

「周回衛星による月・惑星起源粒子計測パッケージの開発」の成果の概要について

実施体制	主管実施機関	京都大学	実施期間	令和3年度～ 令和5年度 (3年間)	実施規模	予算総額 (契約額) 128百万円		
	研究代表者名	教授 松岡彩子				1年目	2年目	3年目
	共同参画機関	富山県立大学				41百万円	39百万円	48百万円

背景・全体目標

背景 月・惑星環境や組成の長期間における変遷は、月・惑星起源粒子の宇宙空間への流出を明らかにすることによって初めて理解されるものであり、月・惑星とその大気から飛散する粒子を全球的かつ長期間測定測定することが必要である。粒子の流出には電磁的物理過程が大きな影響を及ぼしているため、中性粒子とそれが電離したイオンだけでなく、磁場、電場の計測が求められる。

目標 月・惑星周回衛星に搭載し電磁場環境及び月・惑星起源粒子を計測する、磁場・電場・中性粒子・イオン計測小型軽量パッケージの開発を行う。

全体概要・主な成果

全体概要 宇宙空間でその場の磁場、電場、中性粒子、イオンを測定する観測器を開発する。将来の小型探査機による月・惑星探査で使用できる、小型軽量かつ高精度の計測器を実現する。基本波型直交フラックスゲート、軽量で高剛性の炭素繊維素材、3回反射型リフレクトロン、3次元イオンドリフト速度測定等、高性能と小型軽量を両立させる独創的な技術開発を行う。製造したモデルは宇宙環境耐性の実証試験を行う。期間終了後、観測ロケットに搭載し飛翔実証を行う。

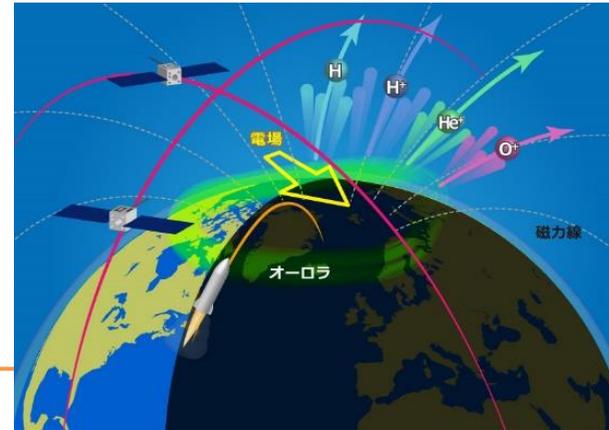
主な成果 開発した磁場・電場・中性粒子・イオン計測パッケージは、性能は維持あるいは向上させつつ、従来よりも小型軽量を実現できた。

磁場：回路をASIC(特定用途向け集積回路)化することによって小型軽量化を実現した。

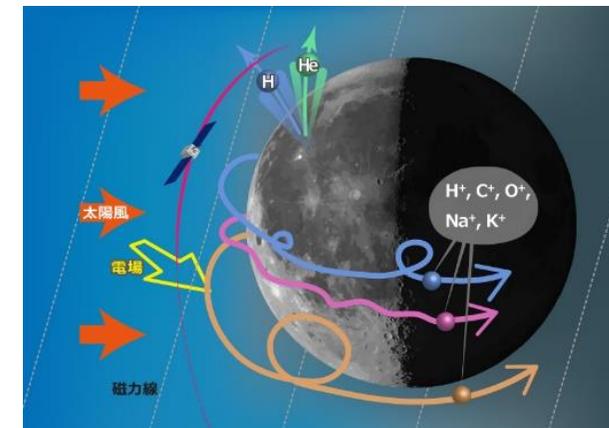
電場：軽量高剛性素材であるCFRP(炭素繊維複合材料)を採用し、超軽量の伸張ブームを実現した。

中性：3回反射型 TOF (Time of Flight)の採用により、軽量でありながら十分な質量分解能を実現した。

イオン：イオンドリフト速度を3次的に30%以内の精度で推定できる見通しが得られた。



大気のある惑星：大気最上層からは中性粒子が流出し、イオン（電離した大気）はより低い高度から電場や磁場の力を受けて流出し、観測ロケットや周回衛星によって観測される。同様の惑星大気起源粒子の流出は、主磁場のない金星や火星でも起きている。



大気のない衛星：太陽風（太陽起源のプラズマ）により、月の表面からは中性粒子やイオンが放出され、太陽風中の磁場や電場の力を受けて宇宙空間に流出し、周回衛星によって観測される。同様の固体起源粒子の流出は、他の衛星や小惑星等でも起きている。

全ての機器について観測ロケット S-310-46 搭載用のフライトモデルを製作、性能を評価した。飛翔環境（機械環境、真空、温度環境）の試験を行い、耐性を持つことを確認した。

①磁場計測器の開発

実施内容

本事業では、小型軽量のセンサに長所を持つ基本波型直交フラックスゲート (FM-0FG) 磁場計測器電子回路部のピックアップ回路部分をASIC (特定用途向け集積回路) 化し、回路部を含むFM-0FG 全体のさらなる小型軽量化を目指した。将来の月・惑星周回衛星への搭載の前の開発段階として、観測ロケット S-310-46 号機による飛翔実証を行うための機器の製作と試験を行った。

ディスクリート回路からASIC回路への置き換え

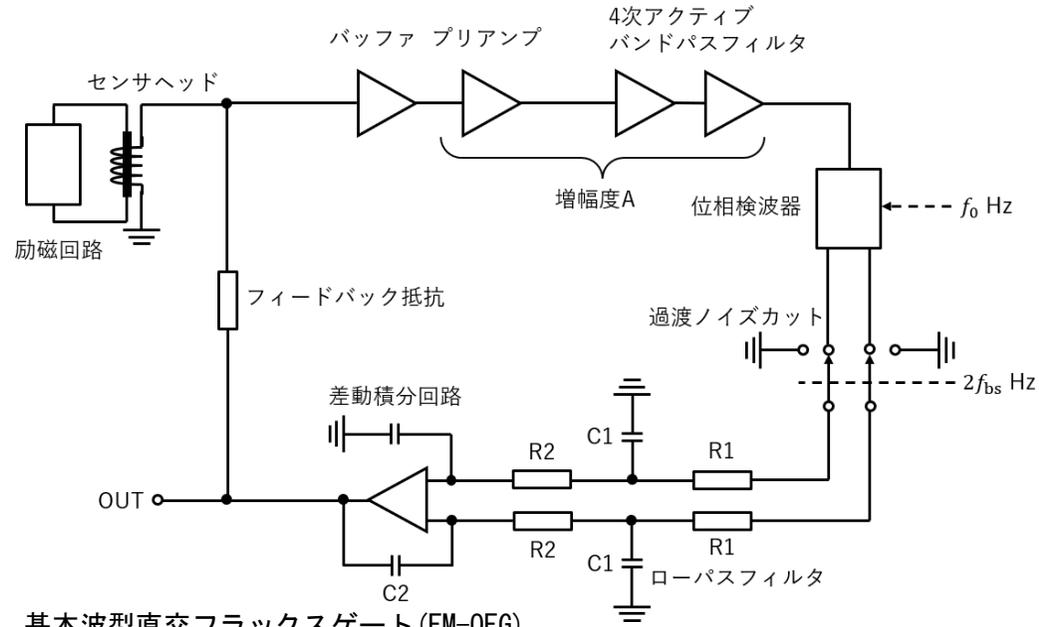
- 集積回路 (ASIC回路) に置き換え後も従来回路と同様 (周波数特性) 性能を持つことをシミュレーションで確認
- アナログ回路の一部を集積回路に置換し、シミュレーションで最適化を図る

ASIC試験回路の試作、評価と改良

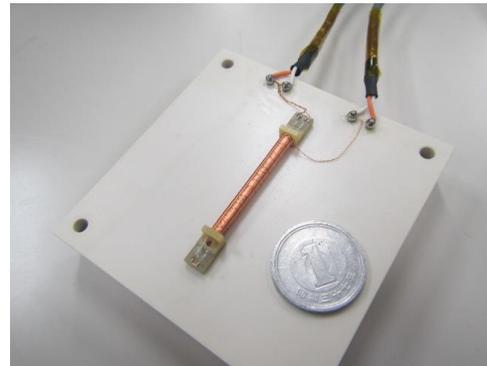
- 基本波型直交フラックスゲート磁場センサのピックアップ信号処理をASICで行う回路の試作を行い、感度やノイズ、周波数特性等の性能を評価
- 段階的にディスクリート部品からASICに置き換えていくことによって改良点を特定

観測ロケットフライトモデルの製作、性能評価と宇宙環境耐性の試験

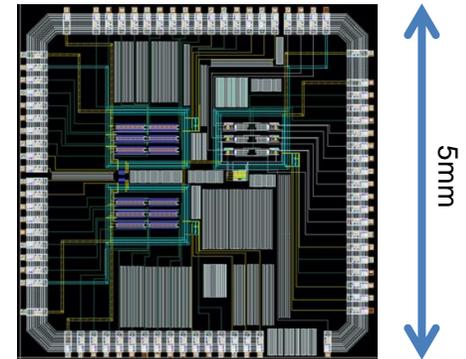
- ASIC試験回路の評価結果をもとに観測ロケット搭載フライトモデル回路およびセンサを製作、詳細性能を評価
- 較正パラメータを取得
- 打ち上げ時の機械環境への耐性を試験
- 宇宙環境への耐性を実証するための温度試験・真空試験を実施



基本波型直交フラックスゲート (FM-0FG) ピックアップ回路のブロック図



1軸の基本波型直交フラックスゲート (FM-0FG) センサ



開発した基本波型直交フラックスゲート用アナログASICレイアウト

①磁場計測器の開発

成果

観測ロケット搭載フライトモデルの製作と試験、評価

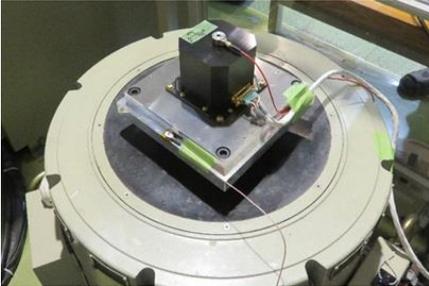
フライトモデルの性能・特性を評価

- ノイズレベル
ASIC回路は、ディスクリート回路と比較してノイズレベルが3倍大きい
ノイズは観測ロケット実験（電離層中の地磁気の観測）を行う上では問題のないレベル
- 周波数特性
100Hz まで安定したゲイン特性を有する
観測ロケット実験としては十分な周波数応答
- 較正試験
JAXA筑波宇宙センターの磁気試験設備および気象庁地磁気観測所（柿岡）
比較較正室において較正試験を実施
ゲインとアライメントを高精度で決定

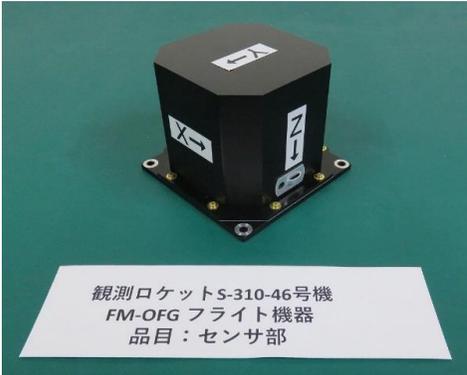
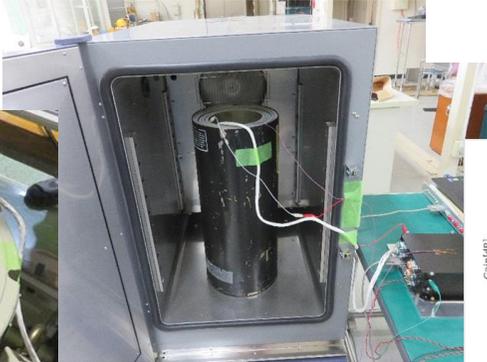
打ち上げ機械環境と宇宙環境への耐性の確認
環境をかける前後で、上記の特性が変化しないことを確認

- 機械環境
振動および衝撃
- 宇宙環境
真空、温度

振動試験
(センサ)



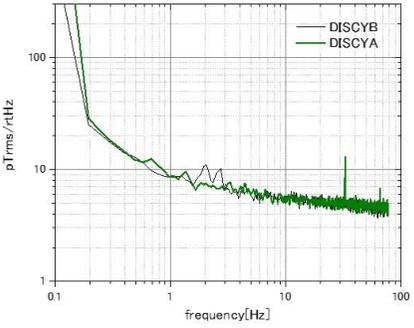
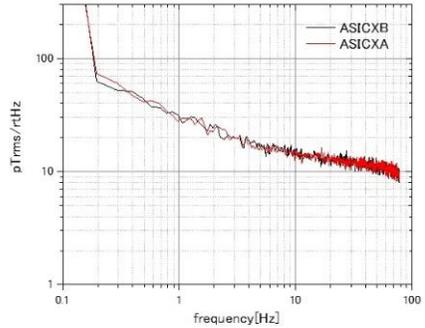
温度試験 (センサ)



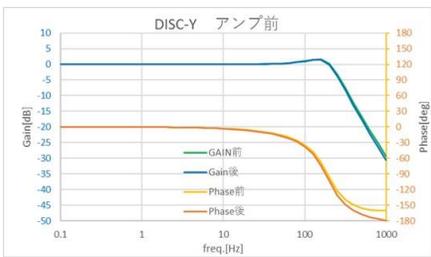
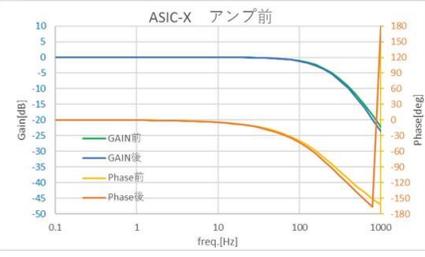
観測ロケットS-310-46号機
FM-OFG フライト機器
品目：センサ部



観測ロケットS-310-46号機
FM-OFG フライト機器
品目：回路部



出力信号のノイズスペクトル (左：ASIC、右：ディスクリート)



磁力計の周波数応答 (左：ASIC、右：ディスクリート)

② 「電場計測器の開発」

実施内容

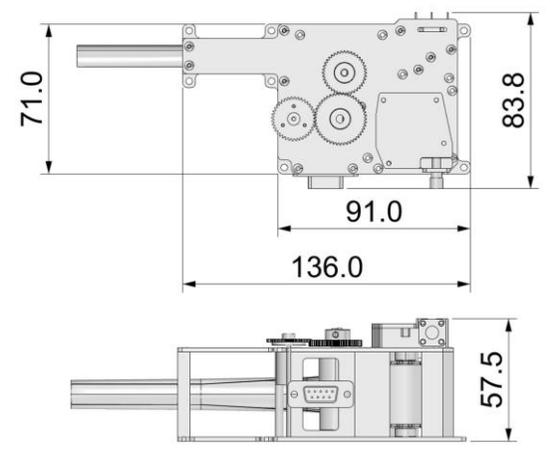
剛性の高い素材を採用し3軸制御衛星への搭載を可能とし、かつ高感度で電場計測する、電場計測用センサの開発を行う。センサで検出した信号の処理は、オーバーサンプリング法を用いてノイズを低減し、また磁場計測との同期サンプルを実現する。



- ・ 電場計測用センサ
稀薄なプラズマ中における高精度電界観測のために3mの電界計測用センサの開発を目標とする。さらに、宇宙環境において飛翔実証すると同時に地球の電離圏を観測し、科学的成果をあげるための観測ロケット搭載用のセンサを製作する。
- ・ 電場計測器のメインエレクトロニクス部
センサで検出された信号を受け取るアナログ信号受信部とFPGAを用いたデジタル信号処理機能を有するデジタル信号処理部で構成された電場計測器のメインエレクトロニクス部を開発する。



観測ロケット搭載用電場計測器のフライトモデルの製作



電場計測用センサ伸展機構部の寸法図

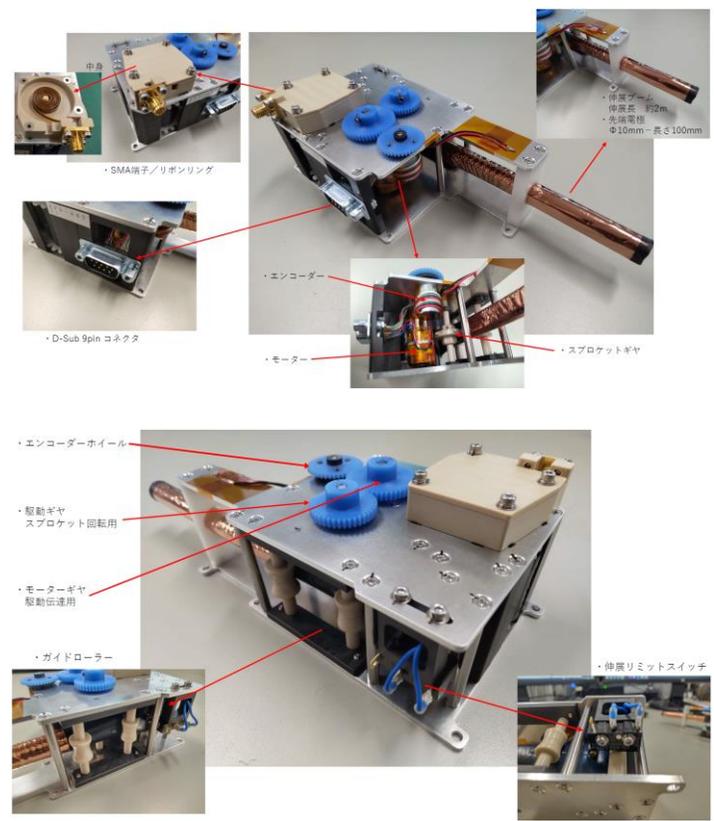


電場計測器のデジタル信号処理部の回路基板

② 「電場計測器の開発」

成果

- 電場計測用センサ**
 高剛性素材であるCFRP (炭素繊維複合材料) 製のセンサブームをモータにより伸展する機構を用いた電場計測用センサのフライトモデルを製作した。センサは今回の観測ロケットの搭載条件の制約に合わせて長さを2mとしたが、3mの長さを持ち衛星に搭載することも可能な設計とした。
- 電場計測器のメインエレクトロニクス部**
 センサで検出した信号処理をデジタル化し、観測ロケットの共通クロック信号であるフレームカウンタ信号に同期した低雑音の電場データを出力することが可能となった。このフレームカウンタ信号は磁場観測データとも同期しており、電場観測と磁場観測の同期サンプルを実現した。

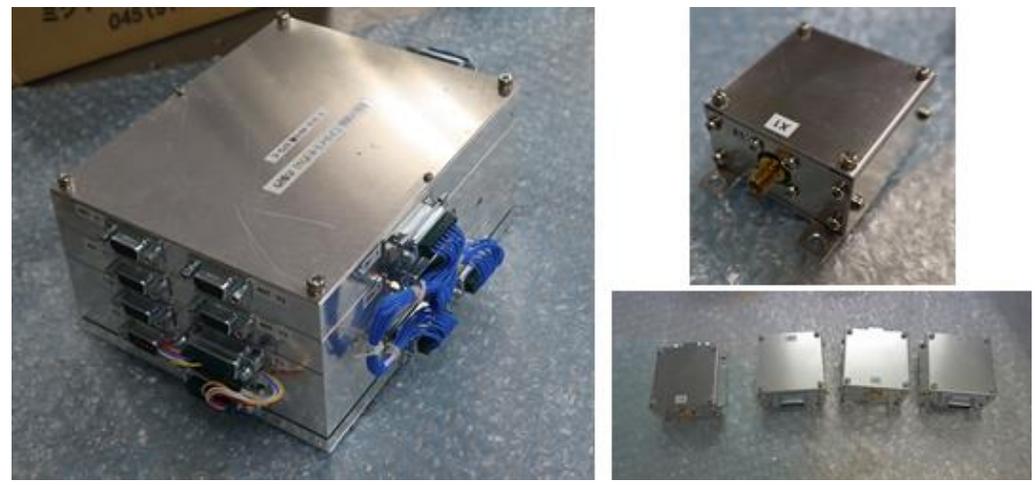


電場計測用センサのフライトモデル詳細説明図



センサおよびメインエレクトロニクスによる単体の真空試験・振動・衝撃試験を実施し、真空環境下において正常に動作すること、振動・衝撃の印加により構造に異常が生じず、機能に問題ないことを確認した。

電場計測器のフライトモデル完成

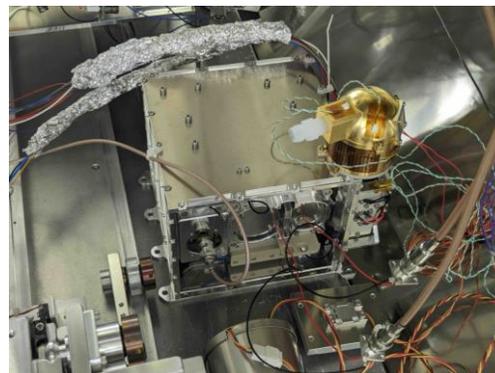


電場計測器のフライトモデル外観図
左：メインエレクトロニクス、右：プリアンプ

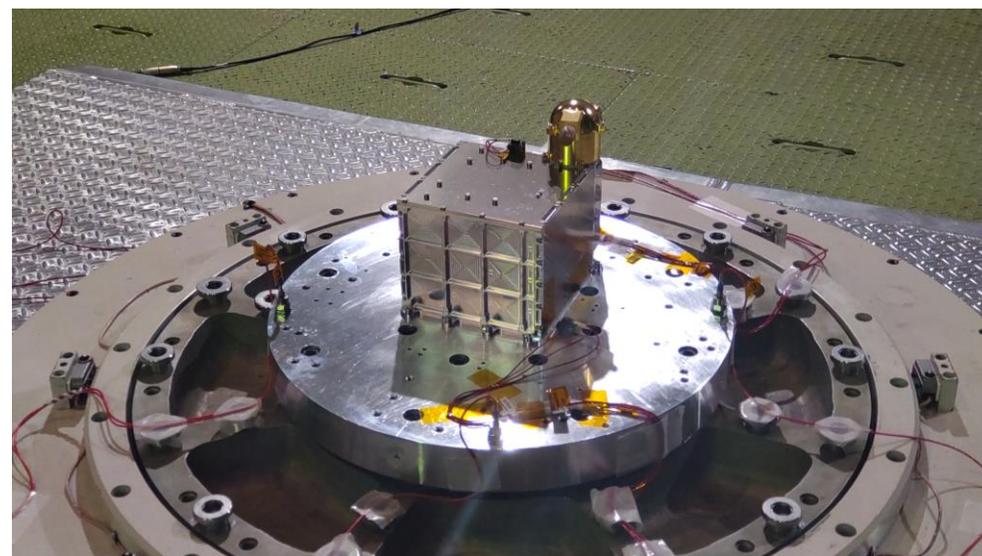
③ 「中性粒子質量分析器の開発」

実施内容

令和3年度と4年度にはパルス高圧電源の設計・製作、イオン源の製作、アナライザーの設計・製作を行った。また、令和5年度には、高圧電源、低圧電源、低圧電子回路を含む電子回路部およびアナライザーの中性粒子取り込み部分の設計・製作を行った。その後、中性粒子質量分析器全体の性能試験を実施した。右上の2つの写真は中性粒子質量分析器全体の性能試験の様子。性能試験においては、真空槽にHe、H₂O、N₂、O₂、Ar、CO₂などのガスを導入して、質量スペクトルの測定を行った。また、中性粒子質量分析器の振動試験、温度サイクル試験を実施し、宇宙環境耐性の試験を完了した。右下の写真はアナライザーの振動試験の様子。



真空チェンバー内に設置したアナライザー(左)と真空チェンバーの近くに設置した電子回路部の写真



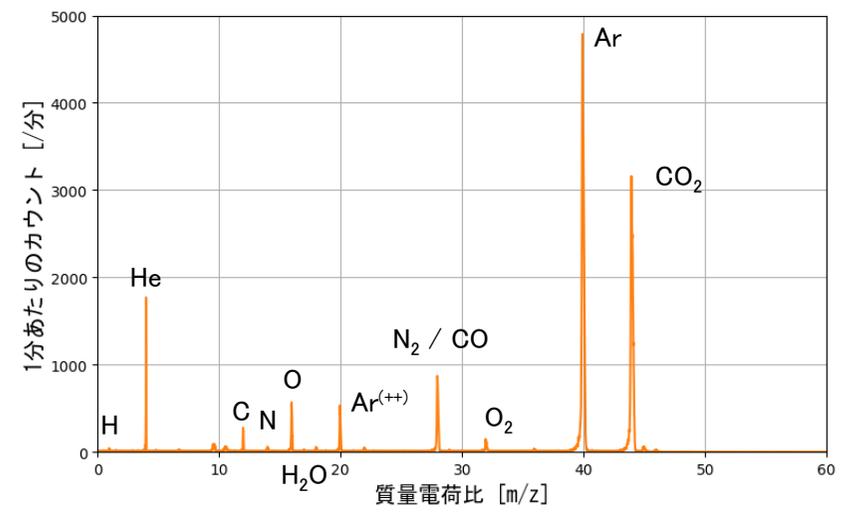
アナライザーの振動試験の写真

③ 「中性粒子質量分析器の開発」

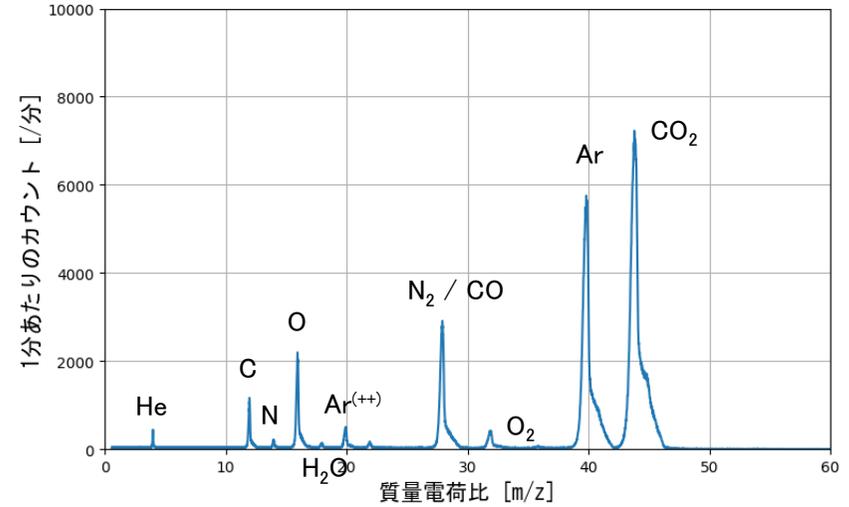
成果

上図は真空槽にアルゴンガス（Arガス）、炭酸ガス（CO₂ガス）、ヘリウムガス（Heガス）を導入して、アナライザーを3回反射モードに設定して取得した質量スペクトル。炭酸ガスなどの分子を計測すると、電子衝撃イオン源でイオン化される際に分子が壊れて、複数の分子あるいは原子に分裂することになるが、CO₂のピークに加えて、COやO、Cなどのピークも見られており、アナライザーが正常に動作していることがわかる。質量分解能 $m/\Delta m$ は、質量数44の二酸化炭素で約280であり、仕様の100を十分に達成できていることが示された。

下図は真空槽にアルゴンガス（Arガス）、炭酸ガス（CO₂ガス）、ヘリウムガス（Heガス）を導入して、アナライザーを1回反射モードに設定して取得した質量スペクトル。質量分解能 $m/\Delta m$ は、質量数44の二酸化炭素で約130であり、仕様の50を十分に達成できていることが示された。



真空チェンバーにArガス、CO₂ガス、Heガスを導入して3回反射モードで計測した質量スペクトル



真空チェンバーにArガス、CO₂ガス、Heガスを導入して1回反射モードで計測した質量スペクトル

④ イオンドリフト速度測定器の開発

実施内容

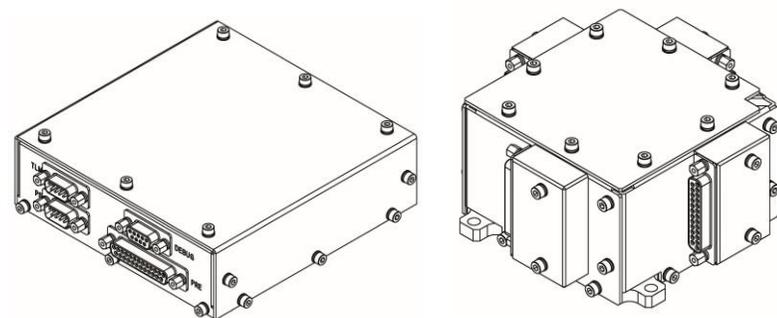
開発と測定精度検証： 観測ロケット搭載用フライトモデルを製作し、真空チェンバー内に電離圏プラズマと同様の環境を生成してデータ取得を実施。イオンドリフト速度・密度・温度について誤差30%以内の精度で推定が可能であることを確認した

環境試験： 観測ロケット搭載時に予想される振動・衝撃・温度・真空環境にて測定器が問題なく動作する事を確認した

測定器の独創性： 従来の電離圏イオン測定器では、イオンドリフト速度を1次元または2次元で測定していたのに対し、本測定器は速度を3次元ベクトルとして推定できることに独創性がある



センサ部



電気回路部

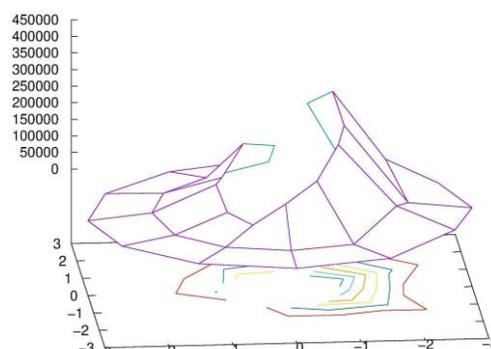
プリアンプ部

④ イオンドリフト速度測定器の開発

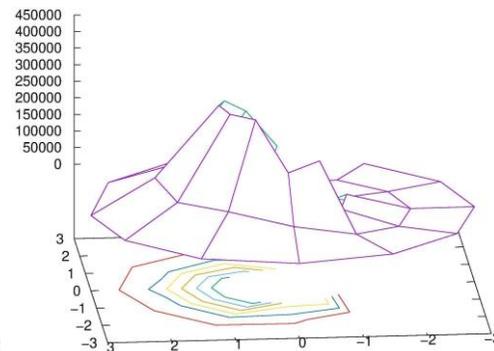
成果

速度推定精度の向上: 従来の測定器ではイオンの入射方向推定に比較的大きな誤差が含まれていたが、開発した測定器では36枚の電流測定用電極を用いるため入射角度推定の信頼性が格段に向上した（下図は電極で得られた電流分布）

測定器の優位性: 他の測定器に比してイオン速度推定に優位性をもつ本測定器は、中性粒子の運動や電磁場により影響を受ける電離圏下部でのイオンドリフト速度の観測に特に効果的で定量的議論に耐え得るデータを取得できる



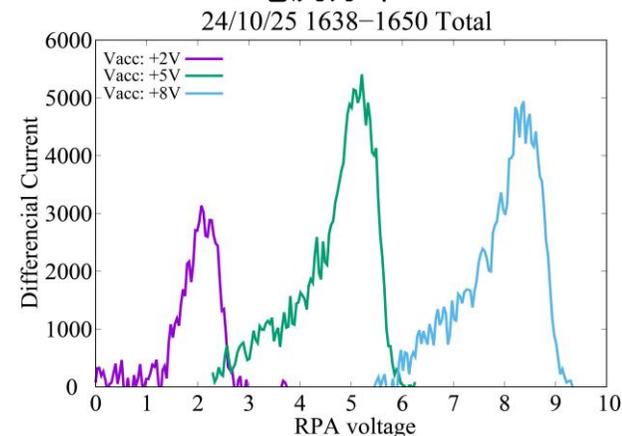
左30度からの入射の場合の電流分布



右30度からの入射の場合の電流分布

人材育成: 測定器開発に大学院生3名が参加、設計、製作、各種試験の各過程において重要な役割を果たした。参加を通して培った技術は今後の貴重な糧となる

イオンソース開発: 国内に存在しない測定器校正のための低エネルギーイオンソースを新規に開発した。本イオンソースは電離圏プラズマ環境を模擬した室内実験にも有効で今後広範な研究分野への応用が期待できる



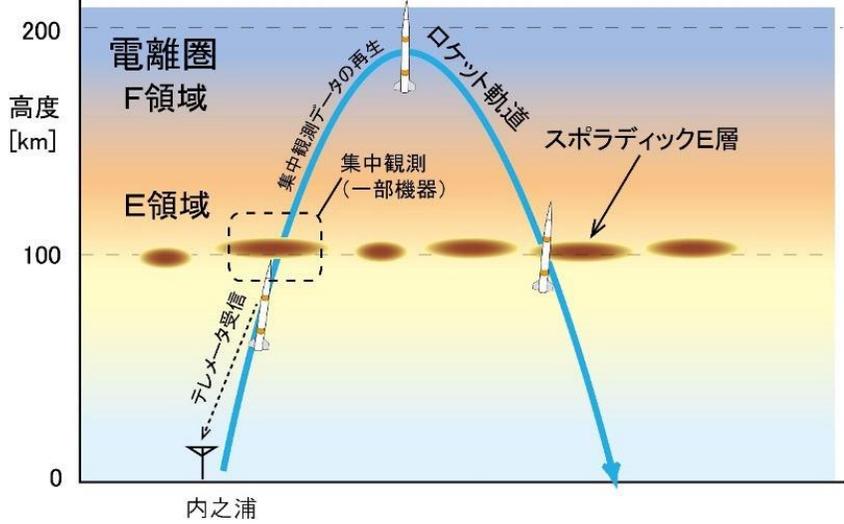
測定器により得られたエネルギー分布

その他の成果

これまで得られた成果 (特許出願や論文発表数等)	特許出願	査読付き 投稿論文	その他 研究発表	実用化事業	プレスリリー ス・取材対応	展示会展展
	国内：0件 国際：0件	国内：0件 国際：0件	国内：8件 国際：0件	国内：0件 国際：0件	国内：0件 国際：0件	国内：0件 国際：0件
	受賞・表彰リスト		米田匡宏（大学院生）京都大学理学研究科地球惑星科学専攻修士論文賞 米田匡宏（大学院生）地球電磁気・地球惑星圏学会講演会 学生発表賞（オーロラメダル）			

成果展開の状況・期待される効果

- 本事業のメンバを含む大学等の研究者でチームを組織し、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所による観測ロケット実験に応募し、2022年（令和4年）4月に正式に採用された。S-310-46号機観測ロケットとして現在準備中である。2025年夏季に打ち上げる予定である。
- 本事業で開発した計測機器群を観測ロケットに搭載して打ち上げ、地球の電離圏を観測してそこで起きている現象、特に無線通信に大きな影響をもたらすスポラディックE層の理解を増進させる。スポラディックE層の生成・消滅には、磁場、電場、中性粒子、荷電粒子（イオン）が関わっていると考えられているが、これまでこの全てを同時に観測した事例がなかった。本事業で開発した計測機器群により、スポラディックE層の消長のメカニズムの理解に、ブレークスルーをもたらすことが期待される。



今後の研究開発計画

- 月惑星を周回する探査機への、本事業で開発した計測機器群の搭載を目指す。月・惑星の固体と大気を起源とする粒子とそれが電離し磁場や電場の力を受けて輸送される様子の観測を行い、月・惑星とその大気の詳細と進化を解明する。人類が月や他の惑星に活動領域を広げる上で必要な、環境に関するデータを収集するための機器群となる。学術的な観点からは、惑星によって大気や海洋などの環境が著しく異なる根源的な理由を探求する上で本質となるデータを提供する。
- 月惑星周辺は、地球電離圏と比べ中性粒子・イオンが希薄で磁場が弱く、観測対象となる物理量がオーダーで異なる。このため、月惑星周辺環境に合わせた機器の性能の最適化が必要となる。
- 観測ロケット搭載機器は、一般部品も使って製作している。本格的な月惑星探査衛星ミッションに搭載する場合には、プロジェクトの部品プログラムに従い信頼性が担保された宇宙用部品を使う必要があり、部品の置き換えが必要となる。一般部品と同等の性能を持たない場合もあるため、代替手段の検討が必要となる。

事後評価票

令和6年3月末時点

1. プログラム名 宇宙探査基盤技術高度化プログラム
2. 課題名 周回衛星による月・惑星起源粒子計測パッケージの開発
3. 主管実施機関・研究代表者 国立大学法人 京都大学 教授 松岡彩子
4. 共同参画機関 公立大学法人 富山県立大学
5. 事業期間 令和3年度～令和5年度
6. 総経費 128百万円
7. 自己点検結果
(1) 課題の達成状況
<p>「所期の目標に対する達成度」</p> <p>◆ 所期の目標</p> <p>周回衛星に搭載する電磁場環境及び月・惑星起源粒子の計測パッケージの開発を目的とする。計測パッケージは、磁場・電場・中性粒子・プラズマ粒子の4つの測器からなり、月・惑星の固体と大気を起源とする粒子の測定を行い、月・惑星とその大気の現状と進化の解明を目的とするものである。大気のない天体においても粒子流出は起こっており、その一部のプラズマ化は流出過程に大きな影響を与えている。また、プラズマの運動の理解には磁場・電場の計測は必須であり、この4つの機器からなる計測パッケージは多くの衛星・惑星の探査に利用可能な、本質的かつ汎用的なものである。</p> <p>本事業期間においては、将来、月惑星を探査する周回機に搭載する計測器パッケージに必要な技術開発を行い、観測ロケットで飛翔実証するための機器の製造とその性能確認を完結する。経験豊富な教員と若手教員とが大学院生とともに開発を実施し、観測ロケットによる実証実験までを短期間に行うことで、次世代の宇宙探査機測器の開発を担う人材を育成し、将来の月・惑星探査への計測パッケージの利用を進めることを目指す。</p>

◆ 達成度

前項「所期の目標」でも述べた通り、本事業で開発した機器パッケージは磁場・電場・中性粒子・プラズマ粒子の4つの測器からなるため、それぞれについて達成度を述べる。

①磁場計測器の開発 近年の磁性材料の開発により新たに利用可能となった磁性材を利用し、従来の3分の1以下の重量の基本波型直交フラックスゲート磁場センサを用い、小型軽量の磁場計測器を開発した。センサに加え回路部の小型化により、超小型衛星への搭載が可能な軽量モデルを実現した。試験モデルによる製作と検証を経て、観測ロケットフライトモデルの回路およびセンサの設計を決定、製作と性能確認を行い、打ち上げ時の機械環境への耐性を試験した。更に、宇宙環境への耐性を実証するための温度試験・真空試験を行った。このような試験と検証を経て、月・惑星磁場環境測定にも十分な機能・性能を持つことを確認した。

②電場計測器の開発 剛性の高い素材を採用し3軸制御衛星への搭載を可能とし、かつ高感度で電場計測する、電場計測用センサの開発を行った。センサ信号の処理にオーバーサンプリング法を用いてノイズを低減し、また磁場計測との同期サンプルを実現した。テストモデルの製作と検証を経て、観測ロケットに搭載する電場計測のフライトモデル（センサおよび計測装置）を製作した。センサは今回の観測ロケットの搭載条件の制約に合わせて長さを2mとしたが、3mの長さを持ち衛星に搭載することも可能な設計とした。打ち上げ時の機械的な環境や宇宙空間の真空環境下における電場計測装置の動作試験を行い、正常に動作することを確認した。また、観測ロケットから供給される信号との同期性を測定することにより、磁場計測との同期サンプルを実現した。

③中性粒子質量分析器の開発 中性大気の組成・密度を測定するTOF (Time Of Flight) 型質量分析器を開発した。新規開発の3回反射型TOFを採用し、質量分解能100以上でHe、O、N₂、NO、O₂、CO₂などの中性大気の質量スペクトルを、近接した質量を持つ分子・原子を分離して計測することを可能とした。観測ロケットフライトモデルとしての、分析器全体の製作と試験を行った。これには、アナライザー、パルス高圧電源、高圧電源、低圧電源、低圧電子回路を含む電子回路部、アナライザーの中性粒子取り込み部分である、アンテナチャンバーの製作と試験が含まれる。中性粒子質量分析器全体の性能試験は、He、H₂O、N₂、CO₂、O₂を導入することで実施した。さらに、振動試験、熱サイクル試験を含む中性粒子質量分析器全体の環境試験を実施して問題ないことを確認した。中間報告の段階では、令和3年度に実施する計画であった3回反射型リフレクトロンの製造が、必要な部品の一部の入手が新型感染症拡大の影響により遅延し、令和3年度中に完了することが出来ない状況であった。令和4年12月末までに部品を入手し、令和5年1月頭に3回反射型リフレク

トロン製造を再開し、2月末までに完了する予定としていた。その後部品を入手し、令和5年2月末までに製造を完了した。

④イオンドリフト速度測定器の開発 測定器はエネルギー分析部、入射方向を検出するための電極部、電源供給およびデータ伝送を行う電気回路部から構成され、イオンドリフト速度を3次元ベクトルとして推定できることに独創性がある。当初予定通り観測ロケット搭載用フライトモデルを完成させ、真空チェンバー内に電離圈イオンとほぼ等しい特性をもつプラズマを生成し、開発した測定器によりデータ取得を行った。データから推定されたイオン密度・温度は別途ラングミュアプローブから推定される電子密度・温度との比較により推定されるイオン速度との比較を通して、誤差30%以内の精度で推定が可能であることを確認した。更に観測ロケット搭載時に予想される振動・衝撃・温度・真空環境にて測定器が問題なく動作することを確認した。

以上の機器開発に関する達成に加え、本事業の一つの出口である、観測ロケットによる飛翔実証の機会を確保することに成功した。

機器の開発に平行し、本事業のメンバを含む大学等の研究者でチームを組織し、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所による観測ロケット実験に応募し、2022年（令和4年）4月に正式に採用された。S-310-46号機観測ロケットとして現在準備中である。当初2024年夏季に鹿児島県内之浦宇宙観測所から打ち上げる予定であったが、その前に打ち上げる予定であった他の観測ロケットのスケジュールの変更の影響で、1年遅れ2025年夏季に打ち上げる予定である。

「必要性」

[科学的・技術的意義]

日本の月探査機「かぐや」は月起源のイオンを観測し多くの成果をあげた。一方で惑星や小惑星探査に関しては、搭載した観測機器の種類や探査機の軌道、主たるミッション目的等の事情で、惑星や小惑星を起源とする粒子を直接計測する機会が無かった。本事業では、「かぐや」の実績に基づきつつ、様々な月・惑星周回衛星で用いることができる磁場・電場・中性粒子・プラズマ粒子パッケージを開発した。このパッケージは月起源の粒子に関する理解を「かぐや」より発展させ、また、惑星起源の粒子について新たな発見をもたらす意義を持つ。日本が今後実施する月惑星探査において、固体と大気の組成やその間の物質の移動に関する知見を広げると期待される。

各機器の技術的意義は以下の通りである。

①磁場計測器の開発 磁場計測器電子回路部のピックアップ回路部分をASIC（特定用途向け集積回路）化し、抜本的な小型軽量化への道を開いた。ASICは、特定の機能を有するように設計された半導体デバイスである。個別のデバイスで構成される回路に比べて、専用の半導体デバイスとして、機能を集約できるため極端な小型化が可能である。通常の個別デバイスで製作した場合A4基板程度の大きさになるものが、5mm角のチップとして実現できている。

②電場計測器の開発 3軸制御衛星への搭載を可能とするため、高剛性素材であるCFRP(炭素繊維複合材料)を採用し、長さ2m、質量27.7gという超軽量のブームを製作することができた。CFRPを使用した構造物はこれまでも宇宙空間で使用されてきたが、電場計測用としては使用されておらず、今回の研究開発で初めて実現した。なお、プラズマが稀薄である月惑星環境計測用途には、高精度観測のために3mの長さが必要であること、伸展にかかる時間に制約が無いこと、空気圧による座屈の懸念が無いことから、3m長が適している。このため、同じ設計で長さだけを変えることによってアンテナ長を2mにも3mにも出来る条件で、電界観測のアンテナの開発を行った。

③中性粒子質量分析器の開発 本研究で開発に成功した、中性大気の組成・密度を測定するTOF型質量分析器は、最終的に質量数44の二酸化炭素で質量分解能 $m/\Delta m$ が約280に達し、仕様の質量分解能100を遥かに上回る性能を達成することができた。これにより、He、O、N₂、NO、O₂、CO₂等の中性大気の質量スペクトルを、近接した質量を持つ分子・原子を分離して計測することができるようになった他、振動試験・温度サイクル試験など、観測ロケット・人工衛星搭載のために必須となる環境試験にもパスすることができた。

④イオンドリフト速度測定器の開発 従来、電離圏イオン観測に用いられてきた測定器としてはRetarding Potential Analyzer(RPA)、Ion Drift Meter(IDM)があるが各々センサ面の垂直1成分、平行2成分の速度を測定するのみであったのに対し、本測定器は3次元的に速度を推定することに独創性がある。IDMでは2枚の電極の電流比からイオンの入射方向を推定するため比較的大きな誤差が含まれる可能性があるが、本測定器では36枚の電流測定用電極を用いるため、入射角度推定の信頼性が格段に向上した。特に電離圏イオンの観測では予想されるイオン速度が人工衛星や観測ロケットの移動速度よりも1桁以上小さく物理過程の議論には高精度の速度データが求められるため、本測定器による観測が有効である。

[他国の先進研究開発との比較における妥当性]

①磁場計測器の開発 機器の小型化を目指しASICを用いた磁場計測器の研究開発は他国でも行われている。本事業の開発では、磁場計測器だけではなく他の計測機器との相乗りしたASICを製作しており、機器のパッケージ化という観点で、より小型化が進む方策を取っている。

③中性粒子質量分析器の開発 本質量分析器は観測ロケット搭載用・人工衛星搭載用観測装置として必要となる冗長機能も備えていながら、アナライザ一部分の重量は2.5kgと軽量であり、他国の同種の中性粒子質量分析器と比較しても、高い性能/重量比を達成することができた。

「有効性」

[新しい知の創出]

①磁場計測器の開発 磁場計測器(フラックスゲート磁力計)ではクロックに同期して動いている

部分、スイッチングをしている部分があり、これらを ASIC で実現するとディスクリート部品で実現した場合に比べ大きなノイズを発生する。ノイズを低減する ASIC の方式について試行錯誤を行い、技術的な知識を蓄積することができた。この知識は、磁場計測機に限らず、クロックに同期して動作するもの、スイッチングを行うもののノイズ低減方策として有効である。

②電場計測器の開発　これまで観測ロケット搭載用の電場計測器はアナログ回路で構成された受信機であったが、今回の研究開発において、センサで検出した信号をデジタル信号処理し、デジタル信号を出力する新たな方式を実現することができた。

③中性粒子質量分析器の開発　本研究で開発に成功した中性大気の組成・密度を測定する TOF 型質量分析器には、パルス高電圧電源、アンテナチャンバー、新しいアナライザ構造などの新規開発要素が多数含まれていた。これらの新規開発要素の開発を通して、観測装置開発における、複数の新しい知を創出することができた。

④イオンドリフト速度測定器の開発　測定器製作完了後の試験においては、校正のための低エネルギーイオンソースが必要であったがそのような装置が国内には存在せず、新規に開発を行った。このイオンソースは測定器校正に利用されるだけでなく、電離圏プラズマ環境を地上に模擬した室内実験にも有効であり、今後広範な研究への応用が期待できる。

[人材の養成]

①磁場計測器の開発　修士学生 1 名が修士論文研究として ASIC を用いた回路の開発に取り組んだ。また別の修士学生 1 名が、観測ロケットに搭載した磁場計測器のデータを用いて解析を行う方法の検討に取り組んだ。学生には宇宙航空研究開発機構の大型施設を使った試験にも参加させ、貴重な経験を積ませることができた。

②電場計測器の開発　計測器のデジタル信号出力化において、大学院生の協力を得て、開発を進めてきた。その結果として、デジタル信号処理に関するハードウェア構成や FPGA による信号処理方法に関する経験を積ませることができた。

③中性粒子質量分析器の開発　本観測装置の開発には、大学院修士課程の学生 1 名が参加したが、観測ロケット・人工衛星搭載用観測装置の設計、製作、試験など一連の技術を習得することができ、装置開発のできる研究者の養成に大変有効な研究であった。

④イオンドリフト速度測定器の開発　測定の開発には大学院生 3 名が参画し、設計、製作、各種試験を経た開発完了までの各過程において重要な役割を果たした。観測対象のイオンは電離圏の主要構成要素であり、開発においてプラズマ計測一般に通じる知識やノウハウが必要なため、参画を通して培った技術は貴重な糧となる。

「効率性」

[研究開発の手段やアプローチの妥当性]

各研究課題に対し、最適な手段とアプローチを選択して研究開発を行った。

①磁場計測器の開発 ASIC は現在、民生部品で用いられ急速な発展を続けている。この技術を宇宙用機器にも取り入れることによって、効率的な回路の小型軽量化が実現される。本研究組織は既にリングコア型平行フラックスゲート磁場センサの回路部を ASIC を用いて実現している。本開発ではその実績に基づき、直交フラックスゲート磁場センサの回路部の ASIC 化を行った。

②電場計測器の開発 高剛性なセンサを開発することが電場計測器の重要な課題であった。そのため、今回の研究開発において、センサの材料の選定、伸展機構の試作を順次行った。これにより、これまでには実現できなかった軽量で高剛性なセンサを開発することを可能とした。そして、観測ロケットによる宇宙空間での実証試験を行う機会を得、ロケットが希薄な大気中を飛翔する際に生じる動圧などを計算し、新開発のセンサを伸展させるための条件を検討することもできた。

③中性粒子質量分析器の開発 本研究における中性大気の組成・密度を測定する TOF 型質量分析器の開発は、パルス高電圧電源、アンテチャンバー、新しいアナライザ構造などの新規開発要素を多数含んでいたが、これまでに培ってきた観測ロケット・人工衛星搭載用荷電粒子計測装置の開発技術を活かして開発を進めることで、新規開発部分の開発に焦点を絞って研究リソースを投入し、効率良く短時間で開発を行うことに成功した。

④イオンドリフト速度測定器の開発 ドリフト速度の推定精度を向上させるためには、電離圏イオンを効率良く電流検出器で捉えることが重要である。本測定器の開発においてはまず計算機を用いた数値シミュレーションにより RPA 部および電極部の構造を検討し、最適な測定機設計を行ったことが限られた期間での開発完了を可能にしたと考えている。また、必要に応じて、電離圏プラズマの測定器開発に携わった研究者に対して意見を求め、有益なコメントをその後の開発に反映させたことも信頼性向上に寄与したと考えられる。

(2) 成果

「アウトプット」

中間報告の際に作成した「中間報告資料(様式)」中の「5. 成果に関する事後自己点検の方針」として、全ての研究課題に対し、

目標値：本事業終了後に観測ロケット実験で宇宙空間における実証実験を行うことを前提として、宇宙環境耐性の試験まで完了させる。

評価指標：TRL 8 相当(ただし観測ロケット環境条件)

と定めていた。

本事業終了時には、開発した全ての機器について、観測ロケット環境条件での試験を実施し、耐性

があることの確認が完了している。各機器について、成果と宇宙環境耐性の状況を述べる。

①磁場計測器の開発 製作した機器の特性（周波数特性、ノイズレベル）を評価し、周波数特性は目標通りであること、ノイズレベルは従来品と比べ3倍であったが目標以内であることを確認した。機械環境試験では、機器に振動衝撃を与えその前後における機器の特性を比較した。宇宙環境試験では、機器を恒温槽や真空槽に入れて動作させ、高温・低温環境や真空環境にさらし、その最中および前後における特性を評価し、機器の動作に異常が無いことを確認した。

②電場計測器の開発 電場計測器は打ち上げ後アンテナを伸展する可動部を持つため、それが打ち上げの機械環境や宇宙の熱真空環境でも正常に動作することが重要となる。本研究開発で製作した計測器の真空試験・振動・衝撃試験を実施し、真空環境下において正常に動作すること、振動・衝撃の印加により構造に異常が生じず、機能に問題ないことが確認された。

③中性粒子質量分析器の開発 質量分解能 $m/\Delta m$ は、質量数 44 の二酸化炭素で約 280 であり、仕様 100 を十分に達成できていることが示された。振動試験、真空試験、温度試験を実施し、宇宙環境耐性の試験を完了した。

④イオンドリフト速度測定器の開発 開発した測定器を用いることで、イオンドリフト速度を3次元的に 30%以内の精度で推定できる見通しが得られた。電離圏におけるイオンの運動方向は中性粒子の運動（速度数十 m 毎秒）や磁場と電場に関連して高度と共に複雑に変化すると考えられ様々な現象の解明に重要なパラメータであることから、測定データの科学的意義は大きい。振動試験、真空試験、温度試験を実施し、宇宙環境耐性の試験を完了した。

「アウトカム」 （令和 6 年 10 月末時点）

本事業の研究開発に共通し、性能は維持あるいは向上させつつ、従来よりも小型軽量の機器を実現できている。

①磁場計測器の開発 地球の持つ磁場が、地球環境を放射線や太陽風から防いでいることはよく知られている。磁場計測器の小型化に成功したことは、月や他惑星の環境をモニターする機器としての磁場計測器を、将来の月惑星探査機に、他機器とパッケージングされて搭載される機会を拡大したという意義を持つ。

②電場計測器の開発 高剛性な CFRP 製のセンサとモータを用いた伸展機構により、観測ロケットが高度 90km に達する前にセンサを全伸展させることができる電場計測用センサを開発した。そのため、動圧が大きい高度 90km のような電離圏下部領域であっても電場を精度よく測定することができる」と期待される。

③中性粒子質量分析器の開発 中性大気の組成・密度を測定する TOF 型質量分析器はこれまでに日本にはなかった観測装置であり、本観測装置を観測ロケット、人工衛星に搭載して観測を行うこ

とで、既に国内外で広く用いられている荷電粒子の質量分析器による観測と合わせて、地球電離圏や磁気圏、他天体周辺空間で中性粒子・プラズマ粒子が電場、磁場と相互作用しながら生み出すダイナミックな変動のメカニズムを明らかにすることに貢献することができる。

④イオンドリフト速度測定器の開発 本測定器の観測から推定されるイオンドリフト速度、密度、温度は電離圏下部においてイオンが中性粒子や電子とエネルギーや運動量をどのように交換をしてスポラディックE層が形成されるかを議論するために必須のパラメータである。特にスポラディックE層形成における電場および中性風による寄与を定量的に議論する上ではエネルギー収支を理解することが重要で、そのための基礎データを提供する。

(3) 今後の展望

短期的には、本事業で開発した計測機器群は観測ロケットに搭載して打ち上げ、地球の電離圏を観測してそこで起きている現象、特に無線通信に大きな影響をもたらすスポラディックE層の理解を増進させる。スポラディックE層の生成・消滅には、磁場、電場、中性粒子、荷電粒子（イオン）が関わっていると考えられているが、これまでこの全てを同時に観測した事例がなかった。本事業で開発した計測機器群により、スポラディックE層の消長のメカニズムの理解に、ブレークスルーをもたらすことが期待される。

長期的には、月惑星を周回する探査機への本事業で開発した計測機器群の搭載を目指す。月・惑星の固体と大気を起源とする粒子とそれが電離し磁場や電場の力を受けて輸送される様子の観測を行い、月・惑星とその大気の現状と進化を解明する。人類が月や他の惑星に活動領域を広げる上で必要な、環境に関するデータを収集するための機器群となる。学術的な観点からは、惑星によって大気や海洋などの環境が著しく異なる根源的な理由を探求する上で本質となるデータを提供する。

8. 評価点

A

評価を以下の5段階評価とする。

S) 優れた成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に著しく貢献した。

A) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献した。

B) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献しているが、一部の成果は得られておらず、その合理的な理由が説明されていない。

C) 一部の成果を挙げているが、宇宙航空利用の明確な促進につながっていない。

D) 成果はほとんど得られていない。

9. 評価理由

月・惑星とその大気の現状と進化の解明を目的に、月・惑星起源粒子を計測する、磁場・電場・中性粒子・イオン計測の小型軽量パッケージの開発を行う。地球から遠い月や惑星が対象となるため輸送の制限から小型・軽量化が重要であり、宇宙探査の基盤技術として価値のある取り組みである。

磁場計測装置は、JAXAが開発した小型フラックスゲートをセンサとして処理回路をASIC（特定用途向け集積回路）化することで小型化が達成できている。電場計測装置は、進展ブームにCFRP（炭素繊維

複合材料)を使うことで軽量化が達成できた。中性粒子計測装置は、3回反射型リフレクトロンを採用することで多種元素の測定感度を大幅に向上している。イオン計測装置は、36枚の電流測定用電極を用い3次元ベクトルを高精度に測定することができた。地球電離圏と月惑星での計測について技術的ギャップは存在するが、その課題認識がある上で計画された新規性、独創性に富む粒子計測パッケージの基礎技術開発と性能検証は、予定通りきっちりと実施されており、所期の開発目標を十分達成し、フライトモデルを完成を評価する。これらの成果は2025年度に予定する観測ロケットにおいて実証される予定であり、これが成功すれば、観測ロケットでの観測機器として目標を達成し、所期の目標をすべて達成できたと判断できる。

一方で、本事業終了後の観測ロケットでの実証は予定されているものの、本来目的とする惑星・月軌道での実証は一部技術での適用を探索中レベルと考えられ、その後の具体ミッションでの活用や産業応用に関しても十分に見据えられていないと思われる。今後の展開が楽観的な気がしたが、更に、月周回など長期間の宇宙利用としては部品レベルの更なる改修が必要だと思う。

外部への研究成果の普及については、現時点で学会発表はされているが、社会へのすそ野拡大を目指した普及・還元の活動はされておらず、成果の公開が論文も含めてやや不十分である。

人材育成については開発にあたった大学院生がそれぞれの分野で成長を遂げていることがうかがえるが、もう少し詳しく記述すると良いと感じた。費用対効果に関しては、定性的な記載をあったものの、他方法に比べてどれだけ効率化が図れたのか定量的な指標は提示されていない。

以上により、本課題は、相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献していると認められる。

今後は、以下の点が期待される。

- それぞれの研究成果については価値があるものの、大きなブレークスルー技術がないこと、ASICやFPGA(Field Programmable Gate Array)の月環境での耐放射線性が確認されていないこと、イオン計測装置において電流測定の絶対精度の検証が不十分なこと、宇宙科学探査ミッションへの国民の理解増進への取り組みが不十分なこと等を改善することを期待する。
- ASIC部分に注力する必要があると感じるので、次の計画を立案して発展させることを期待する。
- 本来目的とする惑星・月軌道での運用に適應できるフライトモデルの開発と実証機会の獲得、その先にある具体ミッションでの活用や産業応用に至れるよう、ロードマップとマイルストーンを定めて、計画的かつ継続して開発に取り組んで成果創出に務めることを期待する。
- 成果を常に社会に発信して、我が国の惑星・月探査でのポジション獲得や社会への普及啓発に務めることを期待する。
- 来年の打ち上げによって、その成果が実証され、さらに月へとステップアップしていくことを期待する。