

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01963

研究課題名（和文）惑星磁気圏in-situ多点観測を目指した小型高エネルギー電子分析器の軌道上実証

研究課題名（英文）In-orbit demonstration of a compact high-energy electron analyzer toward in-situ multi-point observations of planetary magnetospheres

研究代表者

篠原 育（Shinohara, Iku）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：20301723

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,300,000円

研究成果の概要（和文）：放射線帯の高エネルギー電子の生成・消失の重要なメカニズムの一つと考えられている波動-粒子相互作用について、放射線帯の大局的な変動への寄与の定量的な理解に必要な多点観測を実現するために、超小型衛星に搭載可能な小型高エネルギー電子計測器を開発し、軌道上実証を目指した。CdTe半導体検出器を電子計測器に応用することにより、超小型衛星の厳しいリソース制約を満たしながらも、100 keVから5 MeVまでの電子を計測する装置を開発することができ、九州工業大学が開発した超小型衛星への搭載を完了した。電子計測器は衛星搭載後の試験も問題無くクリアし、超小型衛星は国際宇宙ステーションから宇宙空間に放出された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高エネルギー電子計測として、Si半導体に加え、高いエネルギーに対する検出効率の高いCdTe半導体を導入することで、1Uサイズでも5 MeV以上の高エネルギー側までエネルギー分解能の高い計測ができる見通しを示した。この成果は、電力制限の厳しい超小型衛星や深宇宙探査における高エネルギー電子計測の搭載可能性を広げるものである。将来の超小型衛星による超多点観測網に高性能な高エネルギー電子計測器を搭載することで、地球や惑星の全球的な高エネルギー粒子をモニターすることは、科学的な意義だけではなく、宇宙環境変動の高精度予測に向けた観測基盤の獲得することであり、人類の宇宙利用の発展を支えることにつながる。

研究成果の概要（英文）：To realize multi-point observations necessary to quantitatively understand the contribution of wave-particle interactions, which is considered one of the essential mechanisms for the acceleration and loss of high-energy electrons in the Earth's outer radiation belt, to the global variation of the radiation belts, we have developed a compact high-energy electron instrument that can be installed on a nano-satellite. By applying a CdTe semiconductor detector to the electron analyzer, we were able to develop an instrument that can measure electrons from 100 keV to 5 MeV, satisfying the severe resource constraints of nano-satellites, and we have completed its installation on a nano-satellite developed by Kyushu Institute of Technology. The high-energy electronic instrument passed the onboard tests without any problems, and the nano-satellite was released into space from the International Space Station.

研究分野：太陽・地球惑星系科学

キーワード：放射線変動 波動粒子相互作用 多点観測 超小型衛星 高エネルギー電子計測器 CdTe半導体

## 1. 研究開始当初の背景

地球をとりまく放射線帯は、**MeV**以上に及びエネルギーの高い粒子が生成、捕捉されている領域である。放射線帯は太陽活動によって時々刻々と変化する太陽風に反応してダイナミックに変動をしているが、近年の日本の「あらせ」衛星の観測研究などから、波動-粒子相互作用による粒子加速や粒子散乱が放射線帯変動の重要な物理素過程となっていることが明らかになってきた。人工衛星による宇宙空間における精密な“その場”観測によって、局所的な物理過程の理解は飛躍的に深まっているが、従来の観測はある一点における観測に過ぎず、宇宙空間において数点程度の観測では、現象の空間的な広がり(例えば、波動粒子相互作用が起こっている領域の空間的な広がり)を把握することには本質的に困難があり、観測された局所的な現象が大局的な放射線帯変動にどれだけ貢献しているのか、放射線帯変動の全体像を定量的に理解することに対するボトルネックとなっている。この状況にブレークスルーをもたらす**1**つの方向性は、磁気圏を数十点以上の超多点で“その場”観測をすることによって、現象の空間構造の時間発展を把握できるようにすることである。急速に発展する超小型衛星技術を超多点観測に活用することが、世界的にも検討されており、将来、国際連携によって地球磁気圏の超多点観測を実現することの議論がはじまっている。

## 2. 研究の目的

本研究では、超小型衛星搭載可能な小型高エネルギー電子分析装置を開発し、実際に超小型衛星に搭載することで軌道上実証をすることが本研究の目的である。

観測装置の小型化に際しての技術的な新規性は、**MeV**エネルギー帯でより高い検出効率をもつ**CdTe**半導体の電子分析部への適応である。日本の科学衛星「あらせ」をはじめ、従来の装置では**Si**半導体を積層することで検出効率を高めたが、**CdTe**半導体検出器を電子分析部として利用すれば、**Si**半導体とほぼ同じエネルギー分解能をもちつつ、**MeV**電子に対しても同じ半導体の厚さで約**2**倍の検出効率を得られ、回路規模を削減し小型化に資することができる。**CdTe**半導体による電子計測の実証も本研究課題の目的である。

本研究計画では**1**機の超小型衛星による実験しか行わないが、運用中の「あらせ」衛星との異なる高度における放射線帯の**2**点間の協調観測を通して、放射線帯変動の理解に寄与することも目的である。搭載する超小型衛星の軌道は高度約**400 km**の円軌道であることから、超小型衛星では放射線帯から地球の超高層大気に向けて降下してくる電子を観測することとなる。「あらせ」衛星は遠地点高度が約**32,000 km**なので、超小型衛星と「あらせ」衛星の同一磁力線上での同時観測を実現できれば、波動粒子相互が発生している磁気圏側の観測を「あらせ」衛星が、その結果降下してくる電子を超小型衛星が観測することとなり、波動粒子相互作用の結果として超高層大気に消失する放射線帯電子の量を定量的に評価することができる。

## 3. 研究の方法

### (1) 超小型衛星搭載用小型高エネルギー電子計測器の開発と搭載

**100 keV**から**5 MeV**までの高エネルギー電子を観測する**Si/CdTe**半導体の積層検出器を開発し、超小型衛星に搭載する。搭載装置の開発にあたっては、超小型衛星側との各種インターフェース調整を実施してから設計・製造を実施する。電子検出部については、**Geant4**による検出器シミュレータを使って半導体の配置、シールド厚、などの決定を行い、設計に反映させる。装置

の製造後，装置の単体試験，超小型衛星システムとの噛み合わせ試験，衛星システム搭載後の試験を実施する．

## (2) CdTe 半導体の検出器評価

**CdTe** 半導体については， $\gamma$  線での検出部評価および電子照射により電子分析性能を確認する．また，高エネルギー電子計測器としての特性評価を実施し，高エネルギー電子の計測性能を確認する．

## (3) 高エネルギー電子計測器の運用計画の検討・立案

今回搭載機会を得た超小型衛星では，電力制約から常時の観測は難しいことや，通信回線から実際に取得できるデータ量の制約は大きい．このため，軌道上のいつどこで観測機器の電源を入れて観測を行うか，衛星機上に蓄積したデータからどのような方法で地上に送信するデータを選択するか，といった運用設計を行う．また，「あらせ」衛星との協調観測計画を立案する．

## (4) 軌道上における高エネルギー電子計測器の運用・データ解析

超小型衛星の国際宇宙ステーション（ISS）からの放出および衛星システムの健全性の確認が取れた後，高エネルギー電子計測器の健全性確認および軌道上での性能評価を実施する．これらの初期運用終了後，科学観測を行い，「あらせ」衛星との同時観測データの比較から，高エネルギー電子の降下の様相をデータ解析から明らかにする．

## 4．研究成果

### (1) 超小型衛星搭載用小型高エネルギー電子計測器の開発と搭載

#### 1Uサイズにおさまる電子計測器の設計

超小型衛星に搭載するために，**Si** 半導体検出器と **CdTe** 半導体検出器を積層する設計・開発を行なった．図 1（上）に，用いた **Si** 半導体検出器を示す．**Si** 半導体検出器は狭ピッチで積層できるよう，薄いセラミックにマウントしたものをを用いた．図 1（下）に示した通り，本検出器で  $^{207}\text{Bi}$  の電子スペクトルを計測し，十分なエネルギー分解能を有することを確認し，積層検出器を製作した．図 2 には半導体検出器を積層したものの写真（図 2（上））と，超小型衛星に搭載した電子計測器の全体写真（図 2（下））を示す．図 2（上）写真の検出部は，図 2（下）写真の上部に格納され，上方に空いた穴から入射してくる電子を検出する構造となっている．

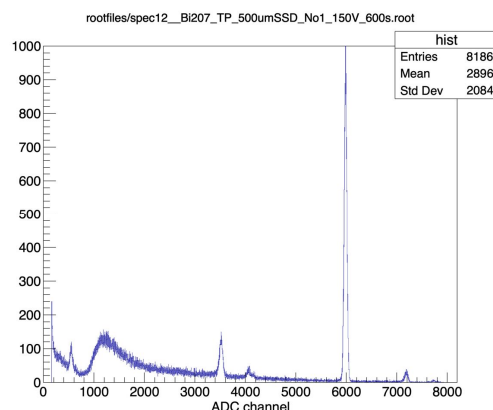
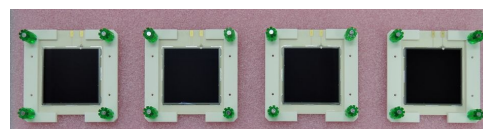


図 1（上）使用した **Si** 半導体検出器，（下）放射線源  $^{207}\text{Bi}$  を計測したエネルギースペクトル（横軸は ADC channel で，検出エネルギーに比例する．）

**Geant4** による検出器シミュレータを用いて貫通電子の影響を評価した結果，重量への制約も勘案し，貫通電子の影響を下げるためのシールドとして **1 mm** 厚のタンタル板で半導体検出部を囲う設計とした．その下方に読み出し用の電子基板（アナログ処理基板 **2** 枚，デジタル処理基板 **2** 枚，電源基板 **1** 枚）を搭載し，衛星システムとは **12** 本の信号線で繋がる設計となっている．重量は **1 kg** 以下となっており，**1U** としての重量制限 **1.1 kg** を満たすことができた．

## 超小型衛星と電子計測器の統合試験

九州工業大学が開発した超小型衛星システムと統合し、総合試験を行なった。衛星システム統合時の写真を図 3 に示す。システム熱真空試験では、各温度での高エネルギー電子計測器の性能試験として、電子計測器の電子基板内部で擬似電荷を発生させ、性能の確認を行い、正常な動作を確認した。また、振動試験前後でも同様の確認を行い、電子計測器の機能・性能が正常であることを確認した。

機上データ処理としては、電子計測器の生成データを衛星システムのフラッシュメモリに記録し、超小型衛星の運用中にデータをダウンリンクする設計とした。特に、「電子計測器側で重要性の高い観測イベントを同定し、そのデータ領域をダウンリンクする」のような柔軟な運用ができるように、搭載機器のソフトウェアを実装した。これらの機上処理や実際の運用性を検証するために、超小型衛星との無線電波を用いた運用模擬試験も実施し、コマンド送受信・ミッションデータ受信の確認を行ない、想定していた動作がなされることを確認した。

### (2) CdTe 半導体の検出器評価

本研究では、高いエネルギーに対する検出効率の高い CdTe を導入することで、「あらせ」衛星ではシンチレータを用いて計測したエネルギー領域をカバーすることを目指した。シンチレータに比べ、よりエネルギー分解能の高い計測ができる上、計測系は Si 半導体と同じものを使うことができるため、全体としてコンパクトな計測器を実現できる。はじめに基礎実験として、既製品を用いて Si 半導体と CdTe 半導体の比較を行なった。図 4 に、放射線源からの電子を Si 半導体検出器 (9mm 角, 0.5mm 厚) (図 4 (左)) と CdTe 半導体検出器 (10 mm 角, 1 mm 厚) (図 4 (右)) で計測したスペクトルを示す。Si 検出器では 976 keV ピークが 482 keV ピークに比して低いが、CdTe 検出器では 976 keV ピークが 482 keV ピークに比して高くなっており、高いエネルギーの電子に対して検出効率が上がっていることが確認できる。また、図 4 (左) に見える 600 channel 付近の広いピークは放射線が検出器を突き抜けた寄与であるが、これは図 4 (右) の CdTe 検出器ではなくなっていることも確認できる。次に、実際に軌道上での電子計測器に用いるサイズとして、20 mm 角, 3 mm 厚の CdTe 半導体検出器の開発を行なった。図 5 に開発した検出器の写真 (図 5 (上)) とこの検出器で取得した  $^{207}\text{Bi}$  のスペクトル (図 5 (下)) を示す。既製品に比べて、面積が 4 倍大きくなったこと、厚さが 3 倍になったことにより、暗電流によるノイズ成分の増加、半導体内の電荷収集効率が不十分になることによるピークの低エネルギー側への裾野など見られるものの、我々が要求する 1 MeV 付近でのエネルギー分解能 10% を十分に満たせていることを確認できた。半導体内の電荷収集効率をさらによくするためには、印加する電圧をさらにも上げる必要があるが、常温では

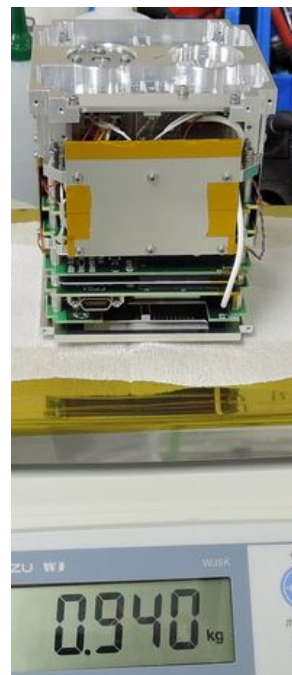
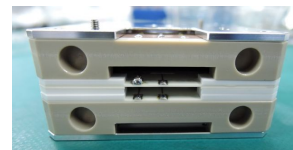


図 2 (上) 積層した半導体検出器、  
(下) 電子計測器の全体像

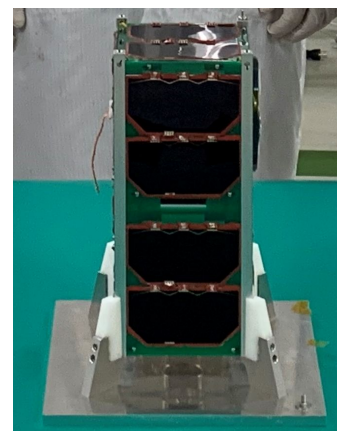


図 3 超小型衛星の全体像。高エネルギー電子計測器は下側に搭載されている。

暗電流の増加によるノイズ成分の増加の寄与が大きいこともわかった。また、今回の **3 mm** 厚 **CdTe** に対して常温で **2 kV** 以下の電圧で運用すると、電荷収集効率が時間とともに悪くなる様子が顕著にみられ、エネルギー分解能は **5** 分程度しか維持できないことも確認された。よりエネルギー分解能を要する場合は **0** 度程度まで冷却して、より高い電圧を印加する必要がある。今回の搭載装置としては、常温で **2 kV** 以下の印加電圧で用いることとしたが、本研究としては、**CdTe** 半導体の電子検出器応用としての制約を明らかにすることができた。

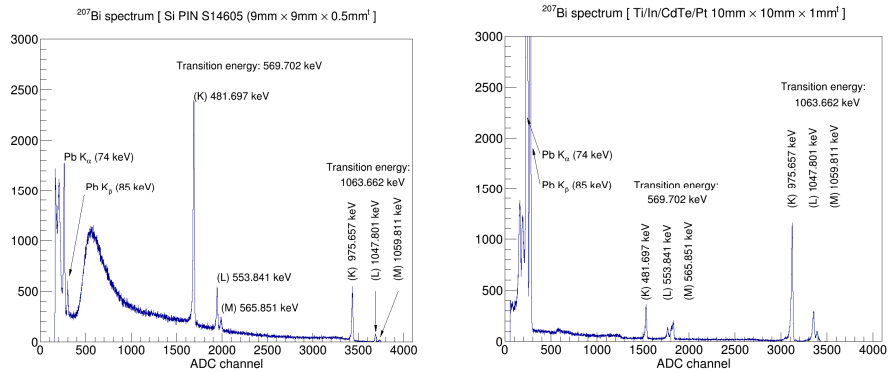


図 4 放射線源  $^{207}\text{Bi}$  を計測したエネルギースペクトル (横軸は **ADC channel** で、検出エネルギーに比例する。)(左) **Si** 半導体 (**9 mm** 角, **0.5 mm** 厚), (右) **CdTe** 半導体 (**10 mm** 角, **1 mm** 厚)

### (3) 高エネルギー電子計測器の運用計画の検討・立案

今回開発した電子計測器は、超小型衛星の電力制限および地上 - 衛星間の通信回線の制約から、電源をオンする時間や取得できる観測データ量に限りがある。運用計画の検討を行った結果、プラズマ圏境界の **L** 値 **4** ぐらいから放射線帯外帯の外縁部である **L** 値が **6** を越えるような領域を計測する機会が毎日あることから、衛星が北半球のそのような領域を通過する時間帯について、**1** 軌道周回あたり約 **5** 分間の連続観測を行うことを運用のベースラインとすることとした。更に、**2** 衛星の連携観測の機会として、「あらせ」衛星と **ISS** の **2017~2020** 年の軌道データから **L** 値が **0.2** 以内、**MLT** が **0.2** 時間以内の距離に両者が近づく機会を調べた結果、**L** 値が **4** 以上の領域でのコンジャンクションは年間数十件もあることがわかり、超小型衛星の寿命を約 **1** 年間と想定したとしても、多くの連携観測ができることがわかったので、高エネルギー電子観測器の運用はこれらの機会を中心にデータを取得する計画を定めた。

### (4) 軌道上における高エネルギー電子計測器の運用・データ解析

開発した小型高エネルギー電子計測器を搭載した超小型衛星は、**COVID-19** の影響による開発の遅れなどもあって当初予定より遅れたものの、**2022** 年 **12** 月に **ISS** から宇宙空間に放出された。しかし、衛星放出後、現在に至るまで衛星からの信号を地上で受信できておらず、高エネルギー電子計測器の軌道上での性能評価試験を実施できていない。

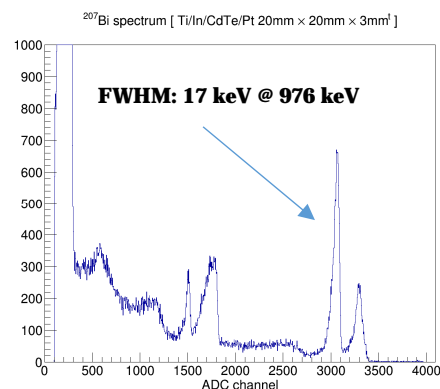
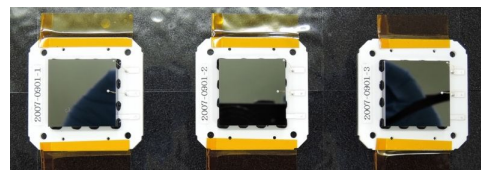


図 5 (上) 開発した **3 mm** 厚の **CdTe** 半導体検出器, (下) 放射線源  $^{207}\text{Bi}$  を計測したエネルギースペクトル (横軸は **ADC channel** で、検出エネルギーに比例する。)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Iku Shinohara, Takefumi Mitani, Mariko Teramoto, Kazushi Asamura, Yumie Kawagoe, Ryota Onogi, Takeshi Takashima
2. 発表標題 High-energy Electron Observation by PINO/BIRDS5
3. 学会等名 The 29th Virtual UNISEC-Global Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 篠原 育、三谷 烈史、寺本 万里子、浅村 和史、川越 弓恵、大野木 瞭太、高島 健
2. 発表標題 The latest status of a high-energy electron analyzer (PINO) onboard a CubeSat (BIRDS-5)
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第152回総会及び講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Iku Shinohara, Takefumi Mitani, Mariko Teramoto, Kazushi Asamura, Yumie Kawagoe, Ryota Onogi, Takeshi Takashima
2. 発表標題 Present status of the development of high-energy electron analyzer (PINO) onboard a CubeSat (BIRDS-5)
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 篠原 育
2. 発表標題 超多点観測による宇宙環境変動の理解
3. 学会等名 超小型衛星利用シンポジウム 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 篠原 育、三谷 烈史、寺本 万里子、浅村 和史、大野木 瞭太、川越 弓恵、高島 健
2. 発表標題 Possible observation plans for high-energy analyzer (PINO) onboard a CubeSat (BIRDS-5)
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第150回講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mariko Teramoto, Mengu Cho, Hirokazu Masui, Sangkyun Kim, Takashi Yamauchi, Necmi Chihan Orger, George Maeda
2. 発表標題 Educational and research activities of nanosatellite technologies at the Kyusyu Institute of Technology
3. 学会等名 The 43rd COSPAR Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Iku Shinohara, Takefumi Mitani, Mariko Teramoto, Kazushi Asamura, Ryota Onogi, Takeshi Takashima
2. 発表標題 Development of a high-energy electron analyzer onboard CubeSats
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 篠原 育、三谷 烈史、寺本 万里子、浅村 和史、大野木 瞭太、高島 健
2. 発表標題 PINO (Particle Instrument for Nano-Satellite) onboard the BIRDS5 satellite
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第148回講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mariko Teramoto , Hoda Elmegharbel, Makiko Kishimoto, Hind Mahmoud, Miori Nakai, Sangkyun Kim, Necmi Cihan Orger, Mengu Cho
2. 発表標題 Space weather missions onboard Cubesats developed by Kyutech
3. 学会等名 第17回宇宙環境シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺本 万里子、H. Elmegharbel、H. Mahmoud、岸本 真生子、中井 美織、Sangkyun Kim、Necmi Cihan Orger、趙 孟佑、SPATIUM II and BIRDS V Project Members
2. 発表標題 九州工業大学が開発した超小型衛星による電離圏観測計画について
3. 学会等名 宇宙空間からの地球超高層大気観測に関する研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高島 健  (Takashima Takeshi)  (10298193)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授    (82645)	
研究分担者	寺本 万里子  (Teramoto Mariko)  (10614331)	九州工業大学・大学院工学研究院・准教授    (17104)	
研究分担者	三谷 烈史  (Mitani Takefumi)  (70455468)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教    (82645)	



6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	川越 弓恵  (Kawagoe Yumie)		
研究協力者	大野木 瞭太  (Onogi Ryota)		
連携研究者	浅村 和史  (Asamura Kazushi)  (50321568)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授    (82645)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関