

## 国際宇宙ステーションにおける微粒子プラズマ実験

京都工芸繊維大学<sup>1</sup>、岡山大学<sup>2</sup>、横浜国立大学<sup>3</sup>、静岡大学<sup>4</sup>、名城大学<sup>5</sup>、東北大学<sup>6</sup>、九州大学<sup>7</sup>、JAXA<sup>8</sup>

林康明<sup>1</sup>、高橋和生<sup>1</sup>、東辻浩夫<sup>2</sup>、石原修<sup>3</sup>、三重野哲<sup>4</sup>、上村鉄雄<sup>5</sup>、佐藤徳芳<sup>6</sup>、渡辺征夫<sup>7</sup>、足立聡<sup>8</sup>、高柳昌弘<sup>8</sup>

### Experiments of fine-particle plasma in international space station

Yasukai Hayashi<sup>1</sup>, Kazuo Takahashi<sup>1</sup>, Hiroo Totsuji<sup>2</sup>, Osamu Ishihara<sup>3</sup>, Tetsu Mieno<sup>4</sup>, Tetuo Kamimura<sup>5</sup>, Noriyoshi Sato<sup>6</sup>, Yukio Watanabe<sup>7</sup>, Satoshi Adachi<sup>8</sup>, Masahiro Takayanagi<sup>8</sup>  
Kyoto Inst. Technol.<sup>1</sup>, Okayama Univ.<sup>2</sup>, Yokohama Nat. Uvi.<sup>3</sup>, Shizuoka Univ.<sup>4</sup>, Meijo Univ.<sup>5</sup>, Tohoku Univ.<sup>6</sup>, Kyushu Univ.<sup>7</sup>, JAXA<sup>8</sup>

E-Mail: hayashiy@kit.ac.jp

**Abstract:** The proposal of the experiment of observation of critical phenomena in a fine particle plasma was accepted as an experiment using the PK-3 Plus plasma equipment in the ISS Russian module. The experiments has been and is carried out in July, 2009 and in January, 2010. Along with the experiments using the PK-3 Plus, we are planning and developing new fine-particle plasma systems. By the use of a planar-magnetron plasma system, which is one of the new fine-particle plasma systems, drop-tower microgravity experiment was carried out.

**Key words;** International Space Station, Plasma, Fine Particle, Critical Point, Magnetron Plasma

#### はじめに

これまで、私達は、微粒子プラズマ研究を欧州やロシアの研究グループと協力して展開してきた。特に、ドイツのマックスプランク研究所が開発し、現在、国際宇宙ステーション (ISS) のロシアのモジュール内に設置されている PK-3 Plus 装置を利用した実験への参加を意図してきた。そこで数年前より、JAXA 内の宇宙環境利用科学委員会研究班 WG として“微小重力環境下微粒子プラズマ研究会”を組織し検討を行った結果、WG 構成員の一人である東辻教授が理論的に予測する「微粒子プラズマにおける臨界現象」<sup>1)</sup>の観測を提案することとし、JAXA 内でプロジェクト化を行った。

幸いにも、マックスプランク研究所とロシアの好意により、ISS において実験を実行する機会を得、2009年7月と2010年の1月(本原稿執筆時点では予定)にロシアのモスクワ郊外にあるミッションコントロールセンターに2名が赴き、ドイツ、ロシアの研究者と共に、ISS 内で実験を実施する宇宙飛行士との交信に参加した。

一方、実験装置の改良を図るべく、ドイツやロシアでは、新しい微粒子プラズマ実験装置の検討も並行して行っている。PK-3 Plus と同様の平行平板 RF プラズマによる装置として、Plasma Lab 計画がある。インサートを複数用意する可能性もあり、その場合は複数の微粒子プラズマ実験装置が搭載されることになるため、日本からも積極的に実験装置の提案を行っていく予定である。WG 内では様々な微粒子プラズマ実験装置の提案があり、

PK-3 Plus を超える、日本独自の実験装置を開発していくことを計画している。

#### PK-3 Plus 装置と ISS 実験

一成分プラズマモデルに基づき理論的に微粒子プラズマにおける臨界点を予測して相図を作成し、一方で、(ドイツとロシアの研究者の好意の下で借用している) PK-3 Plus 同型機を用いて、地上において重力下や航空機放物線飛行による微小重力実験を通して相図内の実験条件範囲の概要を把握した。その結果、これまで行ってきた実験よりも、大きなサイズの微粒子を用い、微粒子密度を高くして、大きな放電電力の条件が適当であることが分かった。

2009年5月に、WGの4名がドイツのマックスプランク研究所に赴き、PK-3 Plus を用いた ISS 実験を担当している研究者と共に、実施する実験条件の詳細な検討を行った。その結果に基づき、2009年7月と2010年1月に実験を実行した。

現時点では、第1回目の2009年7月に行った実験の結果を解析しているところであるが、概略、次のことが分かった。

粒径  $9.2 \mu\text{m}$  の微粒子を用いて、アルゴンガス圧力 40Pa、放電電力 1W、DC 変調実施の下では、中心にボイドが消滅するまで微粒子をプラズマ中に導入することができた。しかし一方で、Heartbeat Instability が生じ、微粒子配列は結晶状にはなりにくい。放電電力 2W や、粒径  $14.9 \mu\text{m}$  の微粒子を用いた実験も行われたが、途中で放電が停止する

トラブルが生じた（予定していた残りの条件下での実験は、第2回目の2010年1月に行われる）。第1回目の実験では、臨界点に向けた実験条件における微粒子プラズマの性質の概要を把握できた。

#### プレーナマグネトロンプラズマ装置による微小重力微粒子プラズマ実験

PK-3 Plus 装置において、ボイドの発生と微粒子プラズマの安定性を同時に満足するため、DC 変調による制御が行われている。十分な最適化はまだなされていないと言えるものの、様々な実験を行うときに、広い条件範囲において、ボイドのない安定した微粒子プラズマを生成する実験装置を用意する必要がある。このため、PK-3 Plus による実験を進めると同時に、次の世代の改良型が検討されている。

本 WG でもこうした観点から、広い条件下でボイドがなく、広い空間領域に結晶化した微粒子プラズマを生成できる実験装置の検討を行ってきた。その結果、プラズマ中の電位・電界やイオン粘性力を制御するいくつかの提案がなされている。ここでは、その一つである、プレーナマグネトロン微粒子プラズマ実験装置による実験について報告する。

昨年度報告したように、大型の実験装置を作製して実験を行った後、その結果に基づき、微小重力実験用の小型の装置を作製した。Fig.1 に示すのがその装置の写真である。真空槽は一辺が 15cm の立方体形状であり、その六面にそれぞれ、強力な永久磁石 8 個からなるマグネトロン電極を取り付けた。

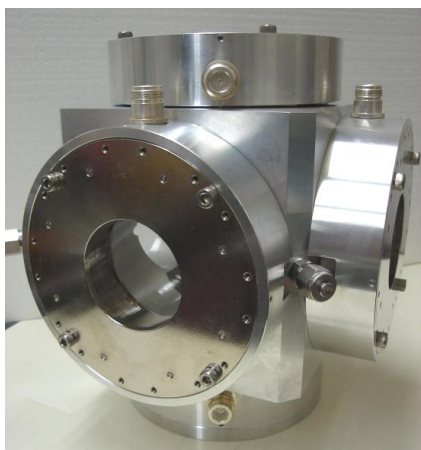


Fig.1 Planar-magnetron plasma system for microgravity experiment.

大型のプレーナマグネトロンプラズマ実験装置による実験を行った結果では、粒径  $6.5 \mu\text{m}$  の微粒

子を用いて、アルゴンガス圧力 100Pa、放電電力 2W の条件下で、Fig.2 に示すように、中央で微粒子が浮き上がる状態が観察された。また、他の実験装置においては、この大きさの微粒子ではシースの中に沈み込むが、この場合はプラズマ中で電極に平行な層を成していることが分かる。こうしたプラズマ側へ向かう力として、イオン粘性力、あるいは電界による力が考えられる。

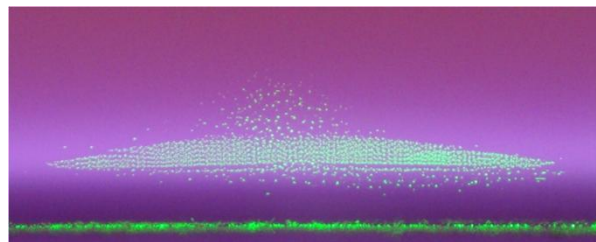


Fig.2 6.5 micron fine particles suspended in planar-magnetron argon plasma of pressure of 100 Pa and RF power of 2 W.

そこで、MGLAB にて、立方体形状の小型マグネトロンプラズマ実験装置を落下塔カプセル内に収め、落下による微小重力実験を実施した。Fig.3 は、落下前後における最上端微粒子の高さと速度の変化を示す（点線の時点から落下）。この結果より、真空槽の中心部に向かう力が働いていることが分かったが、詳細については解析中である。

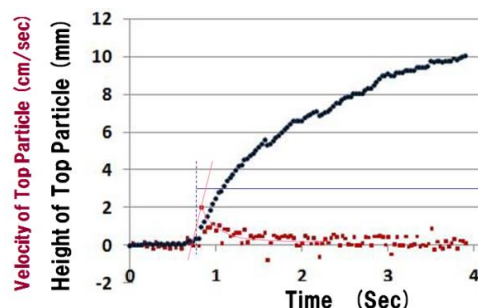


Fig.3 Changes of height and velocity of the top particle during fall.

#### 謝辞

PK-3 Plus 装置の貸与および ISS での実験に協力頂いた、ドイツ・マックスプランク研究所、Dr. H. Thomas、Prof. G. Morfill、ロシア科学アカデミー高エネルギー密度研究機構の方々に感謝します。

#### 参考文献

- 1) H.Totsuji: *J. Plasma Fusion Res.* **82**, 693 (2006); *Phys. Plasmas* **15**, 072111 (2008).