが放電電流 I が大きいので、高温電子の密度が全体に上昇し低温電子の密度成分が徐々に少なくなったように見える。

次に、図1で結線2にし、同様の実験を行った。電子温度は高く（図10： $T_e = 12 \text{ eV}$ ），電子密度は放電電流に比例している（図11）。結線2のためプラズマ電位 V_{sp} とフィラメント電位 ϕ_F （最大 $V + V_F$ ）の差が放電維持エネルギーに寄与することになる。フィラメントの両端はいずれもプラズマ電位以下に沈められており（図12： $V + V_F < V < V_{sp}$ ），低温電子のエミッション条件は満たさない。従って、高温電子のみの1電子温度状態となり、2電子温度は観測されない。ただし、 V_{sp} の値によっては（ $V > V_{sp}$ ），結線2でも2電子温度状態になる⁽²⁾。

フィラメント電流 I_F を変化させて実験を行った結果を図13～図16に示す（結線は1）。電流値を安定させるため、気圧を $5 \times 10^{-5} \text{ Torr}$ まで下げ、放電電圧を高くし放電電流を 600 mA 一定に保った。電子温度は一定である（図13： $T_h = 9 \text{ eV}$ ， $T_c = 2 \text{ eV}$ ）。電子密度は I_F と共に高温電子も低温電子も増加する（図14）が、密度比 N を求めると低温電子の密度の増加率が大きいので、 N は I の増加に対して減少する。

図 12 放電電流に対するプラズマ電位とフィラメント電位（結線 2）
Fig. 12. Space potential and filament potential vs. I .

図 13 フィラメント電流に対する電子温度 (結線 1)

Fig. 13. Electron temperatures T_h , T_c vs. I_F .

図 14 フィラメント電流に対する電子密度 (結線 1)

Fig. 14. Electron densities N_{eh} , N_{ec} vs. I_F .

温度比は $T=4.5$ で一定である (図 15)。プラズマ電位 V_{sp} とフィラメント電位 ϕ_F (最小 $V-V_F$) の関係は、フィラメントの右端で放電し、左端でエミッションする条件を満たす (図 16: $V-V_F > V_{sp} > V$)。ただし、 $I_F=13$ A に近くなると、 $V-V_F=V_{sp}$ と等しくなる領域があるが、両者の電位差はないので、エミッション領域と考えられる。

4. 考 察

プローブ法による温度、密度の解析からは、放電電流が高温電子の密度を制御し、フィラメント電流が低温電子のエミッションを制御することを確認した。よって、2 電子温度プラズマを生成するには、放電とエ

図 15 フィラメント電流に対する温度比、密度比 (結線 1)

Fig. 15. Ratios T , N vs. I_F .

図 16 放電電流に対するプラズマ電位とフィラメント電位 (結線 1)

Fig. 16. Space potential and filament potential vs. I_F .

ミッションを同時に起こし、維持する条件を見つければよい。

本実験ではフィラメントを 30 cm と長くし、両端の電位差を放電とエミッションに利用する方法を試みた。30 cm という長さは、DP 装置で実験を行ったときの 9 cm に対し 3 倍以上で⁽²⁾、更に、フィラメントの総数を 6 本と少なくしたため抵抗値が大きくなり、 $V_F=34\sim 37$ V と高い電圧を両端に与えることができた。 V_F の値が大きいと、フィラメントの両端での電位差を大きくすることができ、放電電圧 V が小さいとき、フィラメント電位 $\phi_F=V_{sp}$ の条件や、放電維持の条件を容易に満足し得る。結線 1 の場合につき述べる。Ar の電離電圧は 15.76 V であるので、フィラメントがプラズマ電位に対し 15.76 V より負に沈められたときに電子が加速され、Ar ガス原子と衝突電離し放電が生ずる。放電維持条件は、図 4(b) でフィラメント電圧 ϕ_F に最小値 V を代入し $V_{sp}-V>15.76$ V である。また、フィラメント電位 ϕ_F がプラズマ電位と等しい場所では、電子が加速されないので低温電子がエミッションされる。エミッション条件は $V<V_{sp}<V-V_F$ である。

従って、同時に放電とエミッションを起こすには、 $V-V_F>V_{sp}>V$ と、 $V_{sp}-V>15.76$ V が同時成立するとよい。図 8、図 16 はこの場合に当たる。更に、2 電子温度ができない場合も検証した。結線を 2 にすると、プラズマ電位 V_{sp} とフィラメントの両端の電位 (V および $V+V_F$) の関係は、 $V_{sp}>V>V+V_F$ および $V_{sp}-(V+V_F)>15.76$ V (ϕ_F に最小値 $V+V_F$ を代入した) となり、放電のみで低温電子のエミッションは起こらない。図 12 がこの場合に当たる。 $V+V_F$ と V_{sp} との差は 45 V 程度あり、Ar の電離電圧以上である。 V_{sp} と V の差は 13~15 V 程度であるが、常に $V_{sp}>V$ のため低温電子のエミッションは起こらないと考えられる。

また、本実験ではプローブの位置を固定して実験を行ったが ($X_p=15$ cm), DP (Double Plasma) 装置において Z 方向に移動させた場合の温度比や密度比の値の変化は、ソース側から高温電子が流入するため、グリッド近辺で多少電子温度が変化し、電子密度は一定であった⁽²⁾。 R 方向については、電子温度、電子密度に非等方性があるが、温度比や密度比は変化しないことが確認されている⁽³⁾。しかし、本実験ではグリッドの代わりに永久磁石パイプで閉じてあるので、電子温度、電子密度の Z 方向分布は一定と考えられる。

5. ま と め

直熱形フィラメントによる 2 電子温度放電プラズマにおいて、(1) 温度比、密度比の制御、(2) プラズマ電位とフィラメント電位の関係を放電モデルに表し、実験で検証した。

(1) 温度比と密度比の制御について 高温電子の密度は放電電流によって、また低温電子の密度はエミッション (フィラメント電流) によって制御され、それぞれ電流に比例する (図 6、図 14)。温度コントロールを自由に行うことはできず、ほぼ一定に保たれる (図 5、図 13)。

(2) 2 電子温度プラズマ放電におけるプラズマ電位とフィラメント電位の関係 プラズマ電位 V_{sp} と $V-V_F$ の関係は、放電とエミッションの条件を決定している。フィラメントの両端の電位の中にプラズマ電位が存在し、かつプラズマ電位とフィラメント電位の最小値との差がガスの電離電圧以上の場合、2 電子温度プラズマ放電が生ずる (結線 1)。プラズマ電位に対しフィラメントの両端の電位がともに負に沈められると、高温電子のみが観測され、2 電子温度プラズマは生成されない (結線 2)。

本研究に際し初期に議論くださった、宇宙研 中村良治教授に感謝する。また、御指導くださった武田進教授に感謝する。本研究は、石田財団研究助成金、中部大学奨励研究費によって援助された。

(平成 2 年 7 月 16 日受付)

文 献

- (1) Y. Nishida & T. Nagasawa: "Exitation of ion-acoustic rarefactive solitons in a two-electron-temperature plasma", *Phys. Fluids*, **29**, 345 (1986)
- (2) T. Yamazumi & S. Ikezawa: "Control of two electron temperature plasma parameter in a DP device", *Japan. J. Appl. Phys.*, **29**, 1807 (1990)
- (3) 山住・池沢: 「2 電子温度プラズマパラメータの制御—非等方性の計測とイオン電流の補正—」, 電気学会研資, EP-89-29 (平元)

山 住 富 也 (正員)

昭和 63 年中部大学大学院修士課程修了。以来、2 電子温度プラズマ中のソリトンの研究など、プラズマ物理の研究に従事。平成 3 年同大学大学院博士課程修了。同年名古屋文理短期大学助手。日本物理学会会員。

今井田 隆 (正員)

平成元年中部大学工学部電子工学科卒業。以来、2 電子温度プラズマ中のソリトンの研究などプラズマ物理の研究に従事。平成 3 年同大学大学院修士課程修了。

加藤 法之 (准員)

平成 3 年中部大学工学部電子工学科卒業。現在、同大学大学院修士課程で 2 電子温度プラズマ中のソリトンの研究などプラズマ物理の研究に従事。

池 沢 俊治郎 (正員)

昭和 42 年山梨大学電子工学科卒業。47 年名古屋大学大学院博士課程修了。同年中部工業大学講師、51 年同助教授、61 年同教授、現在に至る。工学博士。その間、名大プラズマ研、東大宇宙研、FOM プラズマ研 (オランダ) でプラズマ物理の研究に従事。現在、CVD 用プラズマ源などの研究に従事。日本物理学会、電子情報通信学会、応用物理学会、プラズマ・核融合学会、放電研究グループ会員。