

微小重力環境下微粒子プラズマ研究の展開

京都工芸繊維大学¹、岡山大学²、横浜国立大学³、大阪大学⁴、東北大学⁵、九州大学⁶、JAXA⁷

林康明¹、高橋和生¹、東辻浩夫²、石原修³、濱口智⁴、佐藤徳芳⁵、渡辺征夫⁶、足立聡⁷、高柳昌弘⁷

Development of Research of Fine Particle Plasmas under Microgravity

Yasukai Hayashi¹, Kazuo Takahashi¹, Hiroo Totsuji², Osamu Ishihara³, Satoshi Hamaguchi⁴, Noriyoshi Sato⁵, Yukio Watanabe⁶, Satoshi Adachi⁷, Masahiro Takayanagi⁷
Kyoto Inst. Technol.¹, Okayama Univ.², Yokohama Nat. Uvi.³, Osaka Univ.⁴, Tohoku Univ.⁵, Kyushu Univ.⁶, JAXA⁷

E-Mail: hayashiy@kit.ac.jp

Abstract: The experimental verification of existence of critical point in a fine particle plasma is a exciting subject. It is being carried out under microgravity condition in ISS by the collaboration among German, Russian and Japanese research groups. The results of preliminary experiments using a PK-3 Plus experimental model and a planar magnetron plasma system are also presented.

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

はじめに

プラズマ中に大量の負帯電した微粒子を含む微粒子プラズマは、原子・分子からなる系と同様に、気体、液体、固体の状態を成す。一部では微粒子間に引力が存在する可能性も理論的に予測されているが¹⁾、微粒子プラズマに一成分プラズマとしての性質があるならば、集団的な相互作用として凝集力が存在し金属のような結晶を形成する。こうしたことから、微粒子プラズマにおいて、臨界点の存在の可能性が理論的に指摘され^{2, 3)}、その実験的実証が期待されている。

臨界現象を正しく調べるには微小重力環境下での実験が必須である。ドイツ・マックスプランク研究所とロシア・高エネルギー密度研究所の共同研究グループは、現在、PK-3 Plus 装置を用いた微粒子プラズマの微小重力実験をISSのロシア側モジュール内に設置し実験を進めている。そこで、日本における私達の“微小重力環境下微粒子プラズマ研究WG”では、一成分プラズマとしての立場から、PK-3 Plus を用いた臨界点の実証実験を提案している。また、PK-3 Plus と同じ仕様の装置をドイツ・マックスプランク研究所より借用し、地上の重力下および微小重力下で臨界点近接のための実験を理論解析と並行して進めている。

一方、PK-3 Plus において制御できる外部パラメータ（装置条件）やプラズマパラメータは限られており、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しなければならない。ところが、臨界点が PK-3 Plus におけるパラメータ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ように思える。しかし、微粒子プラズマは粒子

間距離が百 μm 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ると考えられ、従来の系よりも臨界点からもっと離れた位置での現象観測・解析が期待される。それが、PK-3 Plus において制御が可能な範囲内であるのか、また接近するには外部パラメータをどのように設定すれば良いのかを地上において調べておく必要がある。

また、PK-3 Plus の制御範囲を超えた外部パラメータ領域に臨界点が存在する場合は、より広い領域で外部パラメータ制御ができる装置を用いて、より臨界点に近い条件下において現象を調べ、その結果から PK-3 Plus において設定すべき外部パラメータの値を推定することも必要である。地上では重力の条件は異なるが、装置の大きさに制限されずにより柔軟性のある装置構造やプラズマ生成方法が適用できるので、条件に適合した装置を用いて臨界点により近接した現象を観測できる可能性がある。ただしこの場合、何らかの方法により重力の影響を相殺する力が働いていなければならない。

PK-3 Plus におけるプラズマパラメータの測定

PK-3 Plus 同型実験装置 (Fig.1、チャンバ横一辺の寸法は約 10cm) を用いて、外部パラメータの制御可能な範囲におけるプラズマパラメータの変化（電子温度と電子密度）を、ラングミュアプローブ法によって、重力下で微粒子を含まないプラズマ中において測定した。実験条件として、放電ガスにアルゴンを用い、放電電力 0.8-3.2W、ガス圧力 20-100Pa とした。

結果は、PK-3 Plus 同型実験装置における電子密度の範囲は $10\text{--}4.0 \times 10^8 \text{cm}^{-3}$ 、電子温度の範囲は $1.1\text{--}1.8 \text{eV}$ であった。また、これらのパラメータはガス圧力には顕著な相関はないが、放電電力が大きくなるほど、電子密度は増加し、電子温度は低下する傾向があることがわかった⁴⁾。

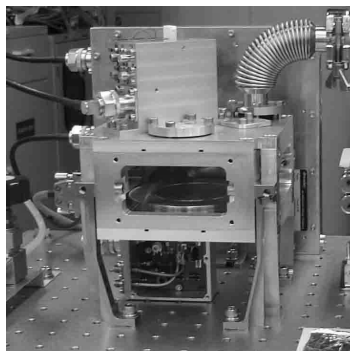


Fig.1 PK-3 Plus experimental model.

大チャンバ装置におけるプレーナマグネトロンプラズマ中の微粒子

大チャンバ装置 (Fig.2、チャンバの直径は約 30cm) の下部電極内にネオジウム・鉄・ボロン系焼結体の強力な永久磁石 (残留磁束密度 1.4 T) をループ状に配置し、13.56MHz の高周波を印加した。上部フランジの中心に覗き窓を設置し、その周囲は接地電位となっているため、上部フランジが高周波放電の対向接地電極の役割をなしている。これら二電極間の間隔は、約 14cm である。

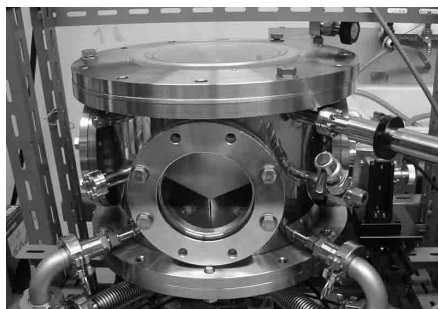


Fig.2 Large-chamber plasma system.

高周波電極上にループ状のプレーナマグネトロンプラズマが生成していることを確認した。その中に直径 $2.27 \mu\text{m}$ のジビニルベンゼン球状微粒子を投入し、微粒子の配列をレーザー光散乱と CCD カメラにより横方向から記録した。その画像を Fig.3 に示す。微粒子配列が明確に上部と下部に分かれ、上部は 3 次元的、下部は鉛直方向に並んだ微粒子列の集合である 2 次元的な構造を成していることが分かる。この結果は、上方に拡散してい

くプラズマ中のイオンの粘性力と重力とが拮抗して微粒子が上部ではプラズマ中に入り込み、一方、下部では微粒子が RF 電極近傍のシース内に入り込み、マッハ数を超えた速度のイオン流による航跡場の影響を受けているものと解釈できる。このように、地上で微粒子の 3 次元配列が得られるようになり、臨界に向けた実験の範囲を拡張することができるようになった。Fig. 4 は、3 次元構造を成す微粒子配列を拡大した画像である。

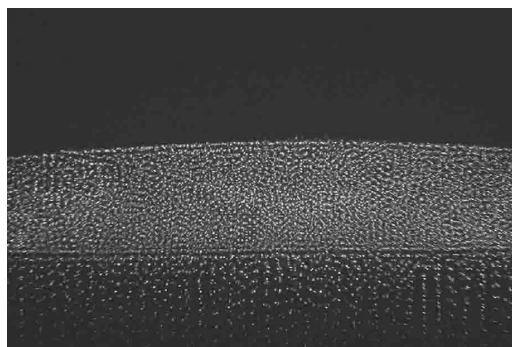


Fig.3 Fine particles suspended in a planar magnetron plasma.

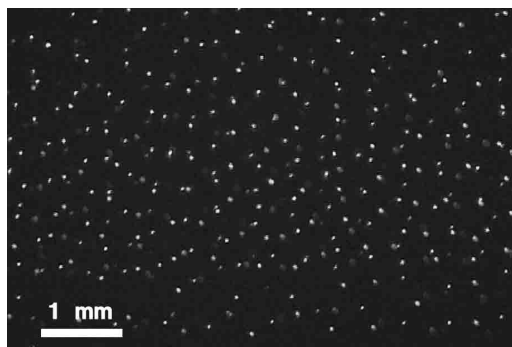


Fig.4 Arrangement of fine particles in the upper region.

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) V. N. Tsytovich, et. al.: *Plasma Phys. Control. Fusion*, **17**, 249 (1996).
- 2) H. Totsuji: *J. Plasma Fusion Res.* **82**, 693 (2006).
- 3) S. A. Khrapak, et. al.: *Phys. Rev. Lett.* **96**, 015001 (2006).
- 4) K. Takahashi, et. al.: Proc. 8th Workshop on Fine Particle Plasmas (Toki, 2007) O-9.