

# 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<sup>1</sup>, 下山 学<sup>2</sup>, 平原 聖文<sup>2</sup>, 小木曾 舜<sup>3</sup>

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

2016 年度に打ち上げが予定されている ERG 衛星は、地球放射線帯における高エネルギー電子の生成機構の解明を一つの目的としている。その生成機構として「波動粒子相互作用」が有力な候補として考えられている。波動粒子相互作用は無衝突状態にある宇宙プラズマ中において、粒子の kinetic エネルギーを波動が媒体となって別の粒子へと輸送していく重要なプロセスである。その波動と粒子間のエネルギー授受を直接観測する世界初の手法が、ERG 衛星に搭載される。「波動粒子相互作用解析装置(WPIA: Wave-Particle Interaction Analyzer)」と呼ぶこの手法では、従来の観測では、情報を失っていた「粒子の速度ベクトル」と「プラズマ波動の瞬時ベクトル」との位相差を観測する。それは、よく知られているように波動と粒子との相互作用によるエネルギー授受の方向は、この位相差で下記のように決まるからである。

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

(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  $\theta$  は電界ベクトルと速度ベクトルの位相差である)。この計測を実現するには、従来、独立して観測していた粒子とプラズマ波動を連携させて観測する必要があり、WPIA は粒子の一つ一つの観測時間を波動の波形とともに記録していくシステムとなる。ERG で行う WPIA 観測は初めての試みであることから、スペースチェンバー実験を通して上式の計算アルゴリズムの最適化や S/N 向上のための手法考案などを地上で確認するのが本実験の目的である。

### 2. 昨年度までの結果

本課題に関するスペースプラズマチェンバー実験は、平成 24 年度から取り組んでいる。昨年度までは傍熱型の電子ビーム源をチェンバー内に設置し、加速した熱電子をチェンバー内に生成したプラズマへ放出することでプラズマ波動を励起し、同時に電子ビーム源と反対側に設置した粒子センサーで電子を観測しようと試みた。やはりチェンバー内に設置したプラズマ波動プローブによって、プラズマ波動の励起は確認できたが、粒子ビーム周辺の密度勾配沿いに発生しており、ドリフト系の波動が励起されている可能性が高かった。

この場合、電界は、チェンバーの長軸と垂直方向に発生しており長軸方向にのみ視野をもつことができる粒子センサーとの連携観測は困難であった。また発生するプラズマ波動も不安定でその再現性も必ずしもよいものではなかった。そこで平成 26 年度は、かご型プラズマ源を用いた実験を試みた。

### 3. かご型プラズマ源を用いた実験

安定なプラズマを生成することができるかご型プラズマ源を用いた実験を今年度は試みた。図 1 に実験の configuration を、図 2 に実際の写真を示す。かご型プラズマ源は、大・中の 2 台を用いた。なかごの電位を可変にすることで、なかごから大かご側に向けて加速したビームを流しこむことになる。外部磁場はチェンバーの長軸方向、即ちビーム方向に印加する。この実験系ではイオンビームが大かごに流しこまれることによりイオン音波の励起が期待できる。

粒子分析器(センサー)、プラズマ波動プローブは、昨年度までと同じようにビーム源と反対側に設置した。ラングミュアプローブの結果から、 $10^6/cc$  程度の密度のプラズマが生成できていることが確認できている。プラズマ波動プローブから出力される X, Y, Z 成分の電界波形、および、粒子センサーが捉えた粒子のパルスを高速同時サンプリング可能な A/D ボードによってデジタルで取り込む。同時性は十分に保証されたボードであり、これにより WPIA としての観測が実現できるようにした。

このかご型プラズマ源を用いた実験では、安定したプラズマ波動の励起が確認できた。図 3 に高速 A/D ボードで取り込んだプラズマ波動プローブ出力波形を FFT 解析して求めた

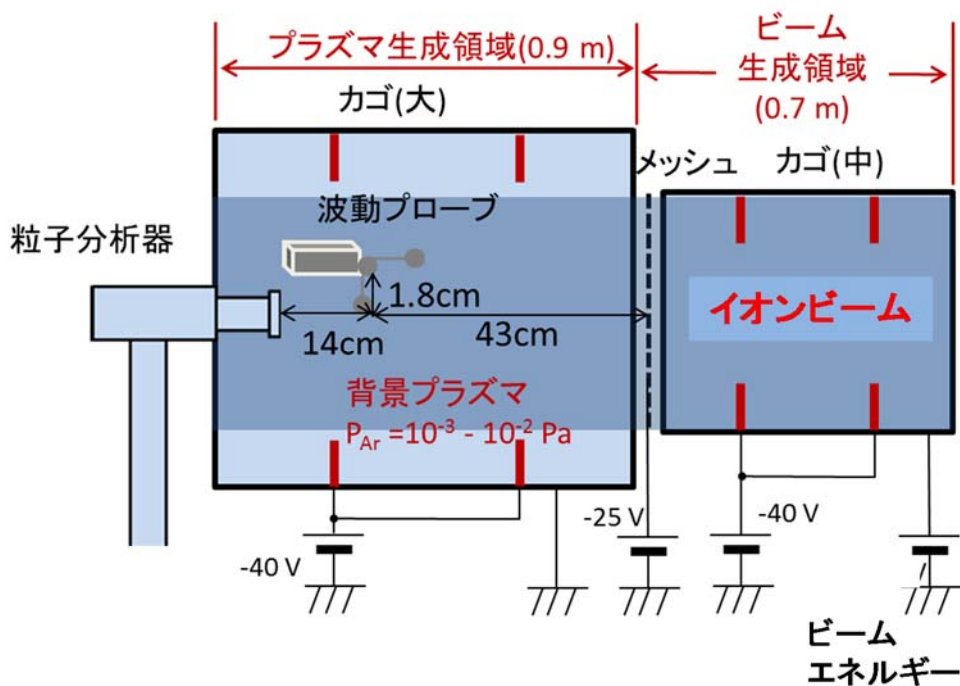


図 1: かご型プラズマ源を用いた実験の configuration.

スペクトルを示す。同時に観測しているスペクトルアナライザの観測結果とあわせて、この図で、50kHz 周辺にみえているスペクトルが、ビームを流しこむことによって励起されたプラズマ波動である(このときのビームエネルギーは数 10eV 程度)。背景の Ar プラズマ密度からイオンプラズマ周波数は 100kHz 程度であり、このことから、予想通りイオンプラズマが励起されていると考えられる。ただし、スペクトルには二つのピークがみられておりその理由について、更に解析が必要である。

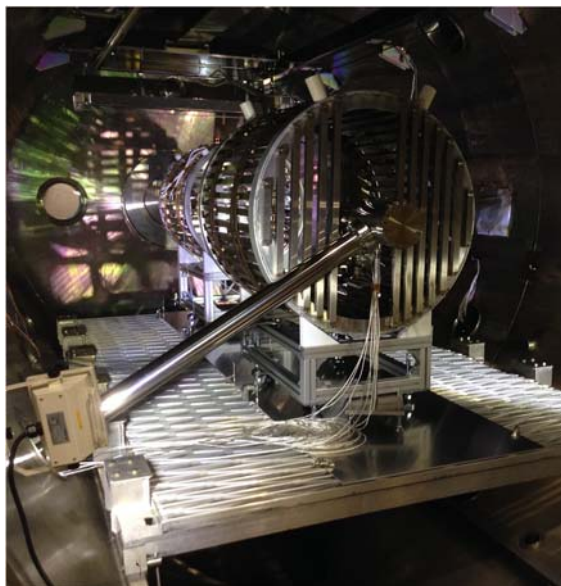


図 2: スペースプラズマチェンバー内に設置されたかご型プラズマ源と粒子センサー。

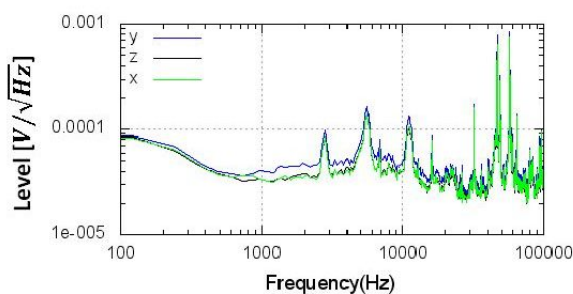


図 3: 高速 A/D ボードで取り込まれたプラズマ波動波形の FFT スペクトル。

しており、実際に粒子と相互作用しているプラズマ波動成分の抜き出しも必要であると考えられる。そのため、図 3 に示したようなスペクトルにおいて、注目する周波数範囲のみを抜き出し、上記の較正を行ったうえで、逆 FFT を行い波形にもどす作業が必要となる。これを行った上で、電界波形の瞬時値と、粒子の速度ベクトルとの位相関係を求めていくこと

図 4 はこの実験中に同時にデジタルで取り込まれたプラズマ波動観測波形と粒子の捕捉パルスを示している。このような個々の粒子とプラズマ波動の同時観測データは宇宙プラズマ中はもとより、地上実験でも非常に貴重なものである。我々は、最初のステップとして、この粒子の捕捉パルスデータの自己相関解析を試みた。粒子が波動の影響を受けて空間的に modulation がかかっていた場合、粒子だけの自己相関を計算することによってその影響が、現れてくると考えたがこちらについては、顕著な結果は得られなかった。

プラズマ波動と粒子との同時データからの計算は、やや複雑でまだ複数のステップを要する。まず、プラズマ波動センサーの電子回路部も含めた gain、位相較正を行う必要がある。特に、WPIA では位相情報が重要であるため、この位相較正は重要である。次に、励起されている波動のモードから想定される位相速度を計算し、波動プローブと粒子観測器の位置関係の違いによる位相のずれを補正する必要がある。また、図 4 のプラズマ波動波形をみると多くの波(ノイズ)が重畳

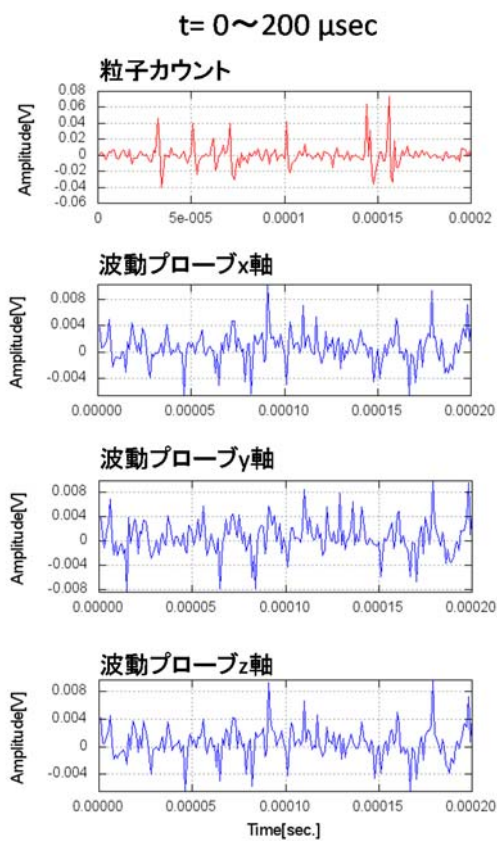


図 4: 粒子捕捉パルス(最上段)とプラズマ波の同時観測例.

り、ISAS 阿部琢美先生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中園智幸氏に大変お世話になりました。ここにお礼を申し上げます。

になる

#### 4. まとめ

かご型プラズマ源を用いることにより安定したプラズマが形成されるようになった。昨年度まで実験の再現性が悪かったが、それも改善され、更に、イオン音波と考えられるプラズマ波の励起が確認された。そして、高速の A/D ボードにより粒子観測器の粒子捕捉パルスと同時に、プラズマ波動波形データを観測することに成功した。このような計測データは非常に重要であり、このデータを用いた波動粒子相互相関の定量的算出を現在、試みているところである。

#### 謝辞

かご型プラズマ源を用いた実験では、宇都宮大学の齋藤和史先生に多くのアドバイスをいただき大変お世話になりました。ここに感謝いたします。また、実験計画にあたり