

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：32689

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22352

研究課題名（和文）高エネルギー銀河宇宙線の直接観測による宇宙線の加速・伝播機構の研究

研究課題名（英文）Study of the cosmic-ray acceleration and propagation with the direct observation of high-energy galactic cosmic-rays

研究代表者

赤池 陽水（AKAIKE, Yosui）

早稲田大学・理工学術院・主任研究員（研究院准教授）

研究者番号：70726744

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では地球近傍の宇宙線加速源や宇宙暗黒物質の探索を目的として、国際宇宙ステーションCALET(CALorimetric Electron Telescope)の観測データをもとに宇宙線電子成分の高精度なエネルギースペクトルの導出を行った。CALETは2015年10月の観測開始以降6年以上に渡り安定的にデータを蓄積しており、この観測データから5TeVに至るエネルギースペクトルを導出した。1TeV付近のスペクトルの折れ曲がりの精度は6.5に向上している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

TeV以上のエネルギー領域における宇宙線の電子成分は地球近傍の宇宙線加速源を特定できる可能性が理論的に指摘されており精密な観測が望まれているが、フラックスの希少さと1000倍以上存在する陽子との選別の困難さからこれまでほとんど観測は行われていなかった。CALETの検出器は厚い物質質量を持つ解像型のカロリメータで上記の問題を克服し、国際宇宙ステーションにおける長期間観測を背景に高精度なエネルギースペクトルを導出した。これは宇宙線の標準的な理論モデルの検証に重要な基礎データとなる。

研究成果の概要（英文）：The goals of this study are to search for possible nearby cosmic-ray sources and dark matter signature with the precise measurement of the electron and positron spectrum with the CALET (CALorimetric Electron Telescope) on the International Space Station. CALET has been accumulating scientific data without any major interruptions for over six years since the start of operation in October, 2015. The significance of the spectral cutoff in TeV region is improved to 6.5

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙線近傍加速源 宇宙線電子 国際宇宙ステーション 衝撃波加速 銀河内伝播 宇宙線原子核

## 1. 研究開始当初の背景

我々が住む銀河系内を起源とする宇宙線（銀河宇宙線）は、超新星残骸における衝撃波で加速され、星間磁場により銀河系内を拡散的に伝播して地球に飛来するという標準モデルによって理解されつつある。しかしながら、その起源や加速・伝播機構の詳細については未解明な点が多い。宇宙線の理解が難しい要因の一つには、宇宙線が磁場のために伝播過程において直進できず、加速領域が同定できないことが挙げられる。しかし高エネルギーの電子成分は、後述するように加速源を同定できる可能性が理論的に予測されており、加速・伝播機構の解明に大きな期待が寄せられている。

宇宙線電子は、伝播中に星間磁場とのシンクロトロン放射と背景光子との逆コンプトン散乱により急激にエネルギーを失うため、高エネルギーほど寿命は短く、遠方より飛来できないという特徴を持つ。したがって、1TeVを超えるエネルギー領域で観測される電子の加速源は、地球近傍1kpc以内にある伝播時間10万年以下の源に限られるが、この条件を満たす加速源の候補はVelaなどの数例に限られるため、TeV領域に離散的で特徴あるスペクトル構造が予想される。到来方向にも観測可能な10数%の異方性が現れると予想されており、電子の精密な観測が実現できれば、宇宙線加速の直接的な証拠となる近傍加速源の存在を、荷電粒子による観測から初めて明らかにすることができるのである。

超新星残骸で宇宙線が加速されている証拠は、既にX線やガンマ線の観測から明らかになっているが、TeV領域の電子観測で加速源が同定できれば、初めて荷電粒子自身による宇宙線加速の直接的な証拠が得られる。そして、そのスペクトル構造から衝撃波加速や銀河内伝播のパラメータ（加速時間、上限エネルギー、源におけるスペクトルのべき、拡散係数など）について定量的な評価が可能になり、加速・伝播機構の解明に大きな進展が期待される。また逆に加速源が同定できない（Velaからの寄与が認められない）場合には、標準モデルに新たな問題を提起することになり、理論モデルの再考を促す重要な観測事実を与える。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、国際宇宙ステーション（ISS）に搭載した宇宙線観測装置CALET（CALorimetric Electron Telescope）のデータを基に、精密に10 TeV領域に至る高エネルギー電子のエネルギースペクトルを導出することである。CALETは2015年8月にISSの日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォームに設置されて以来、電子（1 GeV – 20 TeV）、ガンマ線（1 GeV – 10 TeV）、陽子・原子核成分（数10GeV – 1000 TeV）の観測を行っており、6年以上に渡り安定的にデータを蓄積している。CALETは銀河宇宙線の観測に加えて、重力波やガンマ線バーストなどの突発天体の探索、太陽変動や宇宙天気のリモニタなど、包括的な高エネルギー現象の解明を目指している。

上述のように高エネルギーの電子観測は宇宙線の理解に大きな貢献が期待されるが、TeV領域の観測はあまり行われていない。この要因は、電子のフラックスが少ないこと、陽子のバックグラウンドが多いこと、そしてスペクトル構造を精密にとらえるため、高いエネルギー分解能による観測が必須であることが挙げられる。CALETは電子観測に最適化した解像型のカロリメータ型の検出器である。30放射長の厚い物質質量を有し、7000以上に細分化した構造でシャワー形状の差異からバックグラウンドとなる陽子を電子の数%以下に選別し、微細なエネルギースペクトル構造をとらえるのに不可欠な高いエネルギー分解能（2%）を持っている。そしてISSにおける長期間観測により高統計なデータを提供する。これらはデータ解析によって検出器中のシャワーイメージを詳細に再構成することで観測性能を最大限発揮するものであり、本研究では特に電子観測に与える最も大きなエネルギー較正と粒子識別の解析精度向上に注力し、10 TeV領域に至るエネルギースペクトルの導出を行う。また原子核成分のデータ解析を同時に進め、これまでにない高統計、高精度な各原子核のエネルギースペクトルを導出することで、宇宙線の加速・伝播機構の体系的な理解を目指す。

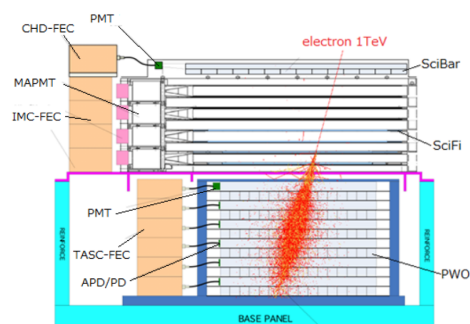


図1 CALETのカロリメータ側面図と1TeV電子の検出例。TeVの電子が作る粒子シャワーを吸収可能な厚い物質質量を持ち、細分化した構造でシャワーイメージを可視化することで、粒子識別とエネルギー測定を可能にする。

### 3. 研究の方法

2018年に発表した論文では780日間の観測を基に10 GeV – 4.8 TeVのエネルギースペクトルを報告しているが、2021年度末までに約3倍の統計量を稼ぐことが可能である。10 TeV領域へ観測エネルギーを延長するためには、安定的なデータの蓄積に加えて長期間観測におけるエネルギー較正が不可欠である。さらにエネルギーと共に増大する陽子バックグラウンド除去の性能向上が不可欠であり、これまでの解析手法からさらに選別精度の向上させることが必要である。

CALETにおけるエネルギー較正は、宇宙空間で実際に測定する宇宙線の陽子、ヘリウム、最小電離損失粒子を利用する。このエネルギー較正用のデータは毎日3時間取得しており（この間、科学観測も並行して実施している）、このデータを基に各検出器の信号応答の経年変化をモニターする。これまでの6年以上の観測中に生じた永久故障は全7,932チャンネルのうち1チャンネルのみであり、観測当初の高い観測性能を維持している。

軌道上の運用に関してはJAXAの運用担当者と連携して科学運用を進めている。早稲田大学に設置したWCOC (Waseda CALET Operations Center) では、科学運用と検出器較正を含む高次データの作成を行う。ISSの軌道に応じた観測モード変更のコマンドリストを週に3度作成して機上にアップロードし観測効率の最大化を行う。稀に生じる宇宙線に起因する不具合には、直ぐに検知できるシステムを開発しており、さらにシフト担当者が毎日データの健全性を確認している。そして、実際に不具合が起きた際にはJAXAの運用担当者と連携して早急な処置を行い、安定的なデータ収集を実現する。

観測データにおける電子選別は、検出器中のシャワー形状の差異によって識別する。これまでの解析では、シャワー形状を表す2種類のパラメータによる単純な識別手法と、9種類のパラメータを用いたBDTによる多変量解析を用いてきた。本研究ではさらに選別に有効なパラメータを使って13種類のパラメータによる多変量解析を確立し、選別精度の向上を図る。この解析には多量のシミュレーションデータが必須であり、検出器応答を仔細に再現するシミュレーションデータの作成を行い、さらにその観測データとの一致性を検証する。得られた誤差は系統誤差として評価する。

### 4. 研究成果

2020年9月までのデータを基に電子のエネルギースペクトルを更新し、2021年の宇宙線国際会議にて報告した。これは以前に報告した論文の2.3倍の統計量に相当し、TeV領域の電子スペクトルの折れ曲がりの有意度は $6.5\sigma$ に増大している。TeV領域の電子選別は13パラメータを使った選別精度向上を達成し、現在2021年度末までの高統計データを使って論文投稿の準備を進めているところである。さらに、2021年末までのデータから5 TeV以上のエネルギーの電子候補イベントを約60例選別しており、これらについては更なる陽子との選別精度向上のため、イベント毎に入射位置、方向、エネルギーを揃えたシミュレーションデータを用意し、個別に電子らしさをBDTやLikelihood法によって検証を進めている。

並行して進めた原子核成分の解析では主要な一次宇宙線成分である炭素、酸素、鉄、そしてニッケルの各エネルギースペクトルを導出し、いずれもPhysical Review Letters誌から発表した。これまでにない高統計、かつ広いエネルギー領域を単一の検出器で測定することができた。炭素と酸素が陽子やヘリウムに見られる数100 GeV/nにおけるエネルギースペクトルの折れ曲がり（硬化）を示しているのに対し、重い原子核である鉄とニッケルのエネルギースペクトルはいずれも単一の冪型を示しており、硬化の兆候は見られなかった。また、炭素と酸素の比、鉄とニッケルの比はそれぞれエネルギーに対して一定の値を示しており、それぞれが同じエネルギー依存性を示している。これは両者が類似の加速・伝播機構を経て地球に飛来していることが示唆される。これらは宇宙線の標準モデルでは説明できないものであり、理論モデルの検証に重要な基礎データが得られた。伝播機構の解明に重要な二次核/一次核 (B/C比) についてもTeV領域まで観測が進展しており、現在論文投稿の準備を進めているところである。

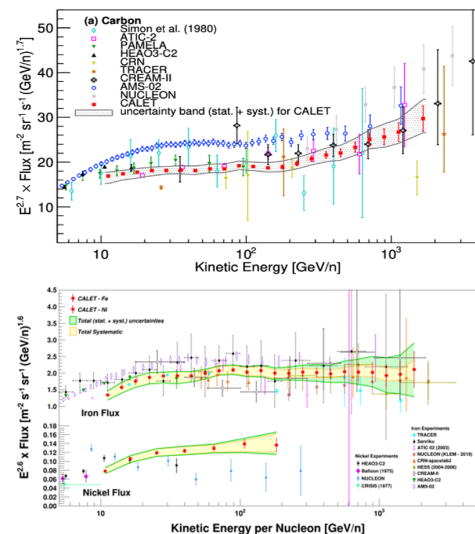


図2 CALETで測定した炭素(上図)と鉄、ニッケル(下図)のエネルギースペクトル。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Asano Katsuaki, Asaoka Yoichi, Akaike Yosui, Kawanaka Norita, Kohri Kazunori, Motz Holger M., Terasawa Toshio	4. 巻 926
2. 論文標題 Monte Carlo Study of Electron and Positron Cosmic-Ray Propagation with the CALET Spectrum	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 5~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac41d1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 O. Adriani, Y. Akaike et al. (CALET Collaboration)	4. 巻 128
2. 論文標題 Direct Measurement of the Nickel Spectrum in Cosmic Rays in the Energy Range from 8.8 GeV/n to 240 GeV/n with CALET on the International Space Station	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 131103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.128.131103	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 O. Adriani, Y. Akaike et al. (CALET Collaboration)	4. 巻 126
2. 論文標題 Measurement of the Iron Spectrum in Cosmic Rays from 10 GeV/n to 2.0 TeV/n with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 241101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.126.241101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 O. Adriani, Y. Akaike et al. (CALET Collaboration)	4. 巻 125
2. 論文標題 Direct Measurement of the Cosmic-Ray Carbon and Oxygen Spectra from 10 <sup>??</sup> GeV/n to 2.2 <sup>??</sup> TeV/n with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 251102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.125.251102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 赤池陽水
2. 発表標題 CALETによる炭素と酸素のエネルギースペクトル硬化の検出
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yosui Akaike
2. 発表標題 Direct Measurement of Cosmic-Ray Proton and Nuclei Spectra with CALET
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 赤池陽水
2. 発表標題 CALETによる宇宙線原子核のエネルギースペクトルの観測
3. 学会等名 第21回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤池陽水
2. 発表標題 飛翔体観測(CALET)による高エネルギー宇宙線加速天体の研究
3. 学会等名 東京大学宇宙線研究所令和二年度共同利用研究成果発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤池陽水
2. 発表標題 CALETによる10GeV/nから2.2TeV/nの炭素と酸素のエネルギースペクトル観測結果
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤池陽水
2. 発表標題 CALET5年間の観測による炭素・酸素・鉄のエネルギースペクトルとB/C比の観測結果
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤池陽水
2. 発表標題 国際宇宙ステーションにおけるCALET6年間の観測・運用とエネルギー較正
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤池陽水
2. 発表標題 国際宇宙ステーション搭載CALETによる宇宙線原子核の観測
3. 学会等名 第22回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤池陽水
2. 発表標題 飛翔体観測(CALET)による高エネルギー宇宙線加速天体の研究
3. 学会等名 令和三年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yosui Akaike
2. 発表標題 Direct Cosmic-Ray Measurements with CALET on the International Space Station
3. 学会等名 International Conference on High Energy Density Science 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yosui Akaike, Paolo Maestro for the CALET Collaboration
2. 発表標題 Measurement of cosmic-ray secondary-to-primary ratios with CALET on the International Space Station
3. 学会等名 37th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shoji Torii, Y. Akaike for the CALET Collaboration
2. 発表標題 Precise Measurement of the Cosmic-ray Electron and Positron Spectrum with CALET on the International Space Station
3. 学会等名 37th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

CALET: カロリメータ型電子望遠鏡  
<https://calet.jp>  
宇宙線炭素・酸素のテラ電子ボルト領域に至るスペクトル硬化を検出  
<https://www.waseda.jp/top/news/71524>  
宇宙線の鉄/ニッケル成分の高精度観測  
<https://www.waseda.jp/top/news/79755>

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