

小型衛星による宇宙線量マップの作成

群馬工業高等専門学校 専攻科 生産システム工学専攻

田嶋健佑, 緑川俊貴, 吉永尚矢

群馬工業高等専門学校 機械工学科

小野塚隆太

群馬工業高等専門学校 電子メディア工学科

松本国朗, 高原泉

1. はじめに

近年, 宇宙旅行が現実的なものとなり, 一般人が宇宙を体験できる時代が到来しつつある. 現在提案されている最も現実的な宇宙旅行は, スペースプレーンにより高度100[km]まで上昇し, 数分間の宇宙体験を行うというものである. しかし, 宇宙空間には宇宙線と呼ばれる高エネルギーの放射線が飛び交っており, 宇宙空間では大気による宇宙線の遮蔽効果がほぼないため, 宇宙船の搭乗者の健康に影響を及ぼすことが危惧される. 特に宇宙船のパイロットは継続的に宇宙線に曝される可能性がある. また, 宇宙線は電子機器にも影響を及ぼし, 機器の誤作動や故障を引き起こすことから, 地球に飛来する宇宙線の線量を測定し, 対策を講じることが求められている.

地球に飛来する宇宙線は, 太陽風や太陽フレア粒子などによる太陽宇宙線と, 太陽系外から超新星爆発などによって加速されて飛来する銀河系宇宙線の二種類に大別できる. これらの宇宙線はγ線バーストや太陽フレアといった物理現象によって線量とエネルギーが一時的に強くなることもあり, 人体にとって非常に危険である.

そこで本稿では, 人工衛星を低軌道に投入し, 衛星軌道上の宇宙線の線量測定を行う

というアイデアについて述べる. そして, 測定によって得られた宇宙線量とGPSによる人工衛星の自己位置から, 衛星軌道上における宇宙線量を可視化した宇宙線量マップを作成するミッションを提案する. ある地点での宇宙線量は, 時間とともに変化するため, 宇宙線量マップも随時更新していく. これにより, 高エネルギーの宇宙線が飛来した場合における宇宙旅行を回避することができ, 宇宙線被ばくの防止が期待される.

2. ミッション概要説明

本節ではミッションの概要について述べる. 本稿で取り扱う人工衛星は, 170×170×170[mm]程度の小型衛星であり, 地球の周りを数周すると元の位置に戻ってくる準回帰軌道上を周回する. そして, 衛星に取り付けられた, シンチレータとフォトダイオードで構成される測定器を用いて軌道上の宇宙線量を測定する. また, 本衛星は自己位置特定のためにGPS受信機を搭載しており, GPSによる位置情報は測定データとともに内部メモリに保存される. そして, 地上局と通信が可能なときにこれらのデータを送信する. 衛星から送信されたデータを元にして, 各地点における宇宙線

量を地図上に表すことによって宇宙線量マップを作成する。

3. ミッション要求

本衛星における各系へのミッション要求を以下に示す。

- (1) 人工衛星で観測可能な宇宙線とその線量の観測方法
- (2) 地球上の広範囲を通過し、また一定間隔で同じ地点を通る軌道

(1)に関して、観測する宇宙線の選定を行う必要がある。宇宙線は主に γ 線やX線などの電磁波や、陽子や電子などの荷電粒子からなる粒子線を含む。また、飛来する原因により宇宙線の組成が変化するが、大半の宇宙線は陽子がほとんどの割合を占める。本ミッションでは低軌道上での観測を行うために、小型衛星での運用を想定している。そのため観測機器は小型衛星に搭載可能かつ人体に影響を及ぼしやすい宇宙線を選定する。そこで本ミッションでは、透過性が高いため人体に影響を与えやすく、またシンチレーション検知器などの小型の計測機器により観測が可能である γ 線を対象とする。

(2)に関して、衛星を運用する軌道を選定する必要がある。マップ作成を行う際にデータの統計を取ることで線量の比較や傾向、データの正当性を確認するといった観点から、定期的に同一地点を通過する必要がある。

また、マップを作成するために広範囲での測定を行う必要がある。そこで本ミッションで運用する軌道は数日おきに同一地点を通過し、かつ地表の広範囲を通過する準回帰軌道を採用する。

4. 宇宙線観測システム

4.1 シンチレーション検出器

本節では、シンチレーション検出器について説明する。本ミッションでは宇宙線の線量を取得することを目的としているため、宇宙線をデータに変換する必要がある。そこで、シンチレータとフォトダイオードを用いたシンチレーション検出器を提案する。宇宙線がシンチレータに入射すると、結晶内の原子に衝突し電子が励起する。これによりシンチレータが発光する。すなわち、線量はシンチレータの発光回数に依存する。また、フォトダイオードはシンチレータの発光をパルス波として検出する。このときマイコンではパルス波を交流信号として読み取り、パルスの数と振幅をデータとして取得する。このように宇宙線量は、シンチレータの発光に変換できるので、フォトダイオードを用いた検出器による宇宙線量の解析が可能となる。また、この検出器は、他の放射線測定器と比較して小型であることから小型衛星に搭載するのに適している。

ここで、発光パルスの計測に関して図1に周波数カウンタ回路を示す。本回路は

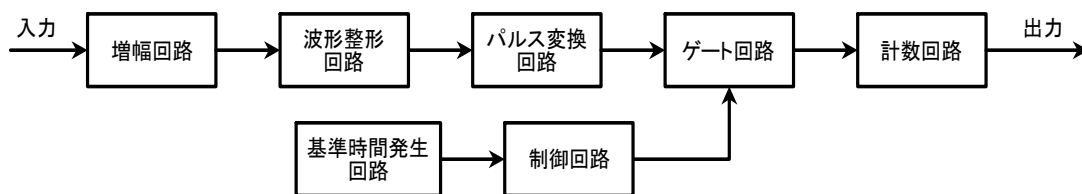


図1 周波数カウンタ回路

APD の電気信号を入力とし、カウント数を 12bit データとして出力する。C&DH 系の要請から入力信号のサンプリング周期は 5[Hz]とする。

4.2 シンチレータ

本節では、シンチレータについて述べる。シンチレータとは、放射線の入射によって光を発する物質の総称であり、素材によって無機、有機シンチレータに分類される。一般的なシンチレータの外観を図 2 に示す。



図 2 シンチレータ

本ミッションでは γ 線を観測対象としており、また、宇宙空間での運用であるため潮解性のないものを必要とする。そこで、無機シンチレータは放射長が短く発光量が多いという特徴があるため、無機シンチレータに限定して比較し選定を行う。これらの中で潮解性が無く、自然崩壊と立ち上がり速度、密度の観点から本衛星ではサンゴバン社の BGO シンチレータ[1]を使用する。BGO の特性を表 1 に示す。BGO は取得できるエネルギー帯と波長が γ 線取得に適した範囲である。また、本衛星で取り扱うシンチレータのサイズは 25×25×10[mm]のものを採用する。

表 1 シンチレータ仕様

密度	7.13[g/cm ³]
放射長	1.11[cm]
蛍光減衰時	300[ns]
蛍光出力	7~12
蛍光波長	480[nm]
屈折率	2.15
対放射線強度	10 ² [gray]
潮解性	なし
融点	1050[°C]

4.3 フォトダイオード

本節ではフォトダイオードについて述べる。宇宙環境において放射線は不規則かつ無数に飛来するため、シンチレータの発光は不連続なパルス信号として出力される。したがって、パルス信号を解析するためには外界の信号に対して即座に反応するデバイスが求められる。そこでシンチレーション光を検出する機器として、雪崩効果を利用した APD を使用する。このダイオードは、逆電圧を印加して動作させ、光電流を増幅することで、わずかなシンチレーション光に対しても反応できる。また、APD は反応速度も速い半導体素子であり、本ミッションの要求に適している。本衛星では浜松ホトニクス社の Si APD S8664-1010[2]を使用する。フォトダイオードの外観および仕様を図 3 と表 2 にそれぞれ示す。

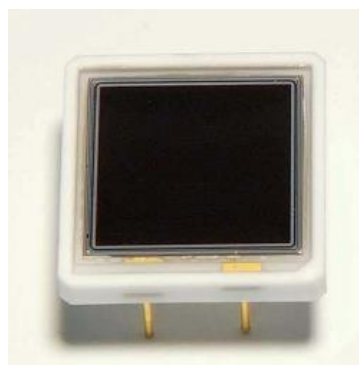


図 3 APD

また、シンチレータの表面積に合わせて、受光面の広いAPD フォトダイオードを使用する

表 2 APD 仕様

製造会社	浜松ホトニクス
型名	S8664-1010
受光面サイズ	20*20[mm]
感度波長範囲	320-1000[nm]
受光感度	0.24[A/W]
動作温度	-20~60[°C]

4.4 シンチレーション検出器の構成及び配置

本節ではシンチレーション検出器の配置について述べる。本ミッションで取り扱うシンチレーション検出器の配置を図 4 に示す。

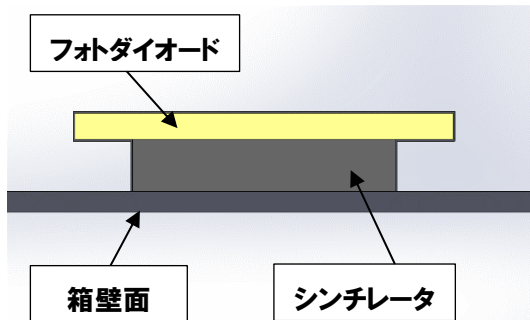


図 4 シンチレーション検出器概要

シンチレータの上にフォトダイオードを密着させ、その上からアルミホイルで覆うことで遮光する。この検出器をアルミ板で構成される立方体壁面の内側に 1 つずつ固定したものを検出箱と呼称し、この検出箱を衛星中心に配置する。したがって、計 6 個のシンチレーション検出器を搭載する。これにより、より多方向から衛星に飛来する宇宙線を観測でき、また、内部に設置することで外乱による影響を軽減する効果が

見込める。

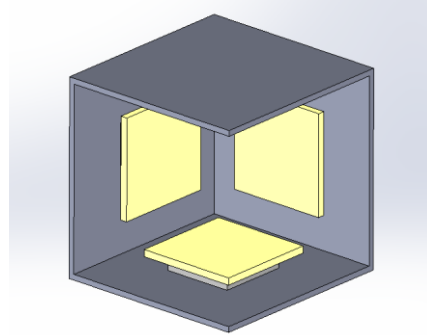


図 5 シンチレーション検出器の配置図

4.5 GPS

本節では GPS 受信機について説明する。宇宙線マップの作成において衛星の位置情報が必要となるため、本衛星では GPS 受信機による自己位置特定を行う。GPS 受信機には、スペースリンク株式会社の IGPS-3[3] を使用し、測位を行う。GPS 受信機の外観を図 6 に、GPS 受信機の仕様を表 3 に示す。本受信機を選定した理由としては、γ線のデータを取得する周期よりも短い周期で計測可能である点が挙げられる。

表 3 GPS 受信機仕様

初期捕捉時間[s]	20
位置ランダム誤差[m]	±0.3
計測間隔[Hz]	50
放射線耐性[krad]	20
消費電力[W]	5
温度[°C]	-20~+60
外形寸法[mm]	120×110

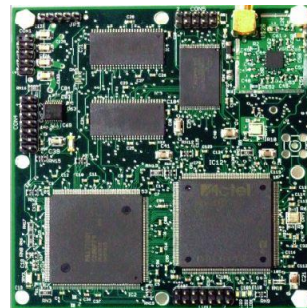


図 6 GPS 受信機

4.6 システム構成

本衛星は姿勢制御系，通信系，電源系，熱制御系，ミッション系，および各系を統括する Main OBC(On Board Computer)から構成される．ただし，姿勢制御系は演算コストが大きいため Main OBC とは別に専用の OBC(以降，AC OBC)を用いる．図 7 に本衛星のシステム図を示す．

4.6.1 Main OBC

Main OBC が行う主な処理を以下に示す．

- A) テレメトリの作成，保存および送信
- B) コマンドの受信
- C) 熱制御系の監視および制御
- D) AC OBC との相互通信

Main OBC はテレメトリを蓄積するためメモリを備える．

4.6.2 テレメトリ

地上局が衛星の状態を把握するために，テレメトリの保存および送信を行う．テレメトリは，衛星の状態を記録する HK データとミッション系の計測結果を記録するミッションデータから構成される．

HK データの項目を表 4 に，ミッションデータの項目を表 5 に示す．HK データは急激な変化が起こりにくいと考えられるため，サンプリング周期を 1[Hz]とするミッションデータのサンプリング周期は衛星の通信可能時間や衛星に搭載可能な通信機器の通信レート等を考慮し 5[Hz]とする．

表 4 HK データ一覧

データ名	データ数	byte
電源電圧	1	2
太陽電池電圧	6	12
バス電圧	1	2
パネル温度	6	12
バッテリー温度	1	2
各種センサ温度	6	12
RW温度	6	12
通信機器温度	2	4
合計	29	58

表 5 ミッションデータ一覧

データ名	データ数	byte
GPSによる位置情報	1	3
APDの出力	6	9
合計	6	12

4.6.3 メモリ

OBCが作成したテレメトリはメモリに蓄積され，地上と通信が可能になった際に，まとめて送信する．前節の軌道計算より衛

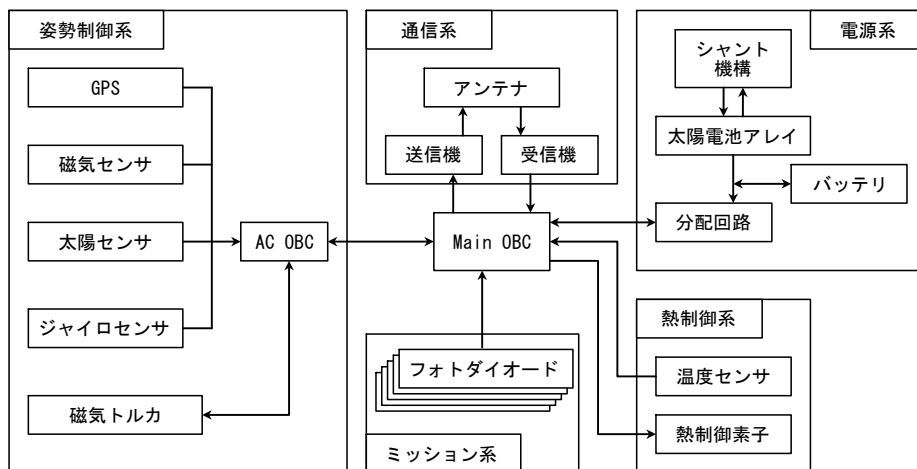


図 7 システム図

星と地上局との通信は1日に数回可能である。しかし、衛星または地上局が不具合により一時的に通信が困難になる懸念がある。通信状態の復元に最大2週間かかると仮定し、衛星に搭載するメモリ容量を検討する。

1日分のテレメトリは、HKデータとミッションデータおよびそれらのサンプリング周期より約10MBとなる。よって2週間分のテレメトリは約136MBである。メモリの最大予想使用量やマージンを考慮し、256MBのFLASH-ROMメモリをMain OBCに追加する。

4.7 軌道

本節では衛星を運用する軌道について説明する。表6に軌道要素を示し、図8にフリーソフトの軌道シミュレータ「Heaven sat」[4]を用いて作成した軌道の概要図を示す。

表6 人工衛星の軌道要素

回帰日数[day]	2
回帰周回数[回]	31
高度[km]	392
離心率	0.0053
軌道傾斜角[°]	97.02
周期[min]	92

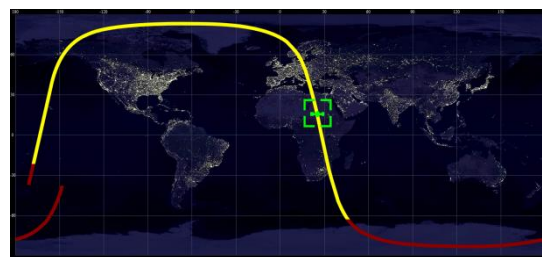


図8 衛星軌道概要図

ミッション要求より、準回帰太陽同期軌道を用いる。準回帰軌道と合わせて太陽同期軌道を用いることで、太陽光入射角が一定となることで観測条件の均一性が期待される。

5. 宇宙線マップ作成

5.1 宇宙線測定方法

本節では、シンチレーション検出器を用いた宇宙線観測の方法について説明する。前述の観測システムにより定期的に放射線を観測し、地上局に放射線観測情報を送信する。放射線量は観測システムにより電流値として計測され、回路による信号処理を経て、電圧値として出力される。出力値はAD変換されOBCに入力され、25[s]の周期でサンプリングを行う。この際、GPSによる位置情報の取得も同時に行い、観測位置および放射線量の情報をミッションデータとし

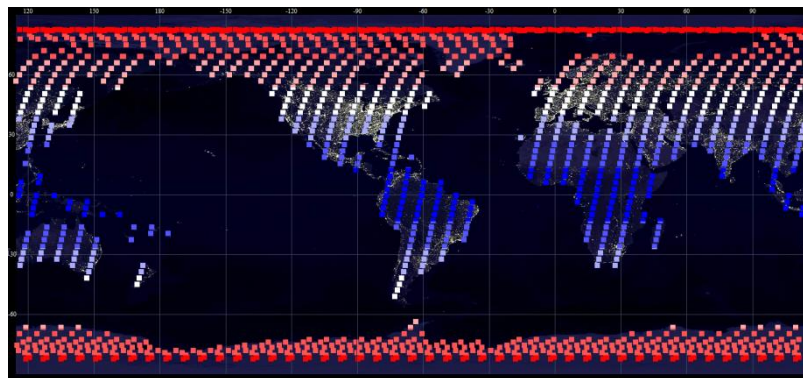


図9 宇宙線マップ模式図

て保存する。地上局との通信が可能な領域において、保存されているミッションデータを含むテレメトリを地上局に送信し、宇宙線マップの作成に必要となる情報を提供する。

5.2 宇宙線マップの作成手法

本節では宇宙線の測定によって得られたデータを用いた宇宙線マップの作成手法について述べる。作成される宇宙線マップの予想図を図9に示す。最初に、マイコンから読み取ったフォトダイオードのパルス数を放射線量に換算する。次に、得られた電圧と測定時の位置情報を、GPS から得られる位置情報を利用して結びつける。このようにして得られたデータを地球全図上にプロットする。最後に、放射線量の大小によってプロットした点の色を変更する。

6. まとめ

本稿では、地球に飛来する宇宙線量を把握し、今後の人類の宇宙進出に活かすために小型衛星による宇宙線量の測定および地球周辺の宇宙線量マップを作成するミッションを提案した。また、上記のミッションを達成するため、シンチレータおよびフォトダイオードから構成されるシンチレーション検知器による γ 線の測定手法と、測定データおよびGPS から得られる衛星の位置情報から宇宙線量マップを作成する手法を提案した。小型衛星を用いることによって地球に比較的近い地点での運用や、運用コストの削減が期待できる。本手法では衛星は決まった地点を通過しながら周回し続けるため、定期的な観測が可能であるが、観測不可能な地点がどうしても発生してしまう。

そこで、複数台の小型衛星を用いることでこの問題を解決することができると考えられる。先述のように、小型衛星は運用コストが大型衛星と比較すると約100分の1で済むため、複数台を運用するコストをかなり抑えることができる。そのため、1台の大型衛星で測定を行うよりも複数台の小型衛星での測定を行ったほうが有効であることがわかる。今後、宇宙への進出が盛んになり、大きなビジネスの一つとなるだろう。その中で、宇宙線への対策がより重要なものとなると考えられるので、本衛星のような宇宙線観測衛星が必要になっていくであろう。

参考資料

- [1] BGO シンチレータ ,
<https://www.saint-gobain.co.jp/sites/default/files/download/pdf/Crystal_Product_Information_Saint-Gobain.pdf>
- [2] Si APD S8664-1010,
<<http://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/category/3100/4003/4110/S8664-1010/index.html>>
- [3] 小型衛星用 GPS 受信機(IGPS-3),
<http://members.jcom.home.ne.jp/socrate/catalog_IGPS-3_spacelink.pdf>
- [4] Heavensat,
<<http://heavennightclub-london.com/>>