大気球を利用した微粒子プラズマ実験構想

高橋 和生[1]，東辻 浩夫[2,3]，足立 聡[2]
[1]京都工芸繊維大学大学院 工芸科学研究科 電子システム工学部門，
[2]宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所，[3]岡山大学

１． はじめに

粒径が数μm 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μm 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様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（~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められたかたちとなる。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。その第一世代の実験は PKE と呼ばれ、2001 年 2 月から 2005 年 7 月まで実施された。現在は第二世代となる PK-3 plus と呼ばれる実験プロジェクトが行われており、第一世代のものから改良された装置がロシアのモジュール内で稼働している。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ている。臨界現象は、比較的相互作用の強い、言い換えると帯電量の多い微粒子の系において起こることが予測されている。ところが、このプラズマの条件では、放電空間の中心に微粒子が存在しない領域（ボイド）が形成され、これが微粒子の分布領域を狭め、分布の非一様性を生じさせることが、臨界現象の解析における障害となっている。一方で、PK-3 plus の後には、第三世代の PK-4 と呼ばれる ESA のプロジェクトが行われる。ガラス管内に円筒状のプラズマが生成され、主にその中での微粒子の流体的振る舞いを解析するための装置が、2014 年に ISS 搭

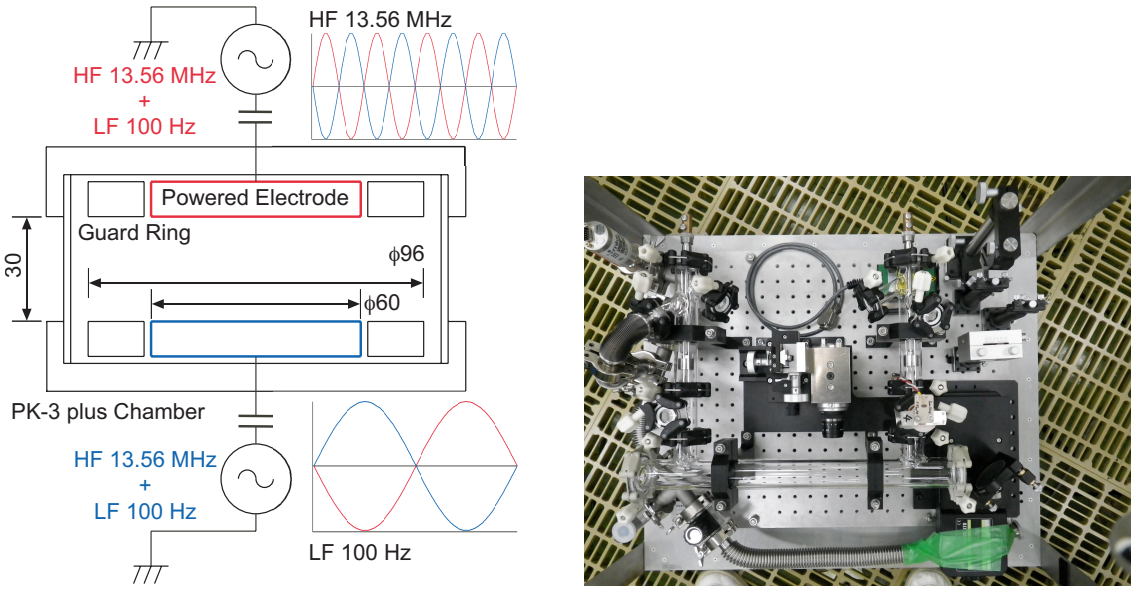
載される予定である。この PK-4 の活動にも日本からの研究者が参加し、円筒状に分布する微粒子の構造解析が行われている。

２．本研究の目的

プラズマ中における微粒子の振る舞いやクーロン結晶の形成機構など、微粒子プラズマの物理の理解を、そのために適切な装置を用意した上で進めたいと考えている。特に、微小重力下において観測領域を狭めるのみならず、微粒子の振る舞いに極度の制限を与えるボイドを、微粒子を含む放電空間より除去できる装置を構築することが急務である。ドイツとロシアの共同プロジェクト、PK-3 plus および PK-4 から得られる知識を活用して装置を製作し、大気球を利用した微小重力実験においてボイド除去の検証を行うことを目的とする。

３．航空機を利用した微小重力実験

2007 および 2008 年に林康明 WG により、PK-3 plus と同型の装置を用いて、航空機を利用した微小重力実験が行われている。この装置では、上下方向に配置した平行平板型の電極に高周波電圧を互いに位相を反転させて印加することにより、プラズマを発生させる（図 1(a)）。微小重力下において微粒子は高周波電圧が印加される中心電極に挟まれた領域に分布し、放電の条件（圧力および電力）ならびに微粒子の大きさにより、その領域の中心にボイドが形成される。



(a) (b)

図 1 PK-3 plus 同型装置の模式図(a)と PK-4 同様装置の写真(b)

一方で、2011 および 2012 年に東辻浩夫 WG により、PK-4 と同様の装置を用いて実験が行われている。ガラス管の両端に電極が設けられ、各々に互いに位相を反転させた 1 kHz の高電圧が印加されている（図 1(b)）。図 1(b)において横方向に伸びる内径 30 mm の主管において、微粒子は円筒状（軸対象の形状）に分布する。

PK-3 plus と同型の装置においてボイドが形成される様子が航空機実験により確認されている（図 2）。図 2 において、航空機が放物線飛行に入る直前の 2G のときから微小重力になる時点までの微粒子の様子について、その時間発展が(a)、(b)、(c)、(d)の順で示されている。2G のときに下側電極近傍に分布していた微粒子は、重力の影響が小さくなるに連れて写真の左手より、上側電極近傍に移動し、やがてボイドを取り巻くような分布を形成する。重力が変化する間に微粒子がたどる経路は、最終的に形成されるボイドと微粒子の分布との境界近傍にあり、微粒子に作用する力の均衡が、微粒子がボイド領域に進入することを妨げているかのように見える。

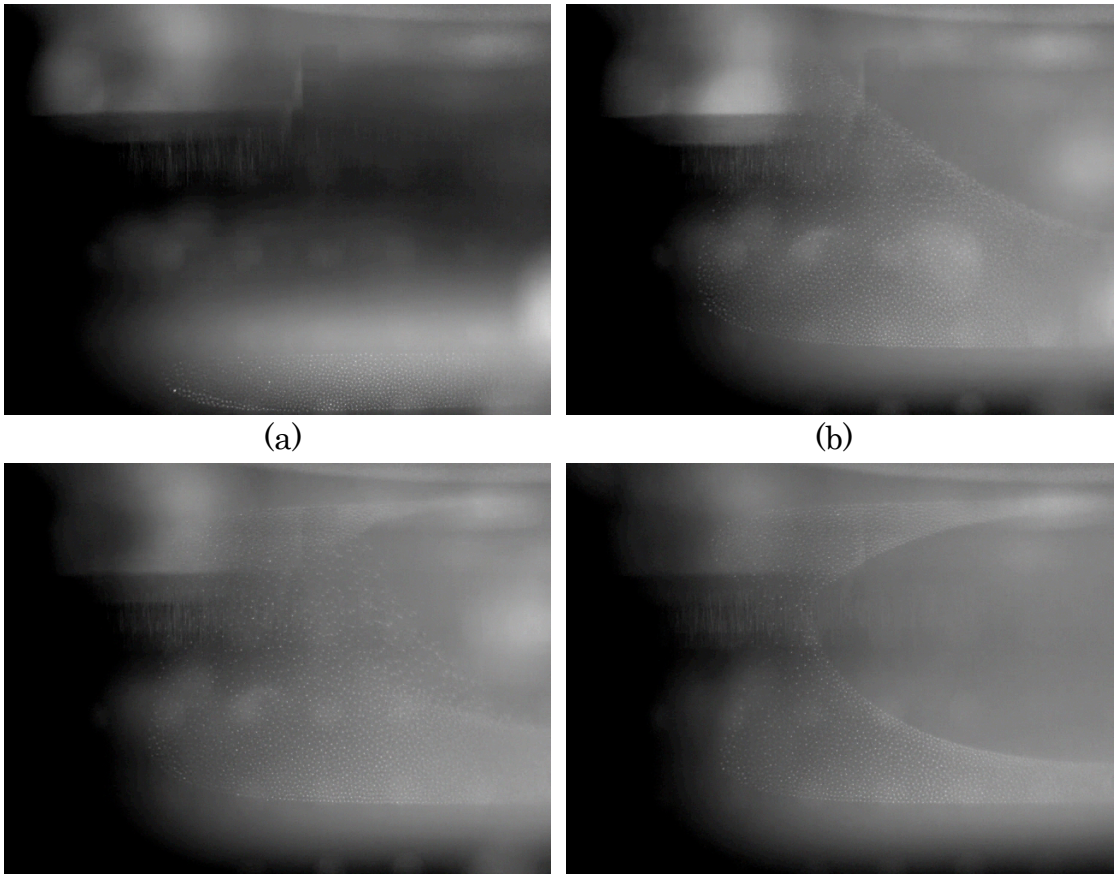


図 2　PK-3 plus と同型の装置においてボイドが形成される様子

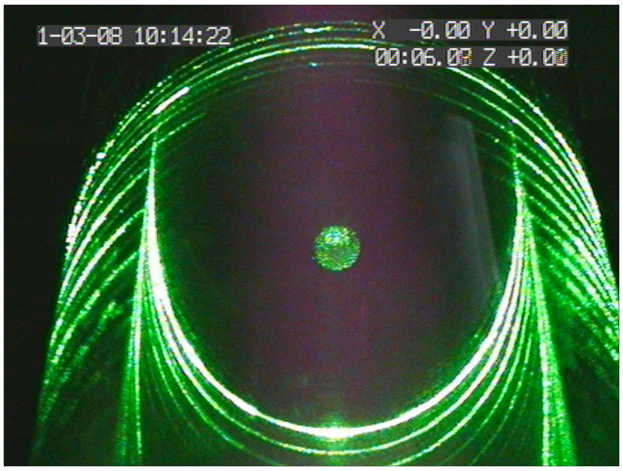


図 3　PK-4 と同様の装置において微粒子が分布する様子

図 3 は、PK-4 と同様の装置において微小重力条件下で微粒子が分布する様子を示している。微粒子分布の軸方向に垂直な断面は、ガラス管中央に位置し、完全な円形を示している。この分布にボイドは存在しない。

４．実験装置製作の指針

先に述べたとおり、微粒子の分布は、微粒子に働く力の均衡により決められる。また、微粒子に働く力は、主にプラズマ中の荷電粒子分布の形状、電位構造を反映するものとなる。電位構造を理解する手がかりを得るために、PK-3 plus 同型装置において、マイクロ波共振プローブによる電子密度の空間分布、ダブルプローブによるイオン密度および電子温度の空間分布を求める計測を行った。また、PK-4 におけるプラズマを想定した陽光柱について、イオンおよび電子、微粒子の空間分布について数値解析が行われている。計測や数値解析の結果について、現在のところ、統一的な見解が得られるには至っておらず、ボイドの形成について経験的な情報がさらに得られるよう努力しているところである。PK-4 でボイドが見られないことから、PK-3 plus の電極配置を PK-4 のそれに近づける、すなわち電極間距離を長くすることによるボイド除去の可能性の追求、もしくは、PK-3 plus でボイドが発生することから、PK-4 の電極配置を PK-3 plus のそれに近づける、すなわちガラス管の内径を増大させての微粒子分布の確認を進める予定である。さらにそれらに合わせてプラズマ計測を行い、電子およびイオン、微粒子の空間分布の様子からボイドの形成機構を理解する。この理解をもとに、ボイドを除去できる装置を構築し、大気球を利用した微小重力実験に臨むことを目指す。