



小特集 微小重力下の微粒子プラズマ研究—国際宇宙ステーション(ISS)における実験—

5. ISS 実験への参加の経緯

5. Chronological Details of International Collaboration Using PK-3 Plus on Board the ISS

足立 聡

ADACHI Satoshi

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所／総合研究大学院大学物理科学研究科

(原稿受付：2015年4月27日)

ドイツとロシアが開発し、国際宇宙ステーション (ISS) に搭載したダストプラズマ実験装置 PK-3 Plus による微小重力実験は、2006年1月から2013年6月まで実施された。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は、ダストプラズマを使った荷電粒子系の臨界現象に関する研究を PK-3 Plus を用いて実施するべく、日本人研究者の国際研究チームへの参加および研究遂行を支援した。支援開始に先立ち、宇宙環境利用科学委員会において科学評価を実施した。支援はISS科学プロジェクト室のミッションとして実施された。臨界現象に関するモデルに基づいて PK-3 Plus の運転条件を決定し、微小重力実験を国際研究チームとして実施した。なお、微小重力実験は費用がかかり、かつ機会が限られている。そのため、宇宙環境を利用した実験を計画したい方々に向けての手引きを最後に述べる。

Keywords:

complex plasmas, PK-3 Plus, International Space Station, collaboration, microgravity

5.1 はじめに

ダストプラズマは、イオンと電子以外に、微粒子が混在する系である。ところが地上では、微粒子が重いため、プラズマ生成用電極周囲に形成されるシース領域の電場によって微粒子が支えられる。シース領域は電気的中性ではないことから、厳密な意味ではダストプラズマとは呼べない。そのため、微粒子をバルクのプラズマ中に保持できることが期待される微小重力の利用が望まれる。

この観点からの微小重力実験の準備が、ロシアの Institute for High Energy Densities (IHED, 当時)、現 Joint Institute for High Temperatures (JIHT) とドイツの Max-Planck Institute for Extraterrestrial Physics (MPE) が中心となって早い時期から始められた。長時間の微小重力環境を得ることができる国際宇宙ステーション (International Space Station, ISS) を用いたダストプラズマの微小重力実験は、2001年3月に開始された。用いられた装置は PKE-Nefedov [1-3] と呼ばれる。PKE-Nefedov は2005年7月まで運用され、多くの成果を上げた。しかし、粒子が存在しないボイドと呼ばれる領域が装置の中心部に形成された [1, 2]。ボイドの形成は、微小重力を利用することによってバルクプラズマ中に微粒子を保持するとの観点からは、望ましくない現象であった。

ボイド縮小をめざして、新しく開発された装置が PK-3 Plus [4-7] である。PK-3 Plus も MPE と JIHT のジョイントプロジェクトである。PK-3 Plus は2006年1月から実験が開始され、2013年6月に運用が終了した。約7年半もの長き

にわたって運用がなされたことは、特筆すべき信頼性の装置であったと言える。PK-3 Plus の打上げと前後してドイツ代表研究者の Prof. Dr. Dr.h.c. G. E. Morfill 氏が来日し、日本の研究コミュニティに対して PK-3 Plus の利用を呼び掛けた。これに対し、日本のコミュニティは概ね静観との立場であったが、東辻浩夫岡山大学教授 (当時) は、荷電粒子系における臨界現象 [8] の観察を行うために使えるのではないかと考えた。今まで誰も見たことがない荷電粒子径の臨界現象が観察できるならば大変興味深いと考え、PK-3 Plus 国際研究チームへの参加をめざすことにした。

PK-3 Plus 国際研究チームが中心となって、臨界点シンポジウムが2006年5月にフランス・オルレアンで開催された。本シンポジウムにおいて東辻モデル [9] の詳細が初めて国際研究チームに紹介され、国際研究チームは大いに興味をもった。2006年7月には、Morfill 氏から宇宙航空研究開発機構 ISS 科学プロジェクト室長に、東辻モデルに基づいた実験を実施したいので、国際研究チームでの打ち合わせ、実験運用、実験条件検討等に対する支援をお願いしたいとのレターが届いた。これを契機として、宇宙科学研究所本部部長 (当時、現宇宙科学研究所所長) 諮問委員会である宇宙環境利用科学委員会に支援の是非を諮った。2006年11月と12月の2度にわたる科学評価を経て、ISS 科学プロジェクト室 (以下、ISS 室) のミッションとして実施することが適切であると答申された。その結果、2007年1月からミッションが開始された。当初は PK-3 Plus が2～3年で運用を終えると思われたため、ISS 室ミッションは2年

Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagami-hara, KANAGAWA 252-5210, Japan

author's e-mail: adachi.satoshi@jaxa.jp

間の予定で始めた。しかし徐々に PK-3 Plus の運用期間が延長されていき、それに伴い、日本チームが得る微小重力実験が増えることが期待された。そのため、毎年度末に開催される ISS 室ミッション評価においてミッション期間延長を申請し、認められてきた。ISS 室ミッションの期間は、最終的には2014年度末までとなった。現在、最終成果報告書をまとめ、ミッション完了審査を待っている状況である。

以下では、2007年1月から開始された ISS 室ミッションについて説明を行うと共に、今後宇宙環境を利用した実験を計画したい方々に向けての簡単な手引きを述べる。

5.2 PK-3 Plus

前述のとおり、PK-3 Plus は MPE が開発した装置である。開発完了後、ロシア科学アカデミーの JIHT に引き渡された後、ロシア宇宙庁 (ROSCOSMOS) とエネルギー社 (ENERGIA) により、2005年12月ロシアのプログレス補給船を用いて打ち上げられた。位置付けとしてはロシアの装置であり、ロシアのクルータイムリソースを使って運用される。軌道上での PK-3 Plus 運用時の様子を図1に示す。PK-3 Plus の国際研究チームには、MPE, JIHT にそれぞれ1名ずつ代表研究者が置かれ、JIHT が全体を統括する。また、プロジェクトサイエンティストが MPE に置かれている。ドイツ、ロシア以外には、フランス、日本が国際研究チームへの主な参加国である。国際研究チームの全体像を正確に知る立場にはないが、活動的な中心メンバーだけでも20名以上いると推測される。

図2に PK-3 Plus の概観を示す。直径 60 mm の RF 電極が上下に配置され、その電極の周囲に外径 98 mm のグラウンド電位のガードリングが配置されている。電極間距離は 31 mm である。側壁は内部が観察できるよう石英ガラス製である。上下に3個ずつ、合計6個の粒子散布装置（ディスペンサー）が取り付けられている。それぞれのディスペンサーには、直径 1.5, 2.5, 3.4, 6.8, 9.2, 14.9 μm の単分散微粒子が詰められている。RF 発振器の最大出力は 4 W である。主要な観察・計測装置であるビデオカメラは異なる4種類の視野を有しており、それぞれ Glow Camera, Overview Camera, Quadrant View (QV) Camera, High Resolution (HR) Camera と呼ばれる。Glow Camera には粒子からのレーザー散乱光をカットするフィルタを入れてあり、中性ガスの励起光を観察することができる。

実験運用は、年2回程度のミッションと呼ばれる運用期間に実施される。1 ミッション期間内には、1 回90分程度（準備等の時間を除く）の実験が2回程度実施される。実験データは、ハウスキーピングデータおよびビデオデータである。データは実験中のリアルタイムダウンリンクに加え、ビデオデータが記録されたハードディスクは、ソユーズ帰還時に地球に持ち帰られる。

5.3 ISS 科学プロジェクト室ミッション

ISS 科学プロジェクト室における PK-3 Plus ミッションは、2007年1月から2015年3月まで実施された。PK-3 Plus は国際研究チームにより実験が実施されるので、実験提案

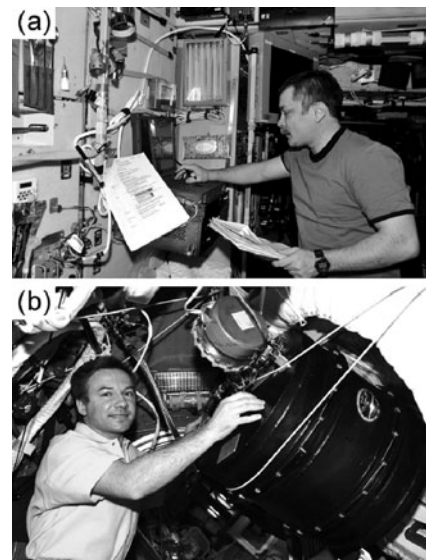


図1 軌道上での PK-3 Plus 運用の様子：(a)制御装置、(b)プラズマチャンバー。（提供：ROSCOSMOS / ENERGIA）

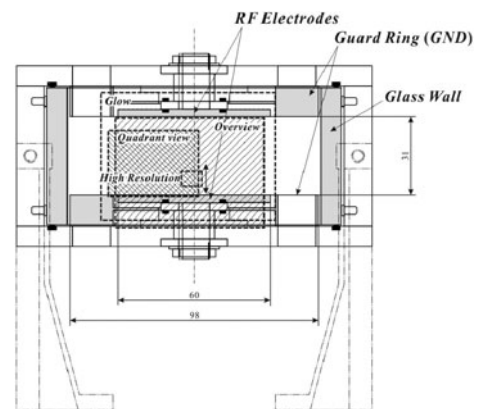


図2 PK-3 Plus 概観図。

はまず国際研究チームに対して行い、興味をもってもらい必要がある。ISS 室ミッション開始後、最初の国際研究チーム会合は2007年5月であった。この場で再度東辻モデルの説明を行った。与えられたタスクとしては、PK-3 Plus の具体的な運転条件を示してほしいとのことであった。PK-3 Plus の制御可能パラメータは、高周波電力、ガス種、ガス圧力、粒子径の4種類である。これらをどのように組み合わせれば希望する密度、温度が達成できるかを予測する必要があった。しかし、軌道上の PK-3 Plus には重量、寸法の制約からか、計測装置がビデオカメラとハウスキーピングのみあり、軌道上での密度、温度を知ることができない。そのため、地上での計測データを援用することとした。用いた装置は、PK-3 Plus のラボモデルと称する地上実験用装置である。このラボモデルは MPE が製作し、日本に貸与されたものである。これにプローブを取り付け、計測が開始された。計測を担当したのは、高橋和生京都工芸繊維大学大学院准教授である。チャンバーの大きさが小さく、かつ密度も低いため、計測は難航した。シングルプローブ、共鳴プローブ、ダブルプローブ等いくつかのプローブ計測を試み、最終的には適切な計測結果を得るに至っている[10]。しかし、2007年時点ではまだ情報が少なく、推測に

基づいて運転条件を決めざるを得なかった。理論からの要請として明確であったことは、大きな粒子径を用いる必要があること、および高密度を得るために大電力が必要なことであった。しかし、PK-3 Plus はボイドの縮小が可能になってはいたものの、それは小粒子径、小電力の場合であり、大粒子径、大電力ではボイドが出現することが分かっていた。そのため、大粒子径、大電力時の様子をまず把握するために、臨界点をめざす日本の提案に基づいた初の実験は、2007年12月に2分間だけ実施された。データは2008年4月に日本に引き渡された。

その後データ解析が進められると共に、理論がさらに発展し[11-13]、2008年7月に新しい提案が行われた。その後すぐに微小重力実験が実施された。この時は22分程度の実験時間を得ることができた。なお、国際研究チーム会合はこの時最も大規模に開催され、マックスプランク財団が所有する城（図3参照）で実施された。データ回収は2009年3月である。ところが、同年5月までに次の実験提案をしてくれとの要請があり、間に合わせるためのデータ解析はかなり大変であった。

同年5月に、今回の運転条件だけでなく、日本側要求を整理し、まとめたものにMPEと協議した。その時点での実験解析結果、中長期的な希望や目標を伝え、次回以降の運転条件の概要を決定した。実験は同年7月に実施され、この時はフルタイムとなる約1時間40分の実験が実施された。この実験から日本側は実験運用に参加した。実験運用はモスクワ近郊のミッションコントロールセンターで行われる。

PK-3 Plus は、地上からのコマンド操作やコマンドシーケンスを走らせるといった通常の機能の他に、ロシア人宇宙飛行士によるマニュアル操作が可能である。コマンドシーケンスの進行を一時停止し、宇宙飛行士がプラズマの状態を調整するといったことはしばしば行われる。このため、実験中は宇宙飛行士がほぼ付きっきりとなる。豊富なクルータイムリソースを有するロシアならではの実験運用と言える。人間による微調整が行われた方が、実験がより確実に望ましい結果を得やすいことはいうまでもない。そして、これこそが本来は有人の最大の利点である。この利点

を活かすようにクルー訓練を行っており、ロシア人宇宙飛行士は単なる作業員、操作員ではないことも特徴的である。クルーが自分の目で見て、より望ましいプラズマを得るために、地上と協議しながら微調整を行う。こういった方式は、クルータイムリソース不足に悩む日本では困難であるが、有人とは一体何かを考えさせられる。

実験実施に先立ち、実験シーケンス確認用の実験装置が組み立てられ、シーケンスが確認される。2009年10月にはこの年2回目となる国際研究チーム会合が開催され、その際に7月実施の実験データも引き渡された。2010年1月には、再び約22分間の微小重力実験機会を得ることができた。データは同年5月に引き渡された。その後も、2010年7月、2011年1月、2012年7月と、合計7回もの微小重力実験機会を得ることに成功した。これほどの豊富な実験機内に恵まれるとは、ミッション開始当初全く予想していなかったことである。臨界点予測のモデルが研究チームの強い興味を惹いた証拠の一つであろう。

本章においては、データ解析の結果等については述べないが、次の6章において述べられる。

5.4 ミッションまとめ

少なくとも1回、できれば2回の微小重力実験機会を得ることをめざして、ISS室ミッションとしてPK-3 Plus 国際協力を実施した。日本の研究チームの努力と、国際研究チームおよびドイツ、ロシアの理解と協力により、当初目標としていた実験回数よりもはるかに多い合計7回もの実験機会を得ることができた。実験では大粒子径、大電力を用いたため、大きなボイドの形成を避けることはできなかった。また大電力と言いつつも、最大で4 W の装置であるので、電力不足であったことは否めない。一方、PK-3 Plus においては、更なる大粒子径、大電力は、ボイドをますます巨大にし、観察可能領域を縮小するだけであり、実験の困難さが増すだけである。したがって、大電力であってもボイドが小さい、あるいは存在しないといった新しい装置が求められる。そのためには、ボイド形成メカニズムの理解がまず必要となる。この点についても、日本の研究チームは研究を進めており、理解が進みつつある。

5.5 微小重力実験実現をめざすには

最後に、微小重力実験を将来めざしたい方々への手引きを少々述べたい。初めにお断りしておくが、以下に述べることはJAXAあるいは宇宙科学研究所 (ISAS) の公式見解ではなく、著者の個人的見解である。したがって、当たっている箇所もあれば外れている箇所もあるであろう。不正確かもしれないが、それでも情報提供しないよりはした方がよいと考えて述べることにする。

現在の微小重力実験では、大きく分けて、JEM「きぼう」を使うか、そうでないかによって、実現方法が異なる。前者の場合、「きぼう」利用公募に応募する必要がある。「きぼう」利用公募では、「きぼう」利用推進委員会が提案書の評価し、実験候補を推薦する。最終決定はJAXA 理事会で行われる。一方後者の場合、実は明確な利用手順は存在



図3 国際研究チーム会合会場。

しなかった。そのため、PK-3 Plus のように他国装置利用においては、他国から JAXA への日本チームの支援要請をトリガとせざるを得なかった。PK-3 Plus に限らず、支援要請等のレターをトリガとして、1 件 1 件都度判断を下してきたのが実情である。利用したい側からすれば、おそらくは大変不便なことであると思う。

ところが、JAXA が研究開発法人へ移行することに伴って、大幅な組織改革が現在進行中である。宇宙環境利用科学委員会の見直しもその一つで、これまでの宇宙環境利用科学委員会は昨年度末をもって廃止となった。本原稿執筆時点では明確なことは決まっていなかったが、新しい形の委員会を立ち上げるべく努力中である。したがって、新委員会の機能を現段階で述べることはできないが、いくつか想定される機能はある。まだ何も決まっていないため、蓋を開けてみると全然違ってはいないかとお叱りを受けることを覚悟の上で、想定される機能の一つを書くと、従来、ワーキンググループ (WG)、リサーチチーム (RT) と呼んできた研究班の全部または一部継承が考えられる。WG とは、Pre-Phase A と呼ばれる作業を実施するための集団であり、Pre-Phase A では、フライト品の元になる機器のうち、キーコンポーネントの試作品を設計、開発するのがメインの仕事となる。このキーコンポーネントを基に、エンジニアリングモデル (EM) と呼ばれるフライト品の試作品を開発し、EM を基にフライト品 (フライトモデル, FM) を作っていく。なお、RT とは、WG への昇格をめざして活動する研究チームのことである。

研究者の基本的行動として、微小重力実験を行い人が最初に取りべき行動は、科研費取得をめざすことであろう。しかし、微小重力実験を行うには、資金規模として科研費だけでは到底賄えないし、段階を踏んで何年もかけてフライト品を作っていく。そのため、WG や RT といった仕組みを用意していた。しかし、WG 活動だけではフライト品を飛ばすには至らない。そこで新たに ISAS が用意した枠組みが、小規模プロジェクトである。小規模プロジェクトには 3 種類の資金枠があり、規模の大きい順に、10 億を超え 100 億以下、1 億を超え 10 億以下、5000 万を超え 1 億以下となっている。いずれも科研費等の外部資金を加えたプロジェクト資金総額である。別の言い方をすれば、外部資金を獲得できない提案は小規模プロジェクトで選定される可能性は極めて小さくなるであろう。

小規模プロジェクトは公募ではあるが、応募できるのは WG あるいはそれに類する研究チームに限られる。理由は、要求される審査対象文書が多数あり、一定の完成度が求められるためである。しかし、研究チームの努力の甲斐あって、小規模プロジェクトに選定されれば、海外装置利用の場合は「きぼう」利用推進委員会とは無関係であるので、いつ実験ができるかは、海外との調整次第となる。この観点からは、従来よりも明確な応募手順が構築されたといえるだろう。

一方、「きぼう」利用の場合は、小規模プロジェクトに選定されたからといって飛ぶことが約束されるわけではなく、「きぼう」利用推進委員会が推薦し、理事会で選定される必要がある。しかし、「きぼう」利用推進委員会の推

薦に際しての方針がこの度変更になったと聞いている。実際にどう変わるかは、新しい公募が発出されるまでわからないが、ISAS と同様に外部資金の獲得状況が重視されるという情報がある。もしそうであれば、科研費を取り、かつ小規模プロジェクトで選定され、微小重力実験実施までの資金をもっている提案が選定されないはずはないと考える。この観点からも、ISAS の小規模プロジェクトを勝ち取ることには意味がある。

以上をまとめると、WG あるいはそれに類する仕組みは現時点で不透明ではあるものの、何らかの形で用意できるように努力している。しばらくは WG 活動でレベルアップを図り、やがて小規模プロジェクトに提案し、選定される。海外装置利用希望の場合は、選定プロセスは以上であり、後は微小重力実験めざして頑張ることになる。一方、「きぼう」利用の場合はさらに「きぼう」利用公募に応募し、選定される必要があるが、小規模プロジェクトに通っている提案が、そうではない提案に比べて格段の強みがあることはいうまでもない。

一方で考えておかななくてはならない点として、2024 年までの ISS 延長問題である。もし、我が国は 2020 年で打ち切ると決まると、実験装置開発に 2～3 年は要することを考えると、残された時間は非常に短い。仮に 2024 年まで延長されることが決まったとしても、小規模プロジェクト選定までに残された時間はせいぜい 4～5 年程度である。したがって、2020 年までに比べると多少緩和されるとはいえ、時間的に厳しいことには変わりない。ところが、他国に目を向けると状況は変わる。例えばロシアでは 2027 年頃に最後のモジュールが取り付けられるとの情報がある。モジュールを取り付けてすぐに破棄するはずはないので、短く見積もっても、2030 年頃まで運用される可能性はあるのではないだろうか。「きぼう」を利用する方が、有人関係の部署の支援を得やすいので、利用する側にとって楽な点があるのは確かである。しかし、万一 2024 年あるいはそれ以前に「きぼう」の運用が終わることになったとしても、それが即ち長時間微小重力利用機会の終焉とは限らないことは強調しておきたい。宇宙計画は頻繁に計画変更がなされ、計画の長期的な信頼性はあまりないことがあるが、必ずしも悲観的になる必要はないと考えている。

参考文献

- [1] G.E. Morfill *et al.*, AIP Conf. Proc. **649**, 91 (2002).
- [2] A.P. Nefedov *et al.*, New J. Phys. **5**, 33.1 (2003).
- [3] V.E. Fortov *et al.*, Phys. Rev. Lett. **90**, 245005 (2003).
- [4] H.M. Thomas *et al.*, New J. Phys. **10**, 033036 (2008).
- [5] H.M. Thomas *et al.*, AIP Conf. Proc. **1041**, 41 (2008).
- [6] P. Hofmann *et al.*, Acta Astronautica **63**, 53 (2008).
- [7] K. Takahashi *et al.*, AIP Conf. Proc. **1041**, 329 (2008).
- [8] H. Totsuji and S. Ichimaru, Prog. Theor. Phys **52**, 42 (1974).
- [9] H. Totsuji, J. Phys. A: Math. Gen. **39**, 4565 (2006).
- [10] K. Takahashi *et al.*, J. Appl. Phys. **110**, 013307 (2011).
- [11] H. Totsuji, Phys. Plasmas **15**, 072111 (2008).
- [12] H. Totsuji, Plasma Fusion Res. **3**, 046 (2008).
- [13] H. Totsuji, J. Phys. A: Math. Theor. **42**, 214022 (2009).