

# 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<sup>1</sup>, 下山 学<sup>2</sup>, 平原 聖文<sup>2</sup>, 三好 由純<sup>2</sup>, 加藤 雄人<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. 東北大学大学院理学研究科

## 1. はじめに

無衝突状態にある宇宙空間プラズマにおいて、プラズマ波動はプラズマ粒子のもつ kinetic energy の輸送媒体として重要な役割を担っている。従って、宇宙プラズマ環境を探索する科学衛星では、プラズマ粒子をとらえる観測器と、プラズマ波動を計測する観測器をそれぞれ搭載し、観測データを解析してそこで発生している「波動-粒子相互作用」を理解しようとする。一般的な解析では、プラズマ粒子計測から得られる速度分布関数とプラズマ波動の様相の時間変化の相関を調べる。しかし、この方法では両者の時間分解能の違いなどから定量的な解析は難しい。

2015年の打ち上げに向けて計画中の小型科学衛星 Splint-B では、この波動粒子相互作用を直接観測する「波動粒子相互作用解析装置(WPIA: Wave-Particle Interaction Analyzer)」を搭載する予定である。この WPIA は、粒子センサーが捉える一つ一つの粒子ベクトル情報とプラズマ波動波形観測瞬時値から、オンボード計算によって波動-粒子間のエネルギー授受量を求めようとするものである。この手法は、これまで衛星観測において行われたことがなく、我々は原理的な検証からスタートさせている。これまで、計算機シミュレーションによって行ってきたが、実際のプラズマによる原理検証、S/N の確認などを行うべく立案しているところであり、本講演ではその背景と内容について発表を行った。

## 2. 波動粒子相互相関解析装置(Wave-Particle Interaction Analyzer)

波動と粒子のエネルギー授受は、下記で表される。

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

ここで、 $m, q, \mathbf{E}, \mathbf{V}, \theta$  は、それぞれ質量、電荷、プラズマ波動の電界ベクトル、プラズマ粒子の速度ベクトル、そして、それらの位相角である。この式で明らかなように、粒子の kinetic energy が波動に向かうのか、波動から得るのかについては、電界ベクトルと粒子速度ベクトルとの位相差だけで決まる。従来の観測では、電界と粒子を独立に観測していたため、この位相差については無視された形で解析を行ってきた。特に、粒子を速度分布関数にしてしまうと時間積分を行うため、この位相差の情報は完全に失われてしまう。

WPIA では、この位相角情報を失わないように観測を行っていく。図 1 は、WPIA の観測原理を簡単に示している。WPIA では、粒子センサーが捕捉した粒子 1 つ 1 つの情報を

時間情報とともに記録していく。この際、粒子のエネルギーおよびベクトル情報が記録される。一方、プラズマ波動観測では、波形を定常的にサンプリングしてオンボードメモリー上へと記録していく。WPIA では、粒子が飛び込んできた時間をもとに、その時間の観測波形瞬時値を算出、それらから  $\mathbf{E} \cdot \mathbf{V}$  を計算する。計算された  $\mathbf{E} \cdot \mathbf{V}$  は、それを計算した位相角などの情報とともに地上へと伝送される。このようにして、従来、失われていた位相情報を保持したまま解析をすることができる。従来は速度分布関数を求めるために時間積分していたことも、 $\mathbf{E} \cdot \mathbf{V}$  として積分することもできるし、また、 $\theta$  毎にソートして積分することもでき、また時間発展も捉えることができる。このようにして、WPIA では従来とはまったく異なった原理で観測を行うものであり、また、そこから得られる物理量も  $\mathbf{E} \cdot \mathbf{V}$  という従来観測したことの無い量であることになる。

Splint-B 衛星では、上記の計算をオンボード CPU 上で動作するソフトウェアで WPIA 機能を実現する。そのため、Software-type WPIA(S-WPIA)と呼んでいる。

以上のように WPIA は、これまでにない新しい観点からプラズマ粒子、プラズマ波動観測データを連携させて新しい物理量を計算させることから、その原理上の検証や、実際に有効なデータを得るためのアルゴリズム開発が重要である。そのために我々はスペースプラズマチェンバー実験による検証を計画している。

### 3. スペースプラズマチェンバーによる検証実験

Splint-B 衛星で WPIA が波動粒子相互作用解析に利用されるのは、主に電磁波に対してである。前述の  $\mathbf{E} \cdot \mathbf{V}$  の式は電磁波に対しても静電波に対しても有効である。そこで、今回行うスペースプラズマチェンバー実験では、静電波に対して実験を行うことにしている。電磁波の場合、ラーマー半径のスケールが重要になり、チェンバー内壁の影響がでる可能性があるからである。

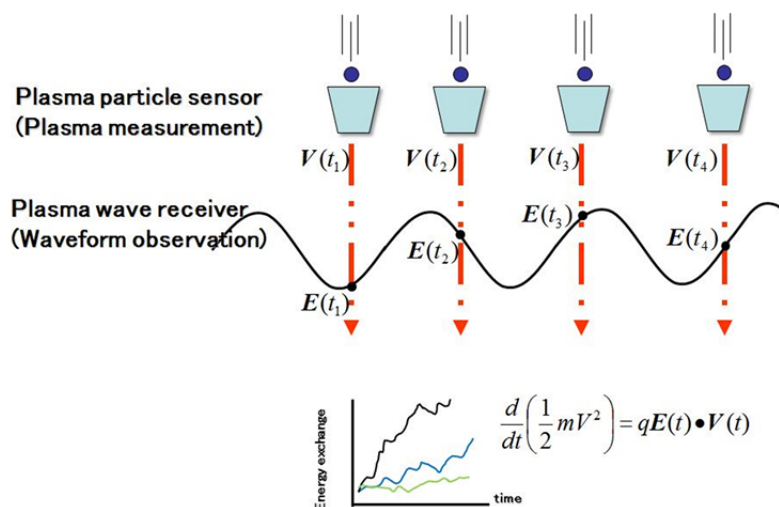


図 1: WPIA の原理.

図2は現在計画している実験の configuration を示している。静電波は、電子ビームをビーム源から背景プラズマに対して打ち込むことによって発生させる。外部磁場をチャンバの長手方向にかけ電子ビームはその方向に対して打ち込むことにより、外部磁場に拘束された電子プラズマ波動の励起を期待する。

チャンバ内には、プラズマを計測するための CEM/MCP を、プラズマ波動を観測するためのプローブ電極を配置する。ここで発生する波動は静電波動で、また、デバイ超は数 cm 程度であることを考えると、1cm 程度の球プローブで電位変動を捉えることで可能である。プローブは 3 軸分を配置する。波長としては 10cm 程度の静電波を期待しているが、チャンバの長手方向の長さに関し、波動の伝搬過程で十分に早く成長するパラメータを決定する必要がある。

各センサーからの出力は高速の A/D コンバーターでデジタル化しメモリ上に取り込まれる。取り込まれたデータをオフラインで計算して WPIA としての原理やアルゴリズムの検討を行う。

#### 4. まとめ

WPIA の原理検証のためのスペースプラズマチャンバ実験は、これについても初めての試みである。実験の configuration が固まって有効なデータが得られるまでには、いくつかの試行的な実験も必要であると考えている。また、一方で、WPIA のアルゴリズムをチャンバ実験で得られるデータに利用することによって、従来得られていないような高品質の解析が可能になるのではないかと期待もしているところである。

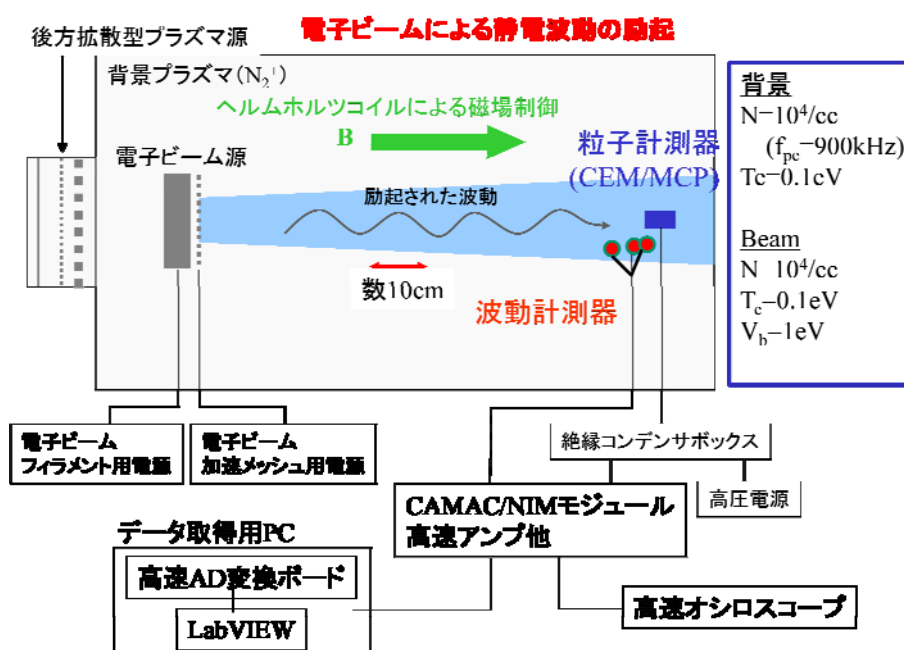


図2: スペースチャンバによる検証実験。