

## 国際宇宙ステーションにおける微粒子プラズマ実験の次期計画

京都工芸繊維大学<sup>1</sup>、東北大学<sup>2</sup>、岡山大学<sup>3</sup>、九州大学<sup>4</sup>、横浜国立大学<sup>5</sup>、静岡大学<sup>6</sup>、名城大学<sup>7</sup>、大阪大学<sup>8</sup>、JAXA<sup>9</sup>

林康明<sup>1</sup>、佐藤徳芳<sup>2</sup>、高橋和生<sup>1</sup>、東辻浩夫<sup>3</sup>、渡辺征夫<sup>4</sup>、石原修<sup>5</sup>、三重野哲<sup>6</sup>、上村鉄雄<sup>7</sup>、飯塚哲<sup>2</sup>、浜口智志<sup>8</sup>、足立聡<sup>9</sup>、高柳昌弘<sup>9</sup>

### Next plan for experiments of fine-particle plasma in international space station

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

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

E-Mail: hayashiy@kit.ac.jp

Abstract: Plans next to PK-3 Plus for experiments of fine-particle plasma in International Space Station are proceeding in Europe. One of the plans, Plasma Lab (PK-5), is to develop and use the spherical distribution of fine particles without a void in a plasma. We are developing plasma systems for the purpose in collaboration with the group of Europe. In this budget year, we investigated to make spherical plasma configuration using a spherical quartz vessel and external radio-frequency electrode and managed to form particle arrangement without a void. We also carried out plasma diagnostics in a planar-magnetron radio-frequency plasma.

*Key words*; International Space Station, Plasma, Fine Particle, Radio Frequency, Magnetron Plasma

### はじめに

微粒子は、正イオンと電子からなるプラズマ中で巨大な負イオンのように振る舞い、複合的なプラズマとして特殊な様相を呈する。このようなプラズマは微粒子プラズマと呼ばれている。微粒子プラズマは気相、液相、固相の三態を成し、相転移・臨界現象など実際の原子からなる系の物理現象をマクロスコピックに観測できるところに特長がある。こうした微粒子プラズマの諸性質を解明すると同時に共通する基礎物理の研究を推進・展開していくことが最終的な目標であり、そのために、“三次元等方的で広い領域にわたるクーロン結晶形成が可能な実験装置”を開発することが本研究チームの目的である。

ところで、ドイツを中心とする欧州の微粒子プラズマ研究グループは、これまで、国際宇宙ステーション(ISS)にPK-3 Plusを搭載し、様々な微小重力環境下微粒子プラズマ実験を進めてきている。私達の研究グループも、ISS内のPK-3 Plusを利用する機会を得て、微粒子プラズマにおける臨界現象観測のための基礎実験を5回ほど実施してきた。

PK-3 Plusは、平行平板型の高周波(RF)プラズマ装置である。一方、円筒型石英管を真空槽とした直流プラズマ装置によるPK-4の計画も進められている。PK-4については、ESAのColumbus内に設置されて2013年から実験が開始される予定とな

っている。しかし、“三次元等方的で広い領域にわたるクーロン結晶形成が可能な実験”を行うための装置としては、平行平板型RFプラズマ装置であるPK-3 Plus装置を発展させた形式が望まれる。このような計画は、PK-4と並行して欧州で進められており、Plasma LabあるいはPK-5と呼ばれている。Plasma Lab(PK-5)では、PK-3 Plusで課題となった、ボイドが発生しない球対称プラズマを生成することが主な目的となっている。

PK-4、Plasma Lab(PK-5)など一連の微小重力環境下微粒子プラズマ実験のプロジェクトがドイツ・マックスプランク研究所を中心として提案され、現在、ESAのELIPS research poolとして進められている。本研究チームもこのプロジェクトに参画し、本研究チーム代表者がプロジェクトの共同研究者を務めている。今後は、欧州研究グループとの国際協力体制の下で研究を推進していく。

Plasma Lab(PK-5)のプラズマ生成方式は、現在、検討の段階であり、本研究チームでも積極的に提案、協力を行っていく。研究チーム内では、これまで様々な微粒子プラズマ実験装置のアイデアがあり、それらと合わせてPK-3 Plusを超える新たなプラズマ実験装置を検討、開発する。本年度は、これまでチーム内で提案・検討してきた独自の微粒子プラズマ実験装置・方式について、実験と解析を行った。

### 球形石英槽と外部電極を用いたプラズマ装置

平行平板 RF プラズマ装置において、電極周辺部に対して中央部を（下部電極の場合）低くすることにより、プラズマとシースの境界面が凹状となり、同じ高さの面で比較したとき中央部の電位が周辺部に比べて高くなる。これを利用すると、負に帯電した微粒子を電極中央部に閉じ込めることができる。さらに推し進めて、湾曲した電極の構造としても微粒子の閉じ込めが可能となる。しかし、湾曲した電極を用いた場合、横方向から微粒子の配列状態を観測することが困難である。そこで、球形の透明な石英真空槽を用いることとした（Fig. 1）。この場合、RF 電極は石英槽の外側に配置する。

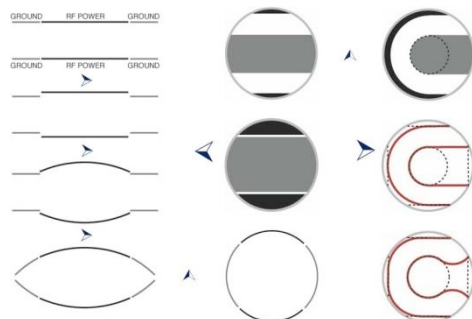


Fig.1 Electrode modification to spherical configuration.

さらに、球対称的なプラズマを生成するため、電極に、Fig. 2 に示すような一対の変形ループを用いた。このプラズマ装置において数 Pa~数 100 Pa の気圧でガス放電を行ったところ、Fig. 3 に示すとおり、球対称なプラズマの生成が確認された。

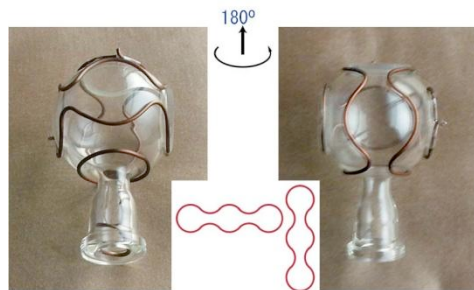


Fig.2 Spherical glass tube with modified electrodes.

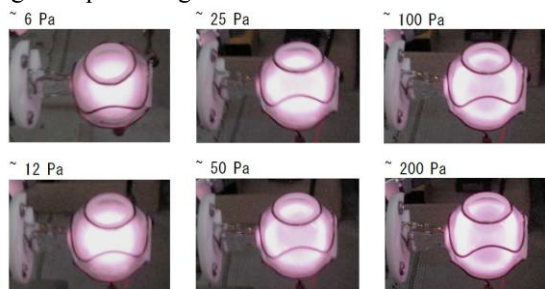


Fig.3 Plasmas under different pressures at RF power of 4 W.

また、プラズマ中に微粒子を導入し、レーザー光散乱によりその配列を調べたところ、ボイドがないことが確認された（Fig. 4）。RF 電力が大きい条件で、微粒子の構造形成も確認された。

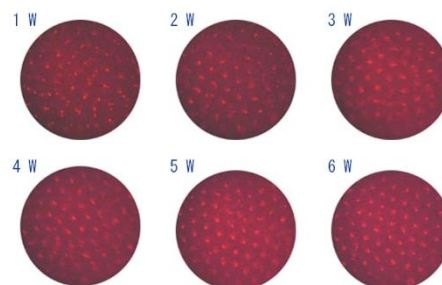


Fig.4 Top view of fine-particle arrangement under pressure of 30 Pa.

### プレーナマグネトロンプラズマ装置

微粒子プラズマ実験装置としてプレーナマグネトロン RF プラズマ装置を検討し、これまで、電極上でボイドのない微粒子配列と構造形成を確認してきた。今回は、微粒子が電極中央部に集積し中央付近で上方に持ち上げられる原因について調べるため、ラングミュアプローブを用いて、アルゴン 100Pa のプラズマ密度と空間電位を測定した。

Fig. 5 に、測定したプラズマ密度（イオン密度）と空間電位の電極上下（Z）方向、径（R）方向の分布を示す。R が小さいほどプラズマ密度が大きくなっていることが分かる。また、空間電位は R が小さいほど高くなっており、微粒子が電極中央部に捕捉され易いことが分かる。一方、Z 方向については、少なくとも、空間電位が上方に大きくなることは認められず、微粒子が電極中央付近で上方に持ち上げられる原因については、電位ではなく別の理由によるものと考えられる。

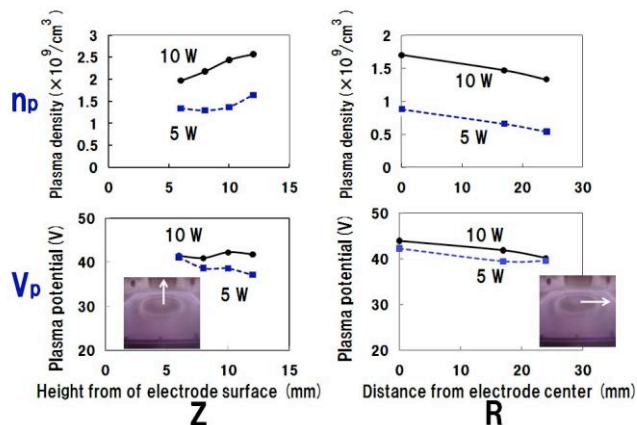


Fig.5 Distribution of plasma density and potential under pressure of 100 Pa.