

## 微小重力環境を利用した微粒子プラズマのイオンウェイクの可視化

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

### Ion Wake in Dusty Plasmas Appearing under Microgravity

Kazuo Takahashi\*, Satoshi Adachi, Hiroo Totsuji

\*Department of Electronics, Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto 606-8585

E-Mail: takahash@kit.jp

Abstract: Dynamics of dust particles in cylindrical plasmas is investigated in an ESA project with the apparatus of PK-4. The WG studied the cylindrical dusty plasmas to contribute to the project with the PK-4J similar to the original one and developed for microgravity experiments of parabolic flights in Japan. The dust particles distributed in the off-centered position close to the bottom in balancing of gravity. They changed the distribution and moved to around the center axis in a cylindrical discharge under microgravity. Several particles arranged in a line parallel to the axis, and the lines piled up to a bundle in the discharge due to an effect of ion wake.

Key words; Dusty plasma, Complex plasma, Fine particle plasma, PK-4, PK-4J, Parabolic flight

#### 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年ま

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、ガラス管内に円筒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、円筒状に分布する微粒子の構造解析を行ってきた。

#### 2. PK-4Jの航空機実験<sup>1)</sup>

直径40 mm、内径30 mm、長さ420 mmのガラス管(主管)に対して、その端部付近に枝管を設けることにより、コの字型のチェンバを用意した(Fig. 1)。枝管に電極を設け、それぞれに700 Vp-p、1 kHzの矩形波を位相を反転させて印加した。ガスにはArを用い、圧力を33 Paに保った。主管に円筒状のプラズマを発生させ、そこに粒径2.6  $\mu\text{m}$ の微粒子を注入した。

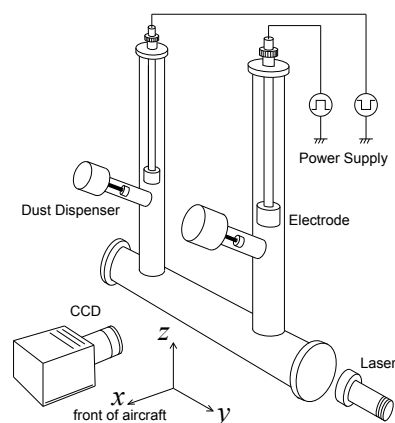


Fig.1 Schematic of the PK-4J in 2013.

前述の装置は 2013 年度のものである。それまでに改良を加えながら実験が進められた経緯がある。2012 年の実験では、主管が 2013 年度のものより長い (550 mm) ものが用いられた。そこで得られた実験画像を Fig. 2 に示す。1G の重力下では、微粒子は主管の中心から 7 mm 下の位置に分布した。微小重力になると、微粒子の分布はガラス管の中心軸周りに移動する。さらにそこで、微粒子は軸方向に沿った直線配列を形成する。この配列は、軸方向の電界に沿って流れるイオン流の作用によるものである。1 kHz で方向を変えながら流れる正の電荷を持つイオンは、負に帯電する微粒子の周りで流れの軌道を変える。イオン流の下流部、微粒子の背後では、負の電荷によって軌道を曲げられたイオンが集中し、局所的にイオン密度の高い場所 (ウェイク) ができる。これが他の微粒子を引きつけ、結果、微粒子の直線配列が形成される。

この様子を微粒子の位置に注目し、2013 年の実験結果をもとに模式的に表したものが Fig. 3 である。放電管内のプラズマ中の電界には、軸方向と径方向の 2 成分が存在する。プラズマのイオン密度は放電管の中心部で最も高く、ベッセル関数  $J_0$  に従って管壁まで変化する。放電管中心付近では、軸方向成分が主たるものであり、管壁に向かって徐々に径方向成分が増していく。この電界成分の分布により、イオンの流れが変化する。すなわち、中心付近では軸方向のイオン流が顕著である一方で、管壁に近づくに従ってイオン流の軸方向成分は小さくなり、管壁に向かって流れるイオンが多くなる。重力下では、このイオン流の径方向成分が無視できない部分に微粒子は存在しており、またそこでのイオン流がウェイクを発生させるほど強くないと考えられる。微小重力下では、微粒子は中心軸周りに分布し、そこで強いイオン流の影響によりウェイクが発生し、微粒子の直線配列が見られるようになる。

微粒子のこの特徴的な直線配列により、イオンとの相互作用によるウェイクの存在を知ることができる。また、微粒子の規則正しい配列には、このようにイオン流をその形成機構とするものもあり得る。本研究の結果は、これに似た他の系でのダストに対しても、イオンウェイクの影響に関する一考の余地を与えるものである。

**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。また、微小重力実験はダイヤモンドエアサービスによる航空機の運航により提供されたものである。

#### 参考文献

- 1) Takahashi, K., Tonouchi, M., Adachi, S. and Totsuji, H., Int. J. Microgravity Sci. Appl. **31**, 62 (2014).

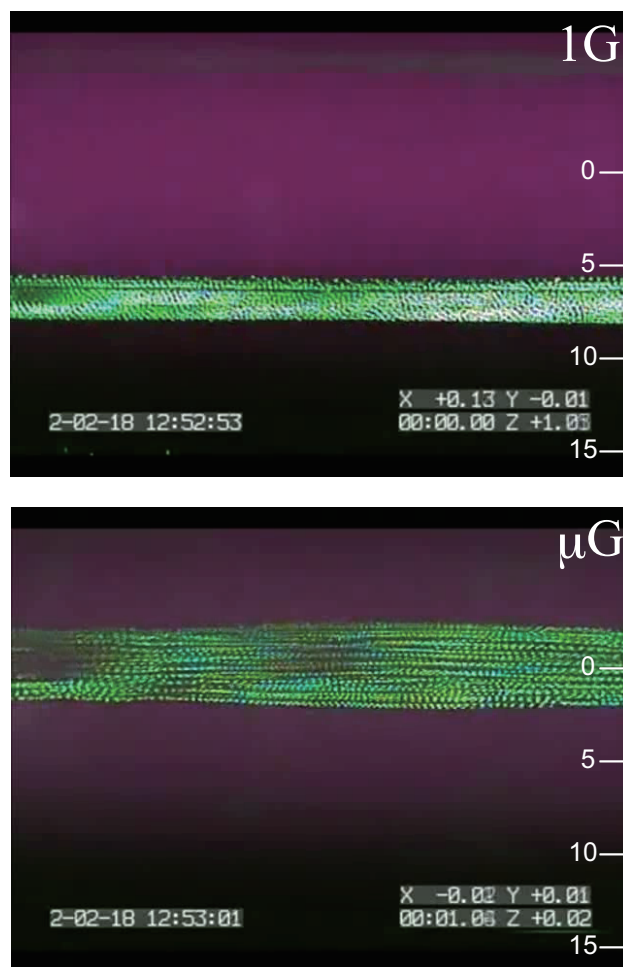


Fig.2 Spatial distributions of dust particles under gravity (upper) and microgravity (lower).

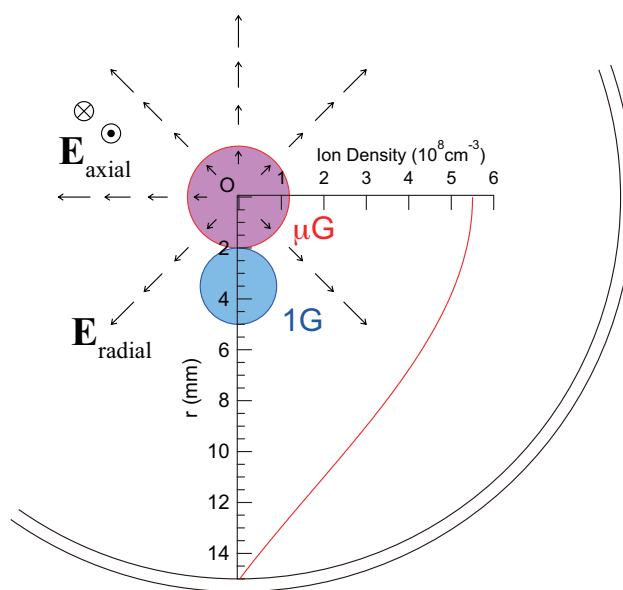


Fig.3 Schematic for spatial distributions of dust particles and ion density in a cross-sectional view of discharge tube.