令和4年度地球観測技術等調査研究委託事業 「周回衛星による

月・惑星起源粒子計測パッケージの開発」

委託業務成果報告書

令和5年5月

京都大学

本報告書は、文部科学省の地球観測技術等調査研究 委託事業による委託業務として、京都大学が実施した 令和4年度「周回衛星による月・惑星起源粒子計測パ ッケージの開発」の成果を取りまとめたものです。 目次

1	は	じめに		1
	1.1	委託	業務の目的	1
	1.2	業務	の方法	1
	1.3	当該	3年度における委託業務の結果概要	2
2	実	〖施内容	ş	3
	2.1	磁場	計測器の開発	3
	2.	1.1	磁場計測器電子回路部の試作と評価	3
	2.1.2		1回目製作の ASIC の性能評価と、2回目の ASIC 製作	5
	2.	1.2.1	1回目製作の ASIC のレイアウトと評価基板	5
	2.	1.2.2	プリアンプの周波数応答特性評価	6
	2.1.2.3		ASIC 回路のノイズ評価	7
	2.	1.2.4	ASIC 回路のオフセット評価	8
	2.	1.2.5	2 回目の ASIC チップ製作	8
	2.2	電場	計測器の開発	9
	2.	2.1	電場計測用センサの試作	9
	2.	2.2	電場計測器の信号処理部の開発	12
	2.	2.3	来年度に向けての開発方針	14
	2.3	中性	=粒子質量分析器の開発	15
	2.	3.1	中性粒子質量分析器パルス高圧の製作・試験	15
	2.	3.2	中性粒子質量分析器パルス高圧+イオン源+検出器+アナライザーを組み合わせた試験	18
	2.4	イオ	ンドリフト速度測定器の開発	20
	2.	4.1	測定器の構成	20
	2.	4.2	センサ部の構成と構造	20
	2.	4.3	真空チェンバーを用いた測定器の性能確認試験の概要	22
	2.	4.4	測定結果	22
	2.	4.5	まとめと測定器の仕様	24
3	ま	とめ		26

1 はじめに

1.1 委託業務の目的

月・惑星周回衛星に搭載され、磁場・電場・中性粒子・プラズマ粒子を計測する4つの測器からなる小型軽量か つ高性能な計測パッケージを開発し、月・惑星環境の長期間における変遷を理解するための月・惑星起源粒子 の宇宙空間への流出および粒子の運動を支配する電磁場環境の測定技術を実現する。これまで地球周回及び 惑星探査衛星ミッションに搭載した科学観測機器を開発してきた教員がその豊富な経験を活かし若手教員、大 学院生とともに、新たな原理や方式により小型軽量、高性能を実現する技術を実用した機器開発を行う。開発・ 製造した機器を、課題終了後に観測ロケット実験で宇宙空間に打ち上げ、宇宙環境で正常に観測することを実 証することを目指す。

計測パッケージを構成する4つの測器である、磁場計測器、電場計測器、中性粒子質量分析器、イオンドリフト 速度測定器のそれぞれについて、試作を行い試験・改良を行った後に、観測ロケットによる宇宙環境実証用の 観測器を製造し、最終的な性能や機能を確認する。

1.2 業務の方法

令和4年度における実施内容は、以下の通りである。

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する。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する。

当該年度の目標は、前年度の検討・開発結果をもとに基本波型直交フラックスゲート磁場センサを用いた磁力 計の試作を行い、性能の評価を行うことである。感度やノイズ、周波数特性等のデータを取得し、電磁場環境測 定の観点に基づいた評価を行い、改良点を特定する。

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ため3mの伸展長を持つ、電場計測用センサの開発を行う。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する。

当該年度の目標は、伸展機構を含めたセンサの試作を行い、真空環境下でセンサが伸展することの確認する ことである。また、電場計測器の信号処理部の電気回路を設計し、試作・試験を行う。

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する。新規開発の3回反射型 TOF を採用することで、質量分解能 100 以上で 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・原子を分離した計測を可能とする。

当該年度の目標は、パルス高圧電源と3回反射型アナライザー部の製作を完了することである。実施する内容 は、パルス高圧の製作・試験とアナライザー部の設計・製作・試験である。

④イオンドリフト速度測定器の開発

測定対象のイオンのエネルギー分析を行うRPA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する測定器の開発を行う。イオンドリフトを 3 次元ベクトルとして推定することに より、質量数が大きく異なるイオンを判別可能とする。

当該年度の目標は、内部に電離圏プラズマ環境を模擬した真空チェンバー内に試作品を設置して、測定器のイオンエネルギー分析に関する性能を評価し、主な仕様を確定させることにある。

1.3 当該年度における委託業務の結果概要

令和4年度における業務の結果概要は、以下の通りである。

①磁場計測器の開発

当該年度は、前年度の検討・開発結果をもとに基本波型直交フラックスゲート磁場センサを用いた磁力計の試 作を行い、性能の評価を行った。感度やノイズ、周波数特性等のデータを取得し、電磁場環境測定の観点に基 づいた評価を行い、改良点を特定した。

②電場計測器の開発

当該年度は、伸展機構を含めたセンサの試作を行い、真空環境下でセンサが伸展することを確認した。また、電場計測器の信号処理部の電気回路を設計し、試作・試験を行った。

③中性粒子質量分析器の開発

当該年度は、パルス高圧電源と3回反射型アナライザー部の製作を完了した。パルス高圧の製作・試験とアナ ライザー部の設計・製作・試験を実施した。

④イオンドリフト速度測定器の開発

当該年度は、内部に電離圏プラズマ環境を模擬した真空チェンバー内に試作品を設置して、測定器のイオンエネルギー分析に関する性能を評価し、主な仕様を確定した。

2 実施内容

2.1 磁場計測器の開発

本開発では、小型軽量なセンサに長所を持つ基本波型直交フラックスゲート(FM-OFG)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-OFG 全体のさらなる小型軽 量化を目指している。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。令和 4 年度は、前年度の検討・開発結果をもとに観測ロケットへの搭載を想定した FM-OFG の試験回路を設計、製造し、観測ロケットフライト品の設計のために必要な基本的な特性を確認した。 感度やノイズ、周波数特性等のデータを取得し、電磁場環境測定の観点に基づいた評価を行い、改良点を特定 した。

2.1.1 磁場計測器電子回路部の試作と評価

FM-OFGの試験回路は、FM-OFG センサ3軸を励磁するドライブ回路、ディスクリート(ASICを用いない)方式の ピックアップ/フィードバック回路1軸分、ASIC を用いる方式のピックアップ/フィードバック回路(後から ASIC が実装できるようになっている)1軸分、データ処理と、観測ロケットとのインターフェースを行う Field Programmable Gate Array (FPGA) およびセンサケーブルで構成した。図2.1-1 に、試験回路の外観の写真を示 す。





インターフェース用コネクタ面



基板中継用コネクタ面

図 2.1-1 FM-OFG の試験回路の外観

ディスクリート(ASIC を用いない)方式の回路は、ASIC を用いる方式の回路の性能の比較評価のために必要で あるだけでなく、ASIC 回路のバックアップともなる。本年度は、このディスクリート方式の回路を用いた FM-OFG の性能評価を行った。 図 2.1-2 に、3 つのセンサを 用いて測定したフィードバック アナログ出力のノイズのスペ クトルを示す。指標となる 1Hz におけるノイズの密度は 11~13 pT/√Hz であり、これ までの FM-OFG 開発の例と 比べても極めて良好であった。 本試験回路を用いることによ り、来年度 ASIC を用いた回 路に実際に ASIC を搭載し て試験した場合、その差分を 純粋に ASIC による寄与と 評価することが出来る。

図 2.1-3 に、同じ 3 つのセン

サを用いて感度と線形性誤差を評価した結 果を示す。磁場の印加範囲は±52794 nT、 計測点数は 2414nT 毎に 42 点である。線 形性誤差が大きいと、特に観測ロケット等 のスピンしながら飛翔する宇宙機の場合、 スピン面内成分の正弦波形が歪んだり、時 系列データのノイズの要因となる。この試 験回路の線形性誤差は約 0.5 %(500nT 程 度)であり、極めて良い線形性を持ってい た。

線形性誤差評価の解析では、同時にオフ セットの評価結果も出る。オフセットが大き いとその温度・経年変化も大きく、測定磁 場の精度に影響が出ることが懸念される。 オフセットを評価した結果、45~47nT の範 囲にあり、大変良く抑えられていることがわ かった。線形性・オフセットについても、来 年度の試験で本試験回路を用いることによ り、ASIC あり/なしの回路の差を評価する ことによって、ASIC の性能を評価すること が可能である。

図 2.1-4 に、別の 3 つのセンサを用いて 12 時間ランニングさせた時のオフセットの経



図 2.1-2 ディスクリート方式回路のフィードバック出力ノイズスペクトル



図 2.1-3 [上] ディスクリート方式回路の入出力特性 [下] 直線フィッティングからの差

時安定性の測定結果を示す。観 測ロケットは飛翔時間が約 400 秒と短いので、観測結果を出す ために経時安定性はそれほど 問題とならないが、将来の月・惑 星探査の場合にはミッションライ フが長期となるため、経時安定 性は測定精度に大きく影響する。 図では、測定開始時のオフセット を基準としたオフセットの変化を 示している。変化は最大 1.2nT 程度であり、良好なオフセット安 定性を示している。経時安定性 についても、来年度の試験で本 試験回路を用いることにより、



図 2.1-4 ディスクリート方式回路のフィードバック出力経時安定性

ASIC あり/なしの回路の差を評価し、ASIC の性能を評価することが可能である。

2.1.2 1回目製作の ASIC の性能評価と、2回目の ASIC 製作

2.1.1 で述べた、FM-OFG 電子回路部試作・評価に並行し、昨年度製作した ASIC の性能評価と2回目の ASIC 製作を行った。

2.1.2.1 1回目製作の ASIC のレイアウトと評価基板

ASIC チップの全体レイアウトを図 2.1-5 に示す。オペアンプとそれを駆動するバイアス回路、位相検波と過渡ノ イズカット回路、カウンタ回路を実装している。



図 2.1-5 ASIC チップ全体のレイアウト

ASIC チップの外観を図 2.1-6 に示す。ベアチップの サイズは 5mm x 5mm である が、基板に実装するためにこ れをパッケージングし、10mm x 10mm のサイズを持つ部 品としている。この ASIC チッ プと受動部品を図 2.1-7 に示 すように基板上に実装し、評 価試験を行った。配線の概 略図を図 2.1-8 に示す。





- 図 2.1-6 ASIC チップの外観
- 図 2.1-7 ASIC 評価基板



図 2.1-8 ASIC 評価試験時の配線概略図

2.1.2.2 プリアンプの周波数応答特性評価

FM-OFG センサから出力される、基本波周波数のピックアップ電圧信号は微弱であるため、プリアンプ(非反転 増幅回路)で40倍に増幅する。図 2.1-9は、プリアンプの周波数応答特性の実測(実線)を回路シミュレーション の結果(点線)と比較して示したものである。FM-OFG の励磁(基本波)周波数は 76kHz であるが、プリアンプに おいて 33dB の増幅度が 200kHz まで維持され、オペアンプの利得帯域が十分であることが確認された。 2.1.2.3 ASIC 回路のノイズ評価 ASIC 評価基板に FM-PFG センサ を接続し、フィードバックアナログ出 カのノイズを測定した。センサによ るノイズと回路によるノイズを切り 分けるために、宇宙航空研究開発 機構にて既開発でノイズが小さい ことが確認されているディスクリー ト回路(以降、JAXA 回路と呼ぶ)と の比較試験を行った。外来磁場に よるノイズの影響を無くすためにセ ンサをシールドボックスに入れた状 態で測定を行った。

図 2.1-10 は、上が JAXA 回路のノ イズスペクトル、下が ASIC 回路の ノイズスペクトルである。指標とな る 1Hz におけるノイズ密度は、 JAXA 回路では 2 μ Vrms/ \sqrt{Hz} 、磁 場に換算すると 13 pT/ \sqrt{Hz} 、磁 場に換算すると 13 pT/ \sqrt{Hz} であ った。一方、ASIC 回路では 10 μ Vrms/ \sqrt{Hz} 、磁場換算で 130 pT/ \sqrt{Hz} と、磁場換算では約 10 倍大きかった。これらの比較評価 は、同じ FM-OFG センサを用いて 行っているので、ノイズレベルの 差は ASIC に由来するものと考え られる。

ASIC 回路のどのブロックがノイズ を出しているのかを切り分けなが ら調査したところ、ノイズの主要因 は位相検波に使用している CMOS スイッチが原因である可能 性が高いとの結論を得た。2 回目 の ASIC 製作では、トランスミッショ ンゲート回路の MOS パラメータ を変更し、チャネル面積を大きくし てノイズ低減をはかることとした。



図 2.1-9 プリアンプ周波数応答特性:実測(実線)とシミュレーション(破線)の比較



図 2.1-10 フィードバックアナログ出力のノイズレベル [上] JAXA 回路 [下]ASIC 回路

2.1.2.4 ASIC 回路のオフセット評価 センサをシールドに入れた状態(センサに かかる磁場がほぼゼロの環境)であっても、 ASIC 評価基板のフィードバック出力には 大きなオフセットが見られた。ノイズに対す る調査と同様、ASIC 回路の各ブロックを 切り分けてオフセットを出している要因を 調査したところ、差動積分器が積分動作 は正しいものの、出力に大きなオフセット を持つことがわかった。回路シミュレーショ ンではこのオフセットの再現が出来なかっ た。回路シミュレーションには考慮されて いない、MOSFET ASIC 製造プロセス誤差 によるものと推測される。

オフセットの原因の考察を進めるために、 積分器を単体で試験する回路を組み、恒 温槽に入れて-20℃から 60℃の範囲で温 度を変えてオフセットの変化を測定した。 結果を図 2.1-11(a) に示す。3 本の線は、 異なる3つの ASIC チップの結果を示す。3 つのチップとも、温度が上がるにつれ出力 オフセット値が小さくなった。また 3 つの チップ間でオフセット値のばらつきが 200 mV 程生じていた。

1回目の ASIC 製作でオペアンプとして採 用していた OPRtR に代わり、プロセス誤



凶 2.1-11 積分器出力のオフセットの温度依存性の比較 (a) OPRtR (b) OP160

差によるミスマッチの抑制が期待できる OP160 の積分回路について、同様にオフセットの評価を行った。結果を 図 2.1-11(b) に示す。出力 DC オフセット電圧値の3 つのチップの平均は -25 mV 程度であり、OPRtR を使っ た積分回路の場合の 1/30 程度に低減された。また温度特性も OPRtR を使った積分回路に比べて小さかった。 特に月・惑星環境においては搭載機器の温度変化幅が大きいので、温度による特性変化が小さいことは重要で ある。これらの結果に基づき、積分器のオペアンプには OP160 を用いることとした。

2.1.2.5 2回目の ASIC チップ製作

令和4年度の試作・試験・検討を元に、観測ロケット実験のフライト品に用いる、2回目の製作のASIC チップの 設計と製作を行った。主な変更点は、CMOSスイッチ群のチャネル面積を大きくしてノイズ低減をはかったことと、 オペアンプに OPRtR ではなく、OP160を用いることとしたことである。製作したASICは、来年度FM-OFG試験 回路に組み込んで性能評価し、観測ロケットフライトモデルに使用する予定である。

2.2 電場計測器の開発

富山県立大学の担当は、計測パッケージ中の電場計測器の開発である。電場計測器において、電場計測用の センサおよび受信した信号のデジタル処理部について検討を行う。電場計測用のセンサは、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ため3mの伸展長を持つものとする。受 信部分については、これまでもデジタル信号処理はされているが、観測ロケット搭載の電場計測器については、 アナログでの信号処理のみとなっていた。そこで、観測衛星および観測ロケットのどちらにも搭載可能なデジタ ル受信機の開発を行う。最終的には、オーバーサンプリング法を用いてノイズを低減し、磁場計測との同期サン プルを実現することを目標とする。

本プロジェクトで製作した電場計測センサが観測ロケットに搭載されることが決定したため、当初の開発目的を 達成しつつ、観測ロケット実験の観測目的を達成することができるように電場観測装置の信号処理部の開発お よび電場観測用センサの試作を行った。

2.2.1 電場計測用センサの試作

電場計測用センサのブーム部分は、令和 3 年度に検討したサカセ・アドテック社製の素材を使用する。図 2.2-1 にブームとして使用する高剛性の炭素繊維素材を用いた双安定性ブームの外観図である。これまでのところ伸 展機構の試作では、図 2.2-1(b)に示すように直径 20mm のブームを使用予定であった。



(a) 外観



図 2.2-1 双安定性ブーム(令和3年度検討済み)

しかし、観測ロケット搭載が決定し、観測対象が高度 100km 付近に存在するスポラディック E 領域であるため、 高度 90km までにはブームを全伸展させてなければいけないこと、ブームの伸展開始高度がおおよそ 70km であ ること、ロケットの上昇スピードが毎秒 1km 程度であることを考慮し、伸展ブームの長さおよび直径を検討するこ とになった。検討の結果、ブームの長さは 2m、直径は 10mm となった。伸展ブームの詳細を以下に記す。ここで、 伸展前において、ブームはドラムにまかれており、ロケットの搭載を想定するとドラムにまかれるブームの長さは 2.2m 程度必要である。そのためドラムにまかれる部分を想定してブームを製作し、長さと質量を測定した。令和3 年度にブーム素材を検討した際は、図2.2-1 に示すように直径が20mmであったが、今年度試作したものは直径が10mmとなっているため、ブーム重量が軽量となっている。しかし、CFRP製のブームは細くなっても剛性は保たれており、宇宙空間においても問題なく伸展する。

結果としてブームの仕様は以下のように決定した。

- 直径 10mm CFRP(炭素繊維複合材料)製 双安定性ブーム
- 開口角 45°
- スプロケット用穴(直径 3mm ピッチ 13mm)加工あり
- ブーム表面の絶縁加工あり(外側 PTFE テープ、内側 TPU)
- ブーム伸展長 2m(ロケットの外側の端からの長さ)
- 質量 27.7g/2.2m

伸展機構については、モータにより伸展する機構を試作した。令和3年度の検討の結果、図2.2-1(a)に示されて いるように、ブームに穴を開けることにより、この穴とスプロケットと呼ばれる歯車状の部品を組み合わせて、伸 展させる仕組みである。この方式によりモータを最適な位置に置くことで小型化が可能となる。図2.2-2に試作し たロケット搭載用センサの外観写真および図2.2-3に外観寸法図を示す。図2.2-2中の先端電極100mmという のは、直流電場測定用の電極を指しており、スポラディックE領域において、直流電場を観測するために用いら れる。試作したセンサにはリボンリングが使用されている。これは、先端の電極からの信号を出力するためであ る。また、ブームはD-sub9pinコネクタから電源を印加して伸展させる仕組みとなっている。伸展長をモニタする 必要があるが、伸展長モニタとしてエンコーダを使用する。エンコーダは回転するごとにパルス信号を出力する もので、パルスの数を数えることでブームの伸展長を知ることができる。



D-Sub 9pin オス





図 2.2-3 外観寸法図



図 2.2-4 ブーム全伸展時外観図

図 2.2-3 の外観寸法図から、伸展機構部としては、130mm(横)×75.5mm(縦)×57.5mm(高さ)の大きさに収まっ ていることが分かる。これはかなり小型化できたので、観測ロケットに搭載する大きさとしては十分であることが 分かった。質量はブーム伸展機構合わせて 250g となっている。伸展させた結果、8 秒で 2m をさせることができ た。速度としては、250mm/sec である。また、2m が伸展した時点でのエンコーダ出力は 2,780 パルスとなった。 図 2.2-4 はブームを全伸展した時の外観図である。 試作したセンサについて、真空容器内で初期的な真空試験を行った。真空容器内寸は全伸展長より短いため部 分的な伸展の試験とならざるを得ないが、伸展動作の評価を行うことは十分に可能である。モータの電源 ON/OFF による伸展動作、エンコーダ出力による伸展長の確認を行い、真空環境下での正常動作を確認した。

2.2.2 電場計測器の信号処理部の開発

今年度は、令和3年度に原理試作をしてきた信号処理部を継続して検討する。特に上述のように本研究開発した電場計測器が観測ロケットに搭載されることが決定したため、観測ロケットの観測目的を遂行することができるように設計をすることになった。特に今年度は信号処理基板の試作を行う予定であったが、観測ロケット搭載できる信号処理基板のフライトモデルを製作する。

図 2.2-5 は、デジタル信号処理部のフライトモデル基板の外観である。基本的な構成は令和3年度に製作した原 理試作基板をもとにしている。具体的には観測ロケットに搭載できるようにケーブルを配置し、部品のはんだ付 けについても観測ロケット搭載に対応できるようになっている。なお、製作を依頼した明和システム株式会社は、 これまでにも FPGA を用いた信号処理回路基板を製作し、観測ロケットに搭載された実績がある。デジタル信号 処理基板では、デジタル信号に変換された信号が入力される。入力されたデジタル信号は、FPGA にて観測仕 様に合うように信号処理され、シリアル通信できるように出力を編集して送出される。なお、AMD 社 Xilinx 製の FPGAを使用した。この FPGA は観測ロケットの搭載機器としての実績がある。そのため、開発環境が整っている ため、FPGA プログラムの開発や FPGA の書き込みに関するノウハウがあるため開発時間の短縮が可能となる。 出力されるデータについては、観測ロケットのテレメータデータに出力することを想定してデータを編集し、実際 の観測ロケットプロジェクトで使用されているソリトンテクノロジー社製 新型テレメータ地上インターフェース装置 を用いて、データが出力される。

令和4年度については、本研究開発で制作したものが観測ロケットに搭載することになったため、電場計測器の デジタル信号処理部の製作を先行して行うことになり、使用する部品などの納期の関係から、デジタル信号処理 基板の完成が遅れてしまった。しかし、昨年度のアナログ信号処理基板と組みあわせて動作確認を行った。動 作確認は、デジタル信号処理基板の出力信号を新型テレメータ地上インターフェース装置に入力し、実際にロケ ットから送出されるテレメータの形式にして行った。そのため、新型テレメータ地上インターフェース装置からの信 号を表示するためのリアルタイム表示装置(QL:Quick Look)を開発し、デジタル信号処理基板からの信号を確認 した。図 2.2-6 は、動作試験時に X 成分のアナログ信号処理基板に振幅 1V、周波数 1Hz の正弦波を入力したと きの QL 表示画面である。出力を確認したところ、左側上部の画面において回路の利得を考慮した出力が表示さ れており、設計したとおりの出力が表示されていることが確認できた。ここで、QL 表示画面は、電波計測器が出 力するすべての信号の波形(8 出力)および瞬時値(10 進数表示、16 進数表示)、現在時刻、テレメトリデータの同 期信号が同時に見ることができるようになっている。当初、購入したパソコンで QL 表示することを試みたが、画 面表示スピードが間に合わず、QL として使用することができなかった。そこで、改めて高性能パソコンを購入し、 表示することが可能となった。なお、QL 表示ができなかったパソコンについては、新型テレメータ地上インターフ ェース装置からデータを配信するために使用することになった。



図 2.2-5 電場計測器のデジタル信号処理部のフライトモデル基板外観図

S-310-46 EFD QL TM ON 500 PORT \$700 Frame Counter Description SML SYND FAF3 Duration \$300 Filterance Data Time [LT7] INS \$200 SML	K / LFAS-S Extension Monitor C X 2 001 2 00 0 0 1746 71750 71800 71820 71840 71850 71850 71850 71850 71850 7180000000000	7188.0 7188.4
Dump Data [HEX] Dump 1 (H2) Dump 2 (H2) DF Y (H2) HK X (H2) Dump 7 (H2) BD0 BCA BBC 1756 B007 FFEE SF X+ (H2) SF X+ (H2) DF Y (H2) HK X (H2) Dump 7 (H2) FFE B007 FFEE B007 FFEE SF X+ (H2) SF X+ (H2) HK Y (H12) Dump 8 (H0) SF X+ (H2) SF X+ (H2) HK Y (H12) Dump 8 (H0) SF X+ (H2) SF X+ (H2) SFE SFE SF X+ (H2) SF X+ (H2) SFE SFE	Dump Data (DEC) Dump 1 Dump 2 Dump 4 Dump 5 Dump 5 Dump 5 Dump 7 Dump 8 Dump 15 Dump 16 44384 (321025) 228608 248191 24818 238963 239966 230054 23015 Dump 9 Dump 10 Dump 11 Dump 12 Dump 13 Dump 14 Dump 15 Dump 16 239015 23901	日祖ヘルブ Dump 15 説明がありません。
DP-Ex 3 4 3 4 3 4 3 4 5 7 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1		718
		7186 7185

図 2.2-6 デジタル信号処理基板出力をリアルタイム表示画面

2.2.3 来年度に向けての開発方針

令和 4 年度は、本研究開発で製作した電場計測器が観測ロケットに搭載されることが決定し、観測ロケットの観 測目的に対応した観測機器として設計・開発することになった。電場計測用のセンサについては、令和 3 年度に 使用を決定した CFRP を用いた双安定性ブームを用い、伸展機構を検討し、伸展機構を含む電場計測用センサ の試作を行った。その結果、観測ロケットに搭載可能であり、小型・軽量なセンサを試作することができた。今後、 令和 4 年度に実施できなかったブームの伸展速度の検討および伸展させるための消費電流の制御方法の検討 などを行う予定である。そして、観測ロケットに搭載するフライトモデルの製作を行い、単体環境試験を行う予定 である。

電場計測器の受信機部分については、デジタル信号処理部のフライトモデルを製作した。デジタル信号処理部 は、令和3年度のデジタル信号処理部の評価モデルを参考にしながら製作された。特に、使用するFPGA、信号 処理項目を再度確認し、評価モデルで使用したもので問題ないかということを確認した。製作されたデジタル信 号処理部は、アナログ回路の評価基板と組みあわせることによって、動作試験が可能であった。動作試験を行 った結果、FPGA にプログラムしたとおりに信号が出力されていることが確認できた。なお、デジタル信号を確認 するためにテレメトリデータのリアルタイム表示装置(QL)を製作した。これによりデジタル信号出力をリアルタイ ムで波形を閲覧可能となった。また、QL を用いることによって、電波計測器のアナログ回路部およびデジタル信 号処理部を合わせた入出力特性を取得することが可能となり、設計通りに動作していることを確認することが可 能となった。

次年度は、観測ロケットに搭載する電場計測器のフライトモデルを完成させる。電場計測用のセンサについては、 令和4年度に試作したセンサを用いて、伸展速度や消費電流について、観測条件やロケット搭載環境を再確認 して、最適値になるように調整したのち、フライトモデルを製作する。受信機部については、デジタル信号処理部 のフライトモデル基板は完成しているが、FPGA内部に書き込むプログラムはまだ完成していない。これは、セン サからの信号が最初に入力されるアナログ回路部からの信号によりデジタル信号処理のプログラムを決定する 必要があるためである。そこで、アナログ回路部の製作をできるだけ早期に行う予定である。その後、デジタル 信号処理部と接続し、FPGAのプログラムを確定する予定である。すべてが完成したのち、観測ロケット搭載機 器をすべて持ち寄って実施される機械的な搭載状況確認試験(計器合わせ)に参加し、製作した電場計測器が 搭載可能であることを示す。計器合わせ後、単体環境試験として、真空試験、温度試験、振動衝撃試験を行い、 正常動作することを確認することを目標とする。そして、観測ロケットの総合試験に持ち込み、正常動作すること を確認し、電離圏環境下での電場データの取得を目指す。

14

2.3.1 中性粒子質量分析器パルス高圧の製作・試験

令和3年度に実施したパルス高圧の設計に続き、令和4年度には、設計したパルス高圧の製作と試験を行った。 図 2.3-1 に製作したパルス高圧の形状を示す。また、図 2.3-2 には製作したパルス高圧電源の外観写真、図 2.3-3 にはパルス高圧基板の写真を示す。



図 2.3-1 パルス高圧電源の形状



図 2.3-2 パルス高圧電源の外観写真



図 2.3-3 パルス高圧電源基板の写真

製作したパルス高圧の出力パルス波形データを含む波形データを図 2.3-4 ~ 図 2.3-13 に示す。



図 2.3-4 固定高圧出力波形 100 us/div 200V/div



図 2.3-6 入力信号 0Hz の時の出力波形 10 us/div 200V/div







図 2.3-5 高圧パルス出力波形 100 us/div 200V/div



図 2.3-7 入力信号1Hz の時の出力波形 10 us/div 200V/div



図 2.3-9 入力信号 100Hz の時の出力波形 20ms/div 200V/div



以上の測定波形から、パルス高圧が仕様要求を満たしていることを確認した。

2.3.2 中性粒子質量分析器パルス高圧+イオン源+検出器+アナライザーを組み合わせた試験 令和3年度に製作したイオン源と検出器、および令和3年度から4年度にかけ設計・製作したアナライザーと令 和4年度に製作した中性粒子質量分析器パルス高圧を、令和5年度に設計・製作する予定の電子回路部と組 み合わせた試験を実施するのに先立ち、機械的なインターフェースに問題がないかどうかを確認するための組 み合わせ試験を実施した。その結果、問題なく組み上がることを確認した。

また、令和3年度に製作したイオン源の動作に問題ないことを確認するために、イオン源を実験室の設備である、 検出器の実験室モデルとアナライザーの実験室モデルに組み込んでデータの取得を行った。図 2.3-14 に試験 の構成図を示す。真空チェンバー内にアナライザー、検出器、イオン源を真空チェンバー外に中性粒子質量分 析器パルス高圧を設置し、真空チェンバー内に CO₂ガスを導入して質量スペクトルを測定した。図 2.3-15 に測定 した質量スペクトルを示す。







図 2.3-15 二酸化炭素ガスを導入して測定した質量スペクトル

質量スペクトルのピークが、CO₂(44) O₂(32) N₂ または CO(28) H₂O(18) OH(17) O(16) N(14) C(12) H2(2) H(1)(括弧内は質量数)のところに見える。CO₂(44)はほとんどがチェンバー外から導入した二酸化炭 素ガスであり、O₂(32) CO(28) O(16) C(12) は CO₂ がイオン化された際に分子が分解したフラグメンテ ーションのピークである。N₂(28) H₂O(18) OH(17) O(16) N(14) H2(2) H(1) は真空チェンバーの壁面に吸 着していた水と窒素分子とそれらのフラグメンテーションのピークである。以上の様に二酸化炭素ガスの正常な 質量スペクトルが取得できたことから、令和3年度に製作したイオン源の動作に問題の無いことが確認できた。

2.4 イオンドリフト速度測定器の開発

令和3年度は、イオンドリフト速度測定器の試作品を、内部に電離圏プラズマ環境を生成した真空チェンバー内 に設置して、イオンエネルギー分析に関する性能を評価し、それらの結果を基に主な仕様を確定した。

2.4.1 測定器の構成

本測定器はセンサ部、プリアンプ部、ポストアンプ部より構成される。センサ部では入射するイオンによる電流を 検出し、信号がプリアンプに送られる。信号は電圧に変換された後に増幅され、マルチプレクサで束ねられてケ ーブルを通じてポストアンプへと伝送される。この信号は再びアンプにて増幅された後に定められたフォーマット にて送られるようになっている。ポストアンプではセンサ部に印加するリタ—ディング電圧の生成、測定器校正用 の CAL 電圧の生成なども行われている。図 2.4-1に測定器全体の簡単なブロック図を示す。



図 2.4-1 イオンドリフト速度測定器の全体構成

2.4.2 センサ部の構成と構造

電離圏イオン測定器のセンサ部は RPA(Retarding Potential Analyzer)部とコレクタ電極部から構成される。RPA 部では内部に配置したメッシュグリッド間に電圧を印加することでイオンのエネルギー分析を行う。電極部では2 次元的に配置した多数の単電極で得られる電流分布からイオンの到来方向を検出する。図 2.4-2 にイオン測定 器の RPA 部(左側)、電極部(右側)の写真を示す。実際には RPA 部を前面、電極部を後面にして組み上げる。 電極部で得られる電流は同軸ケーブルを介してプリアンプに送られる。

図 2.4-3 にセンサ部の断面図を示す。コレクタ電極部は半球状に設計され、内面には 72 枚の単電極が貼り付け られている。円周方向に一周 12 枚の電極が 6 列設置されており、各列の電極の表面積は異なる。72 枚のコ レクタ電極により得られる電流分布からイオンの入射角の推定を行う。電極1個の測定電流の期待値は最大 10 [nA]である。RPA 部には計6枚のメッシュグリッド電極が取り付けられるが、各メッシュの役割が図 2.4-3 の右 に示されている。G1, G5, G6 は測定器の GND に等しい電位に保ち、G2, G3 に印加するリタ—ディング電圧を制 御することによって、入射してくるイオンのエネルギー分析を行う。



図 2.4-2 イオン測定器センサ部の外観(左: PRA 部,右:コレクタ電極部)



図 2.4-3 イオン測定器センサ部の断面図

2.4.3 真空チェンバーを用いた測定器の性能確認試験の概要

測定器試作機の性能を確認するために、チェンバー内に測定器を設置して後方拡散プラズマ源を用いてプラズ マを生成、RPA 電圧を制御しながら電極により得られる電流値データを取得および解析し、イオンの温度と密 度の推定を行った。図2.4-4 に実験のレイアウトを示す。RPA 電圧を変化させた時に得られる電流値から温度お よび密度を推定する方法については、Fang and Cheng (2013)に述べられているパラメータ導出式に従った。また、 別途ラングミュアプローブを真空チェンバー内に設置し、取得したデータから導出した電子密度・電子温度の値と の比較も行った。本実験でのプラズマ源のセッティングは、グリッド電圧 VG = 40 [V]、プレート電圧 VP = 120 [V]、フィラメント電流が 120 [mA]としたが、ラングミュアプローブのデータ取得時もプラズマ源のフィラメント電流 値は 120 [mA]程度であったため、同程度のプラズマ密度において実験が行われたと考え、比較を行った。本来 であれば、イオンドリフト速度測定器とラングミュアプローブで同時にデータを取得すべきであるが、機器間の干 渉を避けるために別個に測定を行った。なお、真空チェンバー内のプラズマ密度は一様ではなく多少偏りが存在 することがわかっているため、イオン測定器とラングミュアプローブはほぼ等しい位置に置いて測定を行った。

2.4.4 測定結果

図 2.4-5 に確認試験で取得されたデータの一例を示す。①は電極で測定された電流の RPA 電圧に対する変化 である。この電流値は半球内部に設置された 72 枚全ての電極の電流値の積算値である。横軸は RPA 電圧で あり、センサに与えるオフセット電圧は 0 [V]であった。オフセット電圧を基準に 0 から+3 [V]までの電圧範囲を 22 ステップで掃引し、電圧を印加している。本実験では 0 から+3[V]までの電圧掃引を 10 回繰り返し、各電圧ステッ プの 10 個の電流値を平均して、電流値を決定した。①の赤点はこのような平均電流値を示している。図 2.4-5 の ②は、①に示した電流積算値を 3 次スプライン補間したものであり、青点が 0 から 1 [V] の RPA 電圧において取 得された電流値、赤線が 3 次スプライン近似を示している。ここでは、Fang and Cheng (2013)に述べられたイオ ンパラメータの推定方法を用いて、本測定器の取得データからイオン温度および密度を推定する。3 次スプライ ン近似した電流値を RPA の電圧で微分した値が図 2.4-5 の③に示した赤線である。この近似したデータに対し、 イオン密度や温度の関数として表される理論式を用いて最小二乗法によりフィッティングを行い、イオン温度とし て 954 ± 241 [K]、イオン密度として 5.14×103 ± 0.613×103 [cm⁻³]を得た。

次に、本実験と同じプラズマ生成条件(プラズマ源のグリッド電圧とプレート電圧、フィラメント電流およびガス圧) で、ほぼ同程度の密度と予想される環境のプラズマを生成し、ラングミュアプローブにより電圧電流特性を取得 し、電子密度と電子温度を推定した。この際、プローブへの印加電圧は振幅 3 [V]の三角波であり、周期は 125 [msec]とした。取得されたデータから、電子温度は 1386[K]、電子密度は 7.39 × 104 [cm⁻³]と推定され、イオン温 度より約 400 [K]大きく、イオン密度より 1 桁大きい結果となった。温度に関しては完全熱平衡が成り立たない場 合には電子温度が高くなる傾向にあり妥当と言えるが、密度に関しては約 10 倍以上の差があるため、原因につ いて考察を行うこととした。

22



図 2.4-4 実験のレイアウト図



図 2.4-5 電流積算値の平均値(①), 測定値(青点)および 3 次スプライン補間(赤線)(②), 3 次 スプライン補間(赤線)および理論値(紫線)(③)

推定されたイオン密度と電子密度に大きな差が生じた原因としては次の4つの可能性が考えられる。

- 1) Fang and Cheng (2013)では1次元のイオンの運動を仮定して式を導いているのに対し、本測定では斜めから 入射したイオンも電流に寄与していること
- 2) センサ RPA 部のメッシュグリッドに衝突、あるいはクーロンカで吸収されるイオンが存在するため、電極に到 達するイオンが減少してしまう効果
- 3) コレクタの単電極間を仕切る部分の面積のために、RPA部の全てのメッシュグリッドを通過しても電極に到達 しないイオンが存在すること
- 4) 3 次スプライン近似を行う際の誤差の影響

特に 2),3)については影響が大きいと思われるが、これらは推定されるイオン密度を過小評価することに直結するため、イオン測定とラングミュアプローブ測定の間の差を生じた主因である可能性が高いと思われる。

2.4.5 まとめと測定器の仕様

上に述べたように本年度は電離圏イオンドリフト速度測定器の試作品を用いてその基本性能の評価を行った。 真空チェンバー内に電離圏プラズマの状態に近い密度と温度をもつプラズマを生成し、内部に本測定器を設置、 イオンを測定器に流入させてデータを取得した。測定データからイオン電流・密度を推定する方法を確立し、イオ ン温度として 954±241[K]、イオン密度として 5.14×103±0.613×103[cm⁻³]を得た。同一の条件で内部にプラズ マを生成し、ラングミュアプローブで取得した電流電圧特性から電子温度と電子密度を求めたところ、それぞれ 1386[K]、7.39×104[cm⁻³]という値が得られた。両者を比較すると、電子温度はイオン温度よりも約400K高く、電 子密度はイオン密度よりも約10倍大きいという結果になったが、前者は電子とイオンが完全熱平衡状態に無い こと、後者は RPA 部メッシュグリッドの透過率の影響および電極部の有効面積が100%では無いことに原因があ ると考えられる。

このようにイオンドリフト速度測定器による取得データは、ラングミュアプローブによる電子の測定値と異なるものの、その差については十分な根拠のある原因により説明が可能であり、イオンの特性に表す物理パラメータを推定可能であるとの結論を得た。これらの結果を考慮して、測定器に求められる主な仕様を次のように確定した。

- 1) プリアンプ部
 - A) I-V変換回路部
 - ・測定電流: 電極1個あたりの電流期待値は最大 10 nA とする
 - ・利得:10 倍
 - ・電流検出においては、DCモード、およびACモードを設ける
 - B) 電圧印加部

・機器の正常性を定期的に確認するための CAL 電圧として 60 秒に1回 0.5 秒間 2.5V を出力すること ・ポストアンプ部から受ける Suppress, offset, retarding 電圧をセンサ部メッシュに印加できるようにする

- 2) ポストアンプ部
 - A) アンプ回路

・電圧利得は低および高の2種類を用意し、利得はそれぞれ2倍、30倍とすること。

- B) A/D変換部
- ・36 チャンネルをマルチプレクサで切換え、順次 A/D 変換を行う。入力は 0~5 V
- C) 印加電圧生成部
 - ・センサ部グリッドG1~6へ印加する電圧を以下の通り生成すること
 - G1: GND 電位
 - G2: 0.0~4.0Vの範囲で100ステップの三角波電圧を印加。三角波の周期は0.5秒
 - G3: G2と同電位(G2、G3に印加する電圧に関してはDCとACモードの2種類を用意する)
 - G4, G5: GND電位
 - G6: -5V(コマンドにて設定可能であること)
 - 但し、G1, G2, G3, G4, G5 には-5.0~+5.0V の共通のオフセット電圧を与えられること。
 - ・DCモードとACモードは併用するが、実行シーケンスについては FPGA への書き込みによって変更が可能な回路構成にすること。
- D) コントロール回路
 - ・電圧掃引上昇(0.0~4.0V)時に 100 の電圧ステップに得られた各電極の電流データに、HKデータを 付加してテレメータに出力する。掃引下降(4.0~0.0 V)時も同様とすること。
 - FPGA

リターディング電圧の設定を FPGA への書き込みにより設定すること。

E) 電源部

外部から+28V の電源供給を受けて、DC/DC コンバータにより次の電圧を生成すること。 +5V(ロジック)、+15V(アナログ)、-15V(アナログ)

3) インタフェース要求

<u>プリアンプ部</u>

(1) センサ部との I/F

センサ部の電極 36 枚の入力用として D-Sub 25 ピンケーブル3本、センサ部に与えるオフセット電圧、 リタ—ディング電圧の印加電圧設定用に D-Sub9ピンコネクタを1本、設けること。

(2) ポストアンプ部との I/Fポストアンプ部との通信用に D-Sub25 ピンケーブルを用いるため、コネクタを1個用意すること。

<u>ポストアンプ部</u>

- (1) プリアンプ部との I/F
 プリアンプ部の(2)に述べた通り
- (2) TLM 出力 観測ロケットテレメトリインタフェース装置に準拠した信号出力を D-Sub9 ピンコネクタに対して行う
- (3) FPGA 書き込み用 I/FFPGA に対して書き込みを行うための I/F を設けること

3 まとめ

令和 4 年度に、磁場計測器、電場計測器、中性粒子質量分析器、イオンドリフト速度測定器の各機器の開発を 以下のように実施した。

①磁場計測器の開発

当該年度は、前年度の検討・開発結果をもとに基本波型直交フラックスゲート(FM-OFG)磁場センサを用いた磁 カ計の試作を行い、性能の評価を行った。ASIC 未搭載のディスクリート試作回路について、ノイズレベル、感度、 線形性誤差、経時安定性の評価を行い、ASIC 回路の比較評価及びバックアップとして、十分な性能を持つこと を確認した。並行して、令和 3 年度に製作した ASIC チップの特性評価を行った。目標とするレベルまでノイズを 下げるためには CMOS スイッチ群のチャネル面積を大きくし、オフセットを低減するためには、積分器に OP160 を用いる必要があることがわかった。この結果に基づき、2 回目の ASIC チップの製作を行った。

②電場計測器の開発

当該年度は、伸展機構を含めたセンサの試作を行い、真空環境下でセンサが伸展することを確認した。また、電場計測器の信号処理部の電気回路を設計し、試作・試験を行った。

③中性粒子質量分析器の開発

当該年度は、令和3年度に設計したパルス高圧の製作と試験を行った。製作したパルス高圧の波形データを調 査し、パルス高圧が仕様要求を満たしていることを確認した。また、3回反射型アナライザー部の製作を完了し、 パルス高圧電源、イオン源、検出器との機械的組み合わせ試験を実施した。また、令和3年度に製作したイオン 源を実験用検出器・アナライザーに組み込んで質量データの取得を行った。正常な質量スペクトルが取得でき、 イオン源の動作に問題の無いことが確認できた。

④イオンドリフト速度測定器の開発

当該年度は、内部に電離圏プラズマ環境を模擬した真空チェンバー内に試作品を設置して、測定器のイオンエ ネルギー分析に関する性能を評価し、主な仕様を確定した。真空チェンバー内に電離圏プラズマの状態に近い 密度と温度をもつプラズマを生成し、内部に測定器を設置、イオンを測定器に流入させてデータを取得した。測 定データからイオン電流・密度を推定する方法を確立した。結果を考慮して、測定器に求められる主な仕様を定 量的に確定した。

学会等発表実績

委託業務題目「周回衛星による月・惑星起源粒子計測パッケージの開発」 機関名 京都大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果(発表題目、ロ	発表者氏名	発表した場所	発表した時期	国内・外
頭・ポスター発表の別)		(学会等名)		の別
将来の月惑星探査小型機器	松岡彩子,齊	熊本	2022 年 11 月 2	国内
開発と観測ロケットによる実証	藤昭則,齋藤	(第 66 回宇宙科学技術	日	
実験(口頭)	義文,阿部琢	連合講演会)		
	美,石坂圭吾,			
	小嶋浩嗣,栗			
	田怜,村田直			
	史,中田雅彦,			
	米田匡宏			
電離圈観測用中性大気質量	米田 匡宏,齊	相模原	2022 年 11 月 6	国内
分析器の開発(ポスター)	藤 昭則, 齋藤	(地球電磁気·地球惑星	日	
	義文	圏学会 第 152 回講演		
		会)		
観測ロケット搭載用電離圏イ	阿部 琢美、渡	相模原(宇宙科学に関	2023 年 2 月 28	国内
オンドリフト速度測定器の開	部重十、斉藤昭	する室内実験シンポジ	H	
発(口頭)	則、松岡彩子	ウム)		

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

該当なし

(注)発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること。