

## 微粒子プラズマと微小重力環境実験

高橋 和生 (京都工芸繊維大), 足立 聡 (JAXA), 東辻 浩夫 (岡山大)

### Dusty Plasmas and Microgravity Experiments

Kazuo Takahashi\*, Satoshi Adachi, Hiroo Totsuji

\*Faculty of Electrical Engineering and Electronics, Kyoto Institute of Technology,  
Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto 606-8585

E-Mail: takahash@kit.jp

Abstract: Charged dust particles in plasmas of micrometer-size show the physical phenomena appearing in classic systems as crystalline matters, which fascinates researchers with visible dynamics. Several microgravity experiments have already been motivated to analyze structures formed by the dusty particles, e.g., Coulomb crystals. For further experiments and enhancing an interest, it will be necessary for the researchers to assign significance for activities related to dusty plasmas with exploring a new phenomena applied to analogy of the dusty plasmas, applications to use the dust particles as industrial materials, and so on.

Key words; Dusty plasma, Complex plasma, Fine particle plasma, Microgravity experiment

#### 1. はじめに

粒径が数 $\mu\text{m}$ の微粒子を含む電離気体を微粒子プラズマ(ダストプラズマ)と呼ぶ。プラズマ中の電子とイオンの移動度の違いにより微粒子は帯電し、その間にはクーロン相互作用が働く。この相互作用により、微粒子は結晶物質の原子と同様の規則正しい配列を形成する。この規則正しい配列、クーロン結晶が発見されたのは1994年のことである。クーロン結晶の構造には体心立方や面心立方など、通常物質の結晶と同様のものがあり、さらには格子の長さが数百 $\mu\text{m}$ に達することから、CCDカメラと簡単な光学系を使って容易にその様子を観察できる。また、系の緩和時間は短く、例えば相転移を経て定常状態に達するまでを数秒程度で観察できるとされており、クーロン結晶が通常の結晶中での原子の振る舞いを理解するための優れた物質モデルになると期待されている。

プラズマ中で微粒子は、主に静電力、イオン粘性力、重力の均衡により決められる位置に分布する。地上の実験において、微粒子に働く重力の大きさは他の力の大きさと同程度( $\sim\text{pN}$ )であり、重力が微粒子の分布に与える影響は大きい。多くの実験では、微粒子の分布はプラズマからシースの中へと押し込まれたかたちとなる。この電気的中性条件の成り立たない領域での微粒子の分布や形の歪んだクーロン結晶の構造の解析は容易ではなく、電気的中性条件を前提とする微粒子プラズマ物理のいわゆる理想系を求める声は大きい。理想的な微粒子プラズマの振る舞いを的確に捉え、それを荷電粒子系における現象の理解の一助とすることが望まれている。

微粒子の分布やクーロン結晶の構造に大きな影響を与える重力を排除するために、国際宇宙ステーション(ISS)における実験がドイツとロシアの共同プロジェクトとして行われている。放電プラズマを用いた初期の実験はPKEと呼ばれ、2001年2月から2005年7月まで実施された。その次には、PK-3 plus と呼ばれる実験プロジェクトが行われ、初期のものから改良された装置が2013年

でロシアのモジュール内で稼働していた。日本からも研究者がこのプロジェクトに参加し、微粒子プラズマにおける臨界現象に関する研究を行った。また、2014年10月より、PK-4と呼ばれるESAのプロジェクトが行われている。このプロジェクトでは、ガラス管内に円柱状のプラズマが生成され、主にその中で微粒子の流体的振る舞いを解析するための装置が使用されている。このPK-4の活動に関して、WGでは航空機実験を利用して、円柱状に分布する微粒子の構造解析を行ってきた。<sup>1-3)</sup>

#### 2. 微粒子と微小重力環境

円柱状プラズマにおいて、微粒子の振る舞い、またクーロン結晶の構造は、重力の有無で大きく異なる。微粒子間相互作用が、重力環境下では主に湯川型クーロン斥力で表されるのに対して、微小重力環境下では微粒子の分布位置が変化するためにイオン流によるみかけの引力が働くようになるからである。このようなクーロン結晶の構造や微粒子間相互作用の相違を解析することにより、微粒子プラズマやクーロン結晶の基礎物理が理解でき、また他の物理現象の理解に役立てられる。このことが動機付けとなり、これまでの研究活動を支えてきた。例えば、結晶の成長初期段階において原子が核をつくり、その後の成長する様子を理解するために、微粒子プラズマのクーロン結晶を利用して結晶の成長過程を視覚化することに、研究者は大きな意義を感じてきた経緯がある。図1は、比較的少数の微粒子が円柱状のプラズマにおいて形成する構造を示している。これから、クーロン結晶の成長初期段階では、重力( $z$ )方向に層が形成されることが明らかである。この知見は、確かに他の結晶における核形成や成長過程の理解の一助となる。このように認識する一方で、ク

ーロン結晶による現象の可視化が、他の結晶を扱う分野における“新規性”や“進歩性”をもたらすことが必ずしも明白ではないことが懸念されるようになってきている。

微粒子プラズマの魅力は、見える“もの”や“こと”の面白さにあり、微粒子の挙動や現象が可視化されることにある。また、物理の理解により微小な物体である微粒子の操作や処理が実現されることに、微粒子プラズマの材料（技術）応用への可能性が秘められている。魅力と可能性を合わせながら、プラズマにおける微粒子の挙動により星間塵の空間分布や惑星形成の機構が理解できる、またクーロン結晶の物性から新規材料の利用に期待できる、などのような、微粒子プラズマと微小重力環境実験が人類に貢献できる具体性をより高める必要がある。

**謝辞** 本研究は、JAXA 宇宙環境利用化学委員会ワーキンググループ「次期実験装置 PK-4 を利用した微小重力実験計画検討」により実施されたものである。

#### 参考文献

- 1) Takahashi, K., Tonouchi, M., Adachi, S. and Totsuji, H., Int. J. Microgravity Sci. Appl. **31**, 62 (2014).
- 2) 高橋和生, 斗内愛美, 井出朋, 足立聡, 東辻浩夫, 林康明, プラズマ・核融合学会誌 **91**, 375 (2015).
- 3) 高橋和生, Thomas, H. M., Vladimir, V. I., 足立聡, 東辻浩夫, プラズマ・核融合学会誌 **91**, 517 (2015).

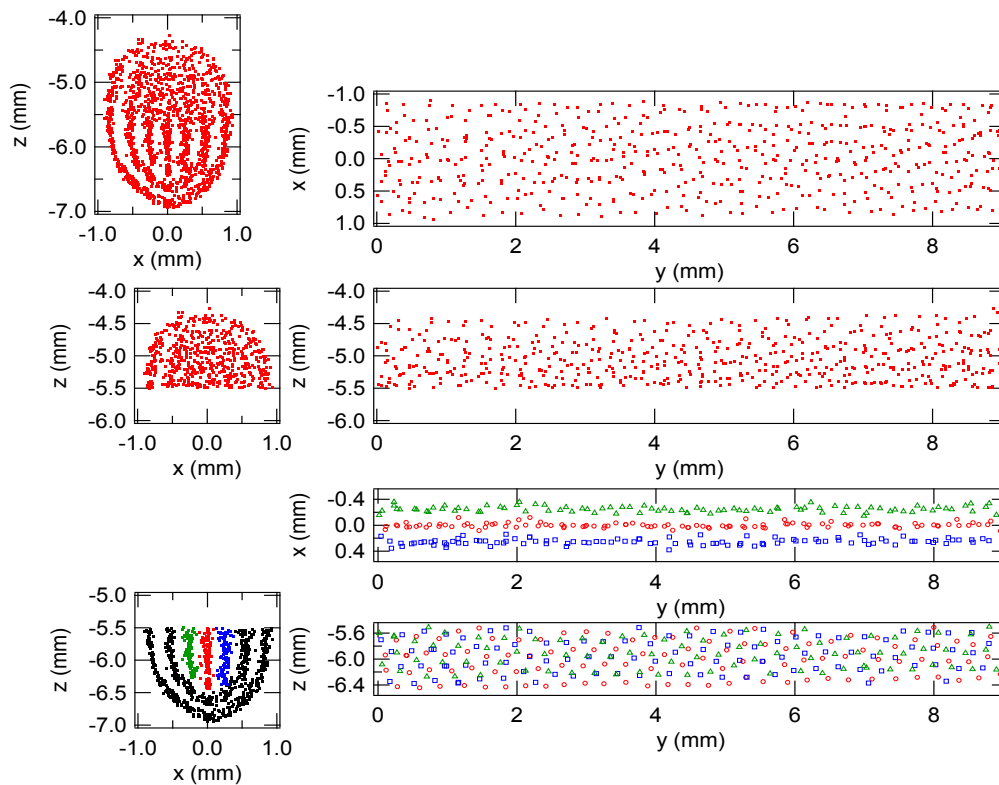


Fig.1 Coordinates of dusty particles in a cylindrical discharge.