

大口径電子銃によるプラズマ生成

安藤利得^(A)、藤田真弘^(A)、谷川隆夫^(B)、佐藤杉弥^(C)、山際啓一郎^(D)、飽本一裕^(E)

A: 金沢大学、B: 東海大学、C: 日本工業大学、D: 静岡大学 名誉教授、E: 帝京大学

1, 目的

我々は極カusp (Polar Cusp) の模擬実験を目指している。まず極カuspについて説明をしたい。太陽風が地球磁場に当たると、地球磁場は太陽風の圧力と釣り合うところで、磁場が遮蔽され、これ以上外には磁場が無いという境界が形作られる。そして本来は太陽側 (上流) にあるはずだった磁力線は下流側に流されることによって、本来は磁極の上空にあるべき上流と下流の分かれ目 (磁力線の分岐点) は、昼側の低緯度側に移動する。分岐点の根元は地球では昼側磁気緯度 75° 付近に位置するが、それは太陽風の圧力や太陽風内部の磁場が変われば移動する。磁場強度はこの分岐点付近で最少になるが、その近傍では磁力線に沿って漏斗の円錐部の先端方向に進んでも、円錐の開いた側に進んでも、磁場強度が強くなる。そのため荷電粒子は磁気ミラー効果によって閉じ込められる。そして、その分岐点近傍の漏斗状の磁力線で囲まれた領域が極カuspと呼ばれる。この領域は地球の何倍もの大きさがあるため、単なる磁気圏の割れ目 (Cleft) としてではなく、1つの個性を持つ系としての扱いが必要となる⁽¹⁾⁽²⁾。また、その素性はまだ十分に分かっていないため、しっかり把握する事は宇宙-地球での粒子循環を理解する上で重要な事である。

我々は実験室で極カuspを調べられる環境を実現したいと考えている。物理現象を限定すれば磁場形状をそっくりにする必要はないと考えて、実験室で作りやすいスピンドルカusp磁場を利用することを考えている。ここではまずプラズマ生成する研究を行なった。具体的には真空チェンバーに薄く満たした中性ガスを電子ビームを用いて電離してプラズマを生成した。その結果について、特に、電子銃の特性や、プラズマの特徴について報告する。

2, 実験装置

本実験に用いる高密度磁化プラズマ発生装置の概略を図1に示す。全長約 500 cm、内径約 74 cm の直線状のスペースチャンバーを持ち、装置の左端にカusp磁場を形成できる。電子ビームのカusp領域への入射を考えて、電子銃はチェンバーの中央から少し左寄りに設置した。大口径電子銃 ($\phi 120$ mm) は大口径ながらコントロールグリッドを備えている。詳細については過去のスペースプラズマ研究会の報告書^③を参照してほしい。電子ビームの入射対象となる領域、図1で電子銃と真空チャンバー左端までの領域を「ターゲット領域」と呼ぶことにする。ターゲット領域に「カusp磁場」と「直線磁場」の2つの磁場を作り、その中にプラズマ生成する実験を行なった。電子銃の近傍にはいずれの場合も一様な外部磁場を印可した。電子ビームはこの磁場によってターゲット領域に導かれる。ただし、図1のとおり真空チャンバーの左端のフランジには観測用の大口径のクォーツガラスの窓が設置されており、特に直線磁場では電子ビームが磁力線に沿って進み対面にあるガラスに当たる。この状況でも実験は可能であるが、これと区別するために、アースにした直径 20 cm の電極 (コレクター電極) を電子ビームの収集用として必要に応じて設置する。コレクター電極の主な設置理由は電子銃の動作チェックにある。また、この位置にコレクター電極を挿入すると、カusp磁場の場合には電子ビームの入射ができなくなるため、今回の実験ではカusp磁場配位では設置しない。チャンバーの軸に沿ってZ軸をとり、その原点をクォーツガラスの内側の面にとると、コレクター電極は $Z = 90.3$ cm に設置した。た

だし、必要に応じて取り外すことが可能である。電子銃はアノードの位置が $Z=172.5\text{ cm}$ になるように設置した (図1に示した通りチャンバーの中央より少し左寄り)。また、カusp磁場配位の条件では中性点 (カusp面)の位置はこの実験では $Z=10\text{ cm}$ になるようにした。(主磁場 280 Gauss のとき補助コイル 13.6 A にした。) この位置では側面にガラス窓などが設置されていないためカusp面の近傍で動径方向に向かう磁力線はすべて金属壁に行きつくことになる。また、真空チャンバーは2台のポンプ (クライオポンプとターボポンプ) で排気が可能である (図1)。今回、電子銃のバリウムの活性化が十分でなかったために脱ガスが若干多めであるが、クライオポンプのゲートバルブを開けている状態で背圧は約 $5\times 10^{-4}\text{ Pa}$ であり、閉じた状態で約2倍の $1\times 10^{-3}\text{ Pa}$ であった。ガスの導入時はクライオポンプのゲートバルブを閉じ、Arガスをチャンバーの右側1/3辺りの側面ポートから導入した。真空度はクライオポンプの上部で電離真空計を用いて測定した。この実験でガスの導入をマスフローメーターで 9 sccm に設定すると真空度は約 $1.3\times 10^{-2}\text{ Pa}$ であった。

電子銃の詳細は報告書⁽⁹⁾にあるので参照して欲しい。ただし、今回については (ある事情から)、コントロールグリッド G1には透過率の高いモリブデンのメッシュ (50 mesh/inch, 線径 0.1 mm, 透過率 64.5%) を用いた。ただし、アノード G2はいつもと同様である (モリブデンのメッシュ 25 mesh/inch, 線径 0.1 mm, 透過率 81%)。この実験では定常的に電子ビームを入射し、定常状態で測定を行なった。プラズマの温度と密度の測定には静電プローブを用いた。プローブは直径 5 mm の円板で裏面をセラミックで覆ったステンレス製の電極 (ディスクプローブ) に電圧を $\pm 30\text{ V}$ の範囲で連続的に印可して電流波形から電子密度と空間電位を求めた。また、電子ビームの電流密度の空間分布を測定するためにワイヤプローブ (直径 0.5 mm で長さ 5 mm のニッケルメッキ銅線) を用い、電圧は印可せず、 $1\text{ k}\Omega$ の負荷抵抗を通してアースして、電流を測定した。電子ビームの電流密度の空間分布の測定は真空中でのみ行なった。これら2つのプローブを1つの可動ステージに設置して、Z軸方向と垂直方向 Yに可動とした。それらの機器の配置の様子を図2に示す。直線磁場とカusp磁場の実験配置である。電子銃のアノード (G2)の位置を基準にとり、そこからの距離を z_p とすれば、(座標 Z から座標 z_p へ変換をすると、) プローブは $z_p=27\text{ cm}$ である。ちなみに前述したビームコレクターは $z_p=82.2\text{ cm}$ であり、また、カusp面は $z_p=162.5\text{ cm}$ にあるので、プローブの位置はカusp面より電子銃寄りに設置して今回の測定を行なったことになる。

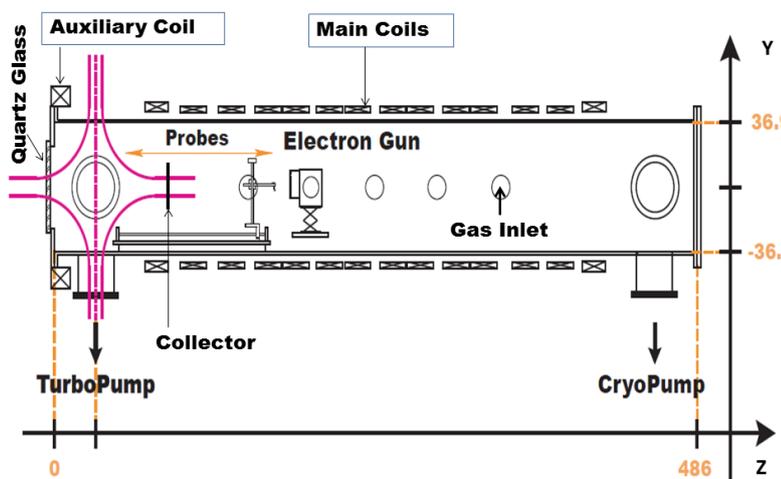


Fig. 1 Experimental Setup

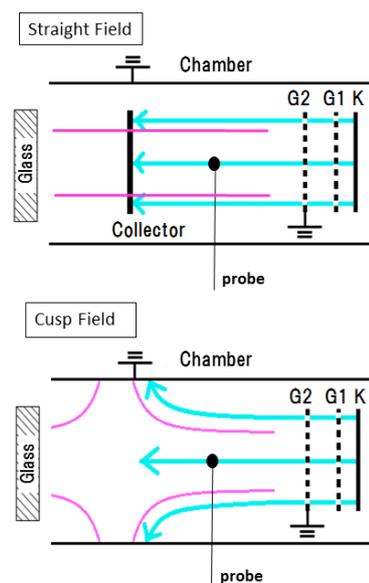


Fig.2 Setups for the straight field and the cusp field.

3, 実験結果

(I) 電子銃の特性

電子銃のアノード G2 はアースにして、カソード K 電圧 $V_K = -100 \text{ V}$ に掛けて加速電圧とした。K-G1 間には電圧 V_{K-G1} を $0 - 21.8 \text{ V}$ の範囲で変化させ、電子銃から引出す電子ビームの電流量を測定した。電子銃からの電子ビームの出射は、遠方の磁場配位によって影響を受けることがわかった。図 3 に電子銃の電圧電流特性を載せる。真空中 (ガス無し) と薄いガスの雰囲気中 (ガス有り) で動作させた場合。そして、直線磁場とカusp磁場配位にした場合の 4 つの条件下で得られたデータを示している。真空中では電子銃の電圧電流特性は基本的に Child-Langmuir 則(C-L 則)に従うと考えられる。実際に I_K は、 V_{K-G1} の $3/2$ 乗に比例する (図 3(a)青)。一方、 $I_{K-G1-G2}$ は別に C-L 則に従い、空間電荷制限電流に達して飽和すると考えられる (図 3(a)緑)。ガス有の場合の $I_{K-G1-G2}$ (図 3(b)青), I_K を見るとガス無に比べて約 1.7 倍に増加している。 $I_{K-G1-G2}$ (図 3(b)緑) も飽和していない。電子ビームの射出に伴って、プラズマが生成され、その結果として空間電荷制限が緩和され、電子ビームの電流量が増えたと考えられる。さて、ターゲット領域の磁場の影響について述べる。直線磁場とカusp磁場では真空 (図 3(a)と図 3(c)) とガス有り (図 3(b)と図 3(d)) とともに I_K と I_{K-G1} にはほとんど違いはない。しかし、 $I_{K-G1-G2}$ に大きな違いがみられる。真空中で直線磁場の場合には $I_{K-G1-G2} = 20.5 \text{ mA}$ であるが、カusp磁場で約 0.18 mA に減少する。また、ガス有で直線磁場の場合には 62 mA であるが、カusp磁場では 6.4 mA となる。このことから、ガス有無に関係なくカuspでは非常に電子ビームが射出されにくい状況であると推測される。

(II) ビーム電流密度

ビーム電流密度の空間分布を図 4 に載せる。これらは真空の条件 (図 3(a)と図 3(c)) で測定した。直線

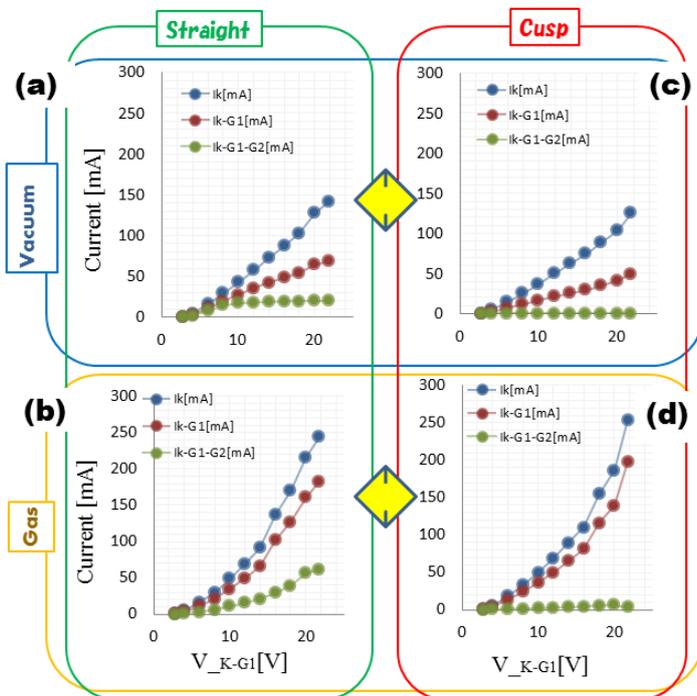


Fig.3 Voltage-current curves of the large aperture gun. Straight field, (a) and (b). Cusp field, (c) and (d). Without Ar gas, (a) and (c). With Ar gas, (b) and (d), $1.3 \times 10^{-2} \text{ Pa}$.

磁場とカusp磁場のデータがそれぞれ緑と赤で示されている。これを見ると前述の電子銃のデータを裏付けるような結果となっている。直線磁場では電子ビームの直径は電子銃のカソードのそれとほぼ同じであり、電流密度は高い。電子銃は正常に動作していることがわかる。(中央がへ込んでいのは G1 が伸びて

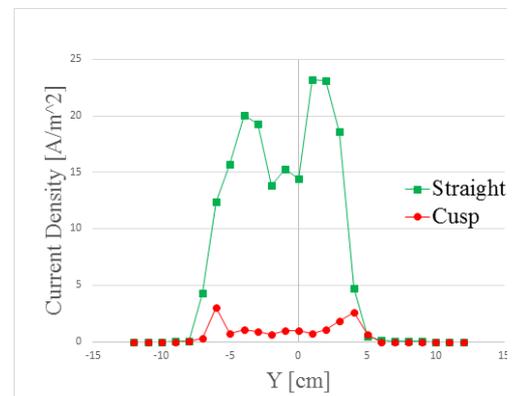


Fig.4 Electron beam current density profiles, for straight field and cusp field without Ar gas supplying.

湾曲し、K-G1 間隔が広がったためと考えている。) 一方、カusp磁場では電流密度は非常に小さい。周辺にピークがあり、電子ビームも中空に近い。これは磁力線がカuspのどこを通るかということでカuspの特徴が表れたと考えられる。

(III) プラズマの特性

プラズマの電子密度と電子温度と空間電位を図5に載せる。これらはガス有りの条件(図3(b)と図3(d))で測定した。直線磁場では密度が $1.5 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ で電子温度が 6 eV のプラズマが生成されている。多少の凹凸はあるがほぼなだらかに分布している。一方で、カusp磁場においては状況が変わる。電子密度は周辺で $1.5 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ で直線磁場の場合とほぼ同じであるが、中央部の大部分の領域(直径約 8 cm)で、非常に密度が低い。ほぼ中空であると言って良い。また、空間電位は周辺が正であるのに対して中央では負に落ち込んでいる。これら密度と空間電位の分布はよく似通っており、空間電位が負になることによって電子銃から電子ビームが出射されるのが抑制され、プラズマ密度が下がったと考えられる。

以上で今回の実験結果の概要を述べたが、一方で以前、 $\phi 20\text{mm}$ の電子銃を用いた実験ではカusp中央部でプラズマの密度が最大となる分布を観測している⁽⁴⁾。この結果は今回の中空の結果とうまく結びつかないような気がする。大口径電子銃においては特別な事情が生じるのか、測定位置によるものなのか現時点でははっきりしないので、今後、実験をさらに行ない統一的な結果を得る必要がある。また、今回はカusp磁場においてはコレクターを使用しなかったが、カusp面より左の適当な位置に設置すればビームの入射は可能であるので、今後そうした実験も行ないたい。

謝辞

本実験を遂行するにあたり、ISAS/JAXA の阿部琢美先生、長谷川 直先生には多大なご支援をして頂きました。ここに深くお礼申し上げる次第です。スペースプラズマ共同研究設備の中園技官には実験を実施するにあたり大変お世話になりました。

参考文献

1. “The discovery of trapped energetic electron in the outer cusp”, R.B. Sheldon, *et.al.*, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1825-1828, 1998.
2. “The polar cusp”, C.T. Russell, *Adv. Space Res.*, **25(7/8)**, 1413-1424, 2000.
3. “大口径電子ビームのカusp磁場への入射とそれに伴うプラズマの変化の観測Ⅱ”, 安藤, 谷川, 佐藤, 山際, 壬生, 藤田, 飽本, 「スペース・プラズマ研究会 平成 25 年度」講演集, (2014. 3).
4. “大口径電子ビームのカusp磁場への入射とそれに伴うプラズマの変化の観測”, 安藤, 遊津, 壬生, 佐藤, 谷川, 山際, 「スペース・プラズマ研究会 平成 24 年度」講演集, (2013. 3).

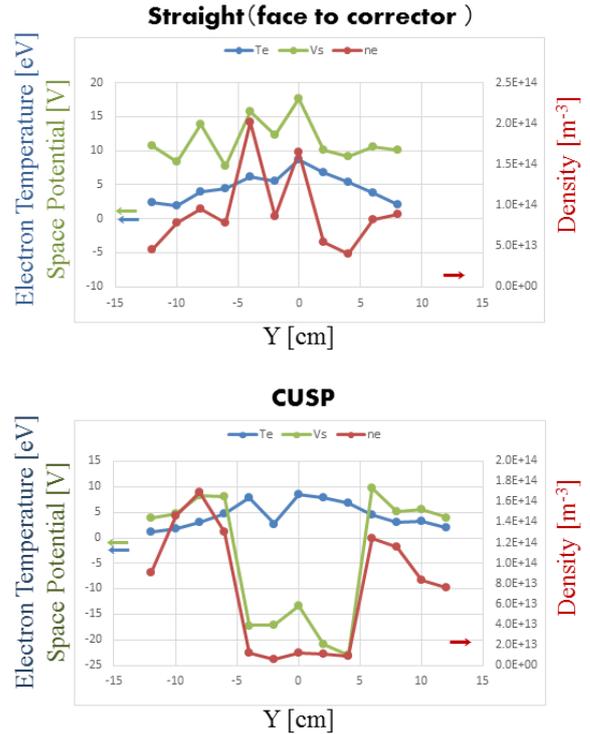


Fig.5 Cross-sectional profiles of electron density, electron temperature, space potential, for straight field, (a), and cusp field, (b), near the gun, $Z_p = 27 \text{ cm}$.