# 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 利得、遊津 元希(金沢大学) 谷川 隆夫(東海大学)、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・プラズマ系では、電子ビームが励起する電子プラズマ波がビーム電子を直ちに 捕捉し(電子ビームの自己捕捉現象)、電子の位相空間ホールが生じる。この過程がその後の系 の非線形発展(パラメトリック不安定性、キャビトンの発生や電磁波放射など)に大きな影響 を与えることが理論・計算機シミュレーションを通して明らかになって来ている[1]。電子ビー ムの自己捕捉現象、それに続く電子の位相空間ホールの1次元的発展についてはクリアカット な室内実験がなされた[2-4]。しかしながら、スペースプラズマなどで生じる電子ビーム起源と 考えられる種々の現象を正しく理解するためには、斜め伝搬ラングミュア波の挙動に代表され るような2次元、3次元的な現象についても詳しく調べる必要がある。そもそも多次元系の理 論・計算機シミュレーションは大変難しいので、室内実験の実施が重要である。また、最近で は電子ビーム・プラズマ系の基礎実験は下火の傾向にあるが、その重要性に鑑み、ノウハウの 継承も大事であると考えられる。この様な考え方の元、宇宙研の共同研究実験として過去数年 大口径(直径 120 mm)電子ビーム源の整備を行ってきた[5,6]。年に1週間程度の実験時間し か取れなかったため、電子ビーム源の安定動作確保に手間取ったが、改良を重ねることにより 安定動作が可能になったので、本年度(平成22年度)の実験結果を簡単に報告する。

### 2. 実験のセットアップ

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(現在我々は この装置を"大容量へリコンプ ラズマ装置(LHPD)"と呼ん でいる)内に大口径電子ビーム 源を設置して行った。セットア ップの模式図を図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



[5,6] を参照されたい。昨年度の重要な改良点は、カソードの前面 2 mm 程のところに設置され る制御グリッドとして 0.6 mm 厚のモリブデン板に多数の小孔をエッチングしたもの(透過率 ≤45%)を採用することにより制御グリッドの酸化膜カソードからの熱(約800℃)による変形 を防止できたことである[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。また、今回の実験では、カソードの熱源となる渦巻状のタングステンヒー ターの線径を1 mm から 1.5 mm にすることにより、さらにビーム源まわりの熱シールドを改善 することにより、より安定にカソードを均一に熱することができるようになった。因みに、タ ングステンヒーターに投入されたパワーは約450Wであった。

電子ビーム源のアノード前面 20 cm の位置で測定した電子ビームの径方向プロフィルを図 2 に示す。プローブドライブの可動域の問題で片側の測定しかなされていないが、中心について 対称性を仮定すれば、直径約 7 cm で密度は 良い一様性を示しており、半値幅は約 12 cm

であり、ビーム源の口径と一致する。

カソード - 制御グリッド間のバイアス電  $EV_{bias}$ を変えることで電子ビーム密度 $n_{beam}$ がどの様に変化するかを示したのが図3で ある。制御グリッドをカソードに対して正 にバイアスすると $V_{bias} \approx 0.75$  Vあたりから 電子ビームが引き出されるようになる。  $1 V < V_{bias} < 3 V \subset n_{beam}$ を2桁近く変化させ ることができる。

電子ビーム・プラズマ不安定性の実験は バックグラウンドの磁場70G下で、アルゴ ンのアフターグロー・プラズマ中に短い電 子ビームパルスを打ち込むことで行なわ れた。

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5 mm、rf プラズ マ源方向は絶縁)を使用した。今回の実験 では2次元プローブドライブの駆動機構 に不具合が生じ、残念ながら限定的な測定 しかできなかった。

## 3. 電子ビーム・プラズマ不安定性

放電は、LHPDの励起アンテナに7 MHz





図3. カソード - 制御グリッド間バイアス V<sub>bias</sub>による電子ビーム密度*n*<sub>beam</sub>の制御.

のrfパルス(~20 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であった。 このアフターグロー・プラズマ(Ar)中に電子ビームパルス(0.2 – 5 μs)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to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ことになる。励起さ れた高周波の生データ、及びその周波数スペクトルの例を図4に示す。電子ビームの入射に呼 応して電子プラズマ波が励起されたと解釈すれば、周波数スペクトルのピークを与える周波数 が測定位置における電子プラズマ周波数に対応すると考えられる。アフターグロー中の遅延時 間toを変化させてこのピーク位置の周波数から算出した電子密度の対数値をプロットした結果



図4.電子ビーム・プラズマ不安定性により励起された高周波振動の観測例.ここで、  $p_{Ar} = 5.6 \times 10^{-5}$  Torr, ビームエネルギー $E_{beam} = 50$  eV, ビームパルス幅 $\Delta t_{beam} \approx 0.5$  µs,  $t_D = 300$ µs, 測定位置(ビーム源のアノードからの距離)z = 30 cm.

が図5である。赤線は指数関数フィットで あるが、e-folding time ≈ 300 µsで密度が減 衰している様子が見て取れる。

励起波動の振る舞いを調べる実験の一例として、図6に励起された波動の振幅の 空間的、時間的発展の様子を示す。この測 定では、 $\Delta t_{\text{beam}} \approx 5 \mu s$ の電子ビームが入射さ れている。ビームパルスの前半のピーク値 をビーム源のアノードからの距離に対し てプロットしたものが図6の左図である。 ビーム源から約13 cm離れた地点から波動 は指数関数的に成長する (e-folding length = 2.9 cm)。z = 20 cmまでに振幅は飽和し、  $z \approx 26$  cmより離れると、今度は逆に減衰し 始めている。ビームパルス内の励起波動の 時間発展の様子を見ると、図6右上図のよ うに、空間的に飽和する前はパルス内で波





動は時間的に成長し飽和、そして減衰する。一方、空間的に波動が飽和した後は、図6右下図 に見られるように、パルス内で時間的に飽和した後、再び成長を始めている。低周波の変調が かかって来ているように見える。今後、パラメトリック不安定性などを通して高周波モードが 低周波モードとカップリングするような非線形現象を観測するためにはさらに長い電子ビーム パルスを入射する必要があるだろう。

# 4. まとめ、今後の課題

数回の改良を経て、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。口径が大きいためカソード面の熱変形が未だに問題である。これを解決すべく、スプリングを用いたカソードの平面性を保つ機構を考案済みであり、次回の実験では試みる予定である。 今回は、2次元プローブドライブの不調なども重なり、極めて限定的な実験しか実施できな かったが、今後この電子ビーム源を用いて、電子ビーム・プラズマ系における種々の線形、非 線形波動現象の実験研究を進めて行く予定である。具体的には、斜め伝搬ラングミュア波の挙 動、パラメトリック不安定性の挙動、電子ビームの自己捕捉現象及びそれに続く電子の位相空 間ホールの多次元的な振る舞い、などの実験研究である。

謝辞

本実験を遂行するに あたり、ISAS/JAXAの 佐々木進先生、阿部琢 先生には多大なご支 援をして頂きました。 こで次くすしし上 で大力の山施するにあたり大 でするいました。 をお礼申し上げます。

実験遂行にあたり普 段からご助言頂いてい る東京農工大学の篠原 俊二郎先生、帝京大学 の飽本一裕先生にも厚 くお礼申し上げます。



図 6. 励起された波動の空間的(左図)、時間的(右側2つ の写真)発展の様子の例.ここで、 $p_{Ar} = 6.0 \times 10^{-5}$  Torr,  $E_{beam} = 70 \text{ eV}, \Delta t_{beam} \approx 5 \mu s, t_D = 600 \mu s.$  測定はビームのほぼ 中心でなされた.右上の写真はz = 19 cm, a下の写真はz = 22 cmにおける生データ.

# 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).