



研究最前線

微小重力環境下における微粒子プラズマ研究の最前線

ープラズマパラメータ計測にもとづく研究の現状ー

Recent Progress in Study of Dusty Plasmas under Microgravity - Current Status of Researches Based on Measuring Plasma Parameters -

高橋和生

TAKAHASHI Kazuo

京都工芸繊維大学 電気電子工学系

(原稿受付：2016年2月16日 / 原稿受理：2016年3月16日)

微粒子プラズマの微小重力環境実験は2001年に、日本では宇宙環境利用の地上研究として盛んに行われ、国際宇宙ステーション (ISS) では本格的にロシアとドイツの共同プロジェクトにより実施されるようになった。その共同プロジェクトが進行する中、日本の研究者は国際協力を得ながら臨界現象のデモンストレーションを目的として、ISSにおける実験の経験を持つに至った。そこでは微粒子プラズマ計測が重要視され、現在でも計測に触れずに研究の最前線を示すことはできない。本稿では、他のプラズマと異なり例が豊富ではない、微粒子を含むプラズマにおける電子温度等のパラメータの測定について紹介する。典型的な現象である微粒子の波動伝搬は微粒子間相互作用に関係する。また、微粒子の帯電量はプラズマパラメータによって決定される。これらのことから、波動の観測によりプラズマパラメータを推定できる。またダブルプローブを用いると電子温度とイオン密度を直接測定できる。電子温度からはプラズマが微粒子の存在により大きな影響を受けていることが確認され、イオン密度からは微粒子の帯電量の計算や臨界現象を観測するための条件を算出できる。微粒子プラズマにおけるさらなる物理の探究と微小重力環境実験に対して、計測にもとづく微粒子プラズマの理解が今後益々期待される。

Keywords:

dusty plasma, fine particle plasma, complex plasma, microgravity, international space station

1. はじめに

2001年に宇宙開発事業団 (NASDA, 当時) によって、第5回「宇宙環境利用に関する地上研究公募」のテーマとして、微粒子プラズマに関する5つの研究グループの提案が選定された。NASDAが提供する機会において、静岡大学

三重野グループは、微小重力環境における無対流アーク放電を利用して、高品質な炭素材料を得ようとした[1,2]。また、九州大学 渡辺・白谷グループは、超高品質結晶 Si ナノ粒子の作製を試みた。微粒子の挙動やクーロン結晶については、東北大学 佐藤・飯塚グループ、京都工芸繊維大学 林グループ、京都大学 筆者 (当時) グループがそれぞれ独自の解析を行った。図1では、2001年以降の日本および欧州における筆者が関わった主な研究活動の進捗を示している。

同年、微粒子プラズマの微小重力環境実験が、国際宇宙ステーション (ISS) においてロシアとドイツの共同プロジェクトとして本格的に開始された[3]。ロシアのグループは、ISSが運用される前に稼働していた宇宙ステーション ミールにて、簡単な装置を使用し微小重力環境下において帯電した微粒子の観察をすでに済ませていた。ドイツ

のグループは、それまでにドイツ航空宇宙センターの支援を受け落下塔や観測ロケット、航空機を用いた実験にて装置開発も含めて準備を進めていた。これら2つのグループが、お互いのリソースを共有して実現させたのがこのプロジェクトである。

日本では、2001年以来、核融合科学研究所との共同研究として微粒子プラズマ研究会 (Workshop on Fine Particle

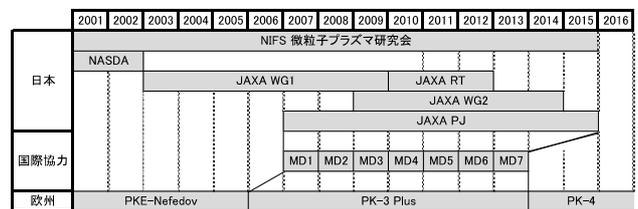


図1 日本および欧州において筆者が関わった主な研究活動の進捗。NIFS, NASDA, JAXA はそれぞれ核融合科学研究所、宇宙開発事業団、宇宙航空研究開発機構 (WG: ワーキンググループ, RT: 研究チーム, PJ: プロジェクト) の支援を受けた研究活動を示す。欧州の欄には国際宇宙ステーションにおける実験プロジェクトの呼称が示されており、JAXA PJ では国際協力により PK-3 Plus のミッションにおける実験データ (MD) を得た。

Plasmas) が開催されており、研究者間において議論を深めながらコミュニティが発展してきている。ロシア・ドイツ共同プロジェクトが進行する中、日本の研究者コミュニティは、日本の ISS モジュールである Japan Experiment Module (JEM, きぼう) における実験機会をうかがっていた。一方で、2005年には、ロシア・ドイツ共同プロジェクトでは実験装置が更新され、さらに活発に実験が実施されるようになった[4]。その頃、日本の研究者とドイツのグループとの交流が広がり、直後には日本の研究者が国際協力を得て ISS における実験の経験を持つに至った。この国際協力による研究活動では、微粒子プラズマにおける臨界現象のデモンストレーションが目的とされ[5,6]、日本宇宙航空研究開発機構 (JAXA) におけるプロジェクトとして実験が実施された[7]。

JAXA プロジェクトでは、臨界現象を観測するために、プラズマパラメータの測定が重要視された。ロシア・ドイツ共同プロジェクトの装置における実測データが皆無であったためである。ISS に搭載される装置では、重量や容積が制限されるため、プラズマを発生させるチェンバは極端に小型化される。小型のチェンバでのプラズマ計測や計測機器の搭載が困難であるため、それまでにプラズマパラメータの測定が実施されたことはなかった。また、微小重力環境実験でなくとも微粒子の存在が計測に困難をもたらすこともあり、微粒子プラズマの計測例は豊富ではない。他のプラズマではごく通常のものとして行われる計測が、微粒子プラズマにおいてはそうではない。これは、微小重力環境における微粒子の振る舞いが地上で見られるものとあまりにも異なり、その観察結果に人々の興味が集まることと、現象についてプラズマの電子やイオンを除いた微粒子の荷電粒子系における解釈に終始することに無関係ではない。

JAXA プロジェクトでは、微粒子の波動を観察しその現象からプラズマパラメータを推定することやダブルプローブを用いた電子温度とイオン密度の測定が行われた。航空機を用いた微小重力環境実験の機会を得て微粒子の振る舞いを観察し[8]、一方地上では微小重力環境実験に合わせたプラズマ発生条件において計測を進めた。本稿では、そのようにして実施した微粒子プラズマ計測の様子を紹介したい。

2. 微粒子疎密波とプラズマパラメータ

プラズマ中に分布する微粒子群に揺動を加えると、疎密波が伝搬する。疎密波は、微粒子の密度が極端に高くなったときに不安定性として現れることもある。平行平板型高周波放電によって微粒子プラズマを生成し、意図的に励起された疎密波の観測から、プラズマパラメータを推定した研究について概要を説明する[9]。図2では、PKE-Nefedov 装置[3]において微粒子群中を伝搬する疎密波の例が示されている。実験では、上下に配置した電極に 13.56 MHz の高周波電圧を印加し、Ar プラズマを発生させ、粒径が 3.4 μm の微粒子を注入した。さらに、高周波電極の外側にあるガードリングに 30 Hz 以下の正弦波電圧を

加えることにより、疎密波を励起した。Ar ガスの圧力を低下させる、また高周波電力を低減させる方が、疎密波を励起しやすい傾向にある。

疎密波が伝搬する速さ v_d (周波数 ω_d と波数 k_d との比) は、次式で与えられ、微粒子の電荷数 Z_d 、イオン密度 n_i 、イオン温度 T_i 、微粒子の密度 n_d 、微粒子の質量 m_d で表される [10, 11]。

$$v_d = \frac{\omega_d}{k_d} = \frac{Z_d}{\sqrt{n_i}} \sqrt{\frac{n_d T_i}{m_d}} \quad (1)$$

実験において、ガス圧力および高周波電力をそれぞれ 24 Pa, 0.25 W とし、疎密波を励起する周波数を変えながら波動を観測した。そのときに得られた励起周波数と波長の関係を図3に示す。波数の小さい領域において周波数と波数の関係が線形であるとする長波長近似により、疎密波が

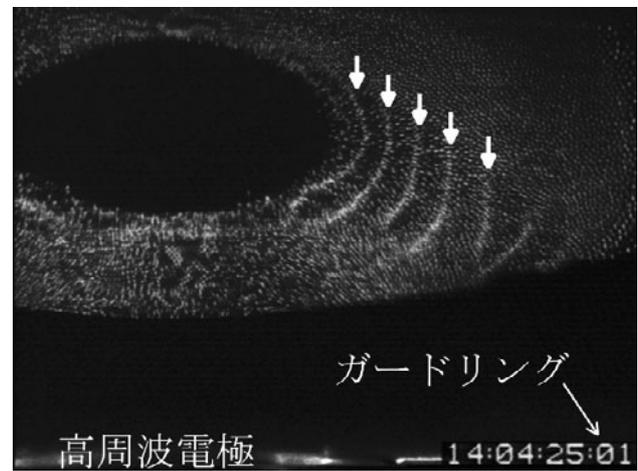


図2 PKE-Nefedov の実験[3]により得られた微粒子プラズマにおける粗密波の例。矢印(太線)は微粒子が密である部分。写真下部に高周波電極が配置されており、その外側のガードリングに 30 Hz 以下の正弦波電圧が印加される。疎密波は、この電位揺動によって励起される[9]。

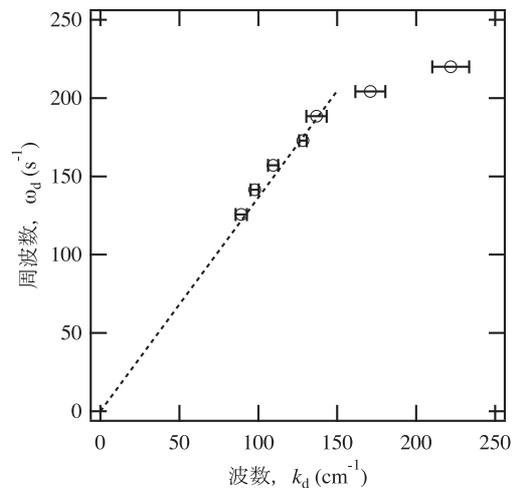


図3 疎密波における周波数 ω_d と波数 k_d の関係[9]。波数の小さい領域において周波数と波数との関係が線形であると同様に(長波長近似)、疎密波の伝搬する速さ v_d を求めることができる。

伝搬する速さとして 0.98 cm/sec の値が得られる。この値と測定が可能な微粒子密度 n_d を (1) 式に代入し、イオン温度 T_i を仮定することにより、微粒子の電荷数 Z_d とイオン密度 n_i との関係 (関係 1)

$$Z_d \propto \sqrt{n_i} \tag{2}$$

を求めることができる。

一方で、微粒子の帯電量は軌道運動制限理論から求められる [12]。プラズマに浮遊する微粒子の表面では、電子電流とイオン電流が等しいことから下記の関係が成り立つ。

$$n_e \sqrt{\frac{T_e}{m_e}} \exp\left(\frac{e\phi_f}{k_B T_e}\right) = n_i \sqrt{\frac{T_i}{m_i}} \left(1 - \frac{e\phi_f}{k_B T_i}\right) \tag{3}$$

ここで、 n_e 、 T_e 、 m_e はそれぞれ電子の密度、温度、質量であり、 m_i 、 e 、 k_B はイオンの質量、電気素量、ボルツマン定数である。また、 ϕ_f は微粒子表面の電位である浮動電位を表し、微粒子の電荷数と次の関係にある。

$$eZ_d = 4\pi\epsilon_0 r_d \phi_f$$

式中の ϵ_0 、 r_d はそれぞれ真空の誘電率、微粒子の半径である。この式と (3) 式においてイオン温度と電子温度を仮定すると、微粒子の電荷数とイオン密度との関係 (関係 2) を得ることができる。

図 4 では、疎密波から得られる (2) 式 (関係 1) を実線で、また軌道運動制限理論から得られる電荷数とイオン密度の関係 (関係 2) を破線で示している。それぞれにおいて、イオン温度と電子温度が仮定されている。これら二つの関係を表す曲線の交点が、疎密波を観測したプラズマにおけるプラズマパラメータを与えると考えられる。イオン温度として室温程度を仮定したとき、電子温度が 1.0 eV よりも低い領域でイオン密度が $10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ となる。これらが実験で得られるパラメータであると解釈されるが、

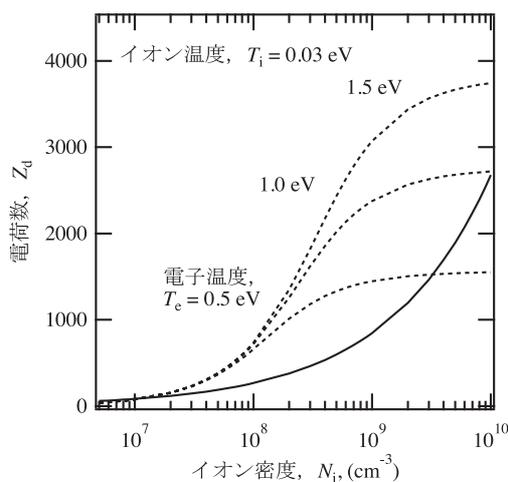


図 4 疎密波と軌道運動制限理論から得られる電荷数とイオン密度との関係 [9]。実線はイオン温度を仮定して疎密波 (関係 1) から得られたもの、また破線はイオン温度と電子温度を仮定して軌道運動制限理論 (関係 2) から得られたもの。二つの関係を表す曲線の交点から、実験におけるプラズマパラメータが求められると考えられる。

ここで大雑把な値の検討はできても、値の妥当性を検証することは難しい。

3. 微粒子プラズマにおけるダブルプローブ計測

前章で述べたような間接的な手法でプラズマパラメータが得られた後、その妥当性を検討するために直接的な方法でのパラメータ測定が求められた。筆者らは、扱う装置における電子 (イオン) 密度がそれほど大きくないとの予想から、電子密度の変動に対して敏感なマイクロ波共振プローブを利用して電子密度を測定した [13]。この測定では、マイクロ波の共振を得るためにプラズマの体積に対して比較的大きなアンテナをプローブとした。そのためプローブがプラズマに大きな影響を与え、プローブ表面におけるプラズマの消滅が無視できない状態となり、本来の電子密度よりも低い値を見積もるにとどまった。それでも、電子密度が微粒子の存在により変化することやその変化がわずかであっても検知できることが有意義であり、その後の計測の発達につながった。

ここではダブルプローブ法を用いて、イオン密度と電子温度が測定された例を紹介する [14]。この方法では、高周波放電におけるプラズマ電位の時間変動への対策を講じることなく、測定ができる [15]。直径 60 mm の円盤電極が上下に 30 mm 隔てられて配置されている PK-3Plus 装置 [4] において、測定が行われた。装置では、Ar ガスの圧力を 40 Pa に保ち、13.56 MHz、0.4 W の高周波電力を印加することによってプラズマを発生させた。そこへ粒径が 2.6 μm の微粒子を大量に注入した。その様子が図 5 に示されている。微粒子の密度が極端に高いため、微粒子群の底部では疎密波が見られる。この微粒子群へ対のプローブチップを挿入した。図 5 より、チップがシースで覆われており、チップからある程度距離を隔てたところに微粒子が分布していることがわかる。この微粒子の分布位置が、微粒子に働く静電力とイオン粘性力とが釣り合うところである。このような状況で、チップ間に $\pm 30 \text{ V}$ の電圧を印加して電流-電圧特性を取得した。



図 5 プラズマ中の微粒子群に挿入されたダブルプローブ。2本のプローブチップはシースで覆われ、微粒子とは接触していない様子がわかる。

図6は、プラズマに微粒子が注入されていない場合と注入された場合に測定されたイオン密度と電子温度を示している。プローブチップを上下電極間で移動させながら測定された結果である。微粒子が注入された場合には電子温度が上昇している。プラズマにおいて微粒子が帯電することにより電子密度が減少するが、印加される電力に変化はない。従って、供給される電子当たりのエネルギーは増加し、電子温度が上昇すると解釈される[16, 17]。一方でイオン密度は、微粒子が注入された場合に減少している。これは、注入された微粒子があまりにも多量であったために、電離が阻害されたことによるものと考えられる。微粒子が少量の場合、また高い電力が印加される場合には、電子温度の上昇は見られるが、イオン密度の値は大きく変化しない。

チップ間の電流-電圧特性を取得する間、微粒子は常にチップ間に存在する。また、チップ間の電圧を変えれば、チップを覆うシース厚が変化するが、チップ間に分布する微粒子はほぼ等量に保たれる。これらのことから、その特性は微粒子を含むプラズマから得られるものと判断できる。ただし、微粒子がプラズマに与える影響として、電子のエネルギー分布を大きく変えるようなことがあれば、電流-電圧特性より、イオン密度と電子温度を算出するとき

に注意をする必要がある。この点について、議論の余地が残されている。

4. まとめ

ダブルプローブ法により、イオン密度と電子温度が直接測定されることによる恩恵は大きい。これまで微粒子の電荷ですら、その見積もりではプラズマパラメータを仮定して軌道運動制限理論に頼るばかりであった。プラズマパラメータの測定は、実験で観測される現象とその解釈に用いられる理論や計算とのつながりをより密接にする。このことから、理論の再構築も進む可能性がある。実際、JAXAプロジェクトにおいては、臨界現象の条件を探索する際に、ある程度確からしい実測されたパラメータは役に立った。

微粒子プラズマ研究の醍醐味は、見えるもの(微粒子)と、こと(現象)の面白さにある。その研究の最前線がやっと始められた計測にあると言え、他の分野の方は拍子抜けされることだろうと思う。これについては、波動の伝搬やクーロン結晶の形成など、強い微粒子間相互作用がもたらす現象の視覚的なわかりやすさと微粒子の存在が招く計測の困難が、実験研究者を計測に向かわせなかったためと言いつけるしかない。特にプロセスプラズマの分野と比べれば、微粒子プラズマで行われている計測はまだまだ初歩段階である。他の分野で発達した手法を取り入れ、希ガス放電に微粒子を注入した系にて計測が行われ始めており、今後、微粒子プラズマの素過程の理解がより深まることが期待できる。

また、微粒子プラズマ研究の方向性についても、多くの場で議論がなされている。実験室微粒子プラズマの意義として、物質結晶の成り立ちや惑星環における波動などの理解を挙げるだけでは十分とされない状況がでてきた。この状況は研究者の立場が問われるものであり、ただ単に真理の追究のための研究が拒否されるとしたら混乱するばかりである。しかしながら、すぐに役に立つ研究に重きが置かれる向きを否定することはできない。実験室にある微粒子プラズマを今まさに国内外で進行する計画に合わせることは重要である。例えば、月面には浮遊するダストが存在することが示唆されており、注目されている[18]。月面におけるダストの帯電や浮遊するための電界が生じる機構は明らかではない。直接観測が試みようとする中で、観測結果を予測できる実験室実験は有意義であろう。また、微粒子プラズマを材料として使うことにも本腰が入れられるべきである。クーロン結晶が、THz領域のフォトニック結晶として動作する可能性が報じられてから久しい[19]。さらには、微粒子が排除され続けてきたプロセスプラズマにおいて、微粒子の利用を考慮してもよい時期かもしれない。微粒子の存在により結果的に電子温度が上昇することを利用して、反応性ガスの解離過程を制御することができそうである。この十数年間海外も含めて、微粒子プラズマ研究においては、微小重力環境実験によって大きな進展がもたらされたとも言える。その中で見いだされた、先に挙げたような微粒子プラズマの可能性を広げる時期が、これから

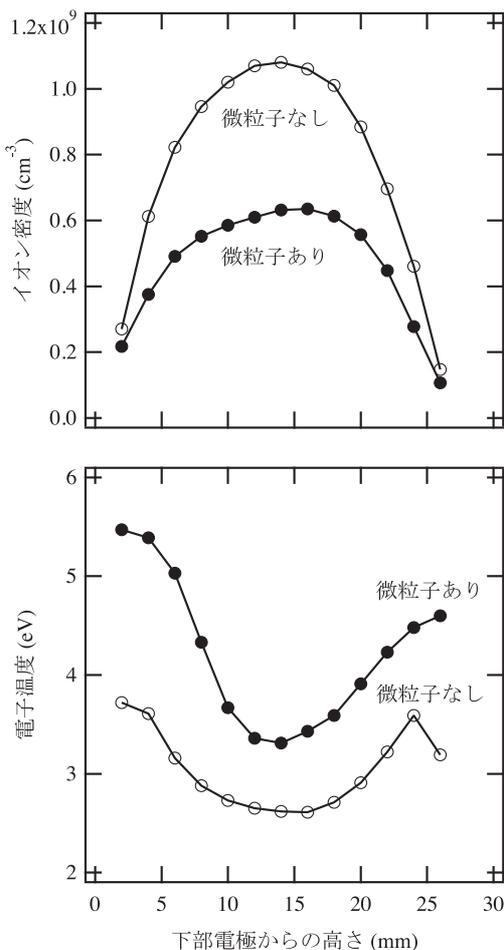


図6 ダブルプローブ法によって測定されたプラズマにおけるイオン密度と電子温度。いずれについても微粒子がプラズマ中に注入されていない場合(微粒子なし)と注入された場合(微粒子あり)が示されている。

であると信じている。

謝 辞

ロシア・ドイツ共同実験プロジェクトのISS ミッションへの参加の機会を下された当時マックスプランク圏外物理研究所のGregor E. Morfill教授，日本の研究者コミュニティの中で絶えずご助言を下された東北大学の佐藤徳芳名誉教授，九州大学の渡辺征夫名誉教授，京都工芸繊維大学の林康明教授に感謝いたします。また計測に関する研究の一部はJSPS 科研費24244094の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] T. Mieno, Jpn. J. Appl. Phys. **42**, L960 (2003).
- [2] T. Mieno *et al.*, J. Appl. Phys. **99**, 104301 (2006).
- [3] A.P. Nefedov *et al.*, New J. Phys. **5**, 33 (2003).
- [4] H.M. Thomas *et al.*, New J. Phys. **10**, 033036 (2008).
- [5] 東辻浩夫：プラズマ・核融合学会誌 **82**, 693 (2006).
- [6] H. Totsuji, J. Phys. A: Math. Theor. **42**, 214022 (2009).
- [7] 東辻浩夫：プラズマ・核融合学会誌 **91**, 514 (2015).
- [8] 高橋和生他：プラズマ・核融合学会誌 **91**, 375 (2015).
- [9] K. Takahashi *et al.*, Int. J. Microgravity Sci. Appl. **32**, 320409 (2015).
- [10] S. Khrapak *et al.*, Phys. Plasmas **10**, 1 (2003).
- [11] V.V. Yaroshenko *et al.*, Phys. Rev. E **69**, 066401 (2004).
- [12] H.M. Mott-Smith *et al.*, Phys. Rev. **28**, 727 (1926).
- [13] K. Takahashi *et al.*, J. Appl. Phys. **110**, 013307 (2011).
- [14] K. Takahashi *et al.*, JAXA Res. Development Rep. **14**, 7 (2015).
- [15] T. Dote, Jpn. J. Appl. Phys. **7**, 964 (1968).
- [16] R.N. Carlile *et al.*, Appl. Phys. Lett. **59**, 1167 (1991).
- [17] R.N. Carlile *et al.*, J. Appl. Phys. **73**, 4785 (1993).
- [18] 千秋博紀：日本マイクログラビティ応用学会誌 **29**, 169 (2012).
- [19] M. Rosenberg, IEEE Trans. Plasma Sci. **34**, 490 (2006).