

# 微小重力微粒子プラズマ実験装置

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>、東北大学<sup>4</sup>、静岡大学<sup>5</sup>、名城大学<sup>6</sup>、九州大学<sup>7</sup>、大阪大学<sup>8</sup>、JAXA<sup>9</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>、飯塚哲<sup>4</sup>、三重野哲<sup>5</sup>、上村鉄雄<sup>6</sup>、白谷正治<sup>7</sup>、濱口智志<sup>8</sup>、佐藤徳芳<sup>4</sup>、渡辺征夫<sup>7</sup>、足立聡<sup>9</sup>、高柳昌弘<sup>9</sup>

## Experimental Systems of Fine-Particle Plasmas under Microgravity

Yasukai Hayashi<sup>1</sup>, Kazuo Takahashi<sup>1</sup>, Hiroo Totsuji<sup>2</sup>, Osamu Ishihara<sup>3</sup>, Satoru Iizuka<sup>4</sup>, Tetsu Mieno<sup>5</sup>, Tetuo Kamimura<sup>6</sup>, Masaharu Shiratani<sup>7</sup>, Noriyoshi Sato<sup>4</sup>, Yukio Watanabe<sup>7</sup>, Satoshi Hamaguchi<sup>8</sup>, Satoshi Adachi<sup>9</sup>, Masahiro Takayanagi<sup>9</sup>

Kyoto Inst. Technol.<sup>1</sup>, Okayama Univ.<sup>2</sup>, Yokohama Nat. Uvi.<sup>3</sup>, Tohoku Univ.<sup>4</sup>, Shizuoka Univ.<sup>5</sup>, Meijo Univ.<sup>6</sup>, Kyushu Univ.<sup>7</sup>, Osaka Univ.<sup>8</sup>, JAXA<sup>9</sup>

E-Mail: hayashiy@kit.ac.jp

**Abstract:** In order to verify the existence of critical point in a fine particle plasma, we are carrying out theoretical analysis and experiments using an experimental model of the PK-3 Plus system that is installed in ISS. Along with the experiments, we are also developing a new plasma system, which applies planar magnetron plasma. Preliminary experiments with the new system under gravity showed the generation of a loop of plasma and the potentiality of the generation without the formation of a “void” of fine particles under microgravity.

**Key words;** Plasma, Fine Particle, Critical Point, Magnetron Plasma

### はじめに

微粒子プラズマにおける臨界点の存在の可能性が理論的に指摘されている<sup>1, 2)</sup>。これまで、その実証を目指して、実験条件の実際的な検討を行ってきた。また、ドイツのマックスプランク研究所が設計した微粒子プラズマ実験装置 (PK-3 Plus) が、現在、国際宇宙ステーション (ISS) のロシア側モジュールに搭載され、微小重力実験が進められている。私達は、PK-3 Plus プラズマ実験装置の同型機を用いて、臨界現象観測のための予備的な実験を、地上重力下、および微小重力環境下で行っている。

PK-3 Plus において制御できる実験条件 (ガス圧力、高周波放電電力、微粒子のサイズ・密度、ガスの種類、DC 変調周波数) は限られており、その範囲内で臨界点に到達する又は近接する条件を探索する。したがって、臨界点が PK-3 Plus における実験条件の制御可能な範囲から遠い場合は、臨界現象の解析は難しい。しかし、微粒子プラズマは粒子間距離が百  $\mu\text{m}$  のオーダーと巨視的であるために、粒子数十個程度の密度揺動を捉えることができ、他の系よりも臨界点から離れた位置での現象観測・解析が可能となる。そこで、PK-3 Plus を用いて可能な範囲内で条件を臨界点に接近させ、どのような現象が観測できるかを、理論的・実験的に検討を行っている。

一方、PK-3 Plus のような平行平板型高周波プラズマ装置では、電極間の中心部に微粒子が存在しない“ボイド”が形成される。これは、プラズマ

が電極間中央で生成し、拡散するプラズマによるイオン流で周辺部に押しやられるためと考えられる。もちろん、PK-3 Plus はこれを克服するべく改良がなされてきた装置であり (PK-3 装置より電極構造が最適化され、DC 変調が印加できるようになった)、以前よりも“ボイド”の発生は低減された。しかし、放電電力を大きく圧力を低くすることにより臨界点に接近できることが理論的な解析より予測されているが、このような条件下では、やはり“ボイド”が発生し易く、さらなる条件の検討を必要としている。

こうした PK-3 Plus 装置の欠点を根本的に解決する装置の検討がなされ、数年後の運用が計画されている Plasma Lab に向けた装置の設計が、ドイツのマックスプランク研究所において並行して進められている。私達も、電界、電位、磁界を制御して、“ボイド”が発生しないプラズマ発生方式を検討してきた。その一つとして、プレーナマグネトロン方式があり、本年度は、微小重力実験を念頭に置いた装置設計と予備実験を行ってきた。

### PK-3 Plus 装置による微小重力実験およびプラズマ診断

PK-3 Plus 同型実験装置を航空機放物線飛行実験用のラックに収め、微小重力実験を実施した (Fig.1)。今回の実験では、DC 変調は行っていない。重力下では微粒子は下の方に沈むものの、プラズマバルク内にも侵入し層状に配列している様子が観察された。しかし、微小重力下では、放電

電力が大きくなるほど“ボイド”が大きくなり境界が明瞭に現れた。

臨界点に接近する条件を探索するためには、プローブ法などを用いてプラズマ診断を行う、すなわち、プラズマ密度・温度などのプラズマパラメータを評価する必要がある。しかし、ラングミュアプローブ法では、プラズマ中に探針を直接挿入するため微粒子が存在した状態での評価はできない。そこで、プラズマ全体の密度を評価する周波数シフトプローブ法を利用した。測定の結果、微粒子が存在しない状態で、両者のプラズマ密度は、30%の範囲内で一致した。



Fig.1 PK-3 Plus experimental model installed in a rack for parabolic flight.

#### プレーナマグネトロンプラズマ装置による実験

プレーナマグネトロンプラズマでは、高周波電極内に組込まれた永久磁石による電極面平行磁界  $B$  とシース電界  $E$  により、電子の  $E \times B$  ドリフトでループ状にプラズマが生成される。電極面上でループ状になったプラズマは中心部に拡散するため、微粒子による“ボイド”の発生が起きにくいと予測される (Fig.2)。実際に、地上重力下で行った実験では、従来法では下部に集まる微粒子群の中央部が凹んだ構成を成すが、プレーナマグネトロンプラズマでは逆に中央部に微粒子が集まり凸状に膨らんだ配置を成した<sup>3)</sup>

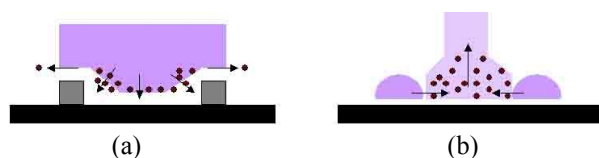


Fig.2 Fine particles transported by ion drag force in conventional plasma (a) and planar magnetron plasma (b).

さらに、微小重力実験を実施するため、小型のプラズマ装置真空槽を設計した (Fig.3)。真空槽は、3軸方向に対称な一辺が15cmの立方体とし、6面にマグネトロン放電用の磁石を貼り付けた。各面には、15mm×30mm×30mm[磁化方向]の磁石を8個取り付け八角形状に配置した。

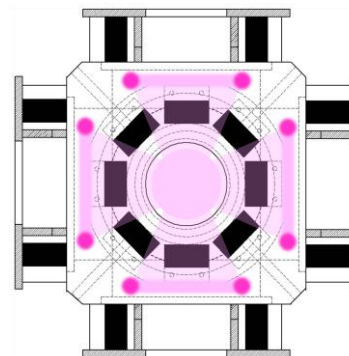


Fig.3 Vacuum chamber of planar magnetron plasma for microgravity experiment.

Figure 4に、予備的な実験において生成したプラズマを示す。磁石の配置に対応してやや八角形状にはなっているが、円形に近い形状でリング状のプラズマが生成している様子がわかる。今後、実験装置を完成し、落下塔を用いた微小重力実験を実施する予定である。

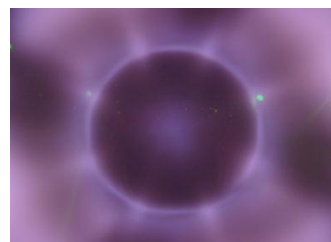


Fig.4 Planar magnetron plasma generated by 8 magnets.

#### 謝辞

PK-3 Plus 装置の貸与と調整に協力頂いた、ドイツ・マックスプランク研究所の、Dr. H. Thomas、Prof. G. Morfill、および所員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).
- 2) S. A. Khrapak, et. al.: *Phys. Rev. Lett.* **96**, 015001 (2006).
- 3) Y. Hayashi, et. al.: *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.* **25**, 349 (2008); to be published in *J. Plasma Fusion Res.* (2009).