

令和 3 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 4 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3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	当該年度における委託業務の結果概要.....	2
2	実施内容.....	3
2.1	磁場計測器の開発.....	3
2.1.1	集積回路への置換とシミュレーションによる最適化.....	3
2.1.2	小型センサの検討と試作.....	7
2.2	電場計測器の開発.....	9
2.2.1	電場計測用センサの仕様決定.....	9
2.2.2	電場計測器の評価モデルの開発.....	11
2.2.3	今後の課題と来年度に向けての設計・試作方針.....	12
2.3	中性粒子質量分析器の開発.....	14
2.3.1	中性粒子質量分析器イオン源の製作.....	14
2.3.2	中性粒子質量分析器検出 MCP の製作.....	14
2.3.3	中性粒子質量分析器パルス高圧の設計.....	14
2.3.4	3回反射アナライザーの設計・製作.....	16
2.4	イオンドリフト速度測定器の開発.....	19
2.4.1	測定器の基本構成.....	19
2.4.2	測定器センサ部.....	19
2.4.3	数値シミュレーションの実施.....	20
2.4.3.1	シミュレーションの方法.....	20
2.4.3.2	イオン入射方向の推定.....	22
2.4.3.3	イオンドリフトエネルギーの推定.....	22
2.4.3.4	イオン温度の推定.....	23
2.4.4	仕様の決定.....	25
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3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)性能を持つことを確認することと、小型センサが良好な特性を持つことを確認することである。実施する内容は、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とともに、小型センサの試作を行い、構造や製作方法の調整を行う。

### 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。

当該年度の目標はセンサの仕様(素材、伸展機構)を決定し、電場-磁場同期計測原理を確立することである。実施する内容は、センサの仕様決定と基本設計、電場-磁場同期計測の原理試作を行い、計測回路を設計する。

### 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(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、N<sub>2</sub>、NO、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 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の設計を行い製作を開始し、イオン源、検出器の製造を完了することである。実施する内容は、イオン化した中性粒子の飛行を開始するためのパルス高圧を設計・製作する。

#### 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。

当該年度の目標は全重量 3.5kg 以内で測定器の基本設計を固め、試作に着手することである。実施する内容は、予想される測定環境に最適な測定器センサ部と回路部を設計、試作を開始する。

### 1.3 当該年度における委託業務の結果概要

令和3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

当該年度の目標は集積回路(ASIC回路)に置き換え後も従来回路と同様(周波数特性)性能を持つことを確認することと、小型センサが良好な特性を持つことを確認することであった。実施した内容は、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とともに、小型センサの試作を行い、構造や製作方法の調整を行った。

#### ②電場計測器の開発

当該年度の目標はセンサの仕様(素材、伸展機構)を決定し、電場-磁場同期計測原理を確立することであった。実施した内容は、センサの仕様決定と基本設計、電場-磁場同期計測の原理試作を行い、計測回路を設計した。

#### ③中性粒子質量分析器の開発

当該年度の目標はパルス高圧電源の設計を行い製作を開始し、イオン源、検出器の製造を完了することであった。実施した内容は、イオン化した中性粒子の飛行を開始するためのパルス高圧を設計・製作した。

#### ④イオンドリフト速度測定器の開発

当該年度の目標は全重量 3.5kg 以内で測定器の基本設計を固め、試作に着手することであった。実施した内容は、予想される測定環境に最適な測定器センサ部と回路部を設計、試作を開始した。

## 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。令和 3 年度は、これまでディスクリートなアナログ回路で実現していた電気回路を集積回路(ASIC 回路)に置き換え、従来回路と同様の性能を持つことを確認することと、小型センサが良好な特性を持つことを確認することであった。

#### 2.1.1 集積回路への置換とシミュレーションによる最適化

図 2.1-1 に本開発のベースとなる FM-OFG ピックアップ回路の回路ブロック図を示す。FM-OFG はセンサ部で外部磁場成分を励磁周波数と同一の基本波  $f_0$  で変調する。このときピックアップコイルに発生する誘起電圧は、微弱信号であるため増幅部で交流増幅する。その後、不要な 2 次以上の周波数成分と増幅部での出力 DC

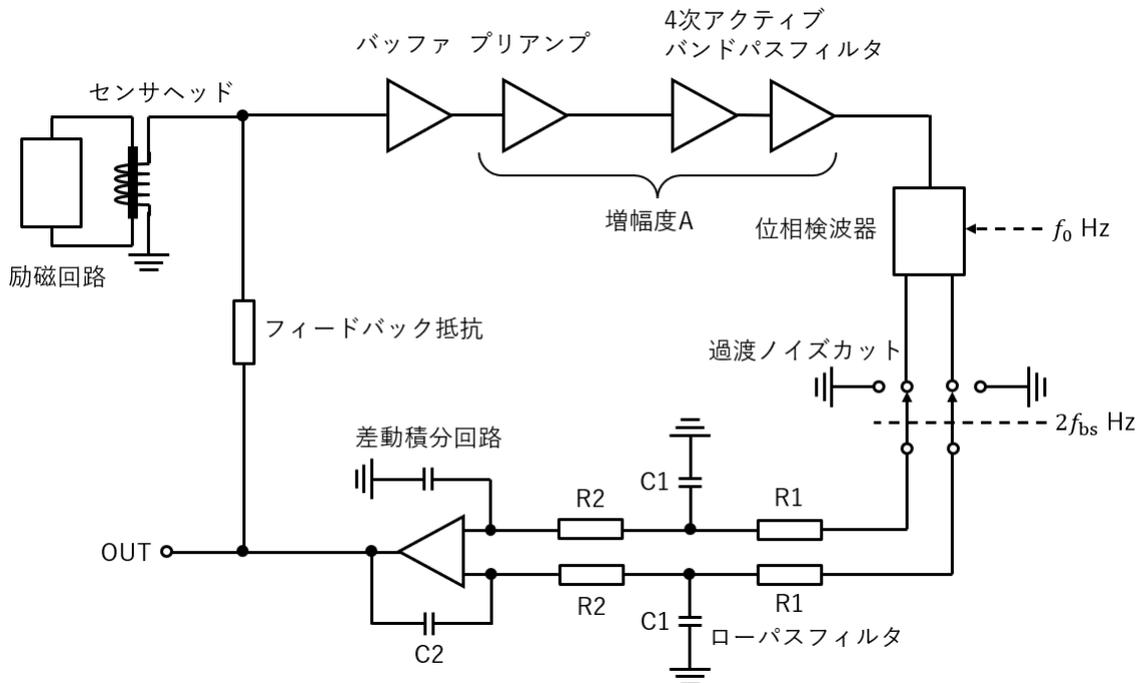


図 2.1-1 本開発のベースとなる FM-OFG ピックアップ回路の回路ブロック図

オフセット成分を落とすために、4 次のアクティブバンドパスフィルタに通している。そして外部磁場成分を持つ基本波  $f_0$  を、位相検波器とローパスフィルタにより直流電圧に変換する。このとき位相検波器にはアナログスイッチを用いている。位相検波後に過渡ノイズカットというブロックが入っている。これはバイアススイッチングに伴う過渡的な雑音を低減するためである。この雑音は短時間に現れるため、極性反転の過渡部分を GND 電位に落とすことで、雑音特性を改善することができる。本開発ではバイアススイッチングに同期した 2 倍周波数 ( $2f_{bs}$ ) の参照信号で、GND と位相検波後の信号を交番通過させることで実現している。更に、磁気異方性に起

因するオフセット波形をバイアススイッチングにより相殺・平滑化する。ローパスフィルタ後の直流に変換された信号は、外来する同相ノイズを効果的に除去するために差動積分器に通す。その出力により、センサ部磁性体が感知するコア長軸方向外部磁場をキャンセルするようフィードバックコイルにフィードバック電流をかける。フィードバックをかけることにより、センサに用いられる磁性体の持つ B-H 特性の良好な部分を利用して外部磁場を検知させ、測定精度の向上がはかれる。積分器の出力電圧範囲とフィードバック抵抗値によってキャンセルできる磁場範囲、すなわち測定レンジが決定する。そのため、フィードバック抵抗の値を測定用途や使用局面に合わせて変更することで、センサのダイナミックレンジを変更できる。

各回路ブロックの集積回路への置換と最適化を以下の様を実施した。

(a) オペアンプ

本開発ではバッファ、プリアンプ、4次バンドパスフィルタ、差動積分器のいずれの回路においてもオペアンプを軸に構成した。CMOS オペアンプの各種特性をシミュレーションで明らかにし、使用可能な3種類のオペアンプ候補 (OP4, OPRtR, OP160) から FM-OFG 用途に適したオペアンプを選択した。OP4 の特徴は占有面積が小さく、高速動作を重視したオペアンプ、OPRtR は rail-to-rail 動作を重視したオペアンプ、OP160 は入力差動対の MOS チャネル幅を大きくし、低ノイズを重視したオペアンプである。オペアンプの特性比較には、オープンループゲイン、同相信号除去比(CMRR)、ノイズ特性、オフセット電圧の項目を用いた。

シミュレーションの結果、いずれのオペアンプも、本開発の FM-OFG 励磁周波数( $f_0$ ) 76 kHz の基本波を交流増幅するに十分な帯域幅を持っていることが分か

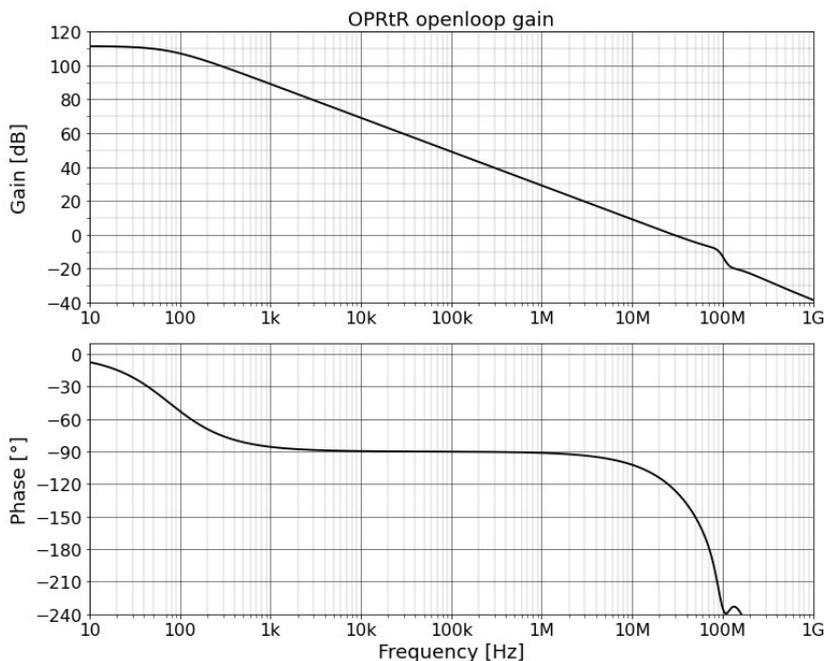


図 2.1-2 OPRtR のオープンループゲインボード線図

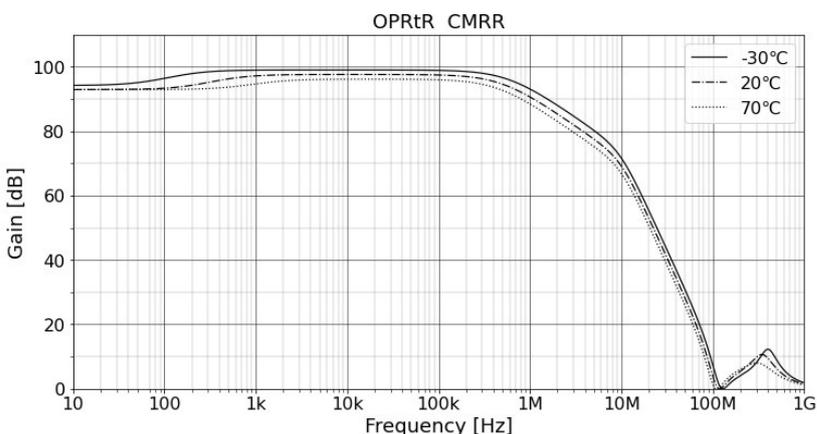


図 2.1-3 OPRtR 同相信号除去比 (CMRR) の温度変動シミュレーション

った。図 2.1-2 に、最終的に採用した OPRtR のボード線図を示す。各オペアンプの CMRR とその温度依存に関するシミュレーション結果の比較から、OPRtR の CMRR が最も大きく高周波領域までフラットに伸びていることが分かった。図 2.1-3 に、OPRtR のシミュレーション結果を示す。

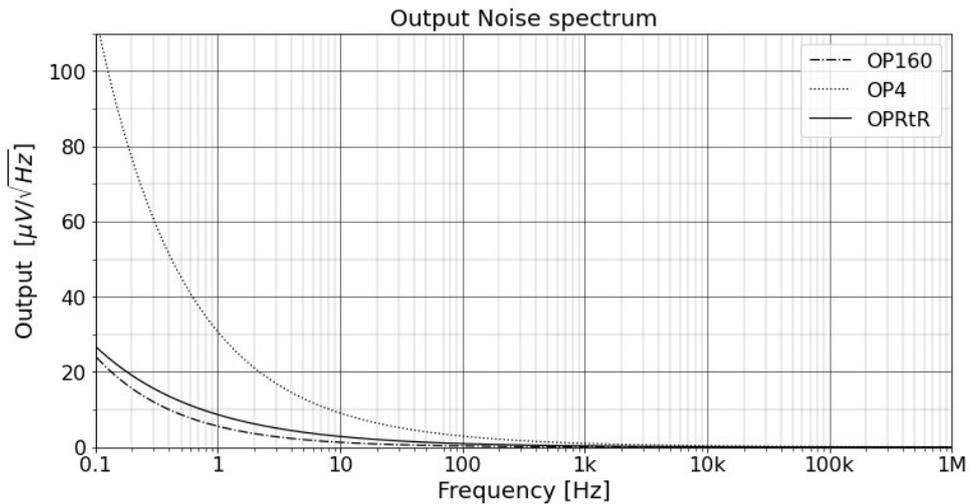


図 2.1-4 OP4, OPRtR, OP160 の各オペアンプノイズ特性

各オペアンプのノイズス

ペクトル密度を図 2.1-4 に示す。OP4 では高速動作を重視して MOS サイズが全体的に小さく設計されており、1/f の周波数特性を持つフリッカ雑音が他と比較して大きいことが分かる。OP160 と OPRtR は同程度のノイズ特性を持つが、OP160 の方がややノイズ特性に優れることが分かった。

表 2.1-1 OP4, OPRtR, OP160 の各オペアンプのオフセット電圧値と温度変動

	-30 °C	20 °C	70 °C
OP4	710 $\mu$ V	635 $\mu$ V	538 $\mu$ V
OP160	349 $\mu$ V	232 $\mu$ V	130 $\mu$ V
OPRtR	-117 $\mu$ V	-137 $\mu$ V	-163 $\mu$ V

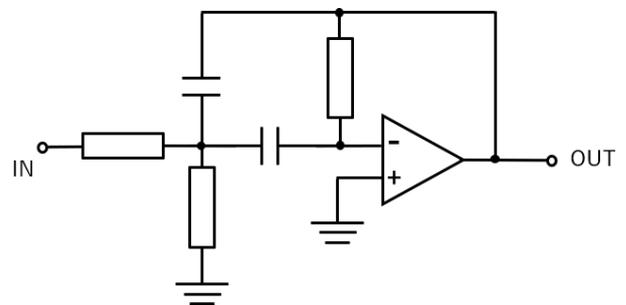


図 2.1-5 多重帰還型バンドパスフィルタ

オペアンプの DC オフセット電圧をシミュレーションした結果を表 2.1-1 に示す。これからわかる通り、OP4 はオフセット電圧の絶対値が最も大きく、OPRtR が最も小さい。また温度変動を考慮しても OPRtR の安定性が最も高いことが分かった。

本年度の ASIC チップ試作では、上記シミュレーション結果を総合的に考慮し、オペアンプには OPRtR を選択した。

(b) バンドパスフィルタ

本開発では、図 2.1-5 に示す多重帰還型 2 次バンドパスフィルタを二つ縦続接続し、4 次バンドパスフィルタを構成した。中心周波数は励磁周波数  $f_p = 76 \text{ kHz}$  となるよう回路パラメータを設定した。

多重帰還型 2 次バンドパスフィルタを縦続接続した 4 次バンドパスフィルタの周波数特性シミュレーション結果を図 2.1-6 に示す。中心周波数  $f_p = 76 \text{ kHz}$  で、減衰特性  $40 \text{ dB/dec}$  を持つことが確認できる。また温度変動は少なく無視できることも確認できた。

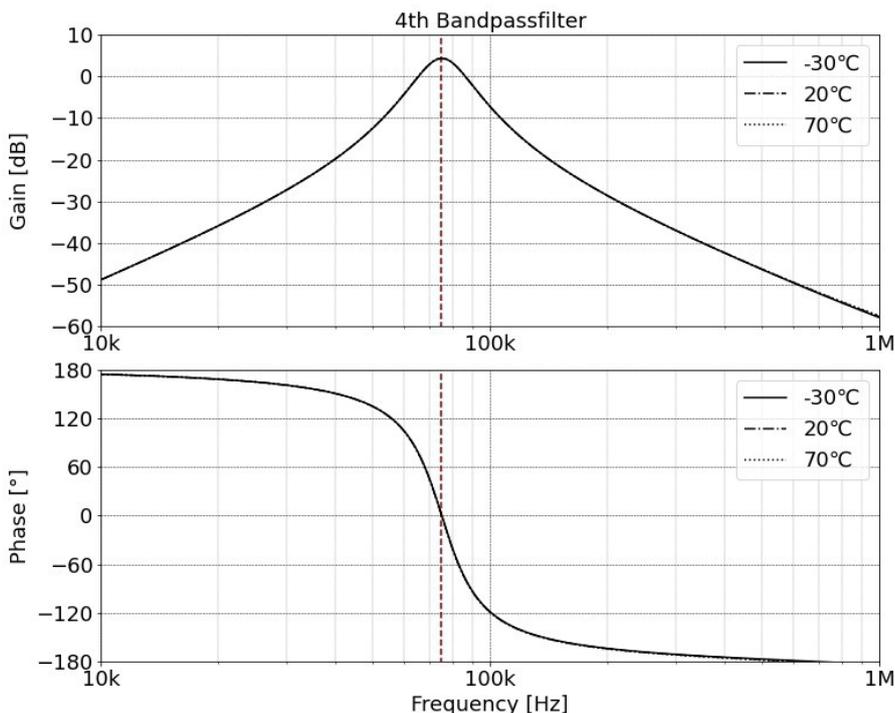


図 2.1-6 4 次バンドパスフィルタの周波数特性シミュレーション(赤破線:励磁周波数 76 kHz)

(c) 位相検波と過渡ノイズカット

本開発では ASIC 内で位相検波と過渡ノイズカットを実現するために、CMOS アナログスイッチを用いて構成し

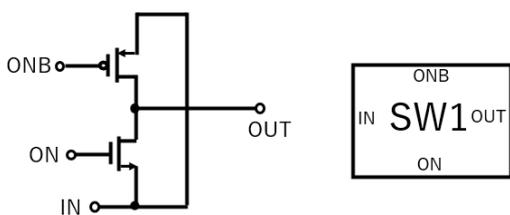


図 2.1-7 トランスミッションゲート回路

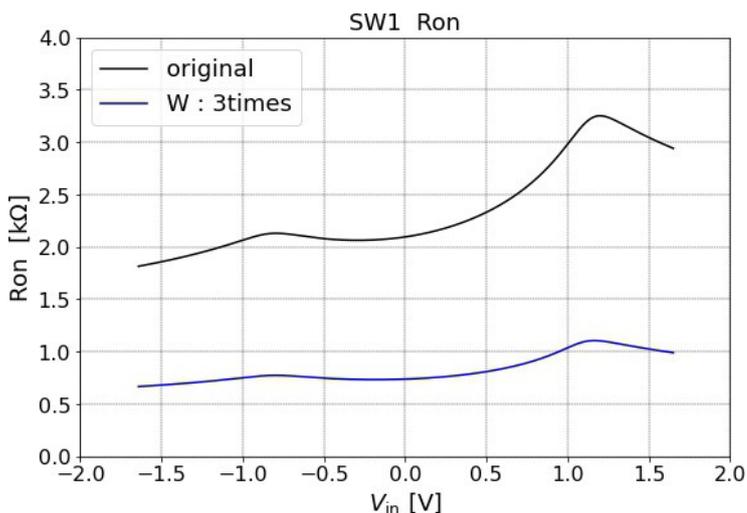


図 2.1-8 トランスミッションゲート回路のオン抵抗シミュレーション(青線:オン抵抗低減のために各 MOS のチャンネル幅を 3 倍に変更)

た。図 2.1-7 に CMOS アナログスイッチの基本回路を示す。

スイッチの性能を測る指標で重要なものにオン抵抗がある。信号損失と伝搬遅延を小さく抑えるため、スイッチのオン抵抗は可能な限り低いことが望ましい。オン抵抗を低減するため、NMOS, PMOS のチャンネル幅をそれぞれ 3 倍に設定し、更に、NMOS, PMOS 間のミスマッチを低減し直線性を改善するために、PMOS のチャンネル幅をさらに 1.4 倍にした。この時のオン抵抗シミュレーション結果を図 2.1-8 に示す。NMOS, PMOS 間のミスマッチが改善され、入力電圧に対する変動も  $100 \Omega$  以下に抑えることができた。

上記のように ASIC の各回路ブロックの最適化を行い、ASIC 回路を設計して、ASIC チップの製造を行った。図 2.1-9 は製造した ASIC チップのレイアウトである。図 2.1-1 で示されるピックアップ回路のブロック図の 3 チャンネル分が、5mm 角のチップ内に実現されている。

### 2.1.2 小型センサの検討と試作

FM-OFG センサの、宇宙機搭載品としての開発を行った。FM-OFG センサは細長いアモルファス磁性体のワイヤコアに検出コイルを巻回する簡素なセンサ構造を有し、小型・軽量化に適する。これまでの開発研究ではアモルファスワイヤコアの支持母材としてガラスエポキシを用いていたが、宇宙機への搭載のために耐熱性や機械的特性に優れた、ポリエーテルイミド

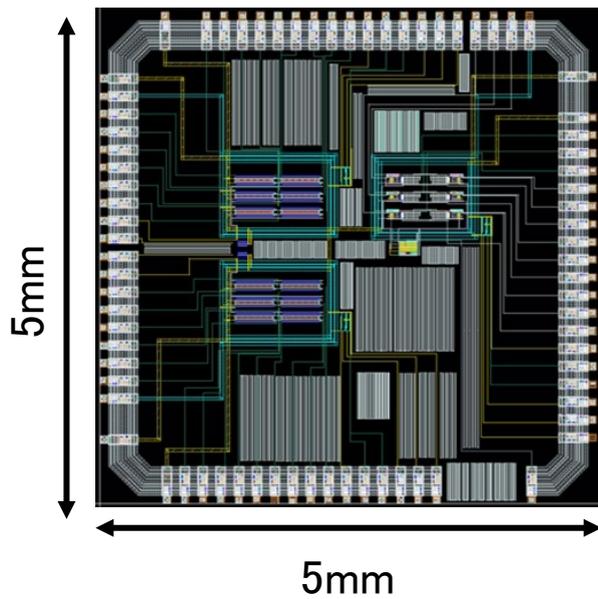


図 2.1-9 開発した基本波型直交フラックスゲート用アナログ ASIC レイアウト

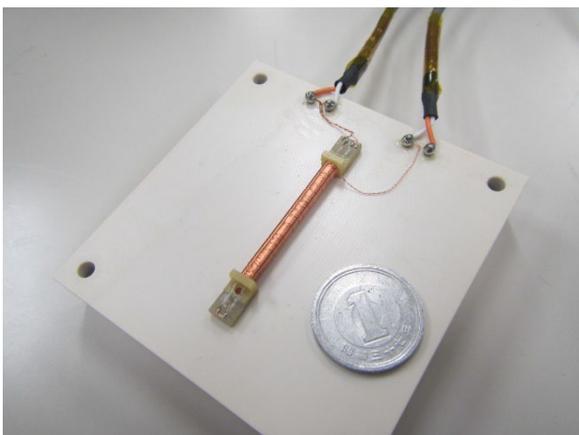


図 2.1-10 試作した 1 軸の FM-OFG センサ

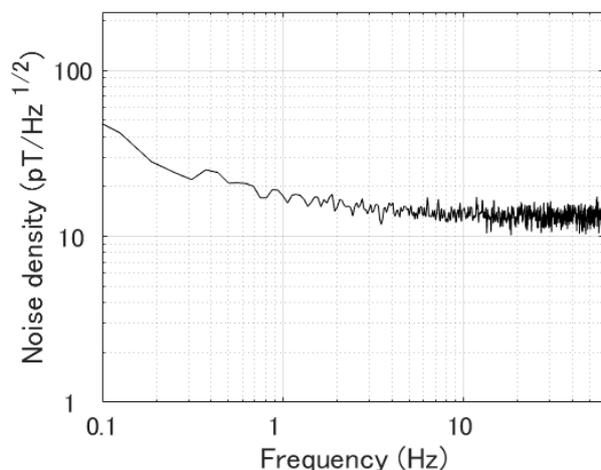


図 2.1-11 FM-OFG センサのノイズスペクトル

(PEI)を用いるとともに、小型軽量の優位性を保持しながら機械環境に耐えうる構造と製造方法を検討した。

図 2.1-10 は試作した1軸のセンサの写真である。耐機械環境性のためにアモルファスワイヤコアを固定するための接着剤と接着方法、アモルファスワイヤコアの端の部分の表面処理とはんだ付け方法、アモルファスコアのアニール(熱処理)方法等を検討した。試作したセンサのノイズ特性を評価し、製造方法の最適化を進めていった。図 2.1-11 はノイズスペクトルの一例であり、月や惑星周辺の宇宙空間環境計測のために十分な低ノイズ特性を示している。

## 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。

令和3年度は、電場計測用センサについては、センサの素材や長さなどの部材の仕様について検討した。電場計測器の受信部分については、これまでのアナログ方式の受信機からデジタル方式の受信機に変更可能であることを確認した。以下に具体的に説明する。

### 2.2.1 電場計測用センサの仕様決定

今回開発する電場計測用のセンサは、将来の月・惑星探査小型衛星への搭載を視野に小型軽量化を重視して開発する。特に将来の月・惑星探査小型衛星は衛星がスピンしない3軸姿勢制御型の衛星が計画されている。そのため、センサの伸展機構については、これまでのスピンによる遠心力を利用したものではなく、自己伸展力もしくはモータで送り出す方式を採用する。また、センサを構成するブーム部分については、高剛性でかつ軽量の素材が必要である。

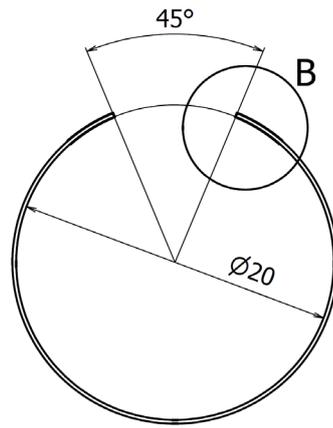
令和3年度は、電場計測用センサのブーム部分に高剛性の炭素繊維素材を用いることができるか検討した。炭素繊維素材は、きわめて軽量で剛性の高い素材であることから、形状を工夫することによって、棒状の形状を作成することが可能である。炭素繊維素材を用いた電場計測用のセンサの検討については、サカセ・アドテック株式会社の協力を得て進める。サカセ・アドテック株式会社は、炭素繊維素材を用いた観測ロケット搭載用の電場観測センサを開発した実績があり、宇宙空間における展開構造物に関する研究開発に取り組んでいる企業である。そこで、令和3年度は、サカセ・アドテック株式会社で製造可能な2種類の伸展構造物を試作し、次年度の伸展機構を開発可能であるか検討を行った。

図 2.2-1 は、双安定性ブームと呼ばれるものであり、図 2.2-1(a)の外観図をみると筒状ではなく一部が開いており、図 2.2-1(b)の断面寸法図のようになっており、開口角は $45^\circ$ である。図 2.2-1(b)図中のBの部分の端面はフッ素系のPTFEテープで保護されている。

図 2.2-2 は、TPU結合ブームの試作品の外観と断面寸法図である。TPU結合ブームは、半円型のブームを突合せ、TPU(Thermoplastic Polyurethane(熱可塑性ポリウレタン))で結合している。ここで、TPUは、柔軟性を持ち合わせており、加工がしやすいという特徴を持つ。なお、TPU結合ブームは閉断面となっている。



(a) 外観

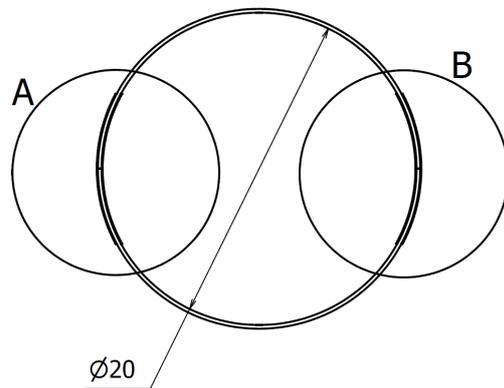


(b) 断面寸法図

図 2.2-1 双安定性ブーム試作品



(a) 外観



(b) 断面寸法図

図 2.2-2 TPU 結合ブーム試作品

今回、試作した双安定性ブームおよび TPU 結合ブームは、どちらもブーム素材は炭素繊維のバイアスクロスという織物である。また、断面の寸法は直径 20 mm である。双安定性ブームの長さは 3 m、重さは 45 g(15 g/m) である。一方、TPU 結合ブームの長さは 2 m、重さは 39 g(18.5 g/m) である。重さについては、炭素繊維を使用していることから、きわめて軽量なものとなっている。ここで、TPU 結合ブームの長さについては、製作用の治具が 2 m までしか対応できないため、ブーム長が 2 m となった。両者を比較すると、閉断面となっている TPU 結合ブームの方が高剛性であるが、折り曲げ角が大きくなるため、収納する際に巻き付けるドラム径が大きくなり、収納ケースが大きくなってしまふ。一方、双安定性ブームについては、開断面となっているため、TPU 結合ブームよ

りも剛性は弱い、宇宙空間では十分自立する剛性をもつ。また、収納時に1枚の板状になるため、巻き付けるドラム径を小さくできるというメリットがある。これらの結果から、本研究開発では、双安定性ブームを用いた電場計測用センサを検討することにする。

次に、伸展機構について検討を行った。伸展については、モータ等による伸展する機構を検討する。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する。これは、ブームを伸展させる際に使用するスプロケットと呼ばれる歯車状の部品を使用し、この穴を歯車に噛ませて伸展させる機構を検討するためである。令和4年度において、双安定性ブームを用いた伸展機構について、詳細に検討することを計画している。

## 2.2.2 電場計測器の評価モデルの開発

これまで観測ロケットに搭載する場合は、センサからの信号はアナログ回路で処理されて、PI-Avioに入力され、PI-AvioのA/D変換機(ADC)でデジタル化されていた。そこで、電場計測器内部にADCを配置し、センサからのデータを同時サンプリングすることができることを確認する。そして、A/D変換されデジタル化されたデータは、FPGAを用いた信号処理を施し、デジタルデータとして出力される。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ようにする。

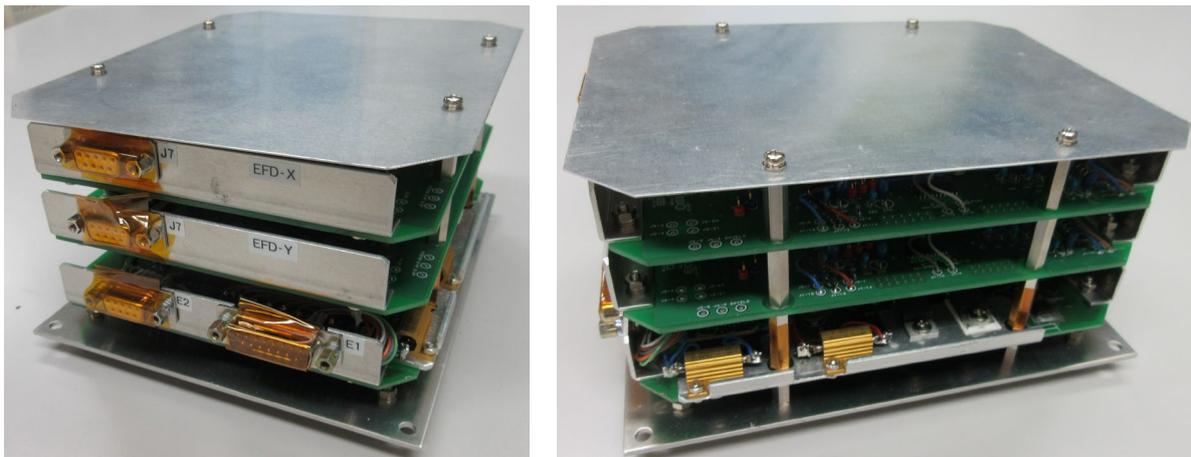


図 2.2-3 電場計測器のデジタル信号処理部の評価モデル外観

今年度の研究開発では、電場計測器のデジタル信号処理部についての原理試作を行い、これまで出力していた観測データを同時サンプリングしてFPGAで処理することができるか確認する。図 2.2-3 は、これまで観測ロケットに搭載していた電場計測器の出力をデジタル出力すること確認する電場計測器のデジタル信号処理部の評価モデルの外観である。今回は、信号の評価を行うモデルであるため、筐体に回路基板を収納せず、簡単に基板にアクセスできるようになっている。また、基板間を結合するハーネスも長いものを製作し、基板を重ねることなく、基板ごとに信号を確認できるようにした。図 2.2-4 は、基板ごとの写真である。図 2.2-4(a)は、X成分、Y成分のアナログ信号処理部の基板であり、同じ構成となっている。プリアンプからの信号は、この基板に入力され、

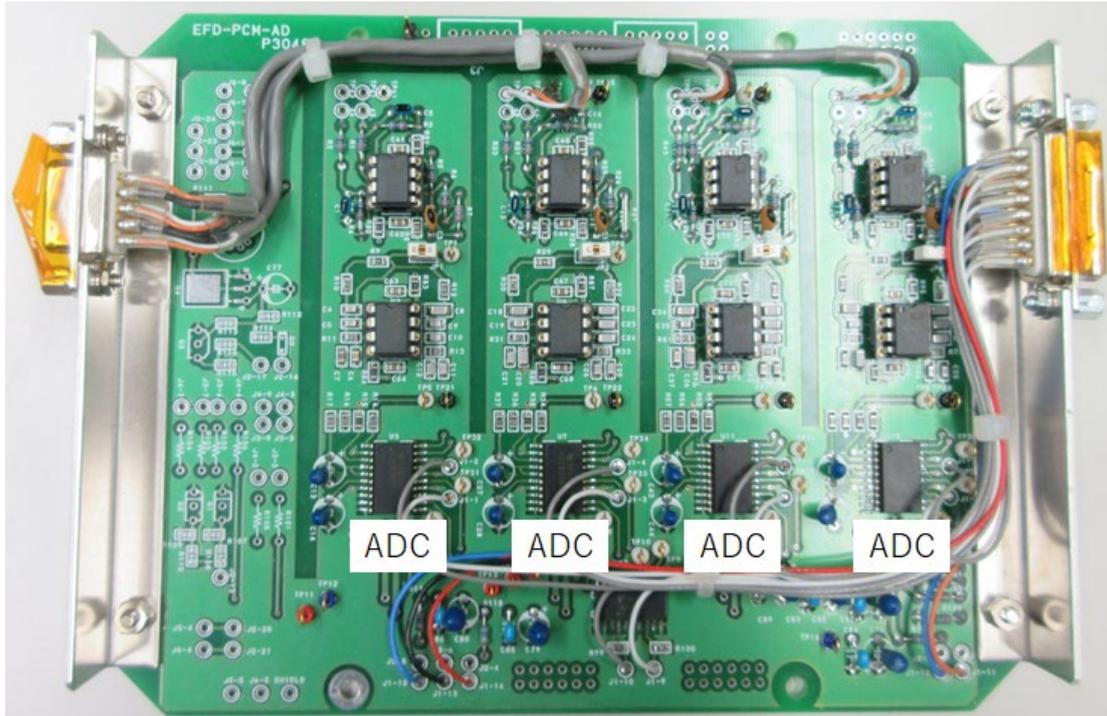
低域通過フィルタ回路を経て、観測出力ごとに ADC によってデジタル信号に変換される。デジタル信号に変換された信号は、図 2.2-4(b)のデジタル信号処理基板に送られる。デジタル信号処理基板では、FPGA にて観測仕様合うように信号処理され、シリアル通信できるように出力を編集して送出される。なお、本研究開発では、AMD 社 Xilinx 製の FPGA を使用した。この FPGA は観測ロケットの搭載機器としての実績がある。そのため、開発環境が整っているため、FPGA プログラムの開発や FPGA の書き込みに関するノウハウがあるため開発時間の短縮が可能となる。

令和 3 年度については、電場計測器のデジタル信号処理部の評価モデルの製作において、半導体の納期が遅れたことなどから、評価モデルの納入が遅れてしまった。そのため、最低限の動作確認を行うことができたが、FPGA にインストールしたプログラムは、基本的な低域通過フィルタのプログラムおよび FPGA に入力された信号を観測ロケット搭載機器仕様のデジタルデータ出力に編集するプログラムを搭載することになった。ただし、評価モデルが製作されたことにより、FPGA プログラムの開発などを行うことが可能となり、磁場観測装置との観測タイミングの同期について検討することが可能となった。そのため、最適な低域通過フィルタの開発やデジタルデータの出力に関しての最適化プログラムなどを検討し、FPGA にインストールして動作確認をする環境が整った。

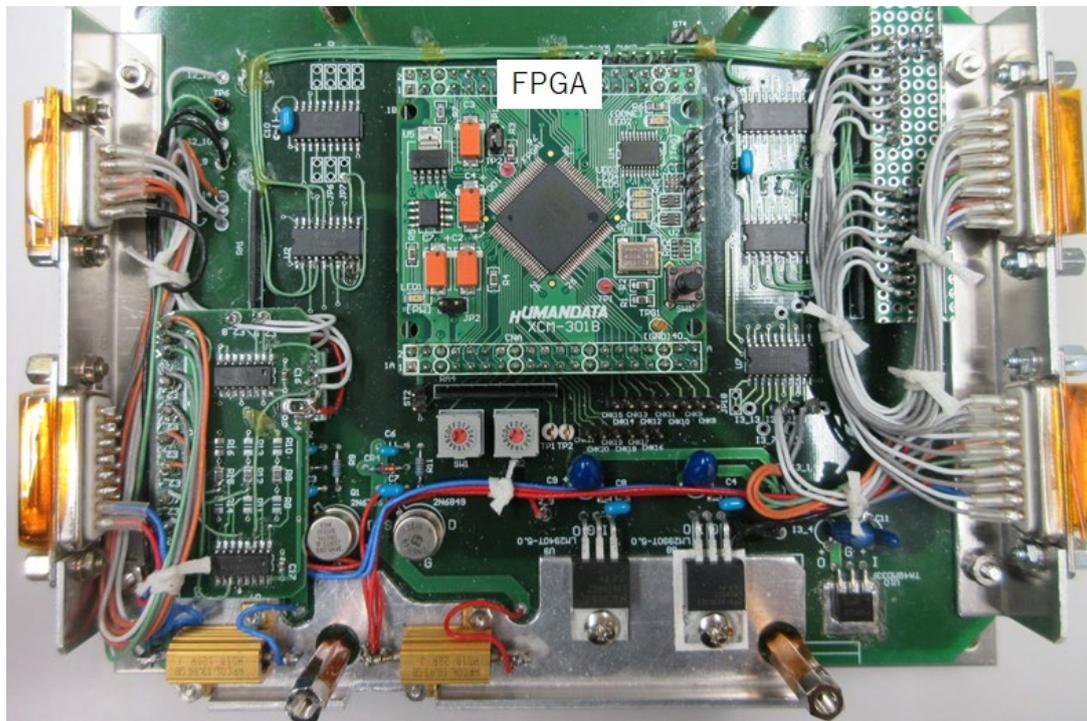
### 2.2.3 今後の課題と来年度に向けての設計・試作方針

令和 3 年度は、電場計測用のセンサのブーム素材について、衛星および観測ロケットに搭載可能なブームの候補として双安定性ブームおよび TPU 結合ブームの 2 種類のブームの検討を行った。その結果、ブーム重量、ブーム製造に関する制約、伸展機構の大きさなどを総合して判断すると、双安定性ブームを使用することが良いということになった。そのため、令和 4 年度に、双安定性ブームを用いた伸展機構の設計を予定している。

電場計測器の受信機部分については、デジタル信号処理の評価モデルを製作した。この評価モデルを使用することにより、FPGA でデジタル信号処理の評価検討を行うことが可能となった。令和 3 年度については、基本的なデジタル信号処理をインストールし、動作確認を行うことができた。令和 4 年度は、評価モデルを用いて FPGA の信号処理部のプログラム開発を行う、特に磁場観測とのサンプリングのタイミングを合わせる方法について検討する。そして、出力される信号に関して最適な低域通過フィルタの設計、および電場計測器から出力信号についての最適な送出パケットの設計を行う。並行して令和 4 年度には、搭載用の電場計測器を設計・試作する EM モデル(エンジニアリングモデル)を完成させることを目標とする。EM モデルの完成させるためには、評価モデルを用いて FPGA のプログラムの設計を進めるとともにアナログ部分の回路機能の設計を行い、電場計測器の動作検証を進める。また、EM モデルの完成後、単体環境試験を実施する。単体環境試験においては、まずは観測ロケットの搭載環境の中でも正常に動作することを確認する予定である。また、出力されたデジタル信号をリアルタイム表示するアプリケーションの開発を行い、評価モデルおよび EM モデルの性能評価に活用する。



(a) アナログ信号処理部基板



(b) FPGA 搭載デジタル信号処理部基板

図 2.2-4 電場計測器のデジタル信号処理部の評価モデル基板外観図

### 2.3 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、N<sub>2</sub>、NO、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 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。

#### 2.3.1 中性粒子質量分析器イオン源の製作

令和3年度には中性粒子質量分析器イオン源の製作を行った。本イオン源は、質量分析器で分析する中性粒子をイオン化するために用いるものであり、測定対象の分子に電子ビームを衝突させて電離する。酸化イットリウム(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)コートフィラメントを通電加熱することで発生する熱電子を加速して電子源としている。本イオン源は、フィラメントを2系統有しており、通常は1系統を使用し、もう1系統はフィラメントが消耗して切れた際のバックアップとしている。イオン源で生成するイオンビームのエネルギーは 10eV から 200eV の範囲で可変で、センサ部イオン源

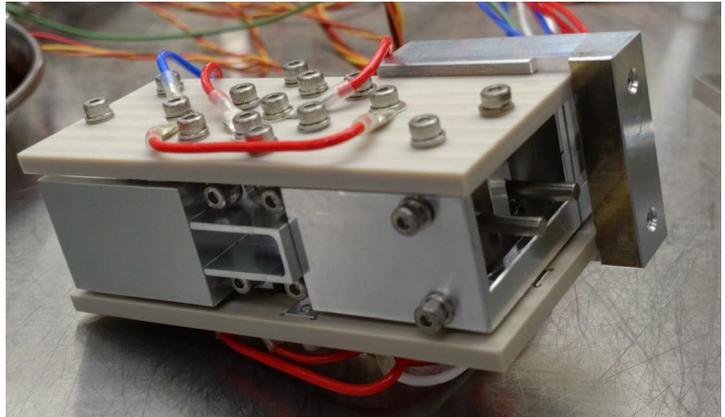


図 2.3-1 製作したイオン源の写真。試験のためにケーブルを接続した状態。

で生成するイオンビームの幅は、10mm X1mm 程度である。図 2.3-1 は製作したイオン源の写真である。イオン源の試験をするために、イオン源の電極に電位を与えるためのケーブルを接続した状態であり、手前の中央にある四角形の部分から、指定したエネルギーに加速されたイオンが射出される。右の面にはピンが2本見えるが、ここからフィラメントに電流を供給する。

#### 2.3.2 中性粒子質量分析器検出 MCP の製作

令和3年度には中性粒子質量分析器検出 MCP の製作も行った。まずは、カタログ品の浜松ホトニクス社製 MCP F12334-11 を購入し、イオンを入射した際の出カパルス波形が中性質量分析器の要求性能を満たすかどうかの確認を行った上で、打ち上げ時の振動に耐える構造を検討して、搭載可能な MCP アセンブリおよびアナライザーの設計・製作につなげることができた。

#### 2.3.3 中性粒子質量分析器パルス高圧の設計

令和3年度には中性粒子質量分析器パルス高圧の設計も行った。本パルス高圧は、中性粒子質量分析器内で、イオン化された中性粒子の飛行を開始するために使用する高圧電源である。本パルス高圧に対する機能性の要求を表 2.3-1 に示す。この要求を満たす設計のパルス高圧の仕様を表 2.3-2 に示す。

表2.3-1 機能性能要求

番号	要求性能
1	質量分析計用高圧パルス電源の内容
1-1	質量分析計用高圧パルス電源は、宇宙用 TOF 型中性質量分析器のマスゲートを担う高圧電源である。
2	質量分析計用高圧パルス電源の内容
2-1	主電源として、外部から供給をうけ、その他の必要な電源は基板内で生成すること。
2-2	-0V~+1kV(可変)の高電圧をパルス状に出力できること。
2-3	パルス電圧が印加される対象は絶縁された電極であり、容量は 200pF 程度を想定すること。
2-4	制御は外部からロジック信号で与えられること。
2-5	パルス幅は 100ns 以下~50us 以上で(可変)であること。
2-6	固定高圧 としても使用可能であること。
2-7	ロジック信号入力の繰り返し周期は 100~10kHz であり、同じ周期でパルス状電圧を出力すること。
2-8	パルス電源の波形は矩形を理想とし、1kV に対して60ns 以内(可能な限り短時間)で高速で昇圧、降圧できること。
2-9	最高電圧に到達後はオーバーシュート及びリップル電圧は 20%以内(可能な限り小さく)でパルス幅を保つこと。
2-10	消費電力は 1kHz, 1kV のパルス出力に対して 2W 以内であること。
2-11	パルスの ON タイミング、OFF タイミング、パルス長を 0~600 マイクロ秒の範囲内、ON-OFF 回数2回以上で自由に選択できること。
2-12	出力波形のモニターができること。
3	形状・基板構成
3-1	サイズは、単体でケースに入れた場合 180mm X 100mm X 40mm 以下であること。
4	部品選定
4-1	宇宙用部品を使用すること。

表2.3-2 中性粒子質量分析器パルス高圧の仕様表

性能項目		仕様値
電源入力	入力	12V、最大 0.4A
	内部生成電源	+1kV
		+5V
+F12V、+F5V(Hi-side floating)		
+B12V、+B5V(Hi-side floating)		
消費電力	2W(1kHz, 1kV 時 以下, 3.5W(10kHz, 1kV 時)以下 ※外部のデジタル制御部を含めない	
出力性能	パルス電圧	-0V~+1kV (256 段階, 3.9V ステップ)
	ドライブ能力	200pF
	パルス幅 (半値幅)	100ns~50us 固定出力可能
	繰り返し周期	最大 10kHz
	立上り速度	60ns/1kV
	リップル電圧	20%以内
制御入力信号	トリガー	・TTL レベル ・ON タイミング、OFF タイミング、パルス長を 0~600 $\mu$ sec、ON-OFF 回数2 回以上設定可(外部信号により制御する)
	動作クロック	1MHz、TTL レベル
	HV 電圧設定	SPI 信号
モニター機能	波形モニター	1/100 アナログ電圧出力
	電圧モニター	1/100 アナログ電圧出力
寸法	180mm X 100mm X 40mm(ケース含む) 以下	
機能保証温度範囲	-20°C ~ +55°C	
保存温度範囲	-40°C ~ +65°C	
EEE 部品品質	以下の標準による ・JMR-012A JAXA 部品プログラム JMR-012A クラス II 相当 ・JERG-2-024 宇宙転用可能部品の宇宙適用ハンドブック (科学衛星編)	

表 2.3-3 に選定した部品のリストを示す。図 2.3-2 に、設計したパルス高圧のブロック図を示す。

表2.3-3 EEE 部品選定結果

品種	一般型番	製造元	個数
Digital Isolator	ADUM141E	Analog Devices Inc.	2
MOSFET Driver	RIC74424H	Infineon Technologies AG	2
Comparator	AD8561	Analog Devices Inc.	2
Regulator	HS9S-117RH-Q	Renesas Electronics	2
Transform	MES-18024	明星電気	4
DC/DC Converter	93673	PICO Electronics, Inc.	1
Hex Inverters	CD54HCT04F3A	Texas Instruments	1
MOSFET	ISM120NT4-19	ISOCOM Limited	2
トランジスタ	2N3439UA	Microchip Technology	5
ダイオード	JANTX1N5819	Microchip Technology	2
ダイオード	JANTX1N6328	Microchip Technology	2
ダイオード	JANTX1N5622	Microchip Technology	6
ダイオード	JANTX1N6331	Microchip Technology	2
ダイオード	JANS1N6642US	Microchip Technology	12
インダクタ	SESI 9.1 M15 1WR	EXXELIA Technologies	4
高圧コンデンサ	FHACD252V183JRLQZ0	Nippon Chemi-Con Corporation	2
高圧コンデンサ	MKP1848610924P	VISHAY INTERTECHNOLOGY	2
高圧コンデンサ	1825B*	KEMET Corporation	3
抵抗	M55342*	VISHAY INTERTECHNOLOGY	57
コンデンサ	CDR31*,CDR31*	KYOCERA AVX Components	24
コンデンサ	CWR11*	KYOCERA AVX Components	4

#### 2.3.4 3回反射アナライザーの設計・製作

令和3年度には、中性粒子質量分析器の3回反射アナライザー（3回反射型リフレクトロンと同義）の設計・製作も実施した。以下に、中性粒子質量分析器の3回反射アナライザーの機能・性能要求を示す。

1. 観測ロケットに搭載して地球電離圏における中性大気の質量分析を行う機能を有すること。
2. 計測質量範囲は  $m/z$  1 - 200 であること。
3. 質量分解能と検出効率の異なる2つの分析モード (Triple Reflection Mode・Single Reflection Mode) を有すること。

(ア) Triple Reflection Mode は、分析器の中のイオン化された測定対象分子の飛行経路を、限られた装置サイズでできるだけ長くするため、3回の反射を行う分析モードで、質量分解能は  $m/\Delta m > 70$  であること。

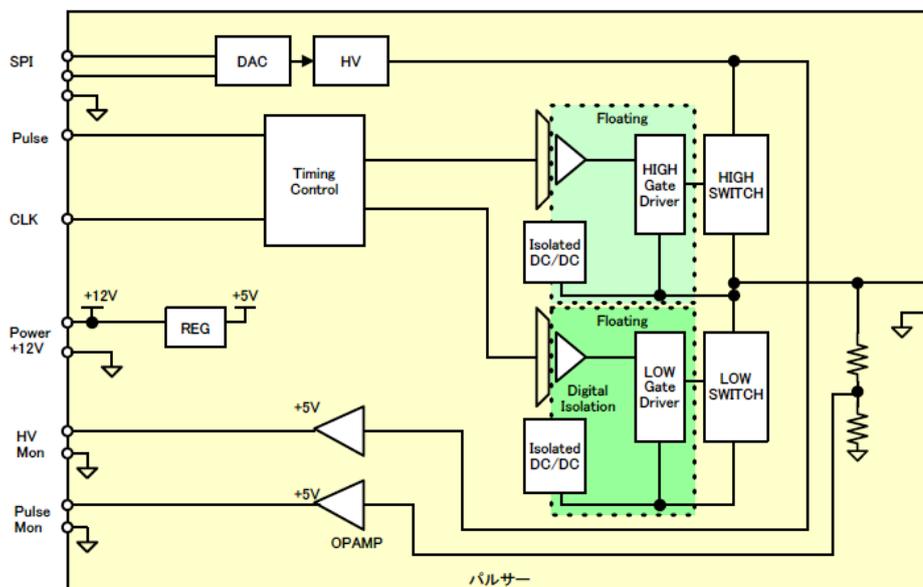


図 2.3-2 中性粒子質量分析器パルス高圧のブロック図

- (イ) Single Reflection Mode は、通常のリフレクトロンと同じ分析モードで、分析器の中のイオン化された測定対象分子を1回反射させて分析するモードで、質量分解能は  $m/\Delta m > 30$  であること。
4. Triple reflection mode, Single reflection mode はイオン源で生成するイオンのエネルギーとアナライザーの電極に印加する電圧を調整することで切り替えることができること。
  5. アナライザーの加速部は2段加速であること。
  6. アナライザーの第1第3反射部は1段反射であること。
  7. アナライザーに印加する電位は $-5\text{kV}$  から $5\text{kV}$  の範囲であること。
  8. アナライザー電極の形状や、配置によっては放電の危険性があるため、アナライザー電極の加工や配置には放電しない様な配慮をすること。アナライザー内部の真空度が、 $1.0 \times 10^{-3} \text{Pa}$  以下であれば、各電極には実際の運用で使用する高電圧を連続して印加した状態で放電しない設計とすること。
  9. 仮に放電した場合でも、故障しない様に放電電流の経路を考慮して必要な対策を講じておくこと。
  10. サイズはイオン源部分を除いて宇宙科学研究所の S-310 標準型観測ロケットの計器板  $\phi 228\text{mm}$  に納まるサイズであること。

図 2.3-3 に3回反射アナライザーの原理図を示す。中央の図(Triple Reflection Mode)に示す様に、3回反射アナライザーは、中性粒子質量分析器イオン源で電離されて正イオンとなった中性粒子を、中性粒子質量分析器パルス高圧で作った電場によって加速してアナライザーの内部の飛行をスタートさせる。自由飛行部を飛行したイオンは第1反射部で反射され、再び自由飛行部を飛行する。次に第2反射部で反射され再度自由飛行部を飛行したイオンは第1反射部で再度反射され、自由飛行部を飛行したのち、MCP で検出される。イオンが加速されたタイミングから、イオンが検出されたタイミングとの間の時間を計測することで、イオンの質量を計測することができる。左の図に示す通り、イオン源からアナライザーに入射するイオンの速度を変えることで、1回反射したイオンをMCPで検出することもでき(Single Reflection Mode)、飛行する距離が短い分質量分解能は低くなるが、検

## 測定モード

飛行時間を長くして質量分解能を向上させた3回反射モードと冗長性を高めるスペアモードを実装。電気的な制御によって切り替える。

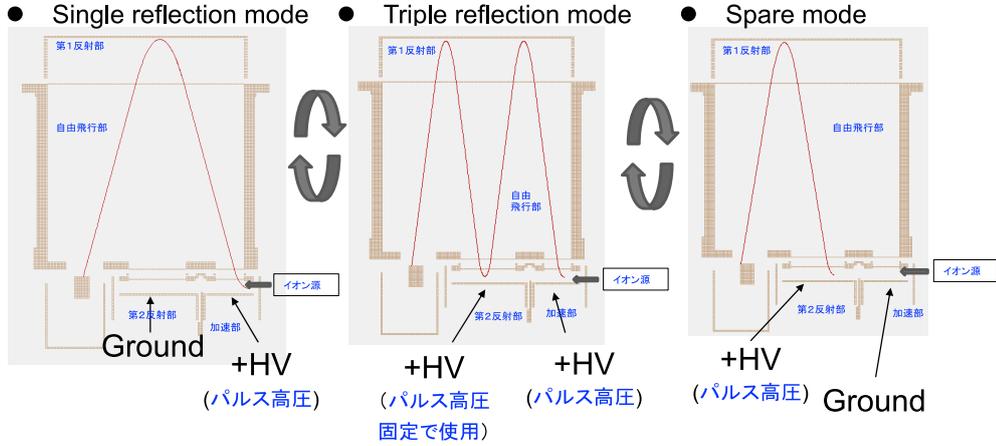


図 2.3-3 3回反射アナライザーの原理図

出感度は高くなる。また、加速部のパルス高圧電源が故障した場合には、右の図に示す通り、第2反射部にパルス高圧電源を接続しておけば、そのパルス電源でイオンを加速することで、1回反射でイオンの飛行時間を計測することができる冗長性を備えている(Spare Mode)。

図 2.3-4 に設計・製造した3回反射アナライザーを示す。左の図に外観図を、右の図にカバーの一部を外してアナライザーの構造とイオン源の見える図を示す。サイズは、S-310 観測ロケットに搭載可能なサイズに小型化した。

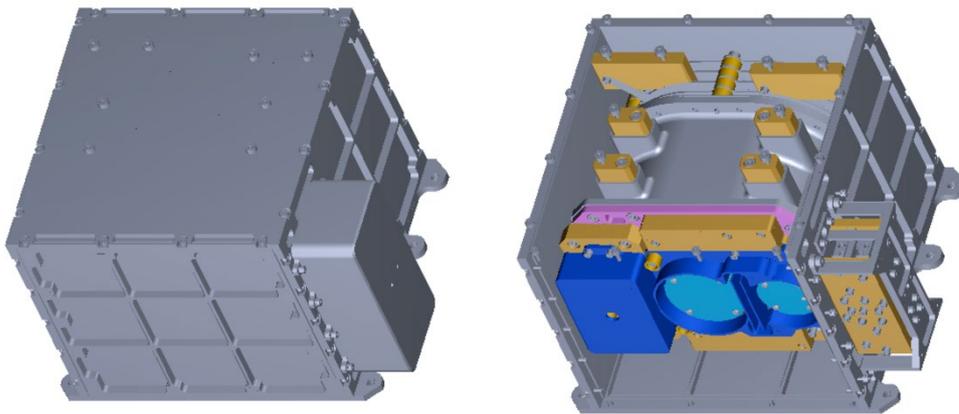


図 2.3-4 左:3回反射アナライザーの外観 右:アナライザーの内部とイオン源

## 2.4 イオンドリフト速度測定器の開発

令和3年度の目標はイオンドリフト速度測定器(図2.4-1)の基本設計を固めて、試作に着手することにあつた。そのため、測定器が観測ロケット上で電離圏熱的イオンを観測するというプラズマ環境を想定し、センサとして金属電極を使用した際に得られる電流データからイオンのドリフト速度、温度、密度が推定できるような測定器の設計を行った。

設計の妥当性については、数値シミュレーションによりセンサ部で検出される電流からイオンがもつエネルギーや温度を推定可能であるかとの観点から行った。こうして、センサ部と電気回路部からなる最適な測定器構成の決定に向けての評価を繰り返して最終的な仕様を決定し、試作を開始した。

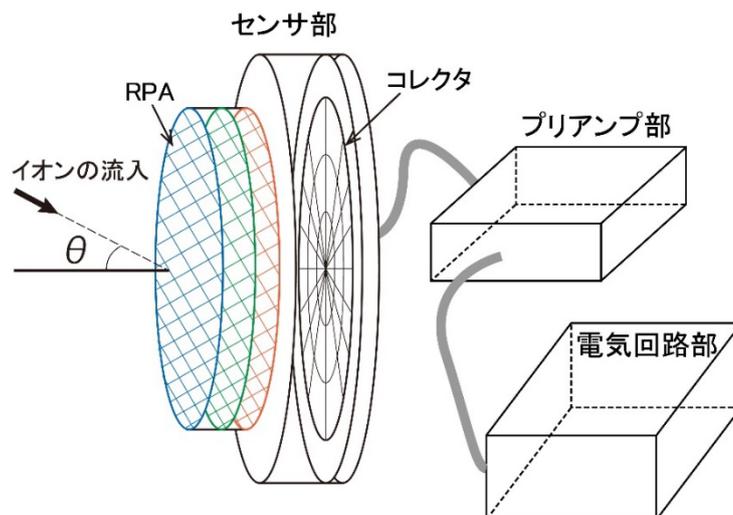


図 2.4-1 イオンドリフト速度測定器の構成

### 2.4.1 測定器の基本構成

本測定器は図2.4-2に示すようにセンサ部、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、電気信号として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システム(観測ロケットの場合はアビオニクス)に送られるようにする。

### 2.4.2 測定器センサ部

センサ部はRPA部および電流検出用コレクタ電極から構成される。RPA部にあるメッシュには電圧を印加し入射するイオンのエネルギーの分析を行う。センサ部ではRPA部を通過してきたイオンによる電流を測定するが、多数の電極により電流分布を測定することでイオンの入射方向を推定できるようにする。

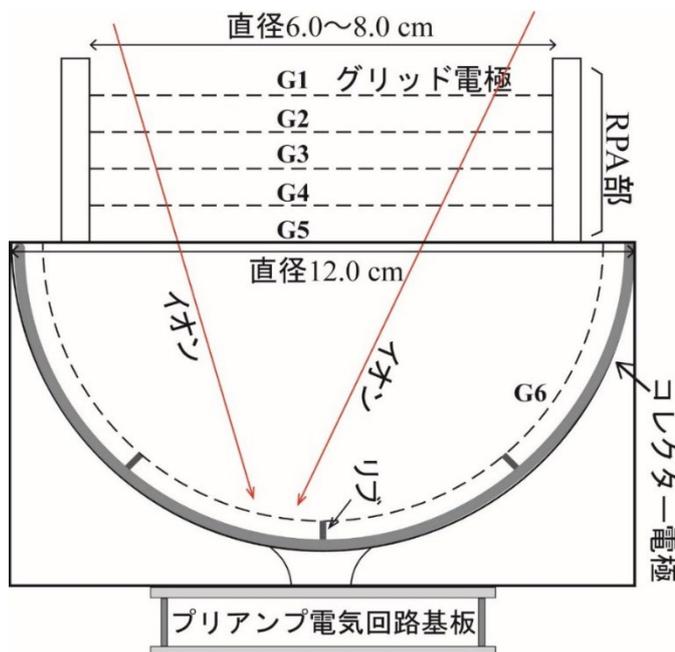


図 2.4-2 測定器センサ部の断面構造図

RPA 部および電流検出コレクタはイオンのドリフト速度や温度の推定精度に直結する部分であり、この設計が測定器としての能力を決定する。ここでは考案した設計について、数値シミュレーションによりその妥当性を検討することにした。シミュレーションにおいて仮定したセンサ部の断面構造を図 2.4-3 に示す。コレクタ電極は半球面の内側に貼り付けることとし、周方向は 360 度に 12 列、半径方向は 6 列で計 72 枚の電極から構成されるものとした。72 枚の電極の配置は図 2.4-3 に示すようになる。このような構造をもつ測定器センサ部にイオンが入射するものとして数値シミュレーションを行った。

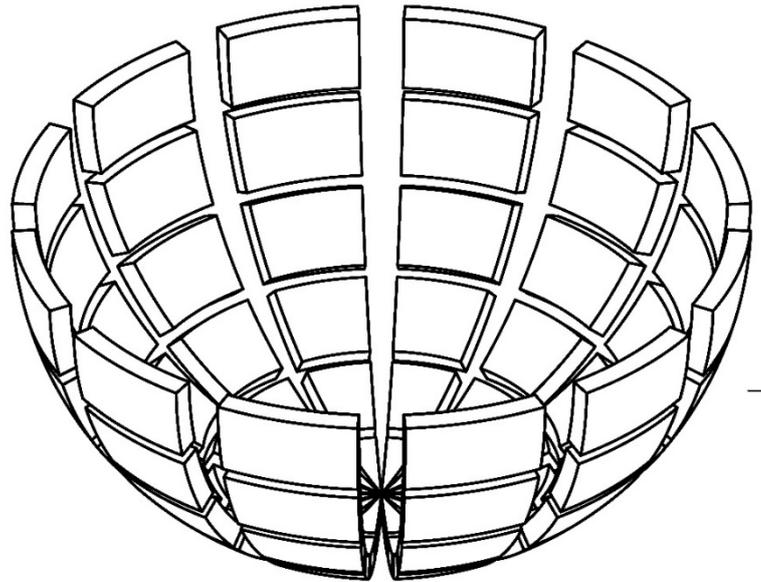


図 2.4-3 センサ部コレクタ電極の配置図

### 2.4.3 数値シミュレーションの実施

#### 2.4.3.1 シミュレーションの方法

図 2.4-4 に示すように、バルク速度  $v_i$ 、温度  $T_i$ 、密度  $N_i$  のドリフトマクスウェル分布として表されるイオンの集団がセンサに向かって入射する状況を想定する。通常、電離圏イオンの温度は数百 K で、 $O^+$  イオンを仮定した場合の熱速度は数百 m/s である。これに対し観測ロケットの飛行速度は電離圏下部において 1~2 km/s であり熱速度の数倍である。このような状況下で、観測ロケット上では、ロケットの移動速度とイオンがもつドリフト速度の和を観測することになる。

図 2.4-5 はそのシミュレーション結果の一例である。この際、入射するイオンの速度は 1200 m/s、温度は 500 K と仮定した。イオン入射方向（センサ面法線方向に対する角度で定義）と RPA 電圧の条件は各図の右上に表示されている。入射方向に応じて、電流分布のピークが中心方向からずれていくこと、RPA 印加電圧をプラス方向に大きくすると電流値が減少する傾向が確認できる。

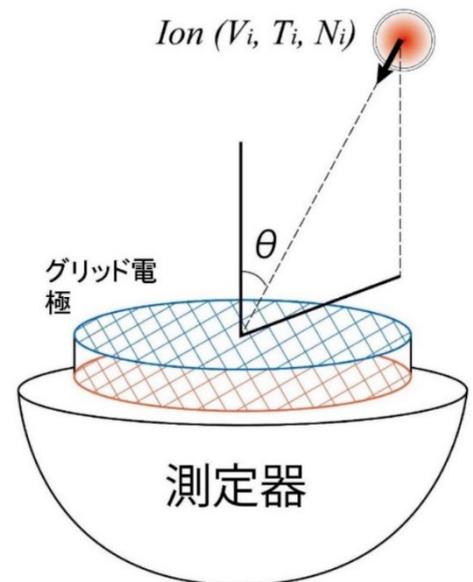


図 2.4-4 測定器数値シミュレーションのイメージ

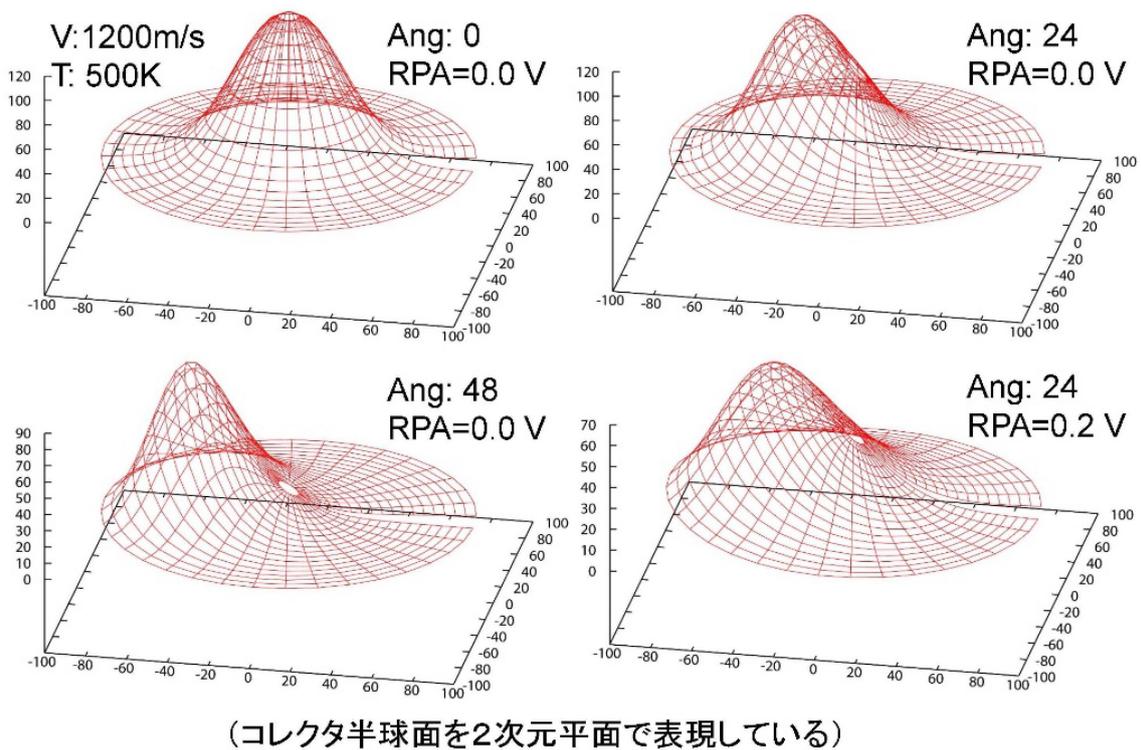


図 2.4-5 測定器コレクタ電極で測定される電流分布の数値シミュレーション

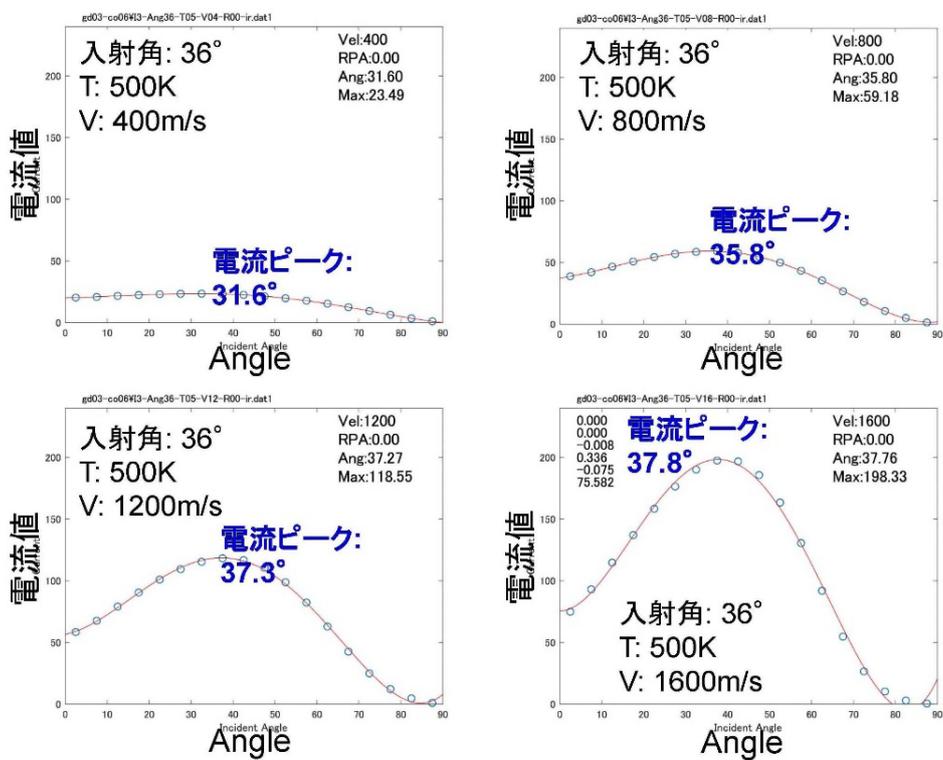


図 2.4-6 イオン入射角 36 度の場合の電流分布ピーク方向の関係

### 2.4.3.2 イオン入射方向の推定

イオンが測定器センサの正面からではなく、斜め方向から入射した場合にはその角度に応じて、コレクタの電流分布に変化が生じる。図 2.4-6 はセンサ部の法線に対して 36 度離れた方向から異なる速度(400, 800, 1200, 1600m/s)でイオンが入射した場合に観測される電流のピーク方向を調べたものである。電流値は電極の位置と個数に相当する離散的な値しか存在しないが、ここでは最小二乗法近似により、ピークの角度を算出している。速度が遅い場合は分布のピークが鈍く入射角度に対する差が比較的大きいが、速度が 800m/s 以上の場合はほぼ入射角度に近い方向でピークが観測されている。

図 2.4-7 はイオンの入射角が 12~48 度の場合について同様な比較を行ったサマリを示している。いずれの場合もイオンの速度が 400 m/s の場合は入射角に対する差が大きいが、速度が 800m/s 以上の場合は差が 2 度の範囲内にあり、入射角度に近い方向でピークが観測され、本設計により入射角度を推定することが可能なことが確認された。

### 2.4.3.3 イオンドリフトエネルギーの推定

次にイオンのドリフトエネルギー推定の妥当性について検討を行った。RPA に印加する電圧はプラスで入射するイオンの速度を減速する方向に作用し、電圧がもつ電位ポテンシャルよりも小さなエネルギーのイオンはメッシュを通過できない。このため、コレクタ電極で計測される電流はエネルギーの積分量となるため、このデータからエネルギーのピークを求めるには電流値をメッシュに印加する電圧で微分し、それぞれの電圧に相当するエネルギーをもつイオン電流の変化からピークを推定する必要がある。図 2.4-8 に示すのはコレクタ電流の微分量の RPA 印加電圧に対する変化であるが、電流のピークが観測された電圧を黒字で示している。速度 1200m/s で入射する O<sup>+</sup>イオンのエネルギーは約 0.12eV であるが、入射する角度に応じて法線方向のエネルギー成分は異なる。このエネルギーは図 2.4-8 に青字で記されている。両者を比較すると約 20%の誤差の範囲内で一致していることが確認できるが、4つのケースともにシミュレーション結果が低い値となっているため、この差については今後検討を行う予定にしている。図 2.4-9 はイオン速度が 600, 1200, 1800, 2400m/s の場合、イオン入射角度が 0, 12, 24, 36, 48 度の場合について同様な比較を行った結果である。これらの範囲の比較においても、与えたイオンのエネルギーとシミュレーションで計算したピークエネルギーの場合では最大 20%の誤算範囲内で一致している。しかし、この差は入射角度が大きくなると共に増しているため、何らかの誤差要因が存在する可能性があり、今後の検討課題としている。

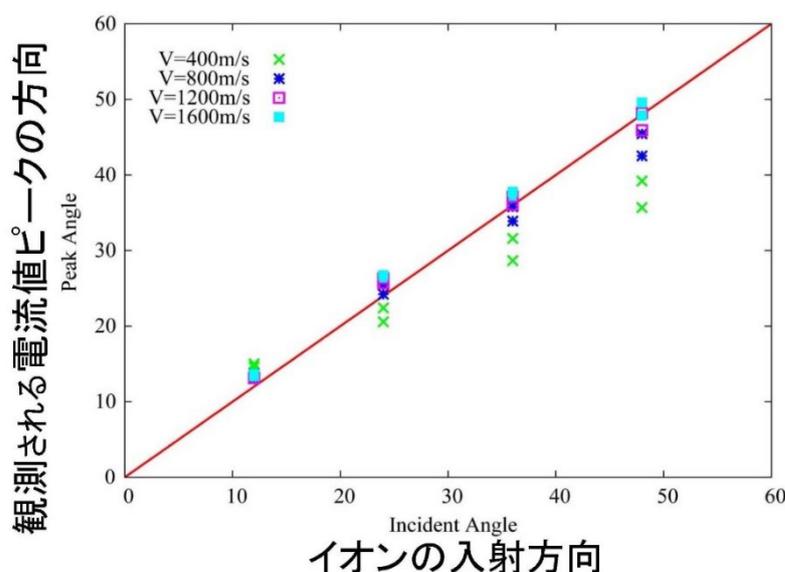


図 2.4-7 イオン入射方向が 12~48 度の場合の電流分布ピーク方向の関係

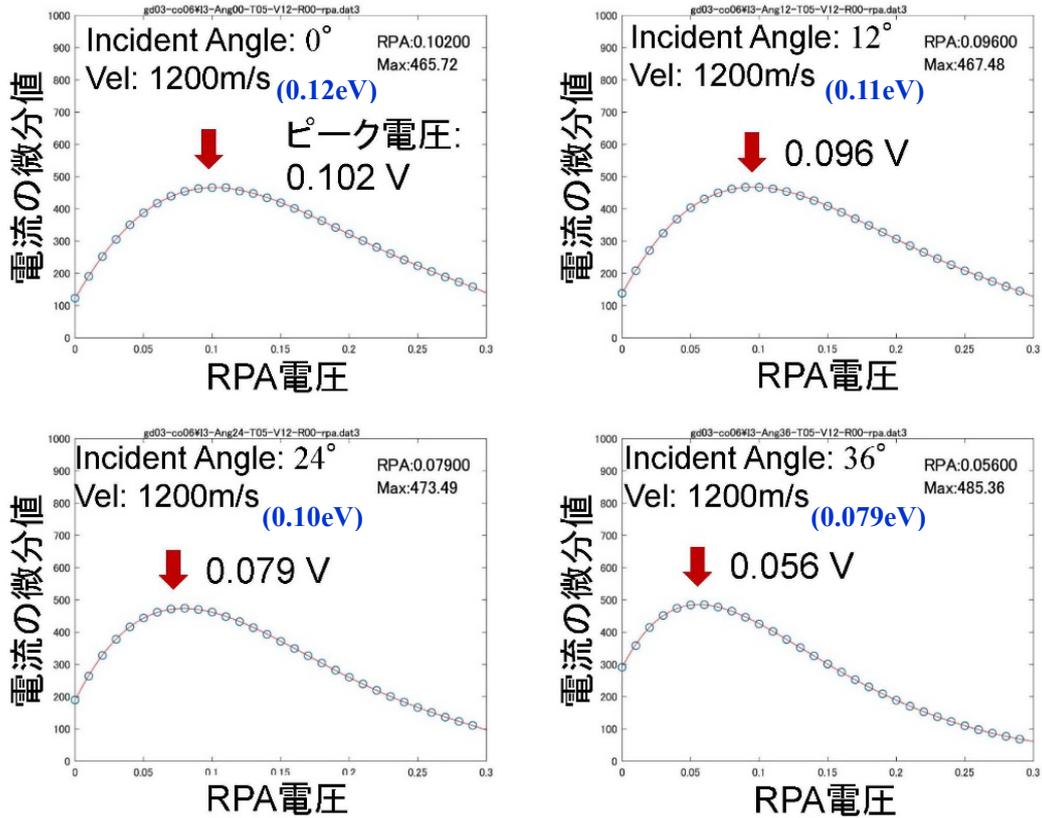


図 2.4-8 イオン速度が 1200m/s の場合の電流値微分値ピークとイオンエネルギーの関係

2.4.3.4 イオン温度の推定  
次にデータからイオン温度を推定する場合の方法および妥当性について検討した結果について述べる。図 2.4-10 はコレクタ電極の電流値の RPA 電圧に対する変化を示している。温度はエネルギー分布における広がりを表すパラメータであるため、ここでは RPA 電圧に対する電流分布の広がりを関数により表現することにした。関数として次の式を用いてフィッティングを行っている。

$$y = A \cdot \exp(-\lambda x)$$

最小二乗法により求めた  $A, \lambda$

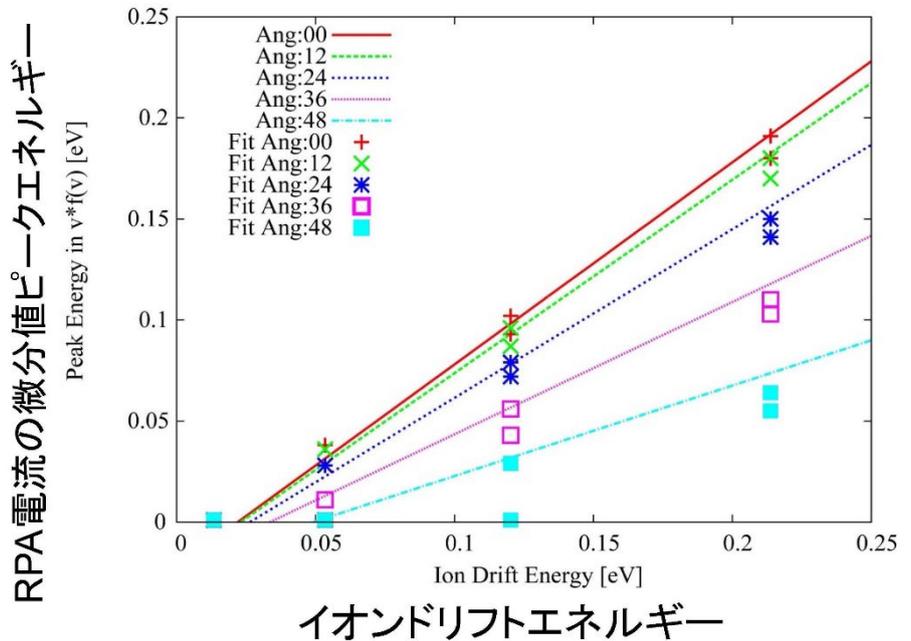


図 2.4-9 イオン速度が 600~2400m/s の場合の電流値微分値ピークとイオンエネルギーの関係

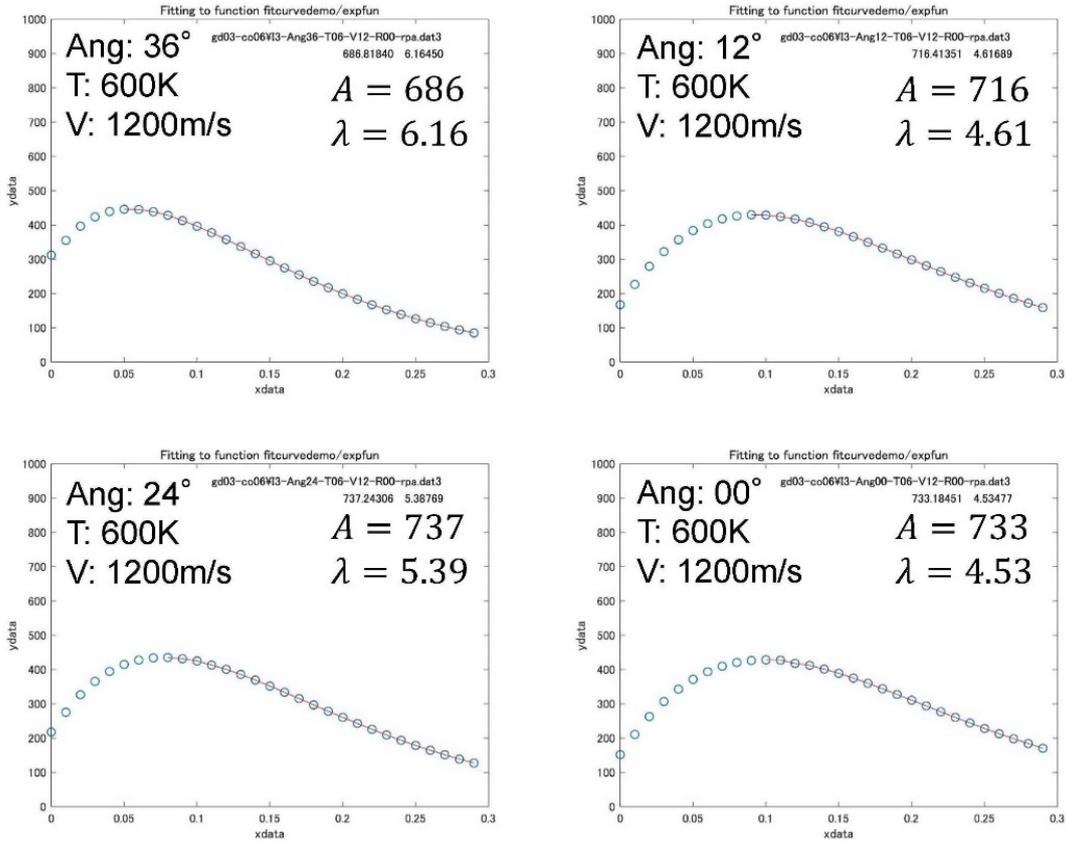


図 2.4-10 電流値の RPA 電圧に対する変化および最小二乗近似による関数フィッティング。関数は本文中に書かれている

の値が各図の右上に記されている。  
 このようにして求めた $\lambda$ と与えたイオン温度の関係を示したのが図 2.4-11(a)~(d)である。図 2.4-11(a)を見ると $\lambda$ はイオン温度に応じて変化するがドリフト速度にも依存している。しかし、図 2.4-11(b)~(d)を見ると入射角にはあまり依存していないことがわかる。これらの結果から、RPA 電圧に対する電流値の変化からイオンドリフト速度を推定した上で、最小

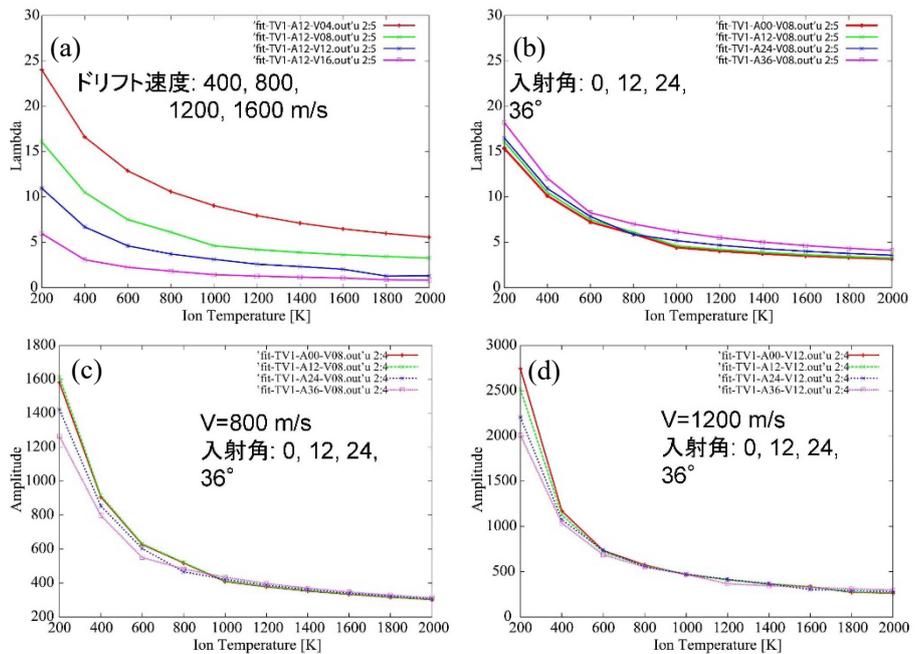


図 2.4-11 イオン温度と $\lambda$ の関係

二乗近似により求めた $\lambda$ からイオン温度を推定することが可能である。この方法は広いイオン入射角範囲にわたって有効であると考えられる。

#### 2.4.4 仕様の決定

##### 2.4.4.1 電氣的仕様

以上述べたように令和3年度は主に数値シミュレーションにより測定器センサ部の構成、構造について検討を実施した。最終的な目的である測定データからのイオンドリフト速度、イオン温度の算出について、ここで考えた構成により可能であることが確かめられた。イオン密度の算出について、本稿では述べていないが、RPA部を通過し電極に到達するイオンによる電流を積算すれば、センサ部開口面に入射するイオン総数がわかるため、イオン密度の推定に大きな問題はないと考えている。

また、電気回路部に要求される仕様については以下のように決定した。

- 1) プリアンプ/CAL 制御部  
測定電流： 電極1個あたりの測定電流の期待値は最大 10 nA。出力は 12ビットで表現  
検出抵抗： 1 M $\Omega$   
利得： 10倍
- 2) ポストアンプ部  
電圧利得を変更できるようにする  
利得： 10倍、30倍、100倍の3段階から選択可能。設定は FPGA への書き込みにより行う。  
カットオフ周波数： 100 Hz
- 3) A/D コンバータ部  
72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
- 4) RPA 部メッシュグリッド印加電圧  
G1,G4,G5: GND  
G2,G3: 0.0~3.0 V の範囲で22ステップの電圧を印加し、1秒間に2回掃引を繰り返す  
G6: -15 V(固定)  
但し、G1~G5 には-5.0~+5.0 V の範囲の共通のオフセット電圧を与えられるようにする
- 5) データ出力  
22 の電圧ステップに得られた各電極の電流データを出力
- 6) 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できること

##### 2.4.4.2 機械的仕様

2.4.2 で述べたセンサ部は質量 1.5kg 以内で製作可能であるとの見通しを得た。また、2.4.4.1 で述べた電氣的仕様を満足する測定器の電気回路部とプリアンプ部は、それぞれ質量 1kg 以内で製作できる見通しを得た。このため、測定器全体の重量を 3.5kg 以内におさめるとの当初目的が達成できた。

### 3 まとめ

令和 3 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

当該年度の目標は集積回路(ASIC 回路)に置き換え後も従来回路と同様(周波数特性)性能を持つことを確認することと、小型センサが良好な特性を持つことを確認することであった。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オペアンプ選定、バンドパスフィルタの設計、位相検波と過渡ノイズカットの CMOS 回路の設計と最適化を行い、試験のための ASIC チップの製造を行った。また、小型センサの試作を行い、構造や製作方法の調整を行った。試作したセンサのノイズレベルが良好であることを確認した。

#### ②電場計測器の開発

当該年度の目標は電場計測用センサの仕様(素材, 伸展機構)を決定し、電場-磁場同期計測原理を確立することであった。双安定性ブームと TPU 結合ブームを試作してトレードオフを行い、小型化により向いているとの観点から今後は双安定性ブームの検討を進めることを決定した。また、電場-磁場同期計測を評価するためのデジタル回路の試作を行い、来年度以降 FPGA のプログラム開発を進めていく環境を整備した。

#### ③中性粒子質量分析器の開発

当該年度の目標は、イオン化した中性粒子の飛行を開始するためのパルス高圧電源の設計を行い製作を開始し、イオン源、検出器の製造を完了することであった。中性粒子質量分析器パルス高圧電源に対する機能性の要求と、この要求を満たす設計のパルス高圧電源の仕様と構成を定め、製作の第一段階として、使用する部品を選定した。また、測定対象の中性粒子に電子ビームを衝突させてをイオン化するイオン源の製作を行った。更に、3回反射アナライザー(3回反射型リフレクトロン)の機能・性能要求を検討した上で、MCP アセンブリと組み合わせてイオン化した中性粒子を検出する、検出装置の製造を完了した。

#### ④イオンドリフト速度測定器の開発

当該年度の目標は全重量 3.5kg 以内で測定器の基本設計を固め、試作に着手することであった。イオン入射方向の推定、イオンドリフトエネルギーの推定、イオン温度の推定の数値シミュレーションを実施し、測定器センサ部の構成、構造を検討した。検討に基づいて決定した仕様を持つセンサ部により、目標となるイオンドリフト速度、イオン温度の算出が可能であることが確かめられた。更に、信号処理を行う電気回路部の検討を行い、要求される仕様を決定した。センサ部および電気回路部の検討結果を元に全重量を見積もり、3.5kg 以内となることを確認した。