

室内シミュレーションによる波動粒子相互作用の直接観測実験

小嶋 浩嗣¹, 下山 学², 平原 聖文², 小木曾 舜³

1. 京大大学生存圏研究所
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

2015年打ち上げ予定であるERG衛星において我々は、WPIA(Wave-Particle Interaction Analyzer)という観測手法を世界で初めて導入する。ERG衛星では放射線帯の高エネルギー粒子生成機構の解明が大きな目的の一つであるが、現在、その生成機構には「波動粒子相互作用」によるプラズマ波動エネルギーから粒子のエネルギーへという伝達機構が重要であると考えられている。WPIAでは、この波動と粒子の相互作用を定量的に計測することをターゲットとしている。WPIAでは、プラズマ観測装置から得られる速度ベクトルとプラズマ波動観測器から得られる電界ベクトルとの位相差を観測する。それは、次式

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

で表されるように、電界ベクトルと速度ベクトルのスカラー積が粒子のkineticなエネルギーの時間変化に等しいからである(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)。

ERG衛星では、このエネルギー交換量の計算を機上にもつCPU上で動作するソフトウェアで実現するため、SoftwareタイプのWPIAということでSWPIAと名付けられている。

SWPIAがERG衛星で行う観測は初めての試みである。これまでは粒子とプラズマ波動の計測結果を粒子は分布関数、プラズマ波動は波形あるいはスペクトルという形で解析を行い、その両者の時間変化の相関性からなにか物理現象の解釈を行う、という手法が非常に伝統的なやり方であった。しかし、この場合、お互いの時間分解能も大きく異なり、また、仮に粒子計測器の時間分解能が飛躍的に進歩したとしても、速度分布関数になった時点で、上記の式でいうところの θ という位相情報は消失してしまっている。これでは定量的にエネルギー授受が、「どちらからどちらへ」、「どれだけ」行われているのか、ということとは永遠にわからない。SWPIAでは、上式で記述している $\mathbf{E} \cdot \mathbf{V}$ を観測された粒子一つ一つに対して計算していく(図1参照)。

実際のSWPIAでは図1のようにそのまま計算を行っていく他に、例えば、位相角 θ 毎にカウント分布を求めてみる、など、その計算アルゴリズムについてはソフトウェアで実現しているメリットで非常にフレキシブルである。しかし、今回初めての試みということで、実際の観測ではどのような点が課題となってくるかを事前に調査しておく必要がある。そこで、本研究課題では、スペースプラズマチェンバー内に電子ビームを打ち込むことによ

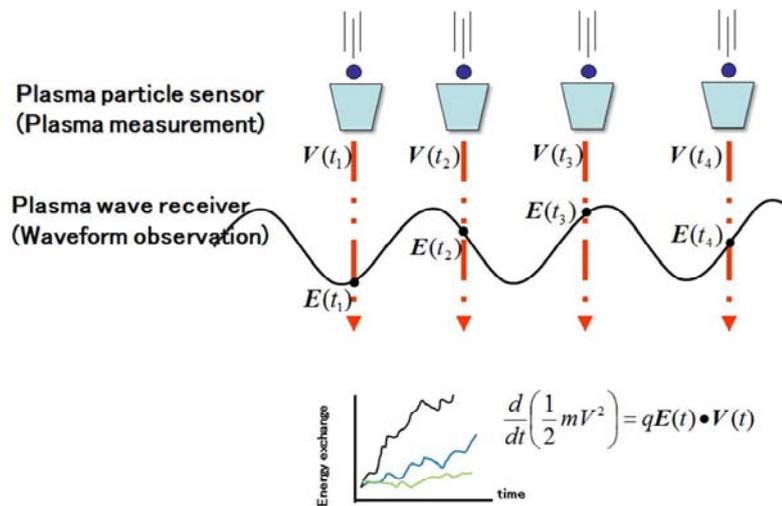


図 1: WPIA の原理.

ってプラズマ波動を励起させ、同時に粒子計測器とプラズマ波動計測器で観測を行いながらデータを収集し、SWPIA の動作検証とアルゴリズムについての検討を行うための基礎データを取得することを目的とする。本年度は初年度ということもあり実験系の設定・確認・改良を繰り返し、電子ビームを打ち込んだ状態でのスペースプラズマチェンバー内での環境を把握することを第一の目的としている。

2. スペースプラズマチェンバーによる検証実験

図 2 に本課題における実験 configuration を示す。後方拡散型プラズマ源より Ar プラズマを生成させ、その状態でプラズマ源と反対側に置かれた電子ビーム源から電子を放出させる。プラズマ源の前、電子ビーム源方向を狙って、粒子計測器およびプラズマ波動観測器を設置し計測を行う。以下に今年度製作して実験に用いたセンサーについて述べる。

2-1 粒子計測器

電子を計測するための MCP・静電分析器を含む粒子計測器である。スペースプラズマチェンバー内に設置した粒子計測器を図 3 に示す。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、最全面に 0.1mm ϕ のピンホールがあげられている。

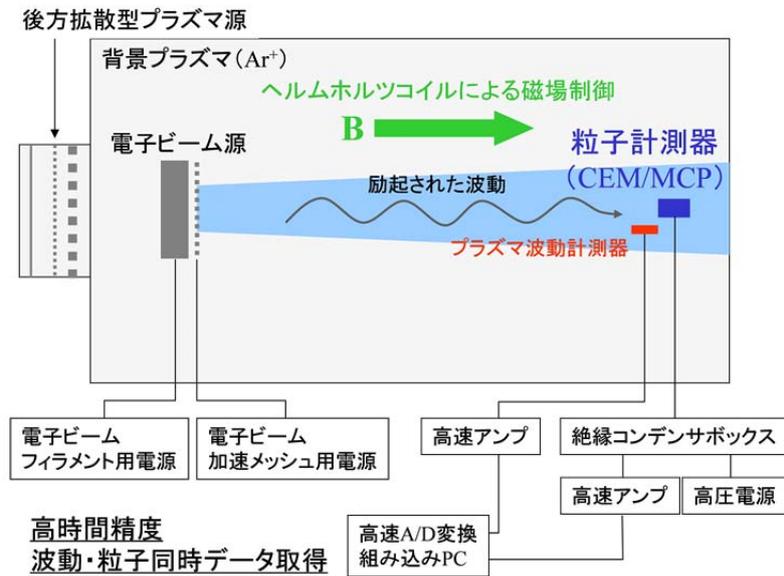


図 2: 本課題における実験の configuration.

2-2 電子ビーム源

プラズマ波動を励起させるためのエネルギーソースとするため、電子ビームをスペースプラズマチャンバー内に打ち込むための電子ビーム源をプラズマ源と反対側に設置した。本年度試作を行った電子ビーム源は、タングステンによるフィラメント型のもの、酸化バリウムによる表面処理を行った傍熱型のものである。図 4 は実際に電子ビームを放出している際のフィラメント型電子ビーム源である。本実験ではプラズマ波動の安定した励起のため、空間的にできるだけ密度が均一な電子ビームがつくることが望ましい。その意味では、均一なビームが実現できる傍熱型の電子ビーム源が適しているが、本年度の実験では耐熱性の問題からフィラメント型を用いている。

2-2 プラズマ波動観測器

プラズマ波動観測はセンサー(プリアンプ)をチャンバー内に設置、その出力をチャンバー外に引き出して計測する。図 5 は設置されたプラズマ波動プローブである。20cm 長のモノポール上に球を配置している。3次元方向の各プローブは、参照電位用として配置した球との差動電位を計測し出力する。

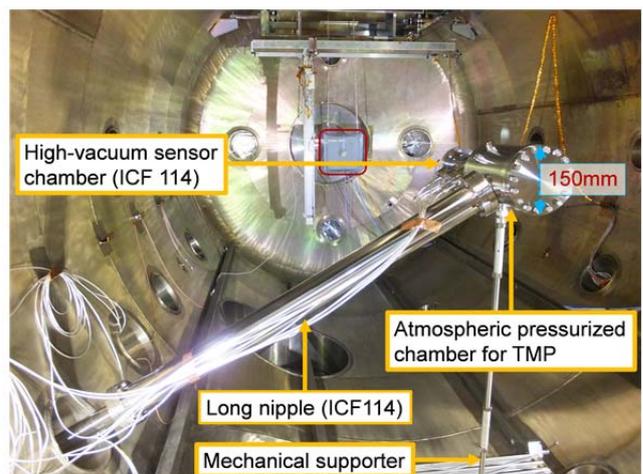


図 3: 大気封じチャンバー型粒子計測器.

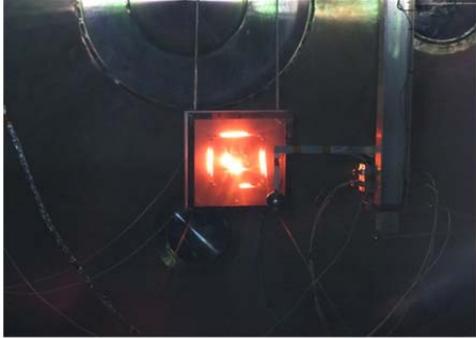


図 4: フィラメント型(タングステン)電子ビーム源.



図 5: プラズマ波動観測センサー.

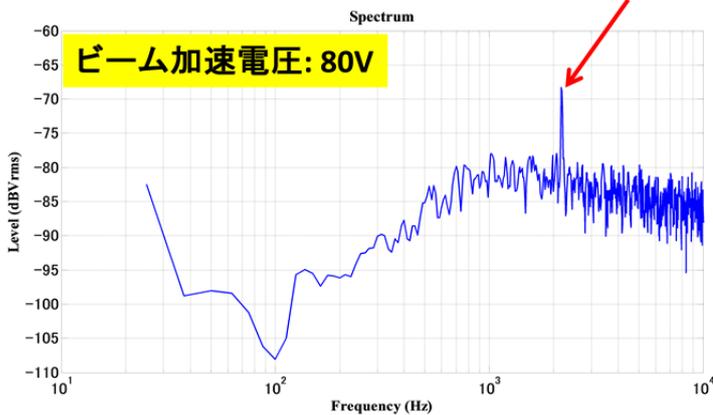


図 6: 観測されたプラズマ波動のスペクトル(2.17kHz).

3. 実験結果

本年度は実験装置の設計・性能確認を主に行ったがそれらの実験の中で得られた波動スペクトルの一例を図 6 に示す。電子ビーム加速電圧が 80V の時の観測データである。この時、外部磁場あるいは電子ビームの方向に対し、垂直方向への電界振動が観測された。その観測周波数は、2.17kHz であり電子のプラズマ周波数が 3MHz 程度であることを考えると非常に低い周波数で励起されていることがわかる。しかし、この励起スペクトルは非常に不安定であることも実験中にわかっており、電子ビームやプラズマのパラメータに対し、どのような依存性をもっているのかが、まだ明らかにできていない。

4. まとめ

本年度は実験系の開発と検証にかなりの時間を費やした。その中でプラズマ波動が励起されている可能性が高いデータも得られているが、その不安

定性から十分なデータが得られていない。不安定性の要因の一つとして電子ビームの空間的な非一様性があると考えており、今後、傍熱型電子ビーム源の利用を考えていく。

謝辞

実験の実行にあたり、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。