

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Ⅱ

安藤利得 (A)、谷川隆夫 (B)、佐藤杉弥 (C)、山際啓一郎 (D)、
壬生健太 (A)、藤田真弘 (A)、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. はじめに

地球磁気圏を貫くカस्प（極磁場）はスペースプラズマと電離圏を結合する重要な要素であるから、その性質をいろいろな角度から研究する必要がある。スピンドルカस्पは実験室で容易に作ることができ、極磁場を2つ合わせた形状をしているので単独の極磁場の理解にも役立てることができると考えている。そこで我々が始めたのが電子ビームを用いた実験である。大口径電子銃はこれまで我々が開発を進めてきたもので本実験では電子ビームを用いてプラズマを生成したり相互作用をさせたりするのに用いる。本電子銃は中心的な役割を果たし、カस्प磁場やプラズマと直接接触する部分であることからその特性を理解し性能を十分に引き出すことが必要である。

2. 大口径電子銃

本実験においてはカस्पプラズマを生成するのにコントロールグリッド (G1) 付きの大口径電子銃を用いる。もし単にガスを放電してプラズマを作るためだけならばG1は必要ないが、G1付きの電子銃を用いる理由は(1)電流を独立に変えることができること、(2)必要に応じて電子ビームに早い摂動を加えることができることなどが挙げられる。大口径であるのはカस्प磁場のほぼ全体に電子ビームを行き渡らせるためである。できるだけ一様なビームが得られることが望ましいと考えている。その概形を図1に載せる。大口径ながらG1を備えている。本電子銃はカソードの直径は $\phi 120\text{mm}$ であり、表面には仕事関数を下げるためにバリウムの酸化物が塗られている。カソード (K) の前面には一定間隔を置いてコントロールグリッド(G1)とアノード (G2) を配置されている。K-G1 間隔は通常は3-5 mm にしており G1-G2 間隔は10 mm に設定している。G1は変形し難い様に0.6 mm のモリブデン板に多数の小孔をエッチングしたものを採用している。物理的透過率は44%である。アノードにはモリブデンメッシュを採用しており物理的透過率は81%である。

電子銃はまだ最終形ではなく一様性と性能アップを図りながら実験を行っている。実験のたびにマイナーな修正を加えている。そのため一定の条件のまとまったデータはまだ無い。今回の電子銃の動作性能の評価を行うのにそれらの設定の異なるデータを利用した。

3. 主装置

本実験に用いる高密度磁化プラズマ発生装置 (High Density Large Helicon Plasma Device, LHPD) の概略図を図2に示す。全長約5 m、内径約74 cmの直線状のスペースチャンバーで、磁場コイルによって最大数千ガウス程度の磁場(B_0)を発生させることができる。装置の片端には補助磁場コイルが設置されており、このコイルに主磁場とは反対向きの磁場を作ることによってカस्प磁場を形成できる。またその電流値(I_{coil})を変化させることによりカस्पの位置を連続的に移動させることができる。カस्प面の位置は I_{coil} と B_0 の両方によって決まる。Z軸方向の原点を装置の左端にとると観測窓がある所は $Z = 33.3\text{ cm}$ となるが、図2はカस्प面が観測窓の中心に来た時の磁

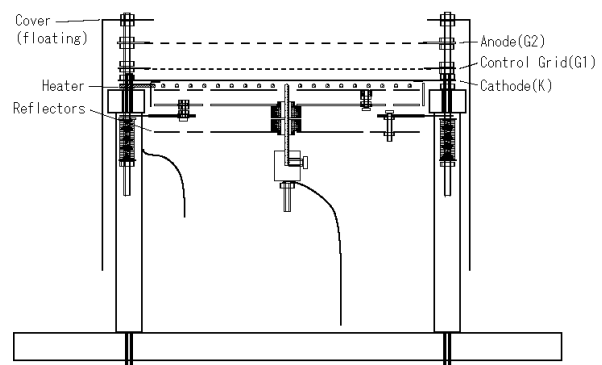


図1 大口径電子銃 ($\phi 120\text{mm}$)。

場配位を表している。この状態は $B_0 = 70 \text{ G}$ の時は $I_{\text{COIL}} = 10 \text{ A}$ で実現でき、同様に $B_0 = 140 \text{ G}$ の時は $I_{\text{COIL}} = 20.9 \text{ A}$ で、 $B_0 = 280 \text{ G}$ の時は $I_{\text{COIL}} = 41.05 \text{ A}$ のそれぞれで実現できる。また補助磁場コイルに流せる最大電流が（定常では） $I_{\text{COIL}} = \text{約 } 145.5 \text{ A}$ であるためカस्प面を移動できる範囲には限界があり主磁場を 70 G にした時には $Z = 0 \text{ cm}$ から最大 $Z = 80 \text{ cm}$ となり、主磁場の強度が上がるほどカस्प面は左にシフトして可動範囲は狭くなる。また電子銃はカソード面の位置を $Z = 173 \text{ cm}$ （図2参照）と約 376 cm に設置した。

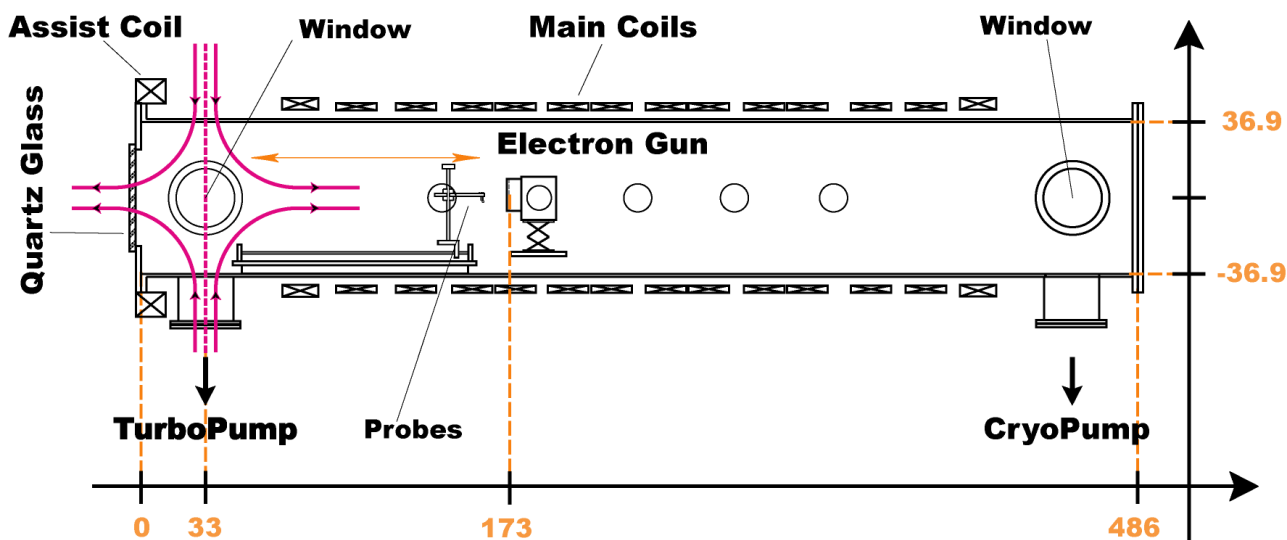


図2 LHPD装置とカस्प磁場

4. 実験（電子銃の電圧電流特性）

本電子銃は3つの電極を持つ。うち一番外側のG2はアースしており真空チャンバーと同じ電位である。Kには電子を加速するための電圧 (V_{acc}) を掛ける。G1はKを基準にして電圧 ($V_{\text{K-G1}}$) を掛ける（引出電圧という）。電子銃の電圧電流特性の測定には図3の回路を用いた。電流計は3つ配置されており、それぞれの電極から射出される電流を測定する。奥からカソードからの放出電流 (I_{K})、G1からの放出電流 ($I_{\text{K-G1}}$)、そして、アノードG2からの放出電流 ($I_{\text{K-G1-G2}}$) である。これにより電子銃の状態を診断したり動作の参考にする。

実験データを図4および図5に示す。図4は約 $5.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ の真空中で測定された（ガス無し）。図4(b)は $I_{\text{K-G1-G2}}$ だけを拡大したものである。図5はArガス ($1.5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$) を導入したときのデータである。 I_{K} は最大で約 40 mA が得られている。ただしこのデータはカソード表面の酸化物が一部剥がれ落ちてしまい実効的なカソード面積は減っている時のものである。図4も図5も $I_{\text{K-G1-G2}}$ が小さく、 I_{K} と比べると9.2%と11%しかない。さらに詳細を述べれば真空時には $I_{\text{K-G1-G2}}$ は飽和し一定値 (0.35 mA) に近づく（図4(b)）。一方、ガス

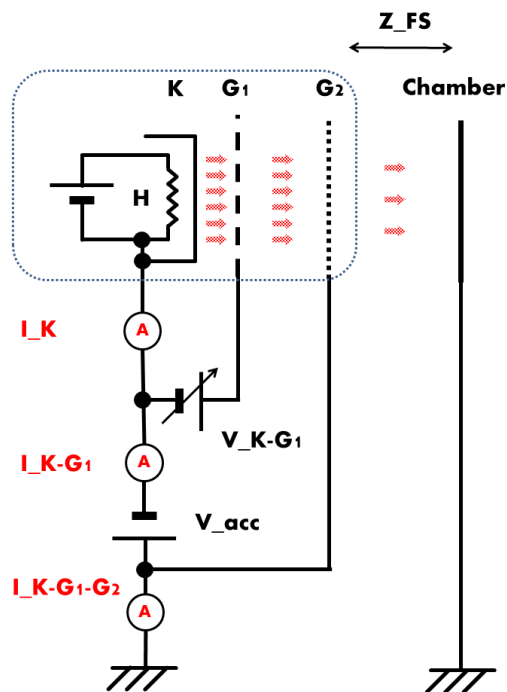


図3 電流測定回路

がある時は $I_{K-G1-G2}$ は一桁大きく、かつ単調増加を続ける (図 5 (b))。さて各グリッドを通過することに伴った通過前後の電流の比 (ここでは電流透過率という) を図 6 に示す。真空中では G1 の電流透過率は変化し 35% が最大で半分程度の値 (21%) に落ち着く (図 6 (a))。また真空中で G2 の電流透過率は引出電圧が小さいときに最大値 46% となるが単調減少して 4% にまで減少する。一方でガス中では図 6 (b) に見られるように G1 の電流透過率は 44% で一定に保たれており、この 44% という値は G1 の物理的透過率と一致する。またガス中での G2 の電流透過率は最大 58% であるが V_{K-G1} が大きくなると約 28% に落ち着く様である。真空中とガス中と共に G2 の電流透過率は物理的透過率 81% と比べると小さい。

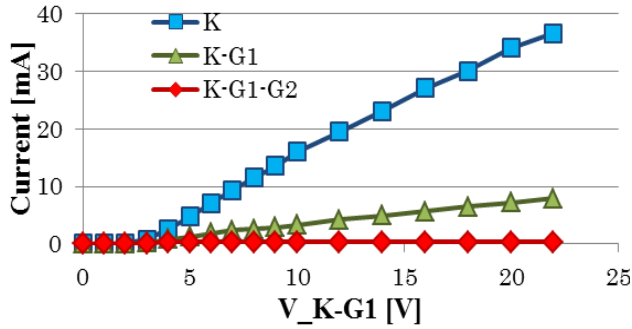
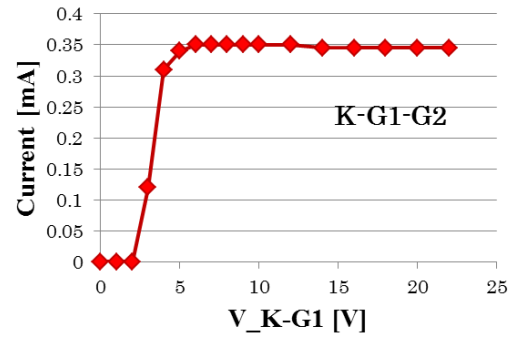


図 4 (a) 電子銃の電圧電流特性. カスプ磁場: $B_0=70$ G, $I_{COIL}=10$ A, $V_{acc}=60$ V (真空中)



(b) 電流 $I_{K-G1-G2}$ (真空中)

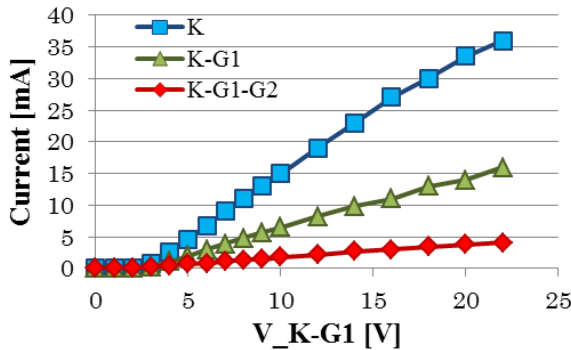
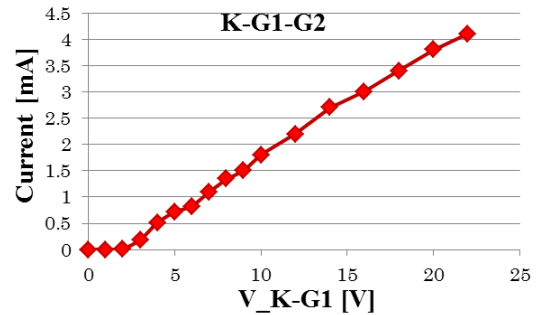


図 5 (a) 電子銃の電圧電流特性. カスプ磁場: $B_0=70$ G, $I_{COIL}=10$ A, $V_{acc}=60$ V (Ar: $1.5e-2$ Pa.)



(b) 電流 $I_{K-G1-G2}$ (Ar: $1.5e-2$ Pa.)

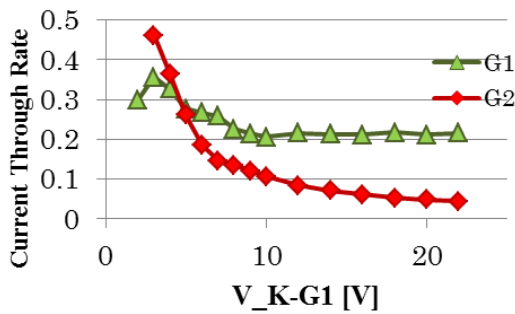
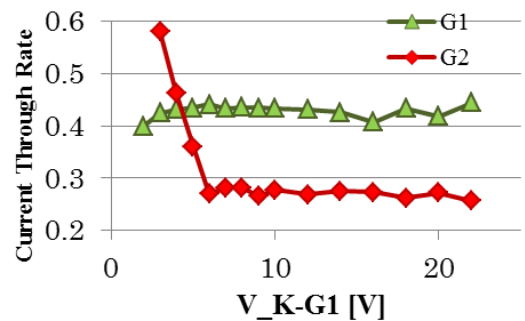


図 6 (a) G1 と G2 の電流透過率 (真空中)



(b) 電流透過率 (Ar: $1.5e-2$ Pa.)

5. 考察

各電極間での最大電流を計算し $I_{K-G1-G2}$ が小さい原因を探った。計算には空間電荷制限と温度制限の式を用いた。具体的に K-G1 空間では初速度がゼロの空間電荷制限の式を、また G1-G2 空間および G2-自由空間 (F) では初速度を持つ空間電荷制限の式を用いた。カソードを飛び出す熱電流の計算にはバリウムの仕事関数 2.7 eV を仮定して modified Child-Langmuir の式を用いた。その結果わかったことはカソードの表面積を 56 % に減じれば図 4 と図 5 の条件の I_K の測定値と良く合い、それは K から酸化物が剥げ落ちた状況と合う。

さて標準的な設定値 (カソードが剥がれていない状態) での計算結果を図 7 に示す。K-G1 間隔は 3 mm、G1-G2 間隔は 10 mm、カソードの温度は 980°C と仮定した。 I_K は最大で 300 mA が得られている。この設定では I_K よりも G1-G2 空間の空間電荷制限電流が余裕を持って上回っているため、K から放出され G1 を抜けた電子ビームはすべて G2 に到達できることを意味する。ただし G2-F 空間では外部からの加速電場が無い為に流れ得る電流が極端に小さい。実験で $I_{K-G1-G2}$ が非常に小さく、真空時に一定値に落ち着くのはこのためと考えられる (図 4 (b))。一方で真空時に G2 の電流透過率だけでなく G1 の電流透過率までも変化したこと (図 6 (a) の G1) に関しては自由空間から戻ってきた電子ビームが G1-G2 空間に入り込み、空間ポテンシャルを押し下げた結果と考えられる。

一方でガスの存在はここでは考慮していないため推測であるが、電子ビームによってプラズマが生成され空間電荷が中和されるために $I_{K-G1-G2}$ が増えたと考えられる。 $I_{K-G1-G2}$ がガス有の時に飽和しないで単調増加する理由も同じであると考えられる。ただし G2 の電流透過率が約 27 % に収束する理由をよくわからない。また図 8 は I_{K-G1} の両対数グラフで実験値と傾き 3/2 の直線を比較している。 V_{K-G1} の大きなところでは 3/2 乗にほぼ合っている。小さいときに合わないのは酸化物の性質に因るものと考えられる。

$I_{K-G1-G2}$ が小さいと言っても電子ビームは電子銃から一度外に出てから空間電荷によって一部が逆方向に跳ね返されると考えられる。つまりアノード (G2) 直後の電流は $I_{K-G1-G2}$ よりも大きい可能性がある。これについては今後明らかにする必要がある。

参考文献

1. “大口径電子ビームのカスプ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, 19, (2013. 3).
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”, 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).
3. 渡邊寧 著「空間電荷電導論」(1950 年) 修教社

Estimated Maximum Currents

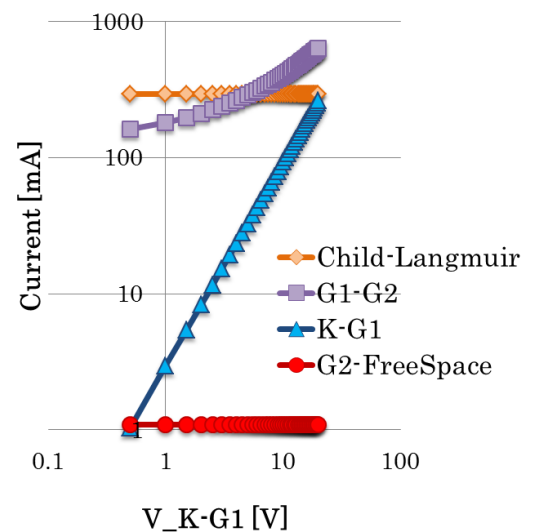


図 7 大口径電子銃の空間電荷制限電流の見積り

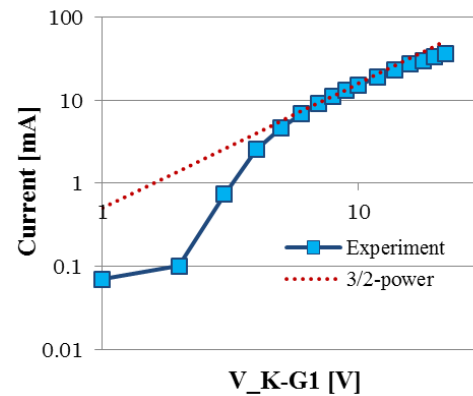


図 8 図 5 の I_K の両対数プロット