

平成19年4月23日

平成18年度「微小重力環境下微粒子プラズマ研究会」活動報告書

代表者所属 京都工芸繊維大学

氏名 林 康明

1. 構成メンバ

氏 名	所属
足立 聡	宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部
飯塚 哲	東北大学 大学院工学研究科
石原 修	横浜国立大学 大学院工学研究院
上村鉄雄	名城大学 大学院理工学研究科
佐藤徳芳	東北大学 名誉教授
白谷正治	九州大学 大学院システム情報科学研究院
高橋和生	京都工芸繊維大学 大学院工芸科学研究科
高柳昌弘	宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部
東辻浩夫	岡山大学 工学部
林 康明	京都工芸繊維大学 大学院工芸科学研究科
三重野哲	静岡大学 理学部
渡辺征夫	九州大学 名誉教授

2. 本年度 WG 会合開催実績

- (1) 第1回：平成18年11月24日
- (2) 第2回：平成18年12月16日
- (3) 第3回：平成19年 3月17日

3. 活動目的

古典系・量子系を問わず、荷電粒子および類似系の正負一方の成分に着目すると、結合度の増加に伴い一般に等温圧縮率が発散することは古くから知られているが、着目成分の電荷を中和する成分が縮退し

て高い圧力を持つため、実験的検証は困難とされてきた。しかし、微粒子プラズマを用いれば、微粒子が強結合であり、かつ電荷を中和する成分が古典系であることから、この熱力学的不安定に伴う臨界現象の観測が可能であることが東辻により最近見出された（東辻モデル）。本WGの主たる最終目標は、微粒子プラズマにおいて東辻モデルを実証し、荷電粒子および類似系に普遍的な現象として等温圧縮率の発散などの臨界現象を実験的に確認することである。そこで、国際宇宙ステーション内に昨年設備された微粒子プラズマ実験装置PK-3 Plusを日独共同で利用して実験を行う。

このため本年度は、必要となるプラズマパラメータ等を実験的及び理論的に検討する。また、マックスプランク研究所との研究協力について協議を進める。臨界状態達成には微小重力環境が必要であり、協力研究では、昨年打ち上げられたPK-3 Plusの日独共同利用を目指す。

4. 活動内容

本研究会では、研究班WGとしての会議を2回、その外に、核融合科学研究所で平成18年12月15－16日に開催された“第7回微粒子プラズマ研究会”に付随した会議を1回（平成18年12月16日）実施した。

また、平成18年5月に構成メンバのうちの4名（足立、高橋、東辻、林）が、フランスのオルレアン大学で開催された、微小重力下微粒子プラズマ実験に関わるInternational Topical Team Meeting (Critical Point Symposium)に出席し、発表と討論を行った。さらに、平成18年10月には構成メンバのうち3名（足立、東辻、林）が、オランダのノルトバイクにあるESA本部で開催された、ESA/JAXA Meetingに出席し、微粒子プラズマ以外の

臨界現象実験のグループと一緒に発表と討論を行った。

さらに、8月には構成メンバーのうちの2名（足立、林）がドイツのマックスプランク研究所を訪問し、Morfill 教授、Thomas 博士らと会談を行い、本 WG との International Topical Team としての活動、JAXA との協力関係について確認を行った。

一方、ISS に現在搭載されている PK-3 Plus と同型装置の本体部をマックスプランク研究所より新規に製作頂き、京都工芸繊維大学が借用して実験を進めることになった。本年度は本 WG 予算で排気系を購入し、真空排気試験、プラズマ生成試験などを行った。

WG 会議において議論された主な内容は以下のとおり。

第1回研究会（18.11.24）：

構成メンバーの中の7名（足立、石原、佐藤、高橋、東辻、渡辺、林）と JAXA の依田教授が参加して討論を行った。

最初に、微小重力条件下における微粒子プラズマによる臨界現象実験フライトプロジェクト化のサイエンスレビューの結果についての反省が行われた。そして、次の3点についてさらに検討する必要があることを確認した。

①通常流体における臨界現象との比較を明確にするため、 p , V , T で記述する。

②微粒子プラズマにおいて臨界現象に接近したことの確認方法

③実際の実験パラメータ（RF パワー、圧力、微粒子量、微粒子サイズ など）から臨界に接近させる方法

①については、微粒子プラズマのパラメータを p , V , T に焼き直したパラメータで表現した図を作成することとした。②では、実空間における微粒子配列の動径分布関数をフーリエ変換して構造因子を求めることで、臨界点への接近度合いを判定することについて議論を行った。③では、まずフライトにおいて設定可能なパラメータとプラズマパラメータと関係を明らかにするため、プローブ計測によるプラズマ解析を行いながら半経験的に合わせることで予測する。次に、プラズマパラメータと

臨界現象に関わる直接的なパラメータとの関係については、コンピュータシミュレーションを用いて解析を行うことを検討した。

また、通常流体における臨界現象と比較しての特長について議論が行われ、個々の構成粒子の挙動から臨界現象を観測できること、荷電粒子系であることなどが明らかになった。

臨界を実現するための具体的実験条件についても議論が行われた。結果的に、イオン温度と電子温度の比を大きくする、イオン密度を増大する、圧力を低くすることが有効であることが分かり、拡散プラズマを利用する方法や、放電周波数を大きくすることがこの目的に合致することが分かった。

さらに、地上重力下条件下で行った予備実験の結果が京都工芸繊維大学および JAXA より報告され、微粒子温度の評価方法、微粒子密度依存性などについて議論が行われた。

第2回研究会（18.12.16）：

構成メンバーの中で第7回微粒子プラズマ研究会に出席した8名（石原、上村、佐藤、高橋、東辻、林、三重野、渡辺）で話し合いが行われた。

はじめに林から、International Topical Team Meeting、ESA/JAXA Meeting とフライトプロジェクトのサイエンスレビューの結果についての報告がなされた。

次に、PK-3 Plus に次ぐ実験として計画されている PK-4 への実験提案について検討がなされた。今回は、この件に関する検討は最初ということで、自由な提案と意見が交わされた。

第3回研究会（19.3.17）：

構成メンバーの中のフライトプロジェクトに関わる5名（足立、石原、高橋、東辻、林）と JAXA の依田教授が参加して討論を行った。

まず、ISS に現在搭載されている PK-3 Plus と同型の装置が京都工芸繊維大学内に設置されており、その見学を行った。

会議では、まず、欧州グループの臨界現象実験との相違点について話し合いがな

された。その結果、欧州グループは微粒子プラズマにおける気液二相の臨界を目指しているのに対して、本 WG では、固相-固相間の臨界現象を調べることであり、本質的に観測する現象が異なっていることを確認した。

ISS 利用についてのマックスプランク研究所によるレビュー(実験計画書最終版の日独サインアップ)を 2008 年 2 月に実施することを設定した。

さらに次の WG 会議を本年 8 月に設定し、それまでに、理論、実験共、より具体的に詳細な議論ができるよう進めておくことを了解した。

5. 成果

学会発表 :

- ・ 林康明、他 11 名, “微粒子プラズマ実験と臨界現象”, 第 23 回宇宙利用シンポジウム (2007.1.17)
- ・ Y. Hayashi, “Critical Point Experiment Using Fine Particle Plasmas”, 7th Workshop on Fine Particle Plasmas (2006.12.16).
- ・ Y. Mizobata, S. Yanagi, Y. Hayashi, K. Takahashi “Temperature Evaluation of Dust Particles in a Plasma”, 7th Workshop on Fine Particle Plasmas (2006.12.16).
- ・ K. Takahashi, et. al. “Wave Observation for Plasma Monitoring in Microgravity Complex Plasmas (PKE-Nefedov) on ISS”, 7th Workshop on Fine Particle Plasmas (2006.12.16).
- ・ O. Ishihara, Attractive Force Resulting from a Free Energy in a Complex Plasma, 14th Gaseous Electronics Meeting (5-9 February, 2006, Murramarang, NSW, Australia)
- ・ O. Ishihara, Quantum Mechanical Approach to Complex Plasmas, International Workshop on Frontiers of Plasma Science (Aug. 21-Sept. 1, 2006, Trieste, Italy)

論文発表 :

- ・ S. Nunomura, M. Kita, K. Koga, M. Shiratani, and Y. Watanabe, In situ simple method for measuring size and density of nanoparticles in reactive plasmas, Journal of Applied Physics, Vol. 99, pp. 083302-1-7 (2006).
- ・ T. Mieno, “Thermal motion of carbon clusters and production of carbon nanotubes y gravity-free arc discharge”, J. Appl. Phys. 99 (2006) 104301(1-5).
- ・ T. Yamanouchi, M. Shindo, O. Ishihara and T. Kamimura, Simulation on Cluster Structuring of Dust Particles Confined in a Plasma, Thin Solid Films 506-507 (2006) 642-646.
- ・ 石原修 他、”宇宙における微粒子プラズマ”、プラズマ核融合学会誌、Vol. 82 (2006) p. 75
- ・ H. Totsuji, “Equilibrium properties of two-dimensional Yukawa plasmas”, Journal of Physics A: Mathematical and General, 39, 4493-4499 (2006).
- ・ H. Totsuji, “Thermodynamic instability and critical fluctuations in dusty plasmas”, Journal of Physics A: Mathematical and General, 39, 4565-4569 (2006).
- ・ Totsuji, T. Ogawa, C. Totsuji, and K. Tsuruta, “Structure of spherical Yukawa clusters”, H. Journal of Physics A: Mathematical and General, 39, 4545-4548 (2006).
- ・ S. Adachi; M. Takayanagi, “Experimental study on Coulomb crystal formation in dusty plasmas”, JAXA-RR-05-025E (2006).
- ・ 東辻浩夫, “微粒子プラズマによる臨界現象”, プラズマ核融合学会誌, Vol. 82 (2006) p. 693

競争的資金獲得(交付内定済) :

- ・ 科学研究費補助金 基盤研究 (B) 研究課題名 : 「微粒子プラズマによる臨界現象」 研究代表者 : 林康明

Research on Fine Particle Plasmas under Microgravity

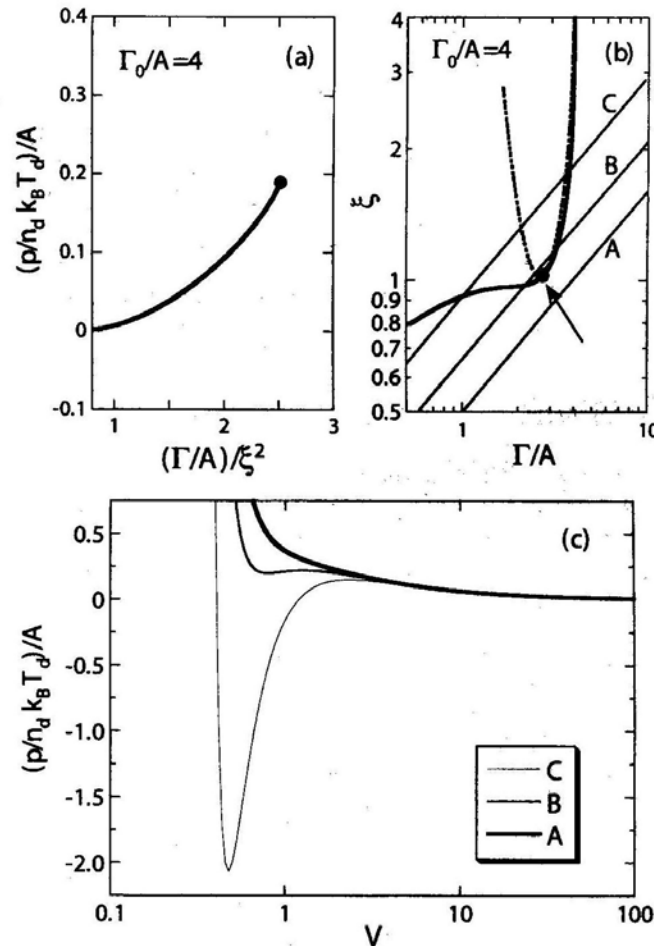
$$p = n_e k_B T_e + n_i k_B T_i$$

$$\xi = a / \lambda_D$$

A : $T > T_c$

B : $T \sim T_c$

C : $T < T_c$



**Typical Experimental Parameters
for Critical Point**

$$T_e \sim 10 \text{ [eV]}$$

$$T_i = 0.1 - 1 \text{ [eV]}$$

$$n_i = 10^{12} \text{ [cm}^{-3}\text{]}$$

$$N_d \sim 10^7 \text{ [cm}^{-3}\text{]}$$

$$Q \sim 10^4 e$$

$$D \sim 20 \text{ }\mu\text{m}$$

$$\rho, \quad \Gamma, \quad \xi (=a/\lambda_D)$$

↑ Theoretical Analyses

$$n_e, T_e, n_i, T_i, n_o, T_o, Q, n_d, T_d$$

↑ Semi-empirical Equation, Experiments

RF Power, Pressure, Quantity of Fine Particles (N_d), Particle Size (D)

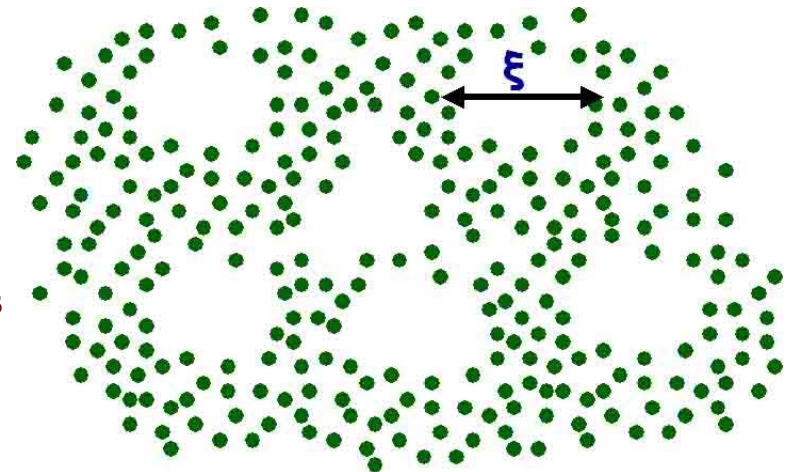
Correlation length

$$\xi(T) \propto T_c / |T - T_c|^{-1/2}$$

Relaxation time

$$\tau(T) \propto T_c / |T - T_c|^{-1}$$

Expected fine particle arrangement observed by CCD around the critical point



Lowest observation limit of ξ

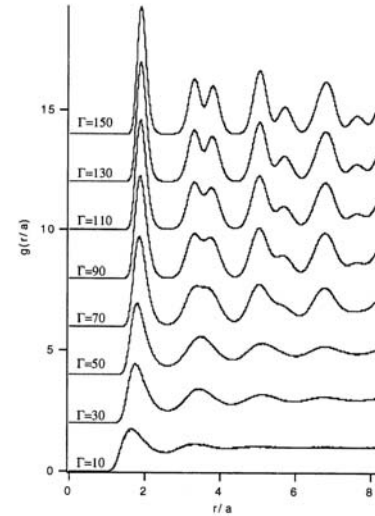
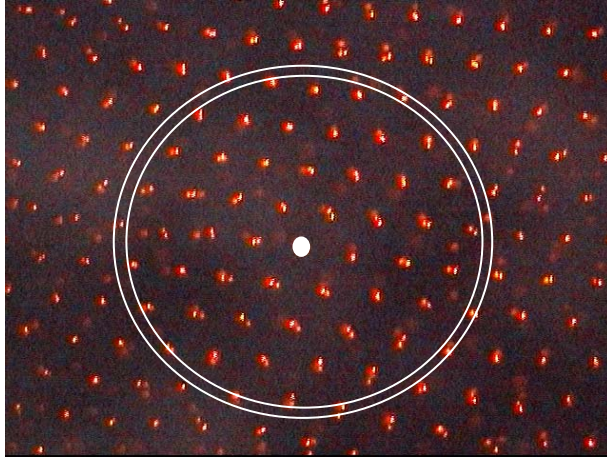
$\times 10^{-3}$ | critical opalescence : $>0.1 \mu m \rightarrow >10^3$ atoms
 ↓ fine particle plasma : $100 \mu m \rightarrow$ few particles

Temperature precision for observation $|T - T_c|$

$\times 10^6$ | critical opalescence : 1 mK
 ↓ fine particle plasma : $1000 \text{ K} (\sim 0.1 \text{ eV})$

Evaluation method of distance from critical point by radial distribution function

$$g(r) = \frac{\langle n(r, r+\Delta r) \rangle}{4\pi r^2 \Delta r N(N-1)}$$



PK-3 Plus ground model constructed in Kyoto institute of Technology

