

大口径電子ビームのカस्प磁場への入射と それに伴うプラズマの変化の観測

安藤 利得、遊津 元希、壬生 健太（金沢大学 数物科学系）
佐藤 杉弥（日本工業大学 共通教育系）
谷川 隆夫（東海大学 総合科学技術研究所）
山際 啓一郎（静岡大学 名誉教授）

1. はじめに

カस्प磁場は太陽磁場や地球磁場等に存在し、恒星間プラズマと地球磁気圏を連結する要の役割をする。地球周辺のスペースの環境を左右する重要な要素の1つであることから、その性質を正確に理解する必要がある。カस्पの論文には例えば文献[1]があるが、さらに研究を進めることが必要であると考えている。

2. カस्प磁場の形成

本実験に用いる JAXA の 高密度磁化プラズマ発生装置 (Large Helicon Plasma Device, LHPD) の概略図を図 1 に示す。全長約 5m の直線状磁場閉じ込め装置である。左端におかれたフラットスパイラルアンテナを用いることによって、ヘリコン波を用いた大容量で高密度なプラズマ生成が可能な装置である。アンテナの手前に補助磁場コイルが設置されており、チャンバーとアンテナのあいだで磁場が弱くなるのを防ぐことができる。主コイルの直径は約 0.935m、補助コイルの直径は約 1.03m である。本研究ではこれを活用する。

補助コイルには主磁場とは独立に電流が流せるため、磁場の向きを反転させることによって、

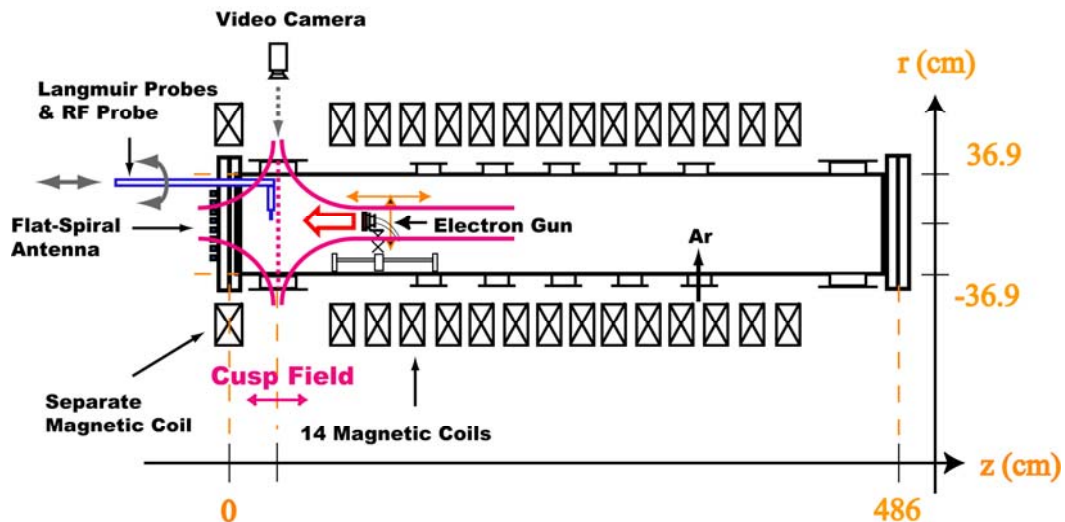


図 1 LHPD 装置と磁場コイルの配置

カस्प磁場を形成することができる。また、電流値を変化させることにより、カस्पの位置を移動させることができる。

図 2 に真空容器の端での磁場強度分布の計算値を示す。Z 軸の原点はアンテナが外側から接するクウォーツガラスの真空側にとる。図中にコイルの位置は点線で示されている。主磁場に流す電流を 50A に一定にして、補助コイル流す電流を変化させた。10A おきに 0A から -50A まで変えた

際に予想されるチャンバーの中心軸上での磁場の強度分布を示す。

電磁場強度が零になるセパトリクス位置は電流値を負に大きくするのに伴ない $Z=0\text{m}$ から 0.45m まで変えられる。図 1 に示されているように $Z=0.35\text{m}$ のところに直径約 30cm のガラス窓の観測ポートがあり、カスプの側面からの観測に用いることができる。また、プラズマの生成用のアンテナを取り除けば、正面から観測が可能である。

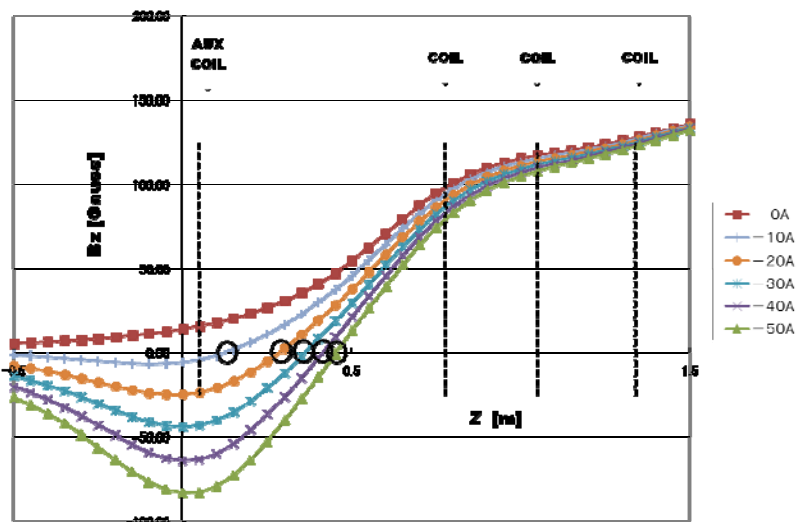


図 2 LHPD の中心軸上の磁場分布。主コイルの電流を 50A に一定にして、補助コイルの電流を 0A から -50A まで 10A 刻みで変えた。 $B_z=0\text{G}$ の位置を図中に \circ で示した。

3. 新たな電子銃

カスプ磁場中での電子ビームの軌道を観察するために小型の電子銃が必要とされた。平成 23 年度までに我々は大口径電子ビーム源（カソード直径 $\phi 120\text{mm}$ ）を開発している [2-5] が、本目的には合わない。そこで、新たに小型の電子銃を 2 つ設計、製作することにした。電子ビームの一様性を確保するために、これまで通り、カソードは傍熱型で、電子放射物質としてバリウムの酸化物を採用した。カソードの直径はそれぞれ $\phi 5\text{mm}$ と $\phi 20\text{mm}$ である。 $\phi 5$ のカソードはニッケル製の円筒型であり、 $\phi 20$ 用のヒーターカソードはパンケーキ型である。設計上の注意点は電子放出体である酸化物は一度空気に触れさせてしまうと使えなくなってしまうことから、カソードが再利用できるようにいずれも分解して、塗り直し、再度組み立てができるようにした点である。また、カソードからの熱輻射を防ぐために反射板を数枚設置した。いずれもこれまで、静岡大および大口径電子ビーム源で養った技術を使っている [6]。

便宜的に $\phi 5$ を「小型」、 $\phi 20$ を「中型」、これまでの $\phi 120$ を「大型」と

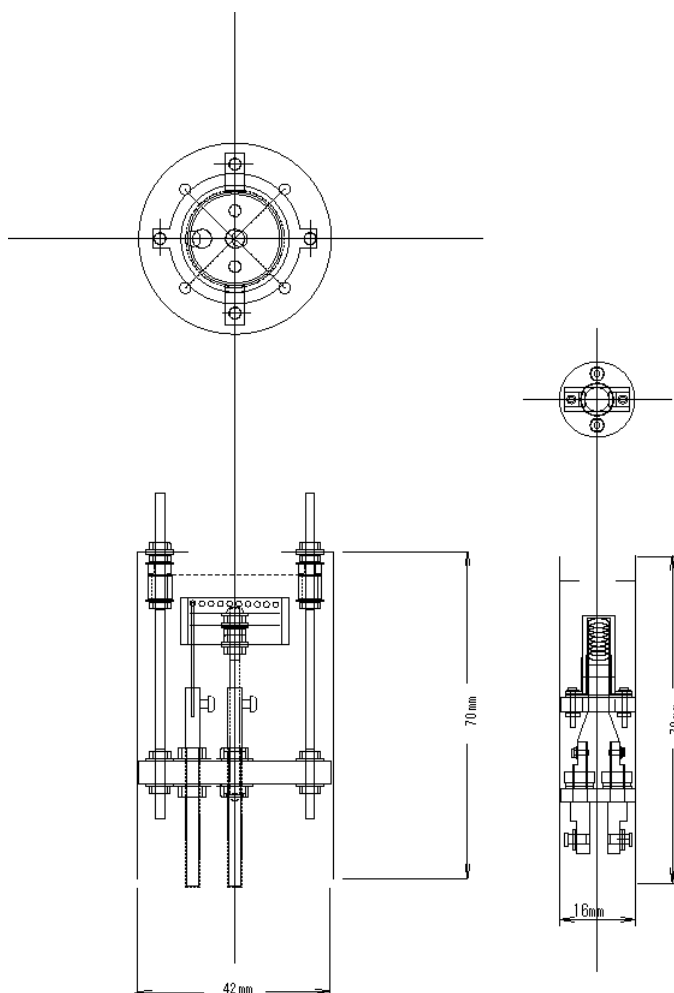


図 3 $\phi 20\text{mm}$ 電子銃と $\phi 5\text{mm}$ 電子銃

呼ぶことにする。以下の表にそれぞれの電子ビーム源のパラメータを載せる。

表1 電子銃の比較。消費電力はヒーターの電流と電圧を計測して算出した。ビーム電流はKとCGから放出される電流を測定した。最後に電子ビーム源を活性化するのに必要とした時間を示した。()の中の値は小型を1とした値である。

タイプ	カソード直径 (mm)	カソード面積 (cm ²)	外寸 (mm)	消費電力 (W)	電流 x 電圧 (A) x (V)	ビーム電流 mA (A-K 電圧)	活性化 (hours)
大型	120	113 (144)	φ 156 x 100	324 (46)	27 x 12	300 (40V 時) (2000)	11 (2.8)
中型	20	3.1 (4)	φ 42 x 70	30 (4)	6.5 x 4.2	9.7 (60V 時) (64)	5 (1.3)
小型	5	0.785 (1)	φ 16 x 70	7 (1)	2 x 3.5	0.15 (10V 時) (1)	4 (1)

大型はカソード(K)とアノードグリッド(A)の外に電流量を調節するコントロールグリッド(CG)を備えた3極型であり、今回作った電子銃はいずれも2極型である。

活性化は 10^{-4} Paのオーダーの真空を保持しながら行なった。活性化の時間は排気速度に依るところが大きいので上記の値はあくまで目安である。表1で分かるように活性化に必要な時間は、大型と比べ、小型と中型が少ない。また、カソードを動作させるためのヒーターの消費電力も小さい。そのため、かなり手軽に使うことができる。

4. カスプ磁場と電子ビームの観測

電子ビーム自体は光らないが薄いアルゴンガスを入れるとアルゴン原子がビーム電子により励起され光を発するため目視が可能となる。カスプ磁場部に電子ビームを入射した際の写真を図4に示す。主磁場を70 Gauss、補助コイルに-15Aを流し、アルゴンガスを 1.7×10^{-2} Paで満たし、70Vで電子ビームを加速している。左側が真空チャンバーの中央で、右側がチャンバーの端となっている。写真はZ=0.35mの観測ポートからで数秒の露出時間を掛けて撮っている。2つの電子ビームを同時に入射している。φ20の電子銃は写真の左端よりさらに左側に置かれており写真には映っていない。きれいなスピンドルカスプの形が見え、φ20の電子ビームによってカスプ磁場のおおよそを視覚化できているのがわかる。また、もう一つのφ5電子銃は写

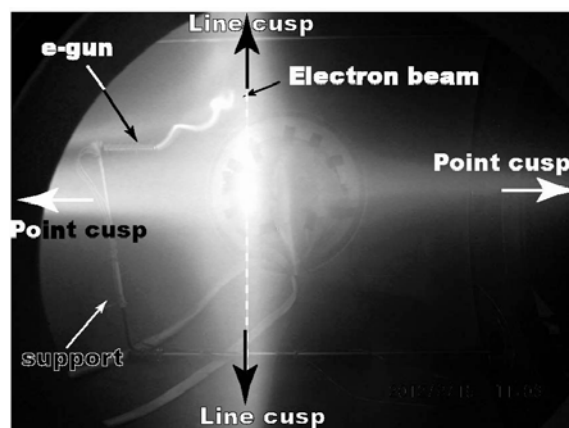


図4 カスプ磁場と電子ビーム。左側から2種類の電子ビームを入射している。φ20のビームはカスプ全体に広がり、φ5はそれほど広がっていないのがわかる。

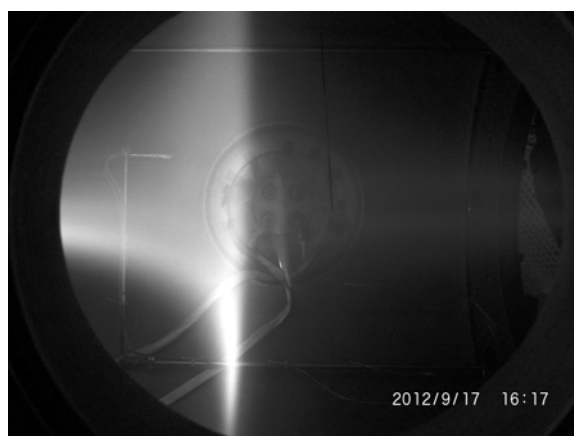


図5 φ20電子ビームを中心より3cm下げた時のカスプの写真。電子ビームは下方に曲げられ、カスプを通り抜けるビームは少ないのがわかる。そのため、カスプの左右の明るさが大きく異なっている。

真中の e-gun と示した所にあり、そこから、細い電子ビームが出ているのが映っている。φ5 電子ビームは、磁力線に巻きつくようにらせん状に軌道を描いており、磁力線をおおよそ把握することができる。

また、図 5 に φ20 電子ビームの入射位置を真空チャンバーの中心軸より 3 cm 下方にずらした時の様子を示す。この場合には電子ビームのほとんどは磁場によって下方に曲げられる。図 4 の場合には電子ビームが中心に入射されるため、大多数の電子がカस्प面を抜けて反対側に行けるが、図 5 の場合にはカस्प面を通り抜けられない。そのため、左右の明るさが大きく異なり、左右を分ける境界面をはっきり目視できる。

5. まとめ

高密度プラズマ発生装置(LHPD)は、真空チャンバー端で補助磁場コイルを備えており、これを用いてカस्प磁場を作ることができることを示した。新たに2つの電子銃(中型: φ20mmと小型: φ5mm)を設計、製作し、これまでの大口径電子銃(大型: φ120mm)と性能の比較をした。新しい電子銃はカソードの活性化の時間が短く、実験の省力化ができる。大型と中型はカस्प磁場を照射し磁場の全体像を可視化することができる。小型からのビームは直径が細いため、カस्प磁場による広がり少なく、磁力線に沿って軌道を描くがわかった。これらを有機的に組み合わせて、今後カस्पの観測に用いてゆく。

謝辞

本実験を遂行するにあたり、JAXA の阿部琢美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山本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。お礼申し上げます。

参考文献

1. “カस्प磁場におけるプラズマ”, 大林, 佐藤, 鳥羽, 渡辺, 高山, IPPJ-REV5, 231-242, 1989-03.
2. “新型大口径電子ビーム源を使用した電子ビーム・プラズマ不安定性の実験Ⅱ”, 谷川, 安藤, 遊津, 佐藤, 山際, 「スペース・プラズマ研究会 平成 23 年度」講演集, 25, (2012.3).
3. “新型大口径電子ビーム源を使用した電子ビーム・プラズマ不安定性の実験”, 安藤, 遊津, 谷川, 佐藤, 山際, 「スペース・プラズマ研究会 平成 22 年度」講演集, 20, (2011.3).
4. “電子ビーム・プラズマ系における非線形現象実験用の大口径電子ビーム源の製作と性能試験Ⅱ”, 谷川, 安藤, 佐藤, 山際, 「スペース・プラズマ研究会 平成 21 年度」論文集, pp. 37-1 - 37-4 (2010).
5. “電子ビーム・プラズマ系における非線形現象実験用の大口径電子ビーム源の製作と性能試験”, 谷川, 安藤, 干場, 佐藤, 山際, 「スペース・プラズマ研究会 平成 20 年度」論文集, pp. 66 - 69 (2009).
6. T. Takeda and K. Yamagiwa, Phys. Lett. A **339**, 118 (2005); J. Plasma Fusion Res. **79**, 323 (2003); J. Plasma Fusion Res. SERIES **6**, 566 (2004).