



解説

航空機放物線飛行による微粒子プラズマの微小重力環境実験

Microgravity Experiments of Dusty Plasmas by Aircraft Parabolic Flights

高橋和生¹⁾, 斗内愛美^{1),*}, 井出 朋^{1),**}, 足立 聡²⁾, 東辻浩夫³⁾, 林 康明¹⁾

TAKAHASHI Kazuo¹⁾, TONOUCI Manami^{1),*}, IDE Tomo^{1),**}, ADACHI Satoshi²⁾,

TOTSUJI Hiroo³⁾ and HAYASHI Yasuaki¹⁾

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

(原稿受付: 2015年2月16日)

国際宇宙ステーション (ISS) を使った微粒子プラズマの微小重力環境実験が, ロシアとドイツの共同プロジェクトとして進められている. プラズマにおける微粒子の振る舞いに対する重力の影響は興味深く, 地上では観察されない, もしくは観察が困難な現象が, 微小重力下において数多く確認されている. 日本でも, ISS の日本実験モジュールにおける実験をめざす研究者が, 航空機を用いて独自に微小重力環境実験を実施している. 航空機を使った微小重力環境実験では, ISS の実験にはない重力が変化する中での系の応答が観察され, そのデータからは特有の理解が得られる. これまで, 平行平板型装置とガラス管内に対向電極を配置した装置の2種が使われ, それぞれにおいて, ボイド形成や微粒子の直線配列形成についての観測が行われている. これら二つの現象について, ISS ではなく航空機を用いたために得られた理解を伝えると共に, 航空機実験について技術や実際を紹介する.

Keywords:

dusty plasma, fine particle plasma, complex plasma, Coulomb crystal, microgravity, parabolic flight

1. 微粒子プラズマ (クーロン結晶) と微小重力環境

電子とイオン, 中性ガス粒子, 微粒子が存在する系を微粒子プラズマもしくはダストプラズマと呼んでいる [1]. 実験室では, 圧力が数十 Pa の希ガスに高周波や直流の高電圧が印加されて発生するプラズマに, 粒径が数 μm の微粒子が注入されることが多い. このようなプラズマでは通常, 電子の温度 (数 eV) がイオンの温度 (室温程度もしくは室温より一桁高い程度) に対して圧倒的に高いため, 微粒子は負に帯電する. また, 微粒子の温度については, 数々の議論があるが, ここでは雰囲気である中性ガス粒子との摩擦により, 室温程度であると考え. 図 1 は平行平板型高周波プラズマ中に微粒子が注入された様子を示している. 微粒子にレーザー光を照射し, 散乱光を得ることにより微粒子の分布や挙動を観察する. この図において電極間隔は 30 mm であり, 微粒子は下側電極の上, 4 mm の位置に 7 mm の厚さの分布をもって浮遊していることがわかる.

負に帯電した微粒子はクーロン力を介して相互に作用する. クーロン相互作用のエネルギーが微粒子の熱運動エネルギーを大きく上回るとき, 微粒子が物質結晶中の原子のように整然とした配列をつくる. これをクーロン結晶と呼んでいる (図 2) [2-5]. 物質結晶中の原子と同様, 体心立方や面心立方の構造がみられる. その格子定数は数十から

数百 μm におよび肉眼で容易に観察できる. このことから, 結晶化や相転移など原子集団が起こす物理現象を, クーロン結晶を用いて視覚的に理解しようと多くの研究が進められてきた.

プラズマ (放電空間中) では微粒子に様々な力が働く.

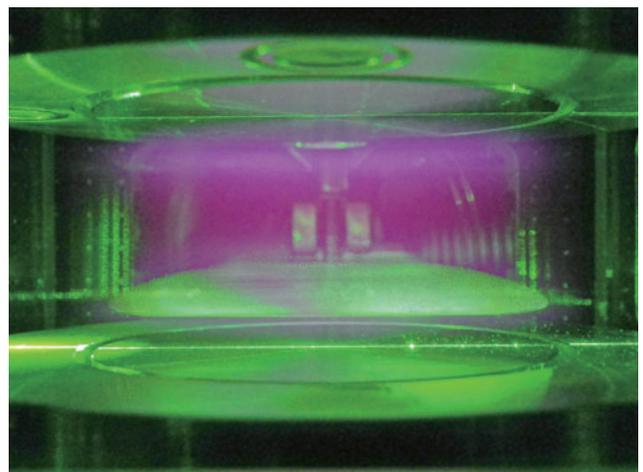


図 1 微粒子プラズマの例. 40 Pa の Ar ガス中で 13.56 MHz, 600 mW の高周波電力が印加され, 2.6 μm のメラミンホルムアルデヒド微粒子が注入されている.

Kyoto Institute of Technology, KYOTO 606-8585, Japan

*2013年3月修了, **2010年3月修了

corresponding author's e-mail: takahash@kit.jp

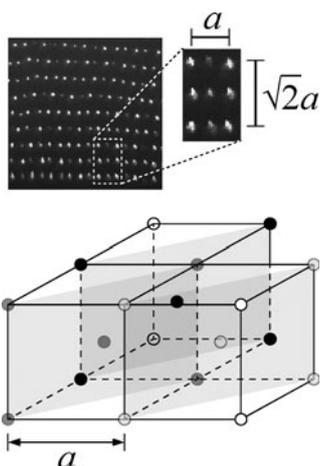


図2 クーロン結晶と体心立方構造の模式図。クーロン結晶の像では、体心立方構造の(110)面が3層重なっている様子がわかり、 $a=209\ \mu\text{m}$ である。

図3は、プラズマ中で微粒子に働く力とその向きを示している。プラズマの中心から外側(電極)へ向かって電位勾配が存在する。その電位勾配(電界)による静電力が働き、負に帯電する微粒子はプラズマの中心側へ引かれる。一方で、電界により電荷が正のイオンはプラズマの外側へ流れる。イオンによる粘性力が働き、これにより微粒子は外側へ引かれる。さらに地上では、重力が働く。どの力もその大きさはpNの程度である。他に、中性ガス粒子による粘性力や熱泳動力等が働くが、微粒子の分布位置を考える多くの場合には、主に静電力和イオン粘性力、重力の3つの力の釣り合いを考えればよい。

地上では図1が示すように、微粒子は重力の作用により下側の電極近傍に分布する。一方で、重力がそれほど他の力に比べて強く作用しない小さい(数百nm以下)微粒子は、上下双方の電極近傍に分布する。この様に、微粒子の分布に対して、重力は大きな影響を及ぼす。筆者らが興味を持つのは、微粒子間のクーロン相互作用が非常に顕著に見られる、すなわち粒径の大きい微粒子が存在する系である。微粒子の相互作用の大きい領域では、結晶が形成されるだけではなく、通常物質では直接的な観察が困難な臨界現象が観察されると予測されている[6]。例えば、気液の臨界点付近では臨界タンパク光を得てその状態を知るのみで、原子や分子の分布の時間的、空間的ゆらぎが直接観察されるわけではない。微粒子の系では、微粒子分布のゆらぎが肉眼で直接観察できることに期待されている。この実証のためには、粒径の大きい微粒子を広い空間に渡って一様に分布させなければならない。したがって、微小重力環境は必要であり、現状では臨界現象を実証するためには実験装置をその環境に置くことが唯一の手段である。

2. 航空機による微小重力環境実験

ボールの投げ上げや斜方投射を例に物理で説明される落下運動を利用して、微小重力環境を得ることができる。主に利用できる設備は、落下塔と航空機である。他の設備もあるが、機会を得ることや装置の制約で利用に困難を伴うものが多い[7]。微小重力環境が得られる時間は、落下塔

で数秒、航空機で20秒程度である。炭坑跡の縦坑を利用し10秒程度の微小重力環境が得られる落下塔もあったが閉鎖されており、現在稼働している落下塔は限られている[8]。落下塔や航空機の利用機会は、日本ではこれまで宇宙航空研究開発機構(JAXA)の宇宙環境利用科学委員会により提供されてきた。同委員会が、微小重力環境科学に興味を持つワーキンググループ(WG)を募り、それに採択されれば必要に応じて審査され、微小重力実験の機会を得ることができた。ただし、現在ではこれも限られたものとなり、新しいテーマを応募して、微小重力実験を実施することは現実的になっていない。そのような状況の中、落下塔と航空機については、研究者個人が委員会を通すのではなく施設へ直接申し込むことでも利用が可能である。研究者がその予算を用意すれば利用でき、実際にこの形態をとる研究者もいる。

航空機による微小重力環境は、放物線を描く飛行(パラボリックフライト)パターンにより与えられる(図4)。機首を45°にして急上昇し、ある時点で航空機の推力を急激に小さくすれば、ちょうどボールをより遠方に到達させようと斜方投射するのと同じ状況になる。航空機は機首方向の加速度を失い、惰性で飛行する。その後しばらく上昇を続け、最高到達点を経て下降に転じる。この間、機上の実験者は重力を感じないのが事実である。航空機の系では重力に対して逆方向の慣性力が働いていると解釈され、慣性力と重力との釣り合いにより、固定されていないものが浮遊するように見える。航空機を運航するダイヤモンドエアサービス株(DAS)によると、このときの加速度は、航空機の前後方向で $1 \times 10^{-2}G$ 、左右方向で $1 \times 10^{-2}G$ 、上下方

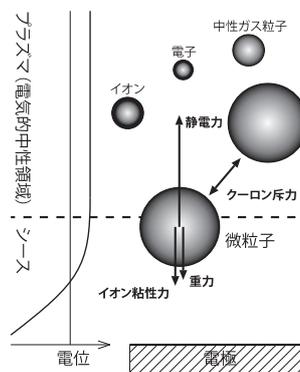


図3 プラズマにおいて微粒子に働く力。

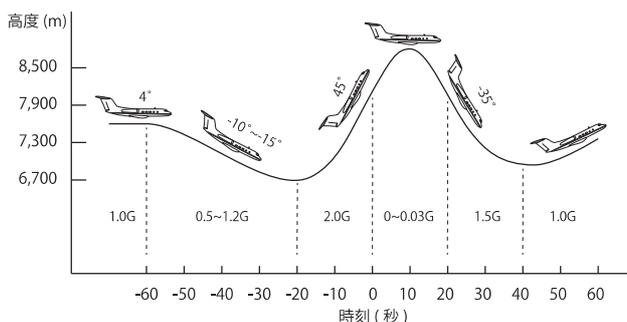


図4 航空機の放物線飛行(パラボリックフライト)パターンと機体の姿勢、ならびに実験者が感じる重力。

向で $1\sim 3\times 10^{-2}G$ であるとされている (1G は地上の重力加速度 9.8 m/s^2 である)。パラボリックフライトにおける加速度の実測値を図5に示す。図では、機体前後方向、翼方向および機体床面に対して垂直方向の座標をそれぞれ x , y および z 軸に対応させている。 z 方向の加速度がほぼ0になる微小重力の状態は20秒程度続いている。 y 方向の加速度はほぼないが、微小重力になる初期の段階では x 方向の加速度が残っている。このため、この段階にはごくわずかであるが機首方向に向かう力が生じる。得られる加速度条件は、飛行地点の風速、雲の様子等により影響を受ける。操縦士がその場での状況を判断し、よりよい微小重力環境が得られるよう最善を尽くしてくれる。正操縦士は計器を見ながら操縦桿を操作し、それに合わせて副操縦士が推力を調節する。双方の操縦士の卓越した技量と呼吸の合った操作なしでは、加速度が小さくまたその揺らぎが少ない、よい微小重力環境は得られない[9,10]。後の章で紹介する結果を欧米で発表すると、それを見た人々は国際宇宙ステーション (ISS) での実験結果と見まがう。それほど DAS が提供する微小重力環境は、世界で群を抜いて素晴らしいものである。

その独特の飛行パターンは、実験者の肉体的および精神的負担を増す。中には苦痛を感じ我慢できなくなる人もいる。微小重力になる前の1分間に、航空機が水平飛行から降下し急上昇するが、体にかかる重力が逐次変化し徐々に増していくのに耐える必要がある。加重力になるとその分体重も増える。特に頭が重たく感じ、首に力が入る。実験装置のコンピュータを操作しようと、ボタンに指をかけて待機していれば、加重力で不意に押ししてしまうこともある。筆者が最初に微小重力の瞬間を迎えたときは、放心にも似た状況で、瞳孔は開き(周囲がまぶしく見える)またそれまでにどこでも感じたことのない感触を得た。遊園地で自由落下を体験する遊具があるが、そこでの感触とも全く異なる。遊具では、そのほとんどの時間で加速度が変化しているのだから、「ふわっ」としたり「ひやっ」と感じて事が終わる。それに対して、パラボリックフライトでは、そんな感覚が得られた後、重量が全く何も感じられない時間が

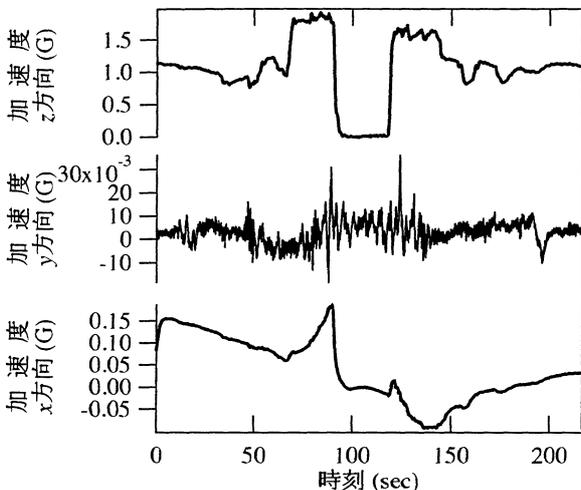


図5 パラボリックフライトにおける機体前後(x)方向、翼(y)方向および機体床面に対して垂直(z)方向の加速度の変化。

訪れる。実験は海上で行われるが、航空機が降下し機首が -35° になるときは、波間に真っ逆さまに進んでいく様子が窓の外を見ているとわかる。

DAS では、三菱式 MU-300 型機とグラマン式 Gulfstream-II (G-II) 機 (図6) の2種類の航空機が用いられ、パラボリックフライトが行われている。1日当たり、1時間程度がパラボリックフライトのために、またその前後1時間程度が実験空域への移動のために割り当てられる。1時間の中で、10~15回パラボリックフライトが繰り返される。どのような場合でも、操縦士が実験者の都合や実験の準備状況に合わせて、その飛行パターンを開始するため、有効な実験データが絶えず得られる。これに対し、欧州宇宙機関 (ESA) が用意する機会では、大型の航空機で多数のチームが相乗りになるため、ある時間間隔で機械的にパラボリックフライトが繰り返される。これに参加する欧州の研究チームは、微小重力実験で得られる実験データの整理に大変苦労するようである。DAS の運行により、日本では非常に恵まれた微小重力実験のための環境が用意されているといえる。

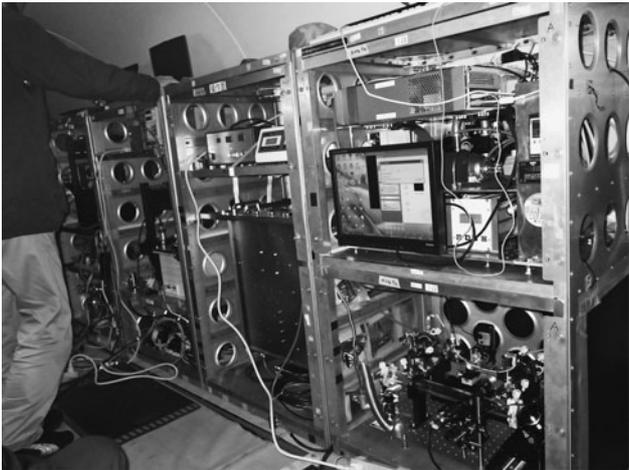
機上では、実験者には肉体的および精神的負担が増すため、実験装置の構築には、操作を簡略化させるなどの工夫が必要である。航空機からは加速度や微小重力信号などの電気信号が得られるため、それらと装置を連動させることができる。また、一般的な AD 変換や画像収録などの機能については、航空機の支援システムで用意されている。交流電源も利用できるため、地上の実験環境をほぼそのまま搭載して、実験を実施することができる。ただし、交流電源については、航空機のインバーター出力によるもののため、接続する機器によっては、その定格が得られるかを飛行前の電磁干渉試験の際に確認する必要がある。その試験は実験および実験装置の稼働が、航空機の安全性に支障が無いことを確認するために、地上で航空機のエンジンが駆動されている状態で必ず行われる。機器類は全てそれぞれの航空機の専用ラックに収められた上で構築される (図7)。航空機からの振動や加重力を加味して、使用できる機器を選択し、堅牢に固定しなければならない。筆者らの実験では、真空排気装置やガラスを含む真空容器については、欧州の研究チームで実績のあるものを用いたため、



図6 G-II を背景にした実験実施時の集合写真。



(a) MU-300 の入り口に見えるのが実験装置ラック (1個)



(b) G-II に搭載された実験装置ラック (2個)

図7 機装された実験装置の様子。

特に問題は発生しなかった。一方で、データ収録やカメラを制御するコンピュータにおいては、航空機の地上滑走中の振動によって、内部のインターフェースボードが脱落し、パラボリックフライト中の加速度の変化によると思われるHDDの故障が起こった。その際には、ボードを取り付ける向きを考えてコンピュータを配置したり、データの書き込みのタイミングを考えてコンピュータを動作させたり、HDDをSSDに置き換えたりするなどの配慮が必要であった。

筆者らは、JAXA宇宙環境利用科学委員会WG活動にて、2007年度に6フライト90回、2010~2012年度に10フライト122回の微小重力環境を得た。初期の頃は、先行する欧州の研究グループから協力を得て、そのグループと同じような結果を得ることで精一杯であった。機会を重ねるに従って、実験に関する独自のノウハウが蓄積され、またそれと機器類の充実とが相まって、有意義な結果が得られるようになった。地上での実験でもそうであるように、人の経験と共に実験も発展していくが、微小重力実験では機会が限られているだけにその発展は緩やかに進行する。いまから振り返ると、その期間は、その緩やかな進行に対しても寛容な、宇宙環境利用を前提とした航空機実験に対する理解が得られたよい時期であった。

3. ボイドの観察

平行平板型の電極を配置する装置において、微粒子の分布が観察された。この装置の真空容器は、2005~2013年にISSにて行われたロシア・ドイツ共同実験プロジェクトにおいてPK-3 plusと呼ばれた装置のものと同一である[11]。微粒子プラズマにおける臨界現象の観察の可能性を検討し、共同実験プロジェクトにて実証を実現するため、日本でも微小重力環境実験を開始した。実験では、装置にArガスを導入して圧力を33Paに保ち、13.56MHz、580mWの高周波電力を印加してプラズマを発生させた。そこへ粒径が2.6 μm の微粒子を注入した。微粒子にレーザー光をシート状にして照射し、CCDカメラによりその散乱光として微粒子の像を得た。ちょうど図1で示すのと同様の状況で、微小重力下での微粒子の振る舞いを観察した。

航空機では、z方向の加速度に対し0.1G以下の値を2秒以上観測すると μG 信号が発せられる。その信号を実験装置において検出した時を基準とし、その前後4秒間の微粒子の振る舞いを図8に示す。-4secの画像では、微粒子は下側電極付近に分布している。加速度が小さくなるにつれ、微粒子は上部へ移動する(-2sec)。 μG 信号を検出したときの画像(0sec)では、微粒子は上部電極近傍にも分布し、その分布の中央には、微粒子の存在しない部分(ボイド)を確認できる。+2secおよび+4secの画像より、ボイドが安定して保持されることがわかる。-2secの画像では微粒子の分布上端中央付近に凹みがある。これはこの部分においては、微粒子がそのまま全体が持ち上がって上部電極近傍へ輸送されるわけではないことを示している。微粒子は上部へ移動すると同時に、ボイドが形成される直前には、分布の外側へ(画像の左側へ)、さらには外側から上

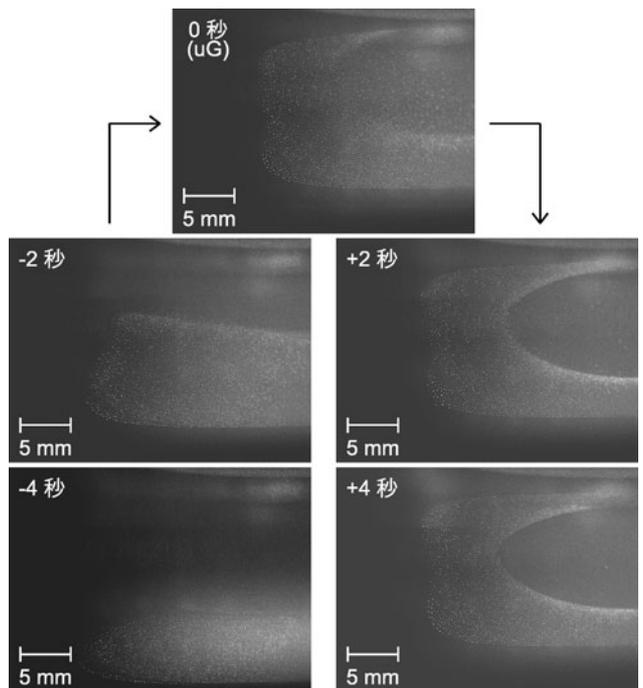


図8 微小重力環境になる前後で微粒子の分布が変化する様子。視野は電極間方向中央にあり、画像の右端はチェンバの中心軸に相当する。

部へ巻き込むように輸送される。この振る舞いから、微粒子がプラズマ中で一様に輸送されてからボイドが形成されるのではなく、微粒子が分布できない場所がありその場を避けて輸送される結果、ボイドが現れると解釈できる。

ボイドの境界にて微粒子に働く力においては、その内側へ向かう静電力と外側へ向かうイオン粘性力が釣り合っていると考えられる。また、このボイドは微粒子分布の観測領域を著しく制限する。微粒子を広い空間に渡って一様に分布させることを目的として微小重力環境を求めたが、ボイドがそのような分布が得られない要因となっている。外側へ働く力が弱く、ボイドが形成されない条件、もしくはプラズマの構造を調べる必要がある。

ここで重要であるのは、ボイドが形成されるとき微粒子の動的振る舞いがわかったことである。ボイドの存在はISSでの実験で確かめられているものの、ボイドが形成されるとき微粒子の動的振る舞いは必ずしも明らかではなかった。航空機実験で見られる微粒子が上部電極近傍にプラズマを外側から巻き込むように移動する様子は、加速度が徐々に変わる系でしか観察されない。ISSの実験ではわからないこの様子が得られたことは非常に重要である。

4. 斥力系における直線配列の観察

2014年10月末にPK-3 plusの次世代となる実験装置PK-4がISSのESAモジュールに輸送された。ISSでの実験は2015年の夏頃までに開始される予定である。筆者らはこのPK-4プロジェクトに実験提案をすることを目的として、日本にて2010年度(2011年3月)に予備実験を開始している。PK-4と同型のガラスチェンバを作製し2011年度(2012年2月)を経て試行錯誤を重ね、2012年度(2013年3月)には日本での航空機実験に最適化された装置PK-4Jを稼働させた(図9)。図では、直径40mm、内径30mm、長さ295mmのガラス管(主管)に対して、その端部付近に枝管を設けたコの字型のチェンバが示されている。また、 x 、 y および z 軸はそれぞれ、機体前後方向、翼方向、機体床面に対して垂直の方向に対応している。双方の枝管には、電極が配置されている。Arガスを導入し、数百V、1kHzの矩形波を、位相を反転させてこれらの電極に印加して、

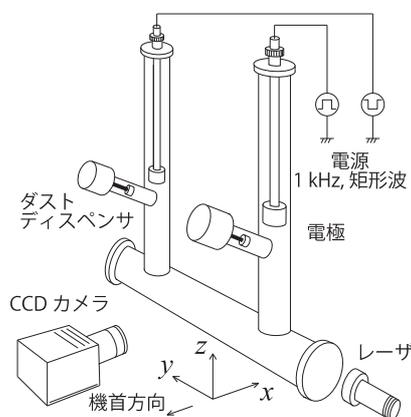


図9 2012年度の航空機実験で使用されたPK-4Jの装置概略図。 x 、 y および z 軸はそれぞれ、機体前後方向、翼方向、機体床面に対して垂直の方向に対応する。

プラズマを発生させる。ここに微粒子を注入し、その振る舞いを観察する。

2011年3月には、PK-4プロジェクトに合わせて実験を行うため、同サイズ(長さが550mm)の主管をもつチェンバにて航空機実験が行われた。当時筆者らの周辺には、計画が開始された直後で十分な機材がなく、それまでのものあり合わせて実験装置を作製した(図10)。またこのときは、主管と枝管のつくる面が機体床面と平行になるようにガラスチェンバを配置した。Arガスを6 sccmで導入して17 Paに保ち、900 Vの電圧を印加してプラズマを発生させた。ここに6.8 μ mの微粒子を注入した。主管の軸方向と垂直になる断面をシート状にしたレーザー光により観察したが、その視野をカメラにて斜め上方から見る形となった。パラボリックフライトでは、機体が加速して z 方向の加速度が2Gになるときに、機体後方への力が作用するため微粒子は主管の軸方向に沿って移動した。さらに、微粒子が枝管にまで達すると電極近傍で放電空間より失われることがわかった。このような状況で、微小重力になる前にカメラの視野から微粒子の像が消えることがしばしばであった。これに対して、パラボリックフライト中でも肉眼で微粒子の位置を追い、また分布を確認しながら、微粒子の移動や消滅に合わせて、微粒子を追加して注入する必要に迫られた。ところが、それでも微粒子の分布が軸方向において一様にはならず、微小重力になる瞬間に微粒子の様子をとらえることは困難であった。パラボリックフライトの回数を重ねて、得られた微粒子の様子を図11に示す。重力下では、微粒子の分布の断面が z 方向に沿って楕円状になっており、またその位置はガラス管の中心軸よりも低いところにある。微小重力になると、微粒子は中心軸周りに分布し、その断面形状は真円である。あらかじめ、計算によりこの分布が予測され、さらには同心円状の微粒子配列まで求められていたが[12]、微粒子配列の詳細を検証するまでの画像は得られなかった。

2012年2月には、パラボリックフライトの重力が変化する最中であっても微粒子の分布が視野から外れないように、観察系のカメラおよびレーザー光の配置を変更した。ま

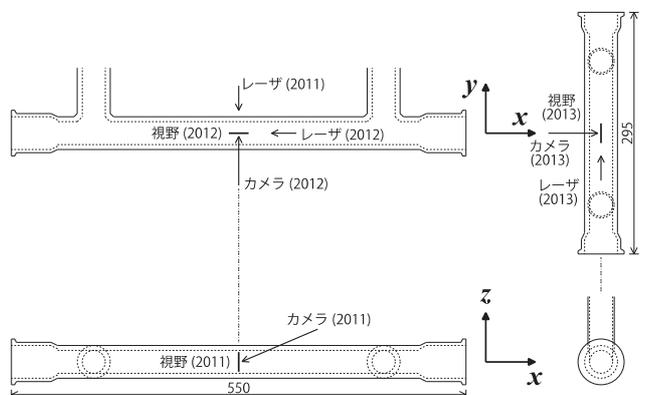


図10 2010年度(2011年3月)、2011年度(2012年2月)および2012年度(2013年3月)に行われた航空機実験に用いられた主管の形状と配置を表す図。カメラおよびレーザーの配置、視野の位置も合わせて示されている。

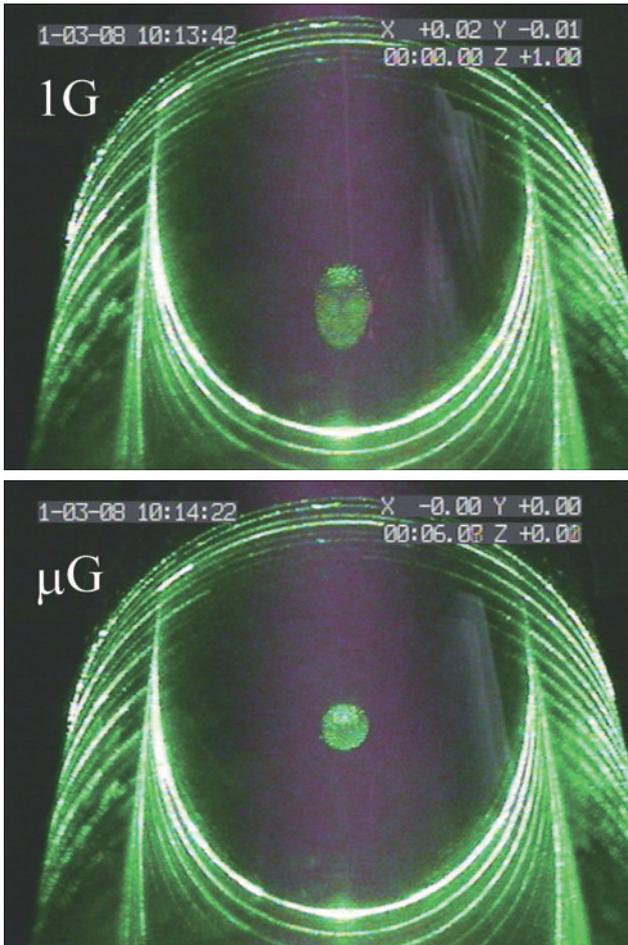


図11 2011年3月の実験で得られた微粒子の様子(上 重力下, 下 微小重力下). ガラス管の斜め上方から, 断面(軸と垂直になる面)を観察している.

た, 高速度カメラ (100 fps) を追加し, これとレーザー光源をモータステージによって翼 (y) 方向に走査させられるようにした (図10). これにより, 微粒子の分布全体にわたって, 微粒子個々の位置 (座標) を記録できることに期待した. Ar ガスを 8 sccm で導入して 40 Pa に保ち, 800 V の電圧を印加してプラズマを発生させた. ここに 2.6 μm の微粒子を注入した. 前年と同様に, 重力下では中心軸から 7 mm 下方 (ガラス管内壁から 8 mm 上方) に位置する微粒子分布が, 微小重力になると中心軸周りに移動することが確認された (図12). さらに, 微小重力下の微粒子分布には, 軸方向に伸びる筋状のものが多数現れることがわかった. このときの微粒子個々の座標を得るために, ステージを走査した. ところが, 走査途中において機体前後方向の加速度が必然的に変化してしまうため, 微粒子が移動し, 画像から座標を抽出するまでには至らなかった. 走査時間は 1 sec 以内であるが, 少なくともその時間内には微粒子は止まっていると仮定されなければ, 画像解析から座標を抽出することは困難である.

その次の2013年3月の実験では, 機体前後方向の加速度の変化による微粒子の移動を避けるために, ガラス管の配置を 90° 回転させた (図9, 10). 航空機のラックの大きさに装置を合わせるため, 主管の長さを短くし (295 mm), 枝管が航空機底面に対して垂直になるようにガラス管を配置

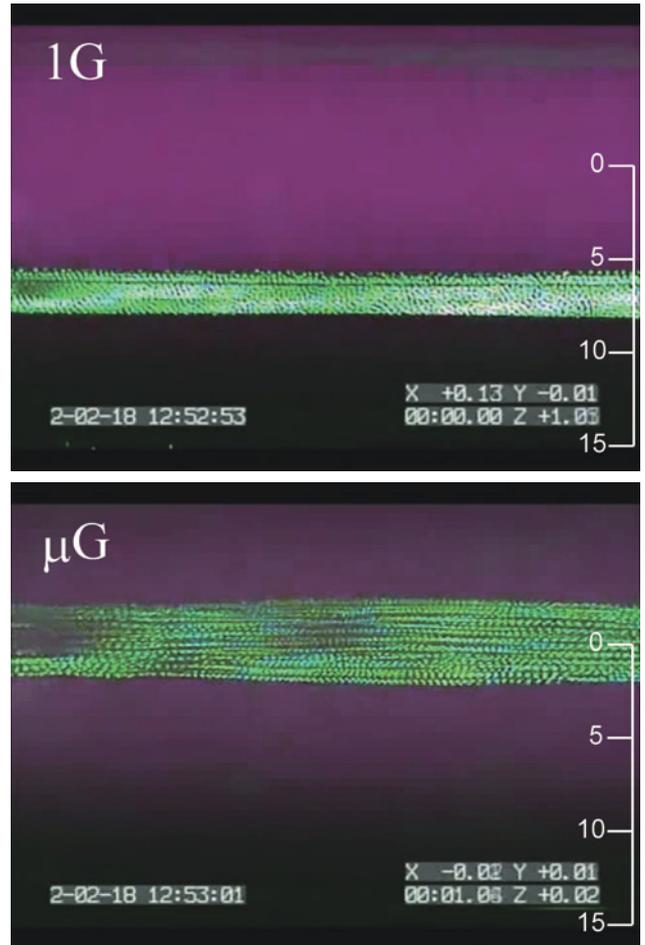


図12 2012年2月の実験で得られた微粒子の様子(上 重力下, 下 微小重力下). ガラス管の真横方向 (軸と垂直になる方向) から観察している.

した. 観察のためのシートレーザー光の厚みを 50 μm とし, これと 200 fps で動作させるカメラを 4.5 mm/sec の速さで機体前後 (x) 方向に走査した. このとき Ar ガスを 4 sccm で導入して 33 Pa に保ち, 700 V の電圧を印加してプラズマを発生させた. また観察対象の微粒子の粒径は 2.6 μm で前年と同じであった. 図13に得られた微粒子配列の座標を示している [13]. 図中 (a) は z-x 平面を示し, ここでの原点はガラス管の中心軸である. 重力下 (水平飛行時) の微粒子配列を下方に, その直後のパラボリックフライトで得られた微小重力下の配列を上方に示している. また, 配列は y 方向の射影として示されている. また y-z 平面では, 配列は x 方向の射影として示されている. 重力下ではガラス管中心から下方 3.5 mm を中央とする分布が形成されている. この分布が微小重力下では, ガラス管中心に移動している. 前年の実験とはガラス管の形状と放電条件が違うため, 重力下での微粒子分布の位置や微小重力に変化したときの移動量は異なる. ただし, 重力が変化するときの微粒子の挙動は全く同じである. 重力下では, 分布の特に下部において, 同心円筒状の構造が見られる. 円筒の中心を適当に仮定し, この最外殻を展開してみる. 図 (b) では, 周 L (図 (a) において矢印 b に沿う) と y を軸とする面に微粒子の配列が表示されている. この微粒子配列は二次元の最密構造である三角格子に相当する. 重力下では三角

格子が多層になって同心円筒構造が形成されると理解できる。一方で、微小重力下の微粒子配列に対して、図(a)中のcで示す領域 $-0.1 \leq x \leq +0.1$, $-2.0 \leq z \leq +2.0$ を抽出し、その座標を y - z 平面において x 方向の射影として示した(図13(c))。ここでは微粒子が y 軸(ガラス管の中心軸)方向に数十個、直線状に数珠つなぎになっている。前年に確認した筋状のものは、このような微粒子の直線配列(直鎖)であることがわかった。この配列は、軸方向の電界に沿って流れるイオン流の作用によるものと考えられる。正の電荷を持つイオンが軸方向に流れながら、負に帯電する微粒子の周りでその軌道を変える。微粒子の背後では、その負電荷によって引きつけられたイオンが集中し、局所的にイオン密度の高い場所(ウェイク)ができる[14]。これが他の微粒子を引き寄せる。この実験では、1 kHz の電圧を電

極に印加しているため、イオン流の向きはそれに合わせて変化しており、ウェイクはイオン流に沿って微粒子の双方向に形成される[15]。

この微粒子の直鎖の形成過程について、改めて2012年の実験結果で確認してみる。図14は、パラボリックフライトで微小重力になる直前、 z 方向の加速度において0.22 Gが観測された時点での画像である。重力が小さくなり、ガラス管中心付近へ移動した微粒子は、直ちに直鎖を形成していることがわかる。このことより、ウェイクによる力は等方的に働くクーロン力よりも強く作用していることが示唆される。また、ウェイクによる力は、ガラス管中心軸付近の局部においてしか作用しないことが理解できる。

5. まとめ

筆者が経験した微粒子プラズマの微小重力実験についてその概要を伝えた。航空機を用いたこのような実験においては、その機会が貴重でありながらも、時間的および金銭的に制約された実験環境の中で実施されている。この点は、地上での実験と全く同じであり、実施してみて装置や構想の不備に気づくこともある。4章で述べた直線配列の観察に至っては、ガラス管における円柱状プラズマの微粒子配列を得ることを目的としながら、装置の改良を重ねつつの実施となり、結果が得られるまでこの程度の地上実験では考えられないほどの長期3ヶ年を要した。地上では数ヶ月で終わるような実験に数年をかけることにその評価は様々にわかれるであろうが、実験を実施する当事者にしてみれば、恵まれた状況であるにせよ、1年あたり2日もしくは4日のフライトで結果を残さねばならないことはかなりの重圧である。ただし、評価を気にせずにいえるのなら、微小重力実験ほど当事者にとって心躍る実験はない。実験実施期間には、3時間のフライトを終えて、その後次の日の実験のために結果をまとめて装置の動作を確認する。最初の頃は、服用する酔い止めの副作用を我慢してのその作業に精一杯であった。肉体的にも高負荷のかかるこの実験で感動的なのは、何を置いても微小重力環境を体験できるこ

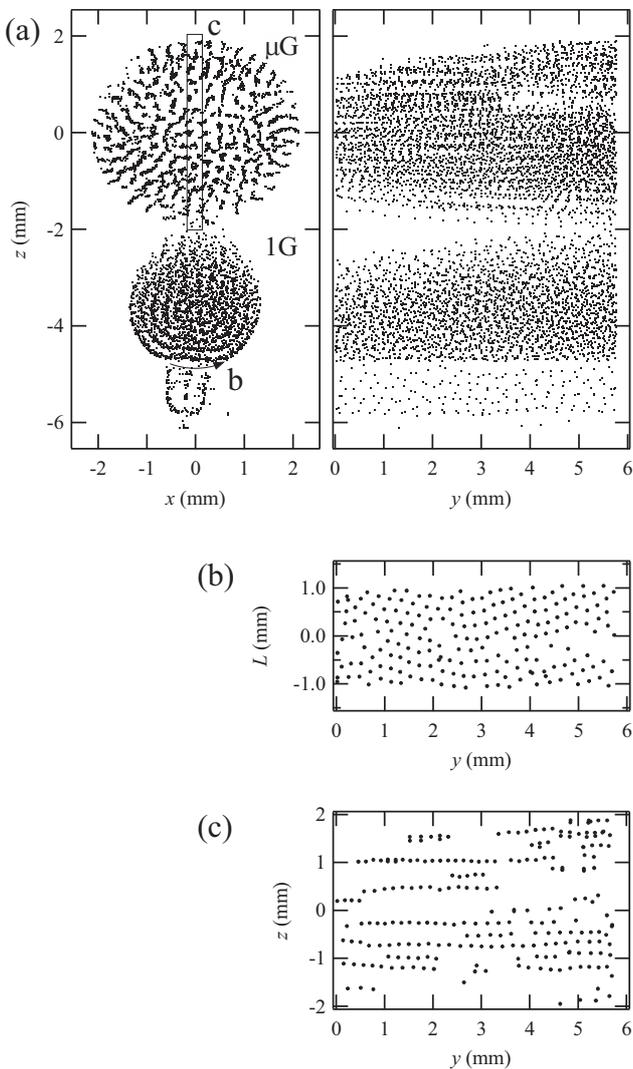


図13 2013年3月の実験で得られた微粒子配列の座標。(a) z - x 平面、原点はガラス管の中心軸に相当する。重力下(水平飛行時)の微粒子配列が下方に、その直後のパラボリックフライトで得られた微小重力下の配列が上方に示されている。また、配列は y 方向の射影として示されている。 y - z 平面、配列は x 方向の射影として示されている。(b)重力下の配列に対して、図(a)中の矢印bに沿う周が示す面を展開した様子。その周を軸として L で表している。(c)微小重力下の配列に対して、図(a)中のcで示す領域を抽出し、 y - z 平面に x 方向の射影として示している。

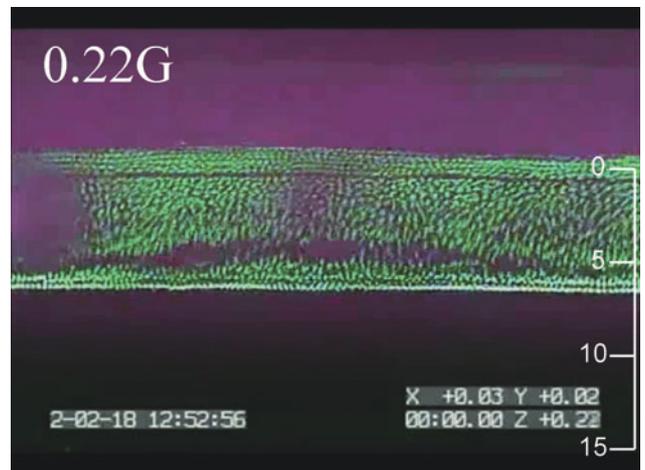


図14 2012年2月の実験において、 z 方向の加速度について2 Gから微小重力になる過程で0.22 Gが観測された時点の微粒子分布の様子。

とである。微小重力環境に身を置いて実験を実施し、その様子と結果をその場で認識できることは本当に興味深いものである。また、日常生活で重力のない状態を想像することは非常に難しい。体験を元に想像を膨らませ、次の実験を考えることはできても、経験のないときに最初の実験の状態を想像することは不可能である。地上でと同じく微小重力下でも実験は当事者の経験と共に発展していく。得られる機会が少ないだけに、実験がたちになるのにも地上よりは年月を要する。

航空機実験で有意義であるのは、微小重力の状態だけでなく、そこへ遷移する状態があること、また航空機の操縦により重力が制御されることである。これは、ISSで行う微小重力実験では実施できない内容である。ボイドや直鎖の形成を理解するにあたり、その形成過程について、重力が徐々に変化する航空機実験であったからこそ明らかになった部分がある。このことから微小重力科学に限らず潜在的なものまでを含めると、航空機を利用して利点が得られる実験は多岐にわたると思われる。

微小重力実験は貴重であるが故に、その結果について周到な理論的予測が求められる。それが実験機会を得るための評価に直結している。ところが、微小重力環境のものも含め実験には、実施してみないとわからない部分、結果がある。微粒子の直鎖の形成については、まさにそのようなもので、現象を理解するのに重力項を除いただけでは不十分である。ある程度寛容な姿勢で判断され、用意される航空機実験でなければ、有益な科学的知見が得られる機会も失うことがあるかもしれない。

筆者らは、微粒子プラズマの微小重力実験に興味を持ち、その機会を日本で開拓するために、ドイツとロシアのグループの先行研究を常に後追いしてきた。先例を学び、そのグループからの協力を得て、将来的には独自の実験を実施したいとの思いであった。航空機実験の経験を重ねてきたことをふまえて、現時点では、ESAが行うPK-4に対して日本独自のアイデアを提案できるまでに至っている。また、臨界現象の実証をめざして、粒径の大きい微粒子をボイド無しで分布させるための研究を進めている。その様な状況で、宇宙環境利用に対する評価が厳しいものになり、ISSの維持についてその先行きが見通せない中、この実験の意義が問われることは多い。それでも微粒子プラズマの重要性を強調したい。見えない原子や分子、イオン、電子が集まるプラズマの中で視覚的に認識できる微粒子が教えてくれることには、それ自身の振る舞いだけでなく、プラズマの本質が含まれる。視覚が直感に変わり理解が進む物理現象は臨界現象だけではないはずである。また、同様の系であると思われる星間塵の挙動や分布の理解は、惑星の形成だけではなく、我々が住む地球の成り立ちや生命の存在をも考えるものになる。星間塵そのものを直接観測することは重要であるが、身近にあるものにてそれを考える手段を得ておくことは必要である。実験室のプラズマにおける微粒子の理解を是非とも宇宙分野を含む他の基礎物

理への発展へとつなげたい。宇宙空間を意識するのであれば、これまでの実験の方向性とは異なる希薄プラズマ中の微粒子の振る舞いに興味を惹かれるところではある。また、微小重力環境におけるプラズマプロセス[16]やプラズマ中の微粒子を工学的応用に向けることも忘れてはいない。気相中の配列を眺めるだけでなく、微粒子を表面へと輸送してそこで配列をつくることも実施している[17]。現在の半導体プロセスにおける加工精度は、かつてそこで微粒子を問題にしていた頃よりもはるかに微細になり、扱う微粒子のサイズとは比べようもない。ところが、その中にもそのサイズの微粒子が意外と使われていることに気がつく。微小重力環境で微粒子を使うためのアイデアが得られるのも、微粒子を前にする実験室でのことである。実験を継続させ、日本独自の微小重力環境実験の機会が得られるよう、今後も準備を進めていきたい。

謝 辞

日本でこの活動の元になったロシア・ドイツ共同実験プロジェクトへの参加の機会をくださった当時マックスプランク圏外物理研究所のGregor E. Morfill教授、日本でPK-3 plus チェンバを稼働させるために協力をしてくださった研究者のHubertus M. Thomas氏、Klaus R. Sütterlin氏、Uwe Konopka氏、技術者のHermann Rothermel氏、Tanja Hagl氏に感謝いたします。有意義な実験となったのは、航空機実験を実施するにあたり多くの助言を下されたDASの操縦士 景山太郎氏、北原龍一氏、技術部 福島玄三氏、土居陽浩氏、松崎雅人氏、他皆様のご協力の賜です。地上も含めて全ての実験は、JAXA 宇宙環境利用科学委員会のWG活動によるものです。

参 考 文 献

- [1] 横田俊昭：プラズマ・核融合学会誌 69, 6 (1993).
- [2] Y. Hayashi and K. Tachibana, Jpn. J. Appl. Phys. Part 2 33, L804 (1994).
- [3] H. Thomas *et al.*, Phys. Rev. Lett. 73, 652 (1994).
- [4] J. H. Chu and Lin I, Phys. Rev. Lett. 72, 4009 (1994).
- [5] A. Melzer *et al.*, Phys. Lett. A 191, 301 (1994).
- [6] 東辻浩夫：プラズマ・核融合学会誌 82, 693 (2006).
- [7] 木暮和美：プラズマ・核融合学会誌 83, 161 (2007).
- [8] 藤田 修：Int. J. Microgravity Sci. Appl. 31, 158 (2014).
- [9] 景山太郎：Int. J. Microgravity Sci. Appl. 31, 45 (2014).
- [10] 景山太郎：日本マイクログラビティ応用学会誌 23, 191 (2006).
- [11] H. M. Thomas *et al.*, New J. Phys. 10, 033036 (2008).
- [12] H. Totsuji and C. Totsuji, Phys. Rev. E 84, 015401(R) (2011).
- [13] K. Takahashi *et al.*, Int. J. Microgravity Sci. Appl. 31, 62 (2014).
- [14] K. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. E 58, 7805 (1998).
- [15] A. Ivlev *et al.*, Phys. Rev. Lett. 100, 095003 (2008).
- [16] 三重野哲：プラズマ・核融合学会誌 83, 129 (2007).
- [17] K. Takahashi *et al.*, Europhys. Conf. Abstracts 36, O3.305 (2012).



たか はし かず お
高橋 和生

1998年京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科博士前期課程電子情報工学専攻修了。2001年京都大学大学院工学研究科博士後期課程電子物性工学専攻修了。同年京都大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻助手、マックスプランク圏外物理研究所客員研究員を経て、2006年より京都工芸繊維大学電子システム工学部門（2015年改組電気電子工学系）准教授。2015年オルレアン大学客員教授。プラズマプロセス、微粒子プラズマに関する研究に従事。経験した航空機実験のパラボラはMU-300にて90回、G-IIにて73回。



い で とも
井出 朋

2010年京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科博士前期課程電子システム工学専攻修了。三菱電機姫路製作所勤務。経験した航空機実験のパラボラはMU-300にて45回。



とう つじ ひろ お
東辻 浩夫

岡山大学名誉教授、理博、プラズマ物理等理論・数値実験。東大助手、岡大助教授・教授、JAXA 嘱託を経た。銀河の相関以来、相関が研究のキーワードの一つ。BITNET時代にREVTeXに接し数式のある文が趣味に近く、半導体工学の教科書も書いたが、論文では懐が寒くなることもある。



との うち まな み
斗内 愛美

2013年京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科博士前期課程電子システム工学専攻修了。日本電産株式会社勤務。経験した航空機実験のパラボラはMU-300にて34回、G-IIにて73回。最近の幸せは、おいしいケーキと紅茶、赤ワインを飲むこと。



あ だち さとし
足立 聡

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所・学際科学研究系准教授。工学博士。現在の専門分野は、ダストプラズマと結晶成長機構。民間企業から旧宇宙開発事業団への出向を経験した後、2005年12月から現職。民間企業時代から一貫して宇宙環境利用実験に携わってきました。現在はクーロン結晶の形成・維持機構やパワーバランス・パーティクルバランス等に興味があります。最近の趣味は、女もすなる料理といふものを男もしてみむとてするなり。



はやし やす あき
林 康明

京都工芸繊維大学電気電子工学系教授。主な研究分野はプラズマ科学。最近の研究テーマは、プラズマを利用したナノ材料の合成と制御、微粒子プラズマの物理、プラズマ(プロセス)の偏光利用計測・制御など。学内プロジェクト「プラズマ制御科学研究センター」を一昨年より組織し、国内外の研究者との交流・共同研究・情報交換を行っています。