

## 微粒子プラズマ実験と臨界現象

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

林康明<sup>1</sup>、東辻浩夫<sup>2</sup>、佐藤徳芳<sup>3</sup>、渡辺征夫<sup>4</sup>、上村鉄雄<sup>5</sup>、石原修<sup>6</sup>、飯塚哲<sup>3</sup>、三重野哲<sup>7</sup>、高橋和生<sup>8</sup>、白谷正治<sup>4</sup>、依田眞一<sup>9</sup>、足立聡<sup>9</sup>、高柳昌弘<sup>9</sup>

### Experiments on Fine Particle Plasmas and Critical Phenomena

Yasukai Hayashi<sup>1</sup>, Hiroo Totsuji<sup>2</sup>, Noriyoshi Sato<sup>3</sup>, Yukio Watanabe<sup>4</sup>, Tetuso Kamimura<sup>5</sup>, Osamu Ishihara<sup>6</sup>, Satoru Iizuka<sup>3</sup>, Tetsu Mieno<sup>7</sup>, Kazuo Takahashi<sup>8</sup>, Masaharu Shiratani<sup>4</sup>, Shinichi Yoda<sup>9</sup>, Satoshi Adachi<sup>9</sup>, Masahiro Takayanagi<sup>9</sup>  
Kyoto Inst. Technol.<sup>1</sup>, Okayama Univ.<sup>2</sup>, Tohoku Univ.<sup>3</sup>, Kyushu Univ.<sup>4</sup>, Meijo Univ.<sup>5</sup>, Yokohama Nat. Uvi.<sup>6</sup>, Sizuoka Univ.<sup>7</sup>, Kyoto Univ.<sup>8</sup>, JAXA<sup>9</sup>

E-Mail: hayashi@dj.kit.ac.jp

Abstract: Study on fine particles plasmas is related to a variety of fields of research. Fine particle plasma is a kind of strongly coupled plasma and is predicted to take the critical phenomenon. Such a kind of interesting experiment is now planning to be performed under microgravity condition by the collaboration between German and Japanese research groups.

#### 微粒子プラズマ研究と微小重力実験

微粒子プラズマの研究は、古くは惑星の成因と関連して宇宙プラズマの分野で取り上げられてきたが、十数年ほど前から半導体材料のプラズマプロセスにおけるダスト発生の問題と関わって大きく広がった。さらに1994年には微粒子がプラズマ中で結晶状に整列する、“クーロン結晶”の現象が世界の3ヶ所（日本、ドイツ、台湾）で同時に実験的に発見され<sup>1-3)</sup>、さらなる展開がなされてきている。ドイツのグループは、微粒子プラズマ・クーロン結晶の実験を早いうちから微小重力実験として計画し、ロシアと連携してISSなどを利用した実験を実施している。一方で、トピカルチーム:IMPACT (IMPF-ICAPS) を形成してESAにおけるISS利用も目指している。

日本でも、数年前より微粒子プラズマ研究が地上研究公募に採択され、落下実験施設や航空機を利用した微小重力実験が、東北大学、静岡大学、京都工芸繊維大学、九州大学において実施された。

微粒子プラズマ・クーロン結晶は、格子定数が数百 $\mu\text{m}$ と大きく、肉眼でも結晶が観察できるほどである。このため、実際の結晶における様々な物理現象を解明する手段として利用することが期待される。しかしそのためには、まず等方的な力の中で結晶を形成する必要がある。地上では、重力の影響を受けて特殊な構造の結晶が形成される場合が多い。そこで微小重力実験が提案された<sup>4)</sup>。しかし重力の小さい条件下では、今度はイオン粘性力の影響が顕著に現れ、微粒子はプラズマ周辺部に押しやられ、中心部にはボイドが形成される (Fig.1)。そこで、プラズマを外側から生成すると、内部へ向かうイオン流と共に微粒子を中

心部に捕捉できることがわかった<sup>5)</sup>。この方法を発展させて、結晶構造には至らないものの、殻構造が形成されることが報告されている<sup>6)</sup>。

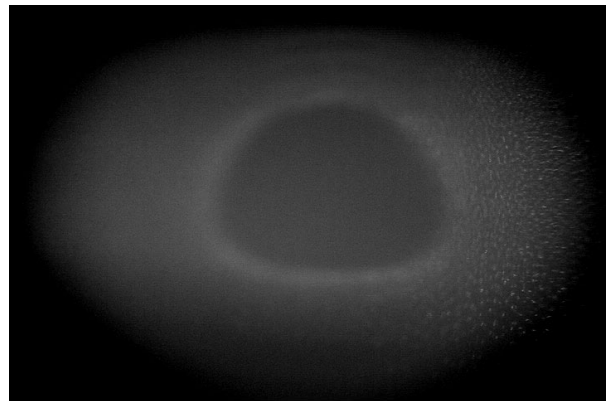


Fig.1 Fine particle plasma forming a void.

#### 微粒子プラズマにおける凝集力

ところで、微粒子プラズマは強結合プラズマの一つとして捉えることができる。強結合プラズマとは、帯電した粒子群が反対符号の（空間的に一様に塗りつぶした）背景電荷の中に存在する一成分プラズマにおいて、粒子間の平均クーロンエネルギーが熱運動エネルギーを上回って粒子間に相関が生じ液体の状態となったものを言う。クーロンエネルギーがさらに大きくなり一定の値を上回ると、固体（結晶）の状態に相転移する。

プラズマ中で微粒子の表面には電子が付着するため、微粒子は負電荷を有する荷電粒子のように振舞う。粒径がミクロンオーダーの微粒子の場合、低気圧グロー放電プラズマ中では数千～数万個の負電荷を有する。したがって、微粒子間の平均ク

ーロンエネルギーは極めて大きく、容易に強結合プラズマとなり得、クーロン結晶も形成される。プラズマ中の電子の多くが微粒子に付着している場合を考えると、周辺の正イオンと電子の密度の不均衡のため背景の電荷は正とみなすことができる。これは、電荷の符号は逆となるが、正イオンが電子の海の凝集力で配列する金属結晶と同様の状態と考えることができる。実際に微粒子プラズマにおいて、fccやbccに近い構造が形成されることも確認されている<sup>7, 8)</sup> (Fig.2)。

このように微粒子プラズマでは、負帯電した微粒子とは反対の正符号の背景電荷が存在し、それが凝集力となって結晶が形成される<sup>9, 10)</sup>。このような理由から、実際の気体・液体・固体の系と同様の物理現象を観測することが期待される。その一つとして、臨界現象観測の可能性が指摘されている<sup>11, 12)</sup>。

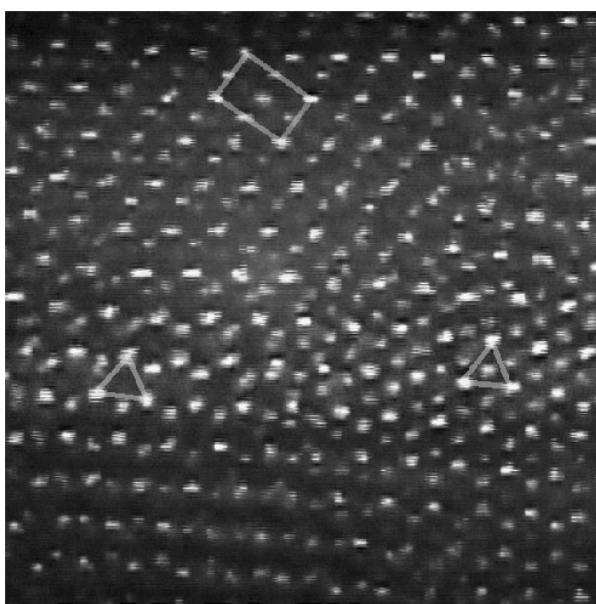


Fig.2 Fine particle Coulomb crystals.

#### 微粒子プラズマにおける臨界現象

強結合プラズマでも、背景が縮退した電子系の場合は背景電荷による圧力は大きい。また、固定された電場の中にトラップされたイオンの結晶では、背景電荷の変形はない。このため、こうした系では臨界現象は観測されない。しかし微粒子プラズマの場合は、背景電荷の変形が可能であり、その圧力も小さいので、圧縮率の発散に伴う現象の観測が可能となる。つまり微粒子プラズマの背景は古典プラズマであり、また個々の微粒子の帯電量が極めて大きいので、臨界現象の観測が可能となると予測される。

一方、日本の動向に触発されたドイツのマックスプランク研究所のグループより、微粒子間引力の存在を示す理論に基づいた計算から微粒子プラズマにおける臨界現象観測の可能性が指摘され、発表された<sup>13)</sup>。

ドイツ・マックスプランク研究所ではロシアと連携して、ロシア側の ISS において微小重力実験が行える態勢にあり、現在、PK3+と呼ばれるプラズマ実験設備を有している。この装置を用いた実験として、日本側から提案している臨界現象実験の実施を積極的に受け入れる構えを示しており、これまで、日本およびドイツにおいて関連した話し合いを持ってきた。今後、できる限り多くの機会を設け、実験の詳細を固めていく予定である。さらにPK4およびIMPACTにおける実験も計画されており、本共同実験の長期的取り組みも検討している。

#### 参考文献

- 1) Y. Hayashi and K. Tachibana: *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, L804 (1994).
- 2) J. H. Chu and Lin I: *Phys. Rev. Lett.* **72**, 4009 (1994).
- 3) H. Thomas, G.E. Morfill, V. Demmel, J. Goree, B. Feuerbacher, and D. Mohlmann: *Phys. Rev. Lett.* **73**, 652 (1994).
- 4) G.E. Morfill, H. Thomas, U. Konopka, H. Rothermel, M. Zuzic, A. Ivlev, and J. Goree, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1598 (1999).
- 5) 飯塚哲, 佐藤徳芳, *日本物理学会誌*, **58**, 821 (2003).
- 6) O. Arp, D. Block, A. Piel, and A. Melzer, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 165004 (2004).
- 7) Y. Hayashi, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 4764 (1999).
- 8) Y. Hayashi, *Physica Scripta*. **T89**, 112 (2001).
- 9) H. Totsuji, T. Ogawa, C. Totsuji, and K. Tsuruta, *Phys. Rev. E*, **71**, 045401(R) (2005).
- 10) H. Totsuji, T. Ogawa, C. Totsuji, and K. Tsuruta, *Phys. Rev. E*, **72**, 036406 (2005).
- 11) H. Totsuji and S. Ichimaru, *Prog. Theor. Phys.*, **52**, 42 (1974)
- 12) 東辻浩夫, *日本マイクログラビティー応用学会誌*, **22**(1) (2005), 17.
- 13) S. A. Khrapak, et. al., *Phys. Rev. Lett.* **96**, 015001 (2006).