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 隆夫(東海大学) 安藤 利得、遊津 元希(金沢大学) 佐藤 杉弥(日本工業大学) 山際 啓一郎(静岡大学)

1. はじめに

電子ビーム・プラズマ系で生じる様々な非線形現象[1-4]の実験研究に供する目的で、大口径 (直径 120 mm)電子ビーム源を開発・製作し、テストを重ねつつ改良を加えてきた。同時に、 この電子ビーム源が作る電子ビームが引き起こすビーム・プラズマ不安定性が励起する波動現 象を詳細に調べるべくデータを貯めてきている。膨大なデータを取得したため解析が追いつか ないという現状であるが、本年度(平成 23 年度)実施した共同研究実験について簡単に報告す る。

2. 実験方法

実験は、宇宙研スペース・プ ラズマ実験施設内の高密度磁 化プラズマ発生装置(大型ヘリ コンプラズマ装置(LHPD)) 内に大口径電子ビーム源を設 置して行う。セットアップの模 式図を Fig. 1 に示す。大口径電 子ビーム源の構造、動作の詳細 については以前の報告[5 - 7]を 参照されたい。



Fig.1. 実験のセットアップの模式図.

カソード前面約2 mmの位置に設置される制御グリッドの熱変形が以前は大きな問題であっ たが、多数の小孔を 0.6 mm 厚のモリブデン板にエッチングしたもの(透過率 ≤45%)を採用す ることによりこの問題を解決した[6]。これにより、ビーム密度の精密な制御が大口径電子ビー ムについても可能になった[7]。しかしながら、ニッケル製のカソード板自体の熱変形が未解決 問題として残っていた。この問題を解決すべく、0.2 mm 厚のモリブデン板にニッケルメッシュ をスポット熔接したカソード板を製作し、その性能試験を実施した。結果は、熱変形の問題は ほぼ完全に解決されたものの、モリブデンとカソード剤の相性に問題があり、カソードの活性 化後、カソード板上の所々に酸化膜の剥離が生じてしまった。この問題は、モリブデン板上に 貼るニッケルメッシュとしてより目の細かいものを選択する、カソード剤の塗布方法に工夫を 凝らす、等で解決可能と考えるが、本年度中に確認する時間が無かった。

ヒーター線(1.5 mm 径のタングステン線)にもカソード剤を塗布し、カソード板との組み立 て精度を上げることで、ヒーターによるカソードの加熱効率を大幅に改善出来た。約350 Wの ヒーター投入パワーで十分なようになった(以前は約450 W 必要であった)。

電子ビーム・プラズマ不安定性の実験は、弱磁化プラズマ中に(今回示すデータは、バック



グラウンド 磁場強度 70 G 下アルゴン の アフターグ ロー・プラズマを使用) 短い電子ビームパルスを打ち込 むことで行なわれる。

計測には2次元プローブドライブ上に設置した特性インピーダンス 50 Ω のセミ・リジッド同軸ケーブルの中 心導体を利用 した rf ピックアップ プローブ (直径 0.5 mm、長さ9 mm。バイアスをかけることで円筒ラン グミュアプローブとしても使用可)、ビーム源方向を向い た円板ラングミュアプローブ (直径 3 mm、rf プラズマ源 方向は絶縁)を使用している。

3. 電子ビーム・プラズマ不安定性

放電としては、LHPD の励起アンテナに7 MHz の rf パル ス (~30 ms, 400 – 500 W) を 1 – 10 Hz の繰り返し周波 数で印加するパルス放電を使用する。 この アフターグ ロー・プラズマ (Ar) 中に電子ビームパルス (今回は約 20 us)を打ち込む(放電 rf パルスが切れた時点から電子 ビームパルスがスタートするまでの遅延時間をちとす る)ことでプラズマ不安定性を生じさせることができる。 この不安定性により励起される高周波ノイズを電子ビー ム源の前面で2次元的に可動なrf ピックアッププローブ により測定する。励起された高周波ノイズの生データの 一例を Fig. 2 に示す。実験条件は、 $p_{\rm Ar} = 2.25 \times 10^5$ Torr、 ビーム電圧 $V_{\text{beam}} = -60 \text{ V}, n_{\text{beam}}/n_0 \approx 1.2\%, t_D = 400 \text{ }\mu\text{s},$ 測定位置は、z = 40 cm、 $r \approx 0 \text{ cm}$ である。ここで、z は ビーム源前面からの距離であり、Fig.1とは異なる。以 下、 z はビーム源からの距離を示す。Fig. 2 の最上図が ビームパルス全体をカバーした、rf ノイズの時間発展の 様子である。それ以外の図は、それぞれの図のすぐ上の 図の一部を拡大したものである。時間スケールの異なる バンチ上になっていることが見て取れる。最下図の波束 のキャリア周波数が励起された電子プラズマ波の基本周 波数に相当する。このような構造の詳細を明らかにし、 来すところの物理過程を明らかにして行くことになる。

Fig. 2. rf ノイズの生データ. 最上図が約 20 μs の電子ビームパルスに相当するノイズの時間 発展の全体像. その他の 4 つの図は、それぞ れの図のすぐ上の図の一部を拡大したもので ある。 Fig. 3 に、励起された ff ノイズの最大 振幅の軸方向発展の例を示す。基本的 な実験条件は Fig. 2 の場合と同じであ る。z < 30 cm では、ほぼリニアにノイ ズ振幅は成長しているが、30 cm < z <50 cm では振幅はほぼ飽和している。振 幅は一旦下がるかに見えるが、z > 65cm で再び上昇に転じている。それもか なり急峻な上昇の仕方である。

Fig. 4 に、Fig. 3 の z = 40 cm 位置での rf ノイズ振幅の径方向分布を示す。ほ ぼフラットであるとも言えるが、変動 がある。電子ビームの不均一性に一因 があるのかもしれない。今後確認が必 要である。

以上のような、不安定性により励起された rf ノイズの時間・空間発展の詳細を現在 解析中で、今後理論モデルなどとの比較検 討により現象の物理過程を明らかにして行 きたい。

現段階で一つ言えることは、ここで示し たデータでは、入射電子ビームの密度が比 較的高く、不安定性が生じると直ちに非線 形領域に入っていることである。Fig.2の時 間的フラクタル構造はそれを反映している と考えられる。



Fig. 3. rf ノイズの空間発展の一例.



Fig. 4. rf ノイズの径方向分布. Fig. 3 の z = 40 cm に相当.

4. まとめ、今後の課題

直径 120 mm の大口径電子ビーム源は高い安定度で動作するようになった。カソード面の熱 変形の問題も解決された。最後に残った問題は、均一な電子ビームを得るために如何に均一に カソード剤を塗布するかである。ビームの質が高まるにつれ、LHPD に付随する問題も浮上し てきた。一部の部品が鉄などの磁性体であるため、バックグラウンドの磁場に予期せぬ変動が 生じているのである。データ解析に当たって要注意事項であろう。この問題にどう対処して行 くかも今後の課題の一つである。この不均一性を逆手にとった実験についても検討中である。

謝辞

佐々木進先生、阿部琢美先生のいつも変わらぬご支援に対し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いつも多大なご支援 をして頂いています。心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1. M.V. Goldman, F. Crany, D.L. Newman, and M. Oppenheim, Phys. Plasmas 7, 1732 (2000).
- 2. 竹田、"電子ビーム・プラズマ系における非線形現象"(静岡大学、博士論文、2003).
- 3. 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).
- 4. 竹田、山際、谷川、スペース・プラズマ研究会 平成17 年度, pp. 26 29 (2006).
- 5. 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, pp. 66 69 (2009).
- 6. 谷川、安藤、佐藤、山際、スペース・プラズマ研究会 平成21 年度, 37-1-37-4 (2010).
- 7. 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, 20-1 20-4 (2011).