

波動粒子相互作用直接観測を目指した

スペースプラズマチェンバー実験

小嶋 浩嗣¹, 下山 学², 平原 聖文², 小木曾 舜³

1. 京都大学生存圏研究所
2. 名古屋大学太陽地球環境研究所
3. 名古屋大学大学院工学研究科

1. はじめに

地球の放射線帯外帯における高エネルギー電子の生成・消滅機構は、人類が宇宙を利用していく上で理解しておくことが非常に重要である。そしてその電子の生成・消滅機構にプラズマ波動と電子の相互作用(波動粒子相互作用)が大きな役割を担っていると考えられ始めている。放射線帯に限らず、無衝突プラズマである宇宙プラズマ中におけるエネルギー輸送過程には、波動粒子相互作用が必要である。そのため従来までの宇宙プラズマ中の物理現象を観測する科学衛星には、プラズマ波動観測器とプラズマ粒子計測器が同時に搭載されている。しかし、これまでの衛星観測ではプラズマ波動は、時間波形あるいは周波数スペクトルとして観測され、プラズマ粒子はそのエネルギー別のカウント値やモーメント計測を行い最終的には速度分布関数として、プラズマ波動現象と比較しながら、波動粒子相互作用を解析していた。しかし、この波動粒子相互作用におけるエネルギー授受量は、電磁場中での荷電粒子の運動方程式から下記のように計算される。

$$W = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} mV^2 \right) = \mathbf{E} \cdot \mathbf{V} = q|\mathbf{E}||\mathbf{V}|\cos\theta$$

(ここで、 m は質量、 q は電荷量、 \mathbf{V} は速度ベクトル、 \mathbf{E} は電界ベクトル、そして θ は電界ベクトルと速度ベクトルの位相差である)。つまり、波動粒子相互作用を定量的に捉えるには、電界、および、それと相互作用する粒子の速度ベクトルとの位相差が重要なものであり、この情報は上述のようなプラズマ波動と粒子の速度分布関数を別々に求め比較する上では失われてしまっている。

2015年に打ち上げが予定されている地球の放射線帯を探索する科学衛星 ERG には、常識の W を直接観測する仕組み「WPIA(Wave-Particle Interaction Analyzer)」が搭載される。これでは、プラズマ波動の波形観測結果と、プラズマ粒子の観測 1 イベント毎の時間、エネルギー、速度ベクトルをすべて機上のメモリに保管し、 W が計測できるようになっている。これは世界初の試みであり、波動粒子相互作用を定量的におさえることができるデータが得られることが期待されている。我々はこの初めての試みである WPIA 観測を精度良く行うための測定方法や解析方法について、計算機シミュレーションやスペースプラズマチェンバー実験(本報告書)を用いて検討を行っている。

WPIA では、粒子計測器が検出した粒子イベントひとつひとつの速度ベクトルと、その瞬間のプラズマ波動電界ベクトルの向きから位相差を求め、時間的に積分していったり、その位相差毎の統計をとったり、とする予定である。チェンバー実験では、スペースプラズマチェンバー内に波動を励起し、その波動とプラズマをそれぞれプラズマ波動受信器とプラズマ観測器で捉えて WPIA 計算を行うデータを取得し、実際の計算アルゴリズムを検討するためのデータ提供を目的としている。

2. スペースプラズマチェンバーによる検証実験

図 1 が平成 25 年度における実験 configuration である。電子ビームを放出してプラズマ波動をチェンバー機軸方向に伝搬させ、その波動と粒子の相互作用をプラズマ波動受信器と粒子観測器で捉えようとしている。昨年度までは電子ビーム源としてフィラメント型のものを使用していたが、25 年度は東海大学の谷川隆夫教授から傍熱型のビーム源をお借りして実験にもちいている。これはフィラメント型であると電子ビームが空間的に一様でなく、また、安定していないように前年度の実験では見受けられたからである。

粒子計測器については、昨年と同様 MCP・静電分析器を含むものを使用した。粒子計測器は、MCP が放電しないようにセンサー空間を高真空にしており、ターボ分子ポンプの部分は大気圧になっている。そのためチェンバー内に大気圧空間と高真空空間をつくりだすための構造となっており、これを大気封じチェンバーと呼んでいる。センサー部の重量を支え、さらにターボ分子ポンプの駆動およびデータ取得ラインの確保のため、フランジから管を引き出している。頭胴部電子ビーム源側に向けられてセンサーを配置し、最前面に

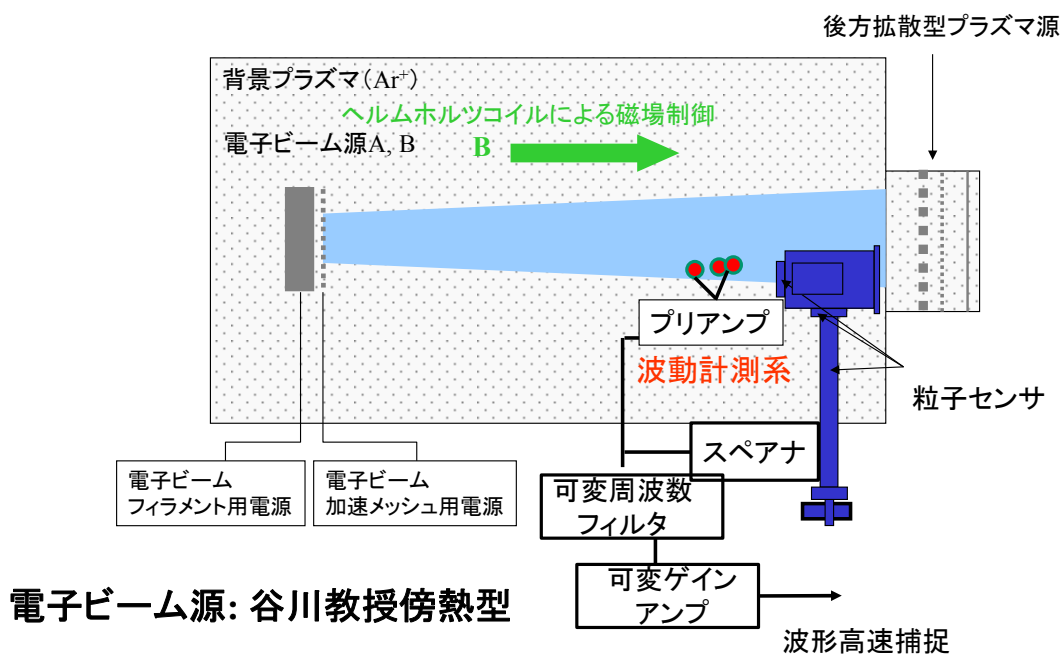


図 1: 平成 25 年度における実験 configuration.

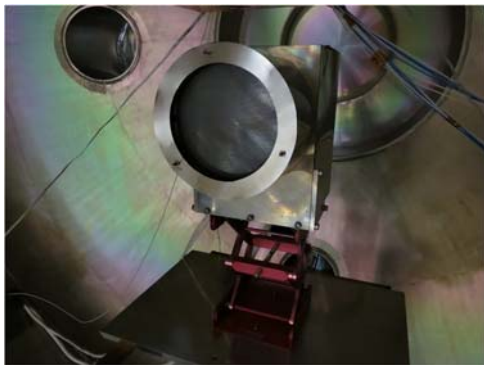


図 2: 傍熱型電子ビーム源(東海大・谷川教授提供)

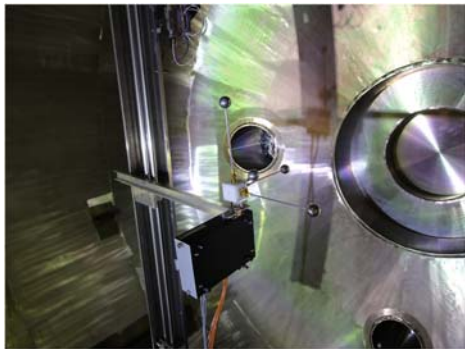


図 3: プラズマ波動観測器とセンサー.

0.1mm φ のピンホールがあげられている。

プラズマ波動観測器も昨年と同様の 3 軸電界計測タイプを用いている。本年度は空間的な現象の依存性を計測できるように図 3 に示すように 3 軸可動ステージ上に設置した。

3. 実験結果

本年度は傍熱型電子ビーム源を用いたことにより現象の安定性・再現性が格段に高くなった。そして、図 1 に示すように電子ビーム内にプラズマ波動プローブが空間的に配置されてしまうような configuration であるとプラズマ波動の励起がみられず、図 4 のように外部磁場の方向をチェンバー機軸方向から傾け、電子ビームの向きを変更した際にのみプラズマ波動が観測された。

図 5 は観測されたスペクトルである。3.5kHz にシャープなスペクトルがみえる。これはチェンバー機軸方向と垂直で水平方向の電界成分の結果である(他の成分に大きな差はなかった)。この時外部磁場は、チェンバーの機軸方向に 45,000nT、垂直方向に 90,000nT(もう一軸はゼロ)印加している。電子ビームの加速電圧は 50V である。

この 3.5kHz という周波数は、電子-Ar プラズマ系における LHR 周波数帯域に相当する。そのため、この励起プラズマ波動の外部磁場強度依存性について示したのが、図 6 である。

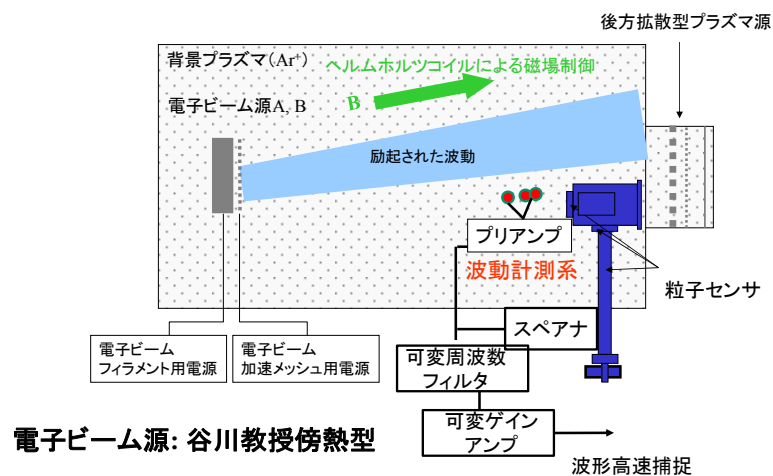


図 4: プラズマ波動励起が見られる場合の電子ビーム configuration.

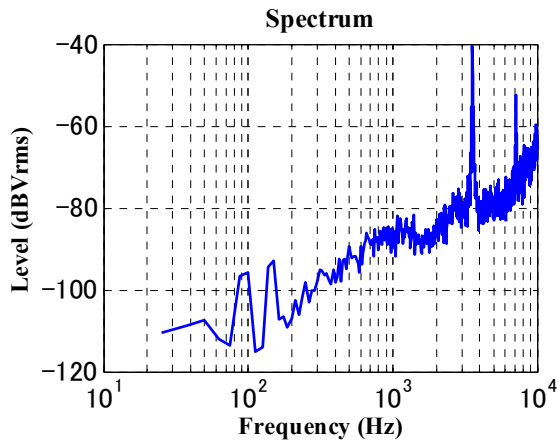


図 5: 励起されたプラズマ波動.(3.5kHz).

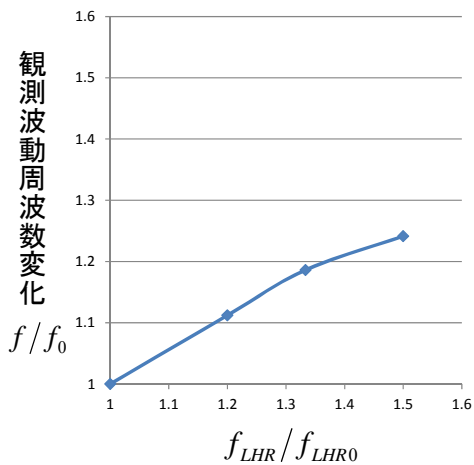


図 6:外部磁場変化による LHR 周波数と励起波動周波数の関係.

作用する粒子を捉えるにはチェンバー機軸方向に伝搬する静電波が必要である。現状の configuration では伝搬距離が十分ではないため波動が成長できていない可能性が高い。そこでもっと低速で伝搬するイオン音波的な波動にターゲットを変更して波動の励起が行える籠形プラズマ源を用いた実験を現在計画中である。

謝辞

東海大学谷川隆夫教授には傍熱型ビーム源の使用を了承していただきました。ここより感謝いたします。また、実験計画にあたり、ISAS 阿部琢美准教授には大きな支援をいただきました。また、実験遂行にあたりましては、スペースプラズマ共同研究設備の山本育男技官に大変お世話になりました。ここにお礼を申し上げます。

外部磁場の角度を一定に保ったまま絶対値を変化させている。横軸は変化させた際の初期 LHR 周波数で、縦軸は同様に励起されたプラズマ波動の初期周波数で規格化してある。この外部磁場の変化に対する励起プラズマ波動周波数の変化をみていると、低域混成波に関連したプラズマ波動であることが予測される。そして、このプラズマ波動がビームの外縁で観測されること、電界ベクトルが斜めになっていることも考えると、**Lower Hybrid Drift** 不安定性に関連した波動励起であると推測される。

詳細は背景プラズマのパラメータも含めて、分散関係も押さえた解釈が必要であるが、WPIA の精度評価を行うための本実験においては、このプラズマ波動では電界とその相互作用する電子の向きが、粒子検出器の検出方向とまったく異なった向きとなる現象であるため、この波動において解析を進めることには、本実験目的から外れることになる。粒子計測器を用いずに電流プローブによって電流を測定し、 $\mathbf{E} \cdot \mathbf{J}$ を計算しても等価の結果が得られると考えられるが、この場合も電流プローブの感度に方向性をもたせる必要がある。粒子計測器で相互