

ビームプラズマ放電現象の発生機構に関する研究

佐々木進 河島信樹（宇宙科学研） 窪田伸治（日本放送協会）
宮武貞夫（電通大） 百々太郎（愛媛大） 高橋邦明（ウシオ電機）

概要

宇宙空間における電子ビーム放射実験に関連して、一様磁場中の中性ガスに電子ビームを入射し、ビームプラズマ放電現象（BPD: Beam Plasma Discharge）を発生させ、その物理機構に関する実験的研究を行った。BPDの発生に必要な電子ビーム電流の臨界値は、ビームの加速電圧にほぼ比例し、中性ガス密度に逆比例するという比較的単純な依存性が確認された。但し磁場強度に対する依存性は、他の研究報告と異なり、もっと複雑なものであることがわかった。波動スペクトル及び電子エネルギー分布計測では、BPD発生前から時間的に増大するアップーハイブリッドチャンネルの波動励起とビームエネルギーの散逸が検出され、BPD発生にともない更に強力な波動の励起と急激なビームエネルギーの散逸が観測された。これらの実験事実の考察から、BPDの発生には静電波動を介した強力なビームプラズマ相互作用がその本質的な役割を果たしていることが判明した。

1 序論

宇宙空間でのプラズマ物理現象では、多くの場合、熱平衡からはずれた電子の集団運動がその主役を果たしている。その中でも電子ビームは、オーロラ、磁気圏波動、電波星からの輻射などのソースとして最も重要なものと認識されている。このような背景から、近年盛んとなった宇宙空間での能動実験（宇宙空間を物理実験の場として利用する実験）では、その手段として多くの場合電子ビームが使用されてきた。宇宙空間での電子ビーム放射実験は、1969年から本格的にスタートし、人工オーロラの励起、電子エコーの検出などに成功し、多くの宇宙プラズマ物理に関する知見が得られたが、その半面多くの謎も生まれた。そのうち最も大きな謎は、電子ビーム放射にも拘らず、飛翔体の帯電が従来の理論で予想されるものよりも遙かに小さかったことである。この謎を解く有力な鍵として、1970年半ばにビームプラズマ放電が Bernsteinらにより提案された（Bernstein et al., 1979）。このモデルでは、飛翔体から宇宙空間に放射された電子ビームは、宇

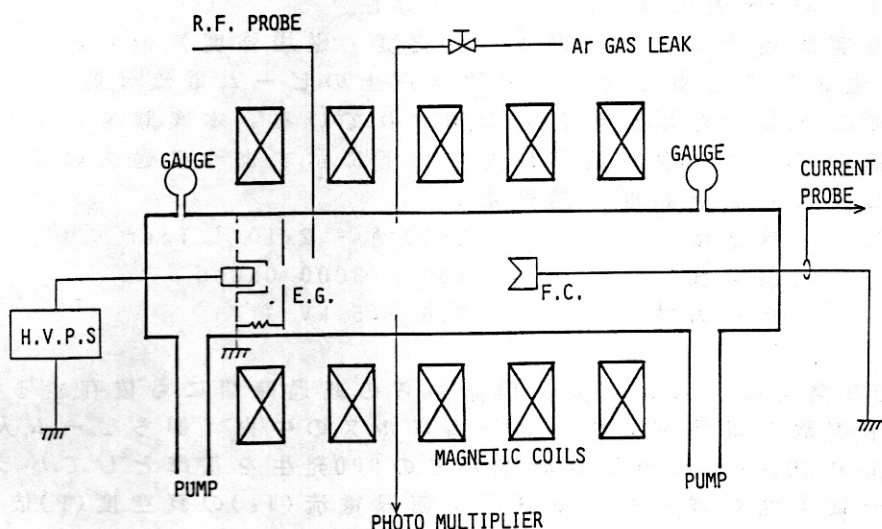
宙空間プラズマとの相互作用により周囲に大量のプラズマを生成し、そのプラズマからの帰還電子電流により飛翔体の帯電が緩和されるというものである。彼等は、1970年代後半から1980年代にかけて、この現象を地上の超大型真空チェンバーでの模擬実験で実証し、現在では電子ビームを放射する飛翔体の帯電緩和を説明する最も有力な説となっている。しかしながら、宇宙空間での電子ビーム放射実験では、中性ガスを同時放射した特殊な場合

(Sasaki et al., 1985) 以外には、明確なBPD発生の証拠は報告されていない。また、Bernsteinの提案以来、BPDに関する理論的実験的研究が世界各所で行われたにも拘らず、現在に至るまで、一貫したBPDの物理機構に関するモデルは確立されていない状況にある。

本研究は、これまでの実験的研究で充分なされていなかったBPDの実験条件に対する依存性を広範囲に調べ、BPD発生にともなう波動及び粒子エネルギーのスペクトルを詳細に調べることによって、BPDの発生機構を明らかにすることを目的として実施している。研究は現在未だ進行中であるが、本論文では、現在までの研究で明らかになったBPDの発生機構に関する実験結果を報告する。

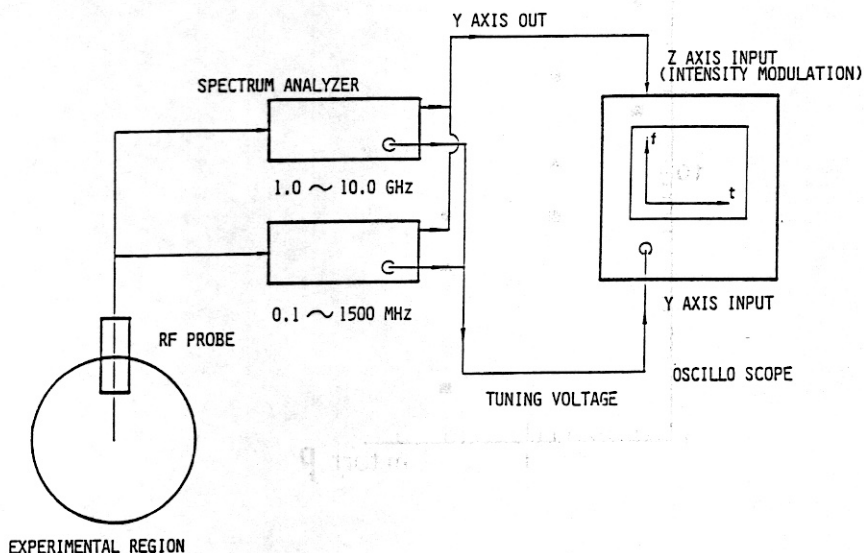
2 実験装置

本実験に用いた実験装置を第1図に示す。ガラス管(径4インチ 長さ2m)の周囲に磁場コイルを配置し、一様な縦磁場(最大3000 Gauss)を発生させる。チェンバーの片側に電子銃を配置し対向側にはビームコレクターまたはビームエネルギー測定用のファラディカップ(4枚グリッド構成)を配置する。電子銃領域と実験領域は中央に差動排気用のパイプをつけた仕切板で分離し、二系統の排気系を用いて電子銃部分の高真空を維持する。実験領域にはアルゴンガスを導入し、チェンバー壁には高周波用アンテナ 光学観測 真空度計測用のポートを取り付けている。電子銃(日本電子 JEBG-03U)は、直熱タンタルカソードを用いたピアス型で、0.5マイクロバーピアンスの特性をもち、定格最大出力は6kV, 0.5Aである。電子銃システムは、繰り返し周波数50Hz パルス幅60 μ secのパルス運転で動作させている。



第 1 図 BPD実験装置

BPD発生 の 判定基準として フォトマルの出力（光の励起）と
 ファラディカップ出力（ビームの散逸）を用いた。波動および電
 子エネルギーの観測には X-Yモニターを利用したスペクトル直
 読表示装置を作製した。今回使用した波動スペクトル表示装置の
 構成を第2図に示す。



第 2 図 波動スペクトル表示装置

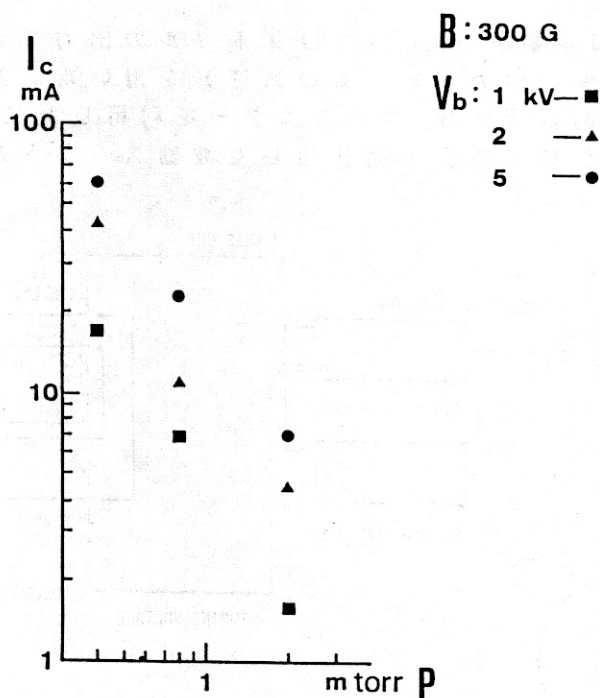
3 実験結果

3-1 BPD発生のパラメーター依存性

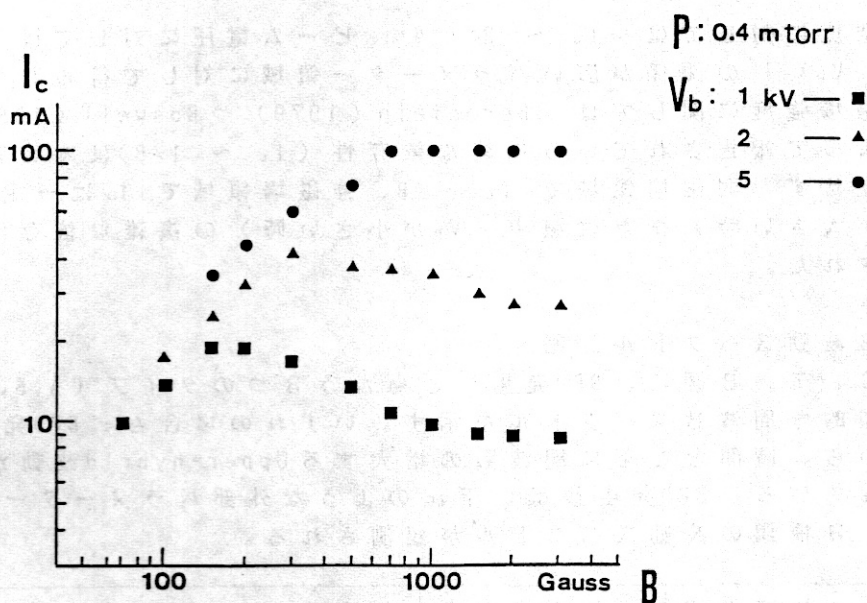
ある実験条件（ビーム電圧 真空度 磁場強度）のもとで BPD を発生させるためには、ある閾値以上のビーム電流（臨界電流）が必要であることは以前から指摘されている。本実験ではこの臨界電流のパラメーター依存性を、以下に示すように過去の実験と比較してより広い範囲で調べた。

真空度	$2 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-3}$ Torr
磁場強度	100 - 3000 Gauss
ビーム電圧	0.6 - 5 kV

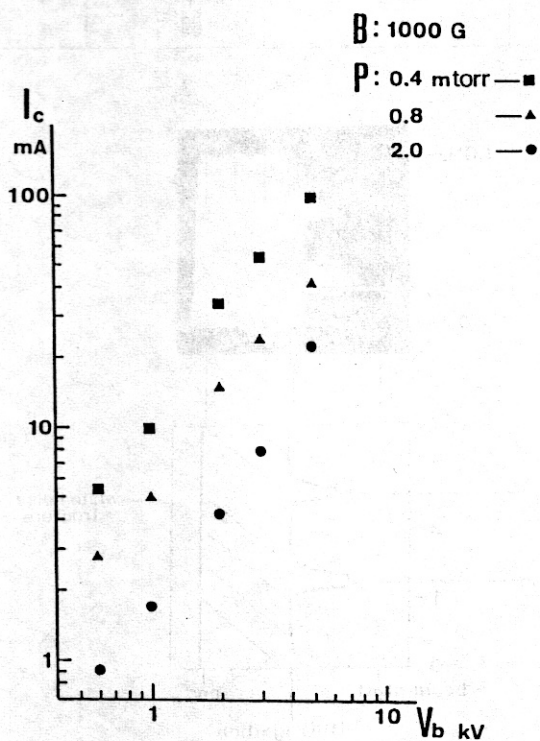
BPDの発生は、パルス入射開始からの経過時間にも依存するので、本実験では便宜的に、ビームパルスの中央（即ちビーム入射開始より $30 \mu\text{sec}$ 経過した時点）での BPD 発生を基準としてパラメーター依存性を調べた。第3図に臨界電流 (I_c) の真空度 (P) 依存性、第4図に磁場 (B) 依存性、第5図にビーム電圧 (V_b) 依存性を示す。



第3図 臨界電流の真空度依存性



第 4 図 臨界電流の磁場強度依存性



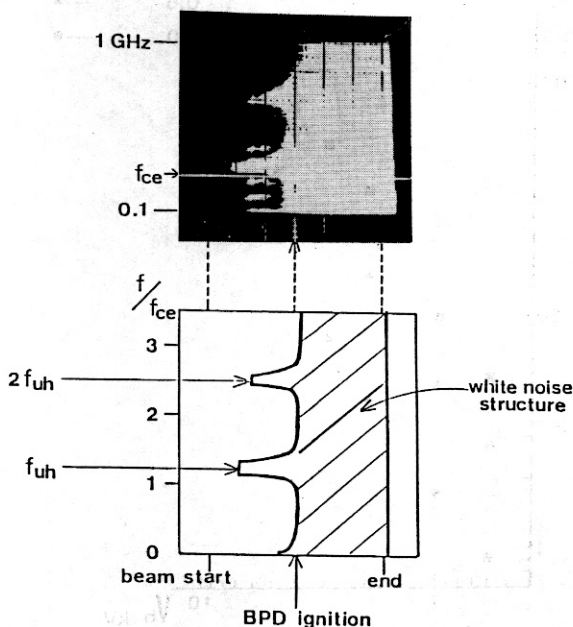
第 5 図 臨界電流のビーム電圧依存性

真空度に対しては $1.0 \sim 10^{-10}$ ビーム電圧に対しては $1.0 \sim 100$ の関係が広いパラメーター領域に対して得られている。磁場強度に関しては、Bernstein (1979) や Boswell (1983) らによって報告されている単純な依存性 ($1.0 \sim 1/B$) は本実験では成立せず、弱磁場領域で $1.0 \sim B$ 、強磁場領域で 1.0 は一定 (V_b が大きい時) または減少 (V_b が小さい時) の複雑な依存性が観測された。

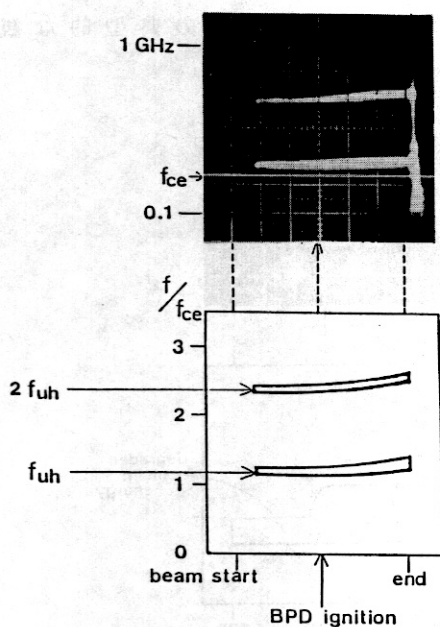
3-2 波動スペクトル計測

第6, 7, 8 図に、BPD発生にともなう3つのタイプ (A, B, C) の典型的な周波数スペクトルを示す。いずれの場合も、BPD発生以前から、時間とともに周波数の増大するUpper-hybrid波動が検出されている。BPD発生後は、下記のような外部パラメーター領域で、3種類の波動スペクトルが観測される。

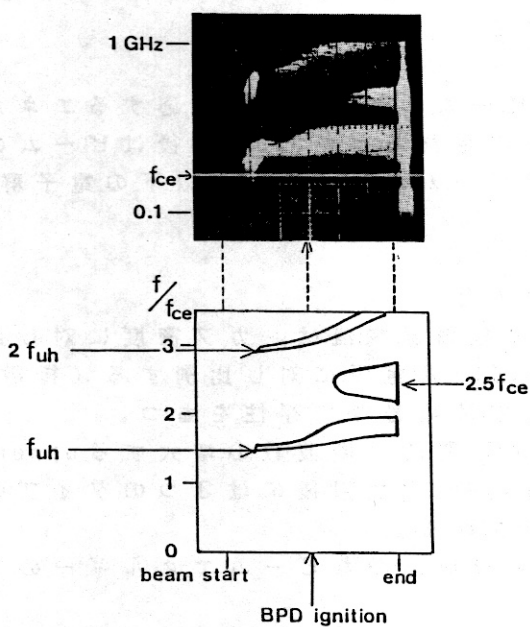
ビーム加速電圧	中性ガス密度	磁場強度	スペクトルタイプ
低	小	強	A
—	—	—	B
高	大	弱	C



第6図 タイプA波動スペクトル



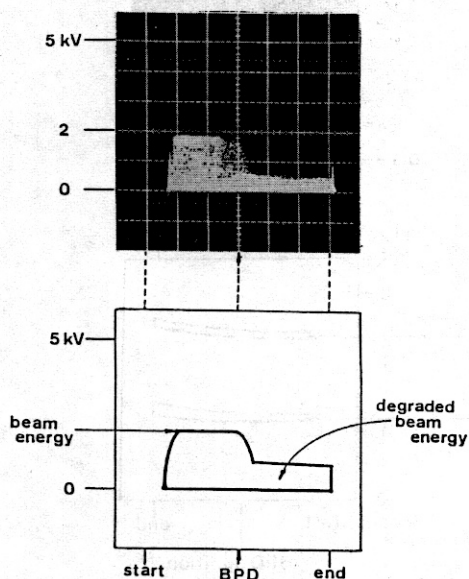
第 7 図 タイプ B 波動スペクトル



第 8 図 タイプ C 波動スペクトル

3-3 電子エネルギースペクトル計測

ファラディカップを用いて、BPD前後でのビーム電子のエネルギースペクトルを計測した。第9図にその典型的な観測例を示す。



第9図 BPD前後のビームエネルギースペクトル
但し濃度はそのエネルギーまでの積分電流に対応する。

BPD発生前には、ビームの加速電圧に対応するエネルギー成分のものが主として検出されるが、BPD発生後はビームのエネルギーの成分は消滅し、ビームのエネルギー以下の電子群が卓越する。

4 議論

実験結果をまとめると

- 1 BPD発生のための臨界電流は、ガス密度に対し逆比例し（指数-1.0）、ビーム電圧に対し比例する（指数1.1）。磁場強度に対しては複雑な依存性をもつ。
- 2 BPD発生以前に時間的に周波数の増大するupper hybrid波の励起がある。BPD発生以後には3つのタイプの波動スペクトルが観測される。
- 3 BPD発生にともない急激なビームエネルギーの散逸がある。

upper-hybrid resonanceの周波数は

$$f_{UHR} = (f_{ce}^2 + f_{pe}^2)^{1/2}$$

f_{ce} : 電子サイクロトロン周波数

f_{pe} : 電子プラズマ周波数

で表される。BPD発生前に f_{UHR} が時間的に増大することは、中性ガスのビームによる衝突電離のため背景プラズマ密度が時間的に増大していることを示している。背景プラズマ密度(n_c)の時間的変化は

$$n_c \sim I_b \cdot P \cdot \sigma \cdot t \quad (1)$$

t : ビーム放射開始からの時間

σ : 衝突電離断面積

この背景プラズマとビームとのビームプラズマ相互作用により電子ビームのエネルギーが波動に輸送されると考えられる。もしBPD発生の閾値が、ビームとプラズマ波のカップリング条件

$$\omega \sim kv_b \quad (2)$$

v_b : ビーム速度

k : プラズマ波の波数ベクトル

で決るとし、 $\omega \sim \omega_{pe}$ 、 k はビームの形状で決る定数とすれば、(1)及び(2)式より t を固定した時の臨界電流は

$$I_c \sim P^{-1} \cdot V_b$$

となり実験事実と比較的近い依存性が得られる。但し σ の V_b 依存性($\sigma \sim V_b^{-2}$)を考慮すれば、 V_b に対する依存性は、 $V_b(1+\epsilon)$ となる。磁場に対する依存性は、 k が弱磁場領域で B に比例し、強磁場領域で飽和または減少するとすれば説明できるが、その物理的意味は明らかではなく、関与している静電波の成長率にも踏込んだ境界条件も考慮したより精密な理論が必要と考えられる。

周波数スペクトル(プラズマ周波数付近の波動の励起)から推定される相互作用のモードは、トリベルピースモード(cold plasma近似)とビームとのランダウ型相互作用によるものと考えられる。この場合、UHRブランチ($\omega_{pe} > \omega_{ce}$ の時 $\omega_{pe} < \omega < \omega_{uh}$ 、 $\omega_{pe} < \omega_{ce}$ の時 $\omega_{ce} < \omega < \omega_{uh}$)とプラズマブランチ($\omega_{pe} > \omega_{ce}$ の時 $\omega_{ce} > \omega$ 、 $\omega_{pe} < \omega_{ce}$ の時 $\omega_{pe} < \omega$)のふたつのブランチで相互作用が可能であるが、 $\omega_{pe} > \omega_{ce}$ の時、UHRブランチの成長率が大きく、 $\omega_{pe} < \omega_{ce}$ の時 プラズマブランチの相互作用が大きいとされている(Christiansen et al., 1982)。本実験の場合でもタイプCのスペクトル(卓越したUHR波動が励起される)は、 $\omega_{pe} > \omega_{ce}$ の条件で観測されており上記の仮説を支持している。これらの実験事実から推定されるBPDの全体像は次のようなものとなる。

1. ビームと中性ガスとの衝突電離で、時間的に増大する初期背景プラズマが生成される。
2. プラズマ密度がある閾値を越えた時、背景プラズマ内の静

電波とビームとが強いランダウ型相互作用をおこない、強力な静電波が励起される。

3. 励起された強い波動が、中性ガスを電離（RF放電）する。RF放電で増大した背景プラズマは更にビームとの相互作用を強め、この正のフィードバックにより放電は成長し、波動強度の飽和時点、または実験領域からの粒子損失及び放射損失による電力損失が入力電力につりあった時点で放電が維持される。

5 結論

BPDの発生機構に関する実験的研究を行った。BPD発生のための臨界ビーム電流のパラメータ依存性及びBPD発生前後の波動、粒子エネルギースペクトルの研究から、BPD発生にはトリベルビースモードの静電波とビームとの粒子波動相互作用が、重要な役割を果たしていることが結論された。BPDの現象全体は、ビーム粒子から静電波、静電波から背景電子への2段階の粒子波動、波動粒子相互作用と電離現象が同時に関与した複雑なプロセスである。その全体像をつかむには、個々のプロセスを有機的に結びつけ、これらプロセス全体にわたるエネルギー輸送を定量的に把握できるような研究のアプローチが必要であり、現在そういった方向で実験を発展させるための準備を行っている。

参考文献

- Bernstein, W., et al., Further laboratory measurements of the beam-plasma discharge, J. Geophys. Res., 84, 7271, 1979
- Boswell, R. W. and P. J. Kellogg, Characteristics of two types of beam plasma discharge in a laboratory experiment, Geophys. Res. Lett., 10, 565, 1983
- Christiansen, P. J., et al., Laboratory beam-plasma interactions-linear and nonlinear-, in Artificial Particle Beams in Space Plasma Studies edited by B. Grandal, 439, 1982
- Sasaki, S., et al., Ignition of beam plasma discharge in the electron beam experiment in space, Geophys. Res. Lett., 10, 647, 1985