

これまで行ったスペースプラズマの研究と今後の期待 宇宙科学研究所 佐々木進

1. はじめに

宇宙研のスペースプラズマ共同利用の歴史は長く、開始されてからすでに43年が経過している。母体の宇宙研の組織はこの間に2回変わり実験設備も駒場から相模原に移設されたが、関係者の努力により節目毎に設備の拡充が図られ、共同利用による研究で得られる科学成果も確実に大きくなってきた。本稿ではスペースプラズマの共同利用の歴史をふり返るとともに、同設備を用いた筆者自身の研究について述べる。

2. スペースプラズマ共同利用の歴史

図1に現在に至るまでのスペースプラズマ共同利用の経緯を示す。1965年から4年間にわたり駒場の東京大学宇宙航空研究所で、大型スペースチェンバー及びプラズマ実験設備が整備され、1969年からこれらの設備を用いた大学共同利用が始まった。宇宙科学研究所に組織替えとなった後、1985年からは2年かけて駒場から相模原への設備の移設が行われると同時に、大型スペースチェンバーについては大型化と高性能化が図られ、プラズマ実験設備については超高速衝突実験設備（レールガン等）が新規に整備された。その後今日に至るまで両設備とも継続的に維持と更新、改良がなされてきた。プラズマ実験設備は相模原移転後、超高速衝突実験装置が中心的な役割を果たすようになり、JAXA統合後は新式の二段式軽ガス銃が導入された。

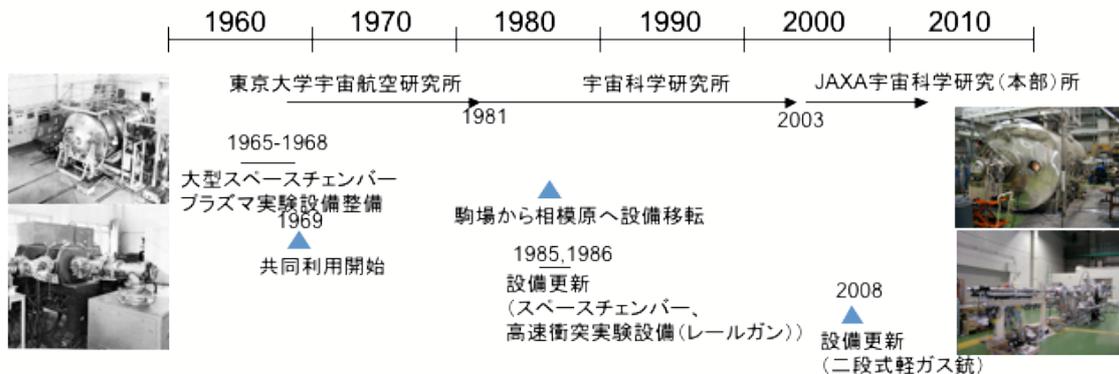


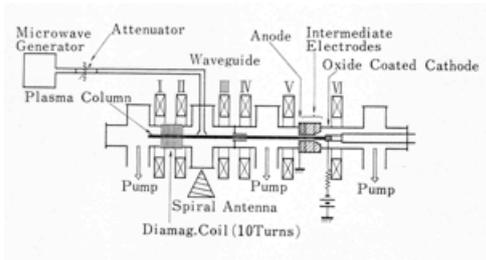
図1 スペースプラズマ共同利用の歴史

3. スペースプラズマ共同利用設備を用いた研究

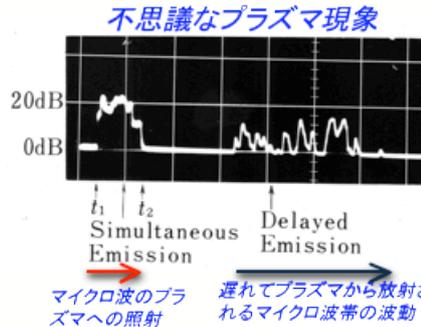
筆者は1971年頃から本設備を用いた研究を行ってきた。以下にその主要なものを示す。

3.1 マイクロ波とプラズマとの相互作用の研究

高密度定常プラズマ発生装置（TPD装置、図2左パネル）で生成された磁化プラズマに高出力マイクロ波パルス照射すると、マイクロ波パルス照射中だけでなくマイクロ波照射後にも、プラズマから規則正しい周波数スペクトルを持つマイクロ波が放射されること（図2右上パネル）を見いだした。この放射現象を **Delayed Emission** と名付け、その発生原因を調べた。原因解明までにはかなりの時間を費やしたが、この現象は、マイクロ波が非線形相互作用（**Parametric Decay Instability**）によりプラズマ中に静電波を励起し、静電波が電子を加熱し、加熱された電子がミラー磁場に捕捉され、やがて時間の経過とともに捕捉電子の静電不安定性によりマイクロ波帯の電磁波がプラズマから放射されるという全体像が得られた。この現象は宇宙空間プラズマ環境での波動・粒子相互作用においても重要な役割を果たすことがわかった。



高密度プラズマ発生装置



マイクロ波のプラズマへの照射
遅れてプラズマから放射されるマイクロ波帯の波動

プラズマによるマイクロ波エネルギーの吸収(パラメトリック不安定性)による静電波の励起
→ 静電波による電子加熱
→ ミラー場による電子の捕捉
→ 静電不安定性によるサイクロトロン波の励起

図2 Delayed Emissionの研究に用いた装置(左パネル)と研究結果(右パネル)

3. 2 宇宙実験のための実験室プラズマ実験

1970年代から1980年代にかけて、宇宙空間を壁のない壮大なプラズマ実験室として利用しようとする研究が世界的にも盛んに行われた。日米共同で計画され電子ビームによる人工オーロラの生成を目指した“粒子ビームを用いた宇宙科学実験 (SEPAC : Space Experiment with Particle Accelerators)”はその代表的な例である。この実験の大きな課題の一つは、図3に示すように宇宙空間でスペースシャトルから電子ビーム放射を行う場合、シャトルが正電位に帯電して実質的にビームの放射が不可能にならないかという疑問だった。しかし当時外国で行われていたロケットによる電子ビーム放射実験では実際に人工オーロラの観測に成功していた。これを説明する為のメカニズムとして、当時ガス中を伝搬する電子ビームがプラズマ不安定性により放電を生じるといふビームプラズマ放電現象 (BPD : Beam Plasma Discharge) が提唱されていた。放電により発生する大量の電子が飛行体の正帯電を抑圧すると考えられた。このことを確認するため、高密度プラズマ実験装置を用いて実験を行った。図4左パネルに示す装置を用いて実験したところ、図中央パネルに示すようにガス中で比較的容易にBPDが発生しうることが確認された。実際のスペースシャトルの実験ではオービターは電子ビームのエネルギーに近いキロボルトまで帯電したことが観測された。ただしガスを同時に放射した場合には宇宙空間でもBPDが発生しオービタ

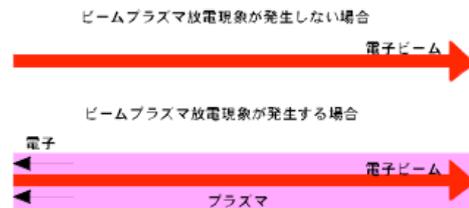
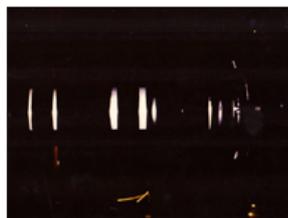
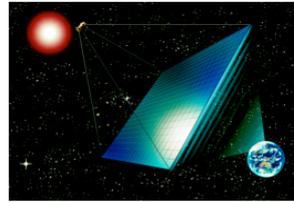


図4 ビームプラズマ放電現象の研究。電子ビームをガス中に放射すると中央パネルに見られるような放電(コイルの隙間から観測された柱状の放電)が発生した。電離プラズマと電子ビームの波動粒子相互作用によりプラズマ電子が加熱され、加熱電子がさらに電離をもたらすことにより放電に至る。

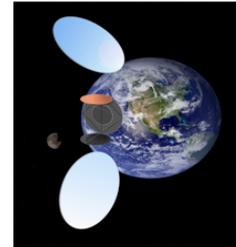
一の帯電が抑圧されることが確認された。

3.3 太陽発電衛星に係わる高電圧放電現象及び超高速衝突現象

筆者はこれまで25年近く太陽発電衛星 (SPS : Solar Power Satellite) の研究を行ってきた。SPS とは軌道上の大型の太陽電池パネルで発電した電力を地上にマイクロ波で送電する宇宙発電所の構想である。現在我が国では図5に示すような概念のSPSの実現を目指した研究が行われている。SPSの



Basic Model



Advanced Model

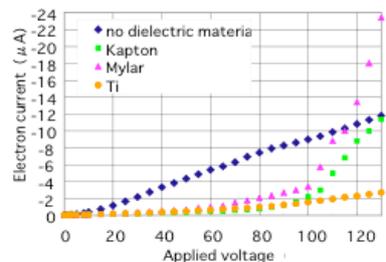
図5 我が国の代表的なSPSの構想。

研究の中でスペースプラズマ共同利用に係わるテーマとして、大電力という観点から宇宙空間プラズマ中での高電圧の振る舞いと放電防止対策の研究、大型構造という観点からスペースデブリなどによる超高速衝突の破壊形態と対策の研究、が必要とされる。

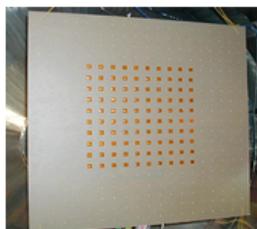
太陽電池に高電圧を使用する場合の放電の特性と防止技術については、図6左パネルに示すような模擬太陽電池アレイを宇宙空間プラズマ環境を模擬した大型スペースチェンバー内に設置して実験を行った。太陽電池アレイの放電現象ではセル間のインターコネクットの電圧露出部の配置、背景絶縁物の材料、温度上昇時のガス放出特性が重要な役割を果たしていることがこれまでに解明され、SPSの太陽電池パネルを設計するために必要なガイドラインが得られている。



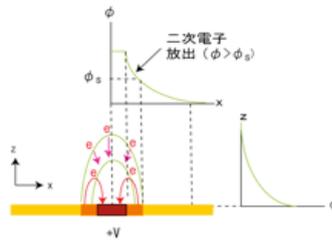
大型スペースチェンバー



電流急増現象の背景絶縁物材料依存



実験に使用した太陽電池模擬パネル



電流急増現象のモデル

図6 宇宙空間プラズマ中での高電圧太陽電池アレイの放電メカニズムを研究するための実験装置 (左パネル)。放電の前駆現象である電流急増現象とその機構を説明するモデル (右パネル)。

また耐デブリの研究については、図7左パネルに示す二段式軽ガス銃とレーザガンを用いて研究を行った。図7右パネルに示すように、薄板構造に高速飛翔体が衝突する時の破壊形態や太陽電池などの電気的機能への影響が調べられた。これにより、破壊を伝搬させないためには、格子状に切れ込みをいれた構造や障子のような栈を持つ構造が有効であることがわかった。また衝突時に発生し面に沿って伝搬するプラズマの特性が明らかになり、高電圧太陽電池が放電を引き起こす可能性のある領域を定量的に予測できるようになった。



二段式軽ガス銃

機械的影響

切れ込み又は障子のような棧を入れれば破断は伝搬しない。

電気的影響

プラズマの沿面伝搬のモデル化と定量的な扱いができた。

図7 超高速衝突実験設備を用いたSPSの耐デブリ研究。デブリ衝突による構造的破壊を最小限にとどめる構造様式と衝突プラズマの発生・伝搬機構を明らかにした。

4. 今後のスペースプラズマ共同利用に対する期待

宇宙科学の研究は、図8に示すように、観測と探査、理論とシミュレーション、実験室実験の3本柱で支えられている。どの柱が欠けてもバランスのとれた宇宙科学研究の進展は望めない。スペースプラズマ共同利用が担っている実験室実験は、宇宙科学研究の重要な柱の一つとして質の高い研究活動を継続する必要がある。

今後とも高いレベルの研究活動を維持発展させていくためには、ハード面からは大学共同利用設備として世界最先端の装置群を具備し続ける必要がある。これは科学衛星の科学機器が世界最先端のものでなければ世界をリードできないのと同じ理由である。一方ソフト面からは、最新の研究課題を機動的に取り込んでいく必要がある。これには、既存分野の研究を深化させるだけでなく、周辺分野との活発な研究交流が不可欠と思われる。例えば、系外惑星環境、生命科学、新材料などの新しい分野の開拓的研究とこれら新しい研究コミュニティとの本格的な交流が望まれる。また、運営形態については、他の大学・研究機関の同種設備との連携運用、周辺装置を用いた滞在型共同研究(数ヶ月～半年)、ユーザー間の成果の共有化、といった新しい試みにも今後積極的に取り組むことが必要となる。

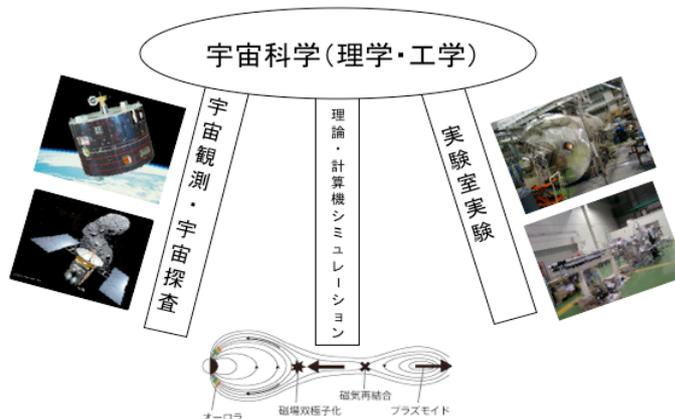


図8 宇宙科学を支える研究の3本柱。スペースプラズマ共同利用が担う実験室実験も柱の1つとして重要な役割を果たすことが期待される。