

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03733

研究課題名(和文) ジオスペース探査衛星搭載の高エネルギー電子分析器の軌道上較正

研究課題名(英文) In-flight calibration of high energy electron detector on board the ERG

研究代表者

三谷 烈史 (Mitani, Takefumi)

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

研究者番号：70455468

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地球周辺の宇宙空間「ジオスペース」において高エネルギー電子が生成・消滅する過程を明らかにするため、2016年12月に打ち上げられたジオスペース探査衛星(ERG/あらせ)のデータ、特に、70 keV - 2 MeVの高エネルギー電子を連続的に観測する「高エネルギー電子分析器(HEP)」のデータについて、軌道上でのHEP観測データと地上での検出器シミュレータにより、分析器のエネルギー・角度の応答関数を構築した。これを観測データに適用し、同じ衛星に搭載されたMEPe、XEPと重なるエネルギー範囲で比較評価し、その妥当性を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球周辺の宇宙空間「ジオスペース」において高エネルギー電子が生成・消滅する過程を明らかにするために、軌道上で計測された電子フラックスデータを校正し、その妥当性を示すことが肝要である。本研究にて開発した校正方法で得られたデータを、異なる検出原理をもつ計測器で得られたデータと比較することにより本手法の妥当性を示したとともに、他衛星ともほぼ整合する結果を得ている。これにより海外の衛星データと合わせ、放射線帯の複数の地点において電子のエネルギーに応じたフラックス変動を議論することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we studied calibration method of the HEP instruments onboard the ERG satellite. We have developed a detector simulator using the Geant4 toolkit, in order to deduce the distribution of incident electrons from the direction and energy detections in orbit. Using the simulator, we calculate response matrices of the detectors and derive incident fluxes from the detected counts. The derived fluxes of electrons at around 90 keV are consistent with those observed by the medium-energy particle experiments - electron analyzer (MEP-e), which utilizes an electrostatic analyzer. Thus, we have illustrate the validity of our method using in-flight data. The calibrate data is open to the public.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：高エネルギー電子 ERG あらせ

1. 研究開始当初の背景

宇宙においては、非熱的なエネルギー分布を持った相対論的粒子が普遍的に存在する。地球をとりまく放射線帯は、MeV以上に及ぶエネルギーの高い粒子が生成、捕捉されている領域であり、近年の研究から、波動・粒子相互作用など様々な粒子加速機構が放射線帯の中で発動している可能性が指摘されており、地球だけでなく木星など天体磁気圏に普遍的な高エネルギー現象を追究するための天然の実験室としても注目されている。地球周辺の宇宙空間「ジオスペース」には、この放射線帯を含め6桁以上のエネルギー幅をもつ粒子が共存し、大規模エネルギー解放現象である宇宙嵐に伴って相対論的高エネルギー電子が誕生するなど、非常にダイナミックに変動する領域である。この変動メカニズムを解明するために、放射線帯の中心部を含めジオスペース赤道面における粒子・電磁場・波動の統合観測を実現しているのが、2016年12月に打ち上げられたジオスペース探査衛星 ERG である。ERG 衛星は、放射線帯を探査する衛星としてコミュニティが長年準備してきたものであり、アメリカの Van Allen Probes 衛星との同時観測を含め、ジオスペースを多角的に理解する絶好の機会が訪れていた。

2. 研究の目的

本研究は、地球周辺の宇宙空間「ジオスペース」において、相対論的なエネルギーをもつ電子がどのように生成され、消滅するのかを明らかにすることを目指し、そのために、2016年12月に打ち上げられたジオスペース探査衛星 ERG に搭載された「高エネルギー電子分析器 (HEP)」について、入射スペクトルに応じて検出されるスペクトルを導出する検出器シミュレータの開発・検証を行うこととする。特に、検出器の原理上、高エネルギー電子が低エネルギー電子に重畳して計数されてしまう成分を差し引きできるように、シミュレータの信頼性を軌道上データ・地上ビーム照射試験と合わせて検証する。

3. 研究の方法

本研究では、ERG 衛星で 70 keV-2 MeV の高エネルギー電子を観測する「高エネルギー電子分析器 (HEP)」について、軌道上での観測データと地上での検出器シミュレータにより、分析器のエネルギー・角度の応答関数を構築・検証した。

具体的には、以下を実施した。

(1) Geant4 と呼ばれる、粒子と物質の相互作用をシミュレーションするために CERN が開発したソフトウェアライブラリを用いて、検出器シミュレータを構築した。

(2) フライト品と同等の電子検出部モジュールを製作し、電子照射試験とシミュレーションの比較を行った。

(3) (1)にて構築した検出器シミュレータから、電子の応答関数を構築し、その妥当性評価を行うとともに、実際の軌道上での観測データに適用した。これを他の観測機器のデータと比較した。

4. 研究成果

検出器シミュレータの構築・検証、地上試験用モジュールの製作・それを用いた電子ビーム照射試験を進め、軌道上データの校正、そしてその妥当性評価を本研究で実施することができた。以下、具体的に記載する。

(1) 検出器シミュレータの構築

従前より構築していたシミュレータは HEP 開発を開始する前に、そのコリメータや検出器の形状を決めるための評価に用いた簡易モデルであったが、フライト品の設計・製造時にいくつか形状の変更をしたため、本モデルを最新版にアップデートするとともに、視野外からの混入を評価するために、電子検出部周りの構造体を含めて、全てソフトウェア内に記述した。図1は構築したモデルであり、HEP の衛星外に露出する電子観測部を全て、フライト品と同等に構成した。電子検出部は、70 keV-1 MeV を観測する HEP-L が3台、0.7 - 2 MeV を観測する HEP-H が3台含まれる。シミュレータの簡単な検証として、検出器の感度を決める幾何学的因子を本シミュレータで導出し、それと別の幾何学計算で求めた値と比較し、図2のように差異がないことを確認した。

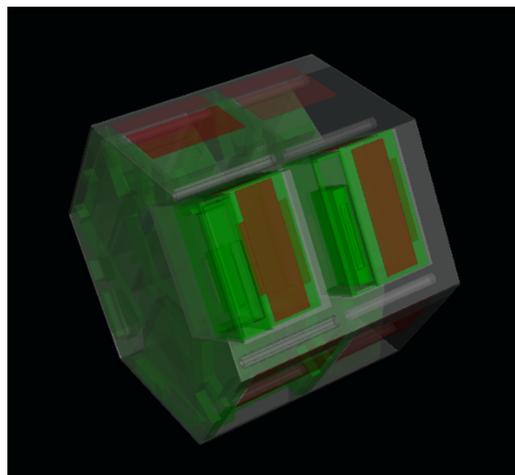


図1 構築した検出器シミュレータ

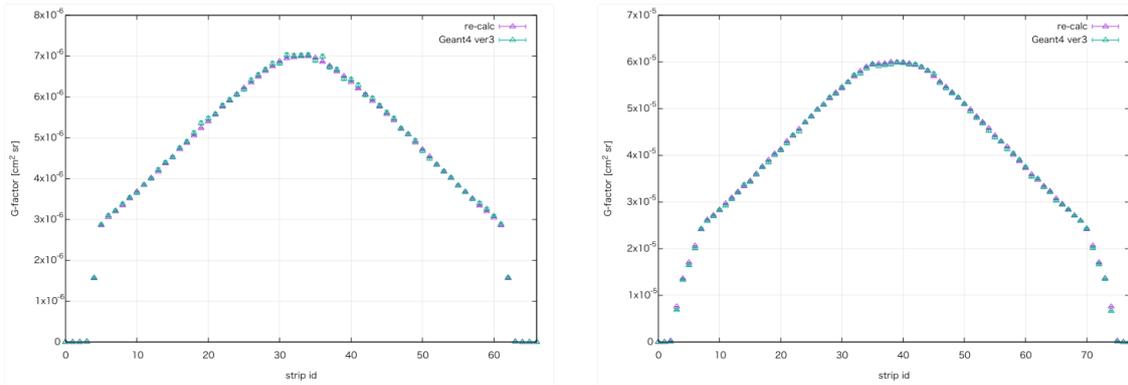


図 2 構築した検出器シミュレータによって計算した各ストリップの幾何学的因子（青）を単純な幾何学計算から得られた値（紫）と比較したもの。（左：HEP-L、右：HEP-H）

(2) フライト品と同等の電子検出モジュールの製作

検出器シミュレータとの比較作業として、打ち上げ前のフライト品の地上試験データを用いるとともに、フライト品で評価が十分にはできなかった低エネルギー付近の応答を評価するために、電子検出部のフライト余剰品を用い、それを囲うアルミケース・コリメータを今回製作し、電子検出モジュールを製作した。これをフライト品と同様のビーム試験に供し、同様の結果を得るとともに、フライト品ではできなかった 100 - 300 keV の電子照射試験も実施することができた。例えば、図 3 は 200 keV 電子を照射した時に観測されるスペクトルを検出器シミュレータ（左図）、地上ビーム試験データ（右図）について示したものである。横軸 180 keV より低い部分で、入射電子のエネルギー 200 keV より低いエネルギー成分が地上ビーム試験データには多く検出されている。シミュレータと比較したところ、電子散乱成分が実験では余剰にみられることがわかり、真空チャンバなどのビーム試験環境を含めて精査する必要があることがわかった。

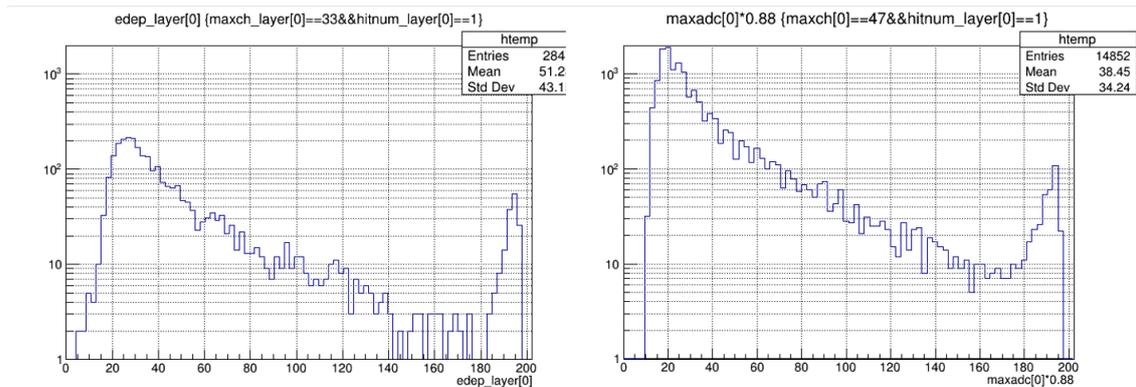


図 3 200 keV 電子を照射した場合に検出されるスペクトル（左：シミュレーション、右：地上ビーム試験結果）

(3) 検出器シミュレータを用いた軌道上観測データの校正と検証

構築した検出器シミュレータを用いて、検出器の応答関数を構築し、観測データに適用し、同じ衛星に搭載された電子分析機 MEPe, XEP と重なるエネルギー範囲で比較評価し、その妥当性を評価した。応答関数の構築にはいくつかの段階を踏み、現時点では、検出回路の特性を考慮したものを最新版としている。図 4 にその観測データを用いて、MEP-e/HEP/XEP のスペクトルを示す。MEP-e と HEP は異なる検出原理に基づいている電子分析器であるが、2 つの計測が重なる 90 keV 付近で非常によく整合する結果が得られている。軌道上の長期間のデータについてこうした整合性評価を行なった結果を JGR 誌に論文として投稿し、査読中である。また、本手法を適用した結果を公開データとして一般ユーザーが使える形として提供している (doi:10.34515/DATA.ERG-01000) ため、Van Allen Probes 衛星など海外の同種の観測データと比較ができるようになり、本方法の妥当性を客観的に示すことができた。その結果の 1 例として、HEP と Van Allen Probes 衛星のデータ比較が JGR 誌へ投稿され、査読中である。また、ERG 衛星全体として、Van Allen Probes 衛星との比較を含めた結果を SSR 誌へ投稿準備中である。

また、本作業を進める中で、HEP の観測範囲より高いエネルギーの電子フラックスを正しく評価する必要がでてきた。これは、検出原理として元々より高いエネルギーの電子の影響を受ける

ことと、また 3 MeV 程度の電子は HEP 筐体を貫通するため、視野外からの電子の影響も考慮する必要があることからである。そうした事項を定量的に評価するためには、より高いエネルギーを計測する XEP の観測データを校正する必要がある。本研究で開発した手法を XEP にも適用し、評価を進めることとした。この作業は現在進行中であり、将来的には、HEP/XEP の整合性・妥当性を評価したデータを公開していく予定である。また、XEP の校正を踏まえて、HEP の視野外からの混入の影響評価を行うために、HEP 筐体を含んだシミュレーションを進めた。

以上、(1)-(3)をもって、ERG/HEP のデータの校正とその妥当性を示すことができた。これにより海外の衛星データと合わせて、放射線帯において電子のエネルギーに応じたフラックス変動を議論することが可能となり、プラズマ波動・電磁場との相互作用の有無、ひいては高エネルギー電子の生成・消滅過程に迫ることが可能となる。今後もより確度の高い校正を進める予定であるが、本研究によりその基盤は十分に築かれた。

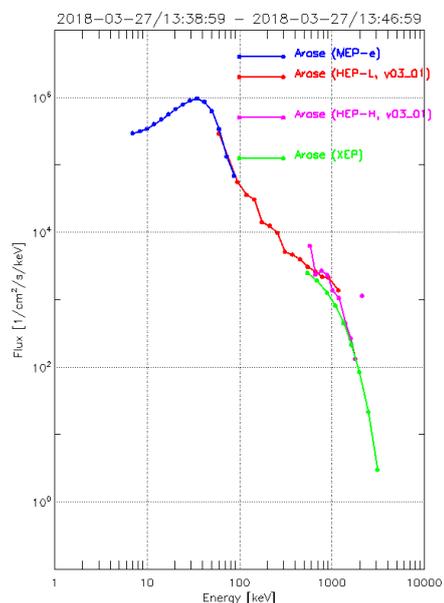


図 4 校正済みの HEP エネルギースペクトルと MEPe/XEP の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takefumi Mitani, Inchun Park, Tomoaki Hori, Takeshi Takashima, Satoshi Kasahara, Satoshi Kurita, Mariko Teramoto, Nana Higashio, Yoshizumi Miyoshi, and Iku Shinohara
2. 発表標題 Calibration status of the high-energy electron experiment (HEP) onboard the Arase satellite
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三谷 烈史, PARK INCHUN, 堀 智昭, 滑川 拓, 浅村 和史, 高島 健, 笠原 慧, 栗田 怜, 寺本 万里子, 東尾 奈々, 三好 由純, 篠原 育
2. 発表標題 Validation of High-energy electron detector simulator for the HEP instruments onboard Arase
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三谷 烈史, Park Inchun, 堀 智昭, 滑川 拓, 浅村 和史, 高島 健, 笠原 慧, 栗田 怜, 寺本 万里子, 東尾 奈々, 三好 由純, 篠原 育
2. 発表標題 Validation of High-energy electron detector simulator for the HEP instruments onboard Arase
3. 学会等名 第146回地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPSS) 総会および講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三谷 烈史, 高島 健, 堀 智昭, PARK INCHUN, 三好 由純, 笠原 慧, 栗田 怜, 寺本 万里子, 東尾 奈々, 篠原 育
2. 発表標題 High-energy electron observations with the HEP instruments onboard Arase and its calibration status
3. 学会等名 第144回地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPSS) 総会および講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takefumi Mitani, Inchun Park, Tomoaki Hori, Takeshi Takashima, Satoshi Kasahara, Satoshi Kurita, Mariko Teramoto, Nana Higashio, Yoshizumi Miyoshi, and Iku Shinohara
2. 発表標題 Improvement of detector response matrices of the high-energy electron experiments (HEP) onboard the Arase satellite
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会
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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------