

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03592

研究課題名(和文) 宇宙線原子核の直接観測による銀河宇宙線の加速・伝播機構の研究

研究課題名(英文) Research on the galactic cosmic-ray acceleration and propagation by the direct measurement of the cosmic-ray nuclei

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、国際宇宙ステーション搭載の宇宙線観測装置CALET(Calorimetric Electron Telescope)のデータを解析し、これまでにない高精度の陽子、He、B、C、O、Fe、Niなどの主要な原子核のエネルギースペクトルを導出した。標準的な加速・伝播モデルでは説明できないスペクトル硬化や、二次核/一次核比の測定など、宇宙線の加速・伝播の理論モデルの解明に重要な基礎データが得られた。さらに、電子(+陽電子)のエネルギースペクトルや太陽変調による宇宙線強度の電荷依存性などの成果も得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙における高エネルギー放射の理解には、その源になっている荷電粒子(宇宙線)の理解が必須である。地球で観測される宇宙線は、その加速・伝播が複雑に絡み合った結果であり、宇宙線を正確に理解するためには、粒子種別や個々のエネルギースペクトルを測定し、各々の側面を切り分けることが不可欠である。本研究では、CALETによる高い粒子選別性能と長期間の観測量を背景に、直接観測として最も高いエネルギー領域(GeV - TeV領域)のエネルギースペクトルを導出した。これらは、宇宙線の加速・伝播モデルの検証に重要な基礎データとなり、宇宙における高エネルギー現象の探究に重要な役割を果たす。

研究成果の概要(英文)：In this study, we analyzed data from the Calorimetric Electron Telescope (CALET), a cosmic-ray experiment installed on the International Space Station. We derived energy spectra of cosmic-ray nuclei such as protons, He, B, C, O, Fe and Ni with unprecedented accuracy. The obtained data are crucial for understanding the acceleration and propagation of cosmic rays, including the hardening of spectra and measurements of secondary-to-primary ratios that cannot be explained by standard acceleration and propagation models. Furthermore, we also achieved results regarding the energy spectrum of electrons + positrons and the charge dependence of cosmic-ray fluxes due to solar modulation.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：銀河宇宙線 衝撃波加速 銀河内伝播 国際宇宙ステーション カロリメータ CALET 宇宙線原子核 二次核一次核比

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 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、「超新星残骸によ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く残っており、観測精度の向上により、標準モデルでは予想されていなかったスペクトルの変化（硬化）を示す観測結果が報告されている。地球で観測される宇宙線は、その加速・伝播が複雑に絡み合った結果であり、宇宙線を正確に理解するためには、各原子核のエネルギースペクトルを高精度に測定し、各々の側面を切り分けることが重要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、国際宇宙ステーション(ISS)に搭載した宇宙線観測機 CALET(Calorimetric Electron Telescope)によって収集したデータを解析し、陽子から鉄に至る各宇宙線のエネルギースペクトル導出を行う。直接観測としてこれまでで最も高いエネルギー領域を高精度に測定し、銀河宇宙線の加速・伝播機構を定量的に検証することが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

CALETは、2015年8月にISSに設置されて以来、電子、ガンマ線、陽子・原子核の観測を行っており、8年以上に亘り安定的にデータを収集している。銀河宇宙線の観測に加えて、重力波やγ線バーストなどの突発天体探索、太陽変調のモニタ、宇宙天気といった宇宙における高エネルギー現象の解明を目指している。

CALETは図1のように30放射長の物質質量をもつ解像型のカロリメータである。原子核測定に重要な特徴は、エネルギー較正に必要なMIP領域から1PeVのシャワーエネルギーに相当する $10^6$ MIPまで計測可能な6桁のダイナミックレンジを有する点と、各電荷を選別可能な素電荷に対して10-30%の電荷分解能を有する点である。さらに、宇宙空間における長期間観測により、10 GeV から 1 PeV に至る測定が達成可能である。このCALETの特性を駆使して未開拓領域の高精度観測を実現する。

CALETにおけるデータ解析は、検出するイベントのシャワー画像を詳細に再構成し、イベントごとに入射粒子の到来方向や種類、エネルギーを再構成することにある。このため、検出器各要素のエネルギー較正精度が測定精度に直結する。そこで長期間観測における測定性能を保証するため、実際に宇宙空間で観測する原子核の最小電離損失粒子を用いてエネルギー較正を行う。これにより、検出器応答の経年変化については常時監視し、検出器較正に反映させる。また、スペクトルの変化に対応する精緻なスペクトル導出のため、複数のシミュレーションコードやハドロン相互作用モデルによる系統誤差の詳細を検証する。シミュレーションデータと観測データの整合性を詳しく検証すると同時に、データ解析の安定化を図り、スペクトルの導出を行う。

### 4. 研究成果

本研究では、主要な陽子や鉄といった原子核の各エネルギースペクトルが得られた。そして、代表的な二次宇宙線であるホウ素のエネルギースペクトルおよび炭素とのフラックス比を導出した。さらに CALET 実験の主目的である電子のエネルギースペクトルや太陽変調に伴う宇宙線の強度変動の電荷依存性も、本研究で得られた成果である。これらの成果はすべて、Physical Review Letters 誌に論文として発表した。以下に成果の概要を示す。

#### (1)陽子、ヘリウムのエネルギースペクトル

[Phys. Rev. Lett. **129**, 101102 (2022) and Phys. Rev. Lett. **130**, 171002 (2023)]

CALETの2,272日間のデータから陽子のエネルギースペクトルを60 TeVまで、また2,392日間のデータからヘリウムのスペクトルを250 TeVまで測定した結果を発表した。図2は、それぞれのスペクトルを Rigidity で表し、他の観測と比較したものである。陽子とヘリウムの両方で500 GV付近におけるスペクトルの硬化を確認するとともに、10 TV領域でスペクトルの軟化の兆候を観測した。図3に、陽子/ヘリウム比のエネルギー依存性を示す。エネルギーの増大とともに陽子に対するヘリウムの割合が増えている。標準モデルでは、エネルギースペクトルは単一の冪型であり、電荷に依存しないと予測されることため、陽子とヘリウムには高エネルギー領域で異なる加速・伝播機構が存在することを示唆しており、今後の理論的な検証が必要である。

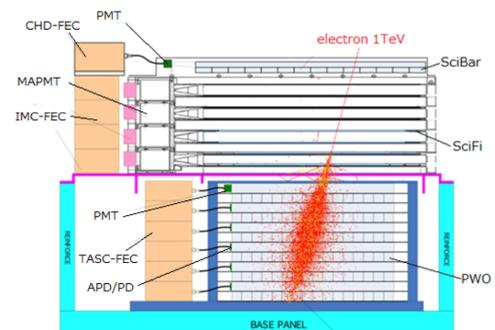


図1 CALETのカロリメータ側面図と1TeV電子の検出例

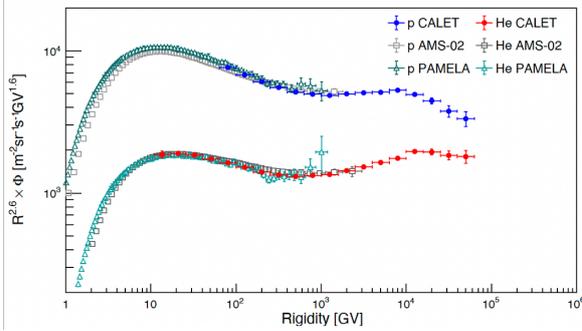


図2 CALET による陽子とヘリウムのエネルギースペクトルと、マグネトスペクトロメータ(PAMELA、AMS-02)の測定結果の比較。

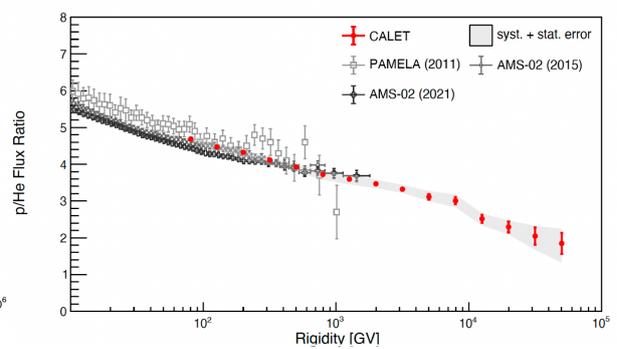


図3 CALET による陽子とヘリウムのフラックス比と PAMELA、AMS-02 との比較。

(3) 鉄、ニッケルのエネルギースペクトル [Phys. Rev. Lett. **126**, 241101 (2021) and Phys. Rev. Lett. **128**, 131103 (2022)]

代表的な重い原子核である鉄のエネルギースペクトルを 2.0 TeV/n まで、ニッケルを 240 GeV/n まで測定した結果を発表した。図6にその観測結果を示す。軽核で見られたスペクトル硬化は鉄では観測されなかったが、現状の観測誤差を考慮すると、硬化を否定できるものではない。今後の観測量の増加と、より詳細なデータ解析により、この現象をさらに検証する予定である。また鉄/ニッケル比は 240 GeV/n まで一定であり、両者が類似した加速・伝播機構を示唆する結果も得られている。

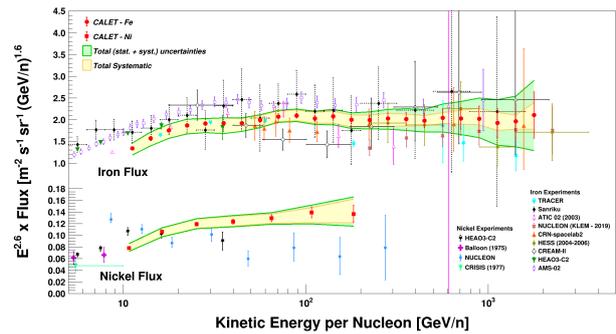


図6 CALET による鉄とニッケルのエネルギースペクトルと他の観測結果の比較。

(2) 二次核/一次核比(B/C比) [Phys. Rev. Lett. **129**, 251103 (2022)]

宇宙線は、星の進化の過程で核融合反応により生成された元素が進化の最終段階における超新星爆発などにより加速されて、宇宙空間に飛び立ったものと考えられている。しかし、ホウ素などの元素は、星の進化の過程では生成されないため、宇宙線が銀河内を伝播する間に星間物質と衝突して二次的に生成されたものであると考えられている。したがって、ホウ素の測定は銀河内伝播の理解に有益な情報をもたらす。図4にCALETにより測定した炭素(C)、酸素(O)、ホウ素(B)のスペクトルを示す。一次宇宙線であるCとOは同じエネルギー依存性を示しているのに対し、二次核であるBはそのスペクトルの冪の絶対値が大きい。そしてスペクトル硬化は300 GeV/n付近で存在し、現在の観測量では有意度は大きくないものの、Bのスペクトル硬化の変化量はCやOより大きく約2倍である。図5にB/C比のエネルギー依存性を示す。AMS-02や他の測定結果と合致しており、3.8 TeV/nまでエネルギー領域を進展させた。DAMPEと比較すると、エラーの範囲で一致しているものの、高エネルギー領域ではDAMPEより系統的に小さいB/C比となっている。また、この他に、B/Oの初期的な解析結果も同様の結果を得ており、今後データ解析を進め論文として発表する予定である。

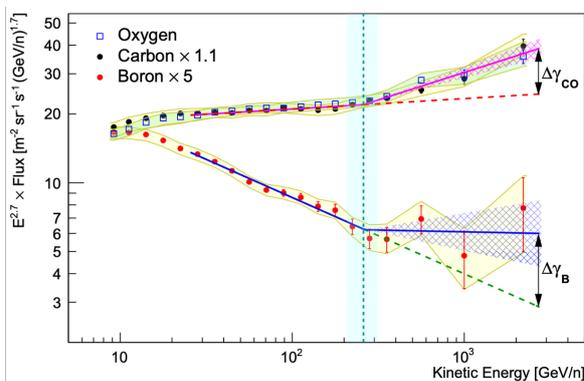


図4 CALETによるB,C,Oのエネルギースペクトル。10 GeV/nで絶対値が揃うようにB,Cを規格化してある。

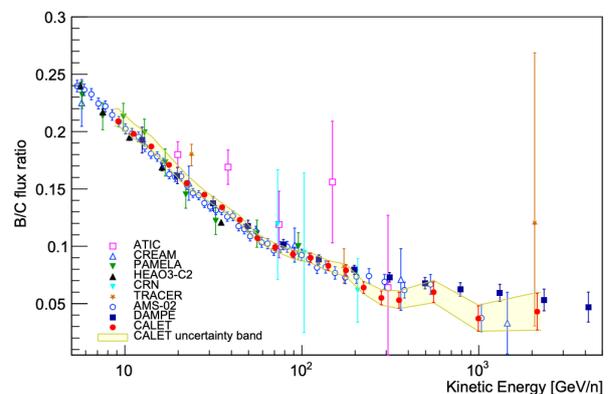


図5 CALETによるB/C比と他の観測結果の比較

(4) 電子+陽電子のエネルギースペクトル [Phys. Rev. Lett. **131**, 191001 (2023)]

7.5TeV に至る電子+陽電子のエネルギースペクトルを測定した。これは、2018 年に出版した電子の観測量の 3 倍以上に相当し、エネルギーの測定領域も 7.5 TeV まで拡大させた。電子観測ではバックグラウンドとなる陽子との選別が重要である。本研究では、シミュレーションデータを観測データに合致するよう改良し、機械学習による選別精度向上を図ることでこの成果を実現した。1 TeV 付近におけるスペクトルのカットオフの有意味性は  $6\sigma$  以上に増大している。これは、宇宙線電子が銀河内伝播中に受けるエネルギー損失量が大いという理論モデルによる予測と合致する結果である。

図 7 に CALET による電子+陽電子のエネルギースペクトル、AMS-02 による陽電子のエネルギースペクトル、および地球近傍の加速源を考慮した理論モデル例を示す。これは、宇宙線伝播を数値的に計算するコード DRAGON を使い、各測定結果に対するフィット結果である。現状では TeV 領域の誤差が大いいため有意度は高くないが、超新星残骸 Vela からの寄与を示唆する結果が得られており、今後の観測で加速源を同定できる可能性が期待される。

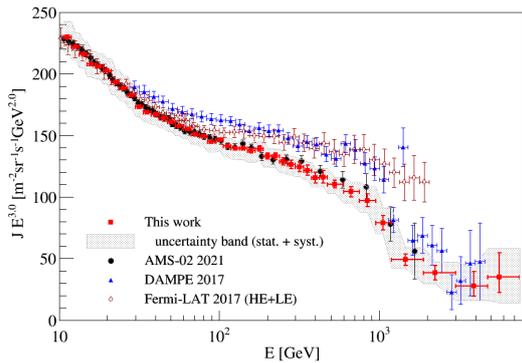


図 6 CALET による 7.5TeV までの電子+陽電子のエネルギースペクトルの観測結果と、宇宙空間における他の観測結果の比較。

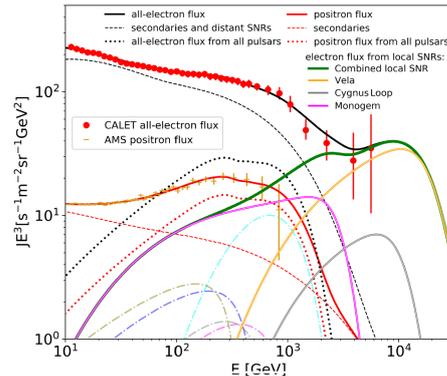


図 7 CALET による電子+陽電子のエネルギースペクトルと AMS-02 による陽電子のスペクトル、及び地球近傍の加速源を考慮した理論モデル例。

(5) 太陽変動による宇宙線強度変動の電荷依存性 [Phys. Rev. Lett. **130**, 211001 (2023)]

CALET の 6 年間の観測により、低エネルギー銀河宇宙線の陽子・電子の強度変動を観測した。太陽活動に伴う陽子と電子の強度変動には顕著な違いがあり、電荷の違いに対する依存性を明らかにした。図 7 (b) の青点と赤点は、それぞれ CALET で観測した電子と陽子の量の時間変化を示している。図中の青線と赤線は、ドリフト効果を考慮した宇宙線輸送過程のシミュレーションモデルで再現した結果である。観測された陽子と電子の変動をよく再現することができた。この結果は、ドリフト効果が太陽活動周期ごとの宇宙線量の変動に大きな役割を果たすことを示す世界で初めての成果である。

この結果は太陽活動の半周期分に基づくものであり太陽活動が低下する減退期における太陽変動の描像である。今後の観測で増進期の太陽活動を継続的に測定し、宇宙線が太陽系内の環境にどのような影響を与えているのかを明らかにすることを旨とする。

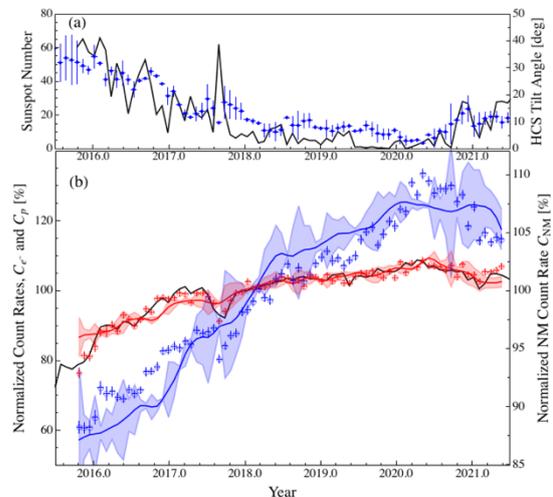


図 8 CALET で観測した宇宙線電子(青丸)と陽子(赤丸)の変化。青線と赤線はドリフト効果を考慮したモデルによる計算結果。上図(a)は同期間の太陽黒点数(黒点)と太陽磁場のカレントシートの傾き角(青点)を示す。

本研究を通じて、CALET における主要な観測成果の創出に貢献した。CALET は、上記以外にも多くの結果を出しており、これらの成果を踏まえて 2030 年までの運用延長が正式に決定した。宇宙線観測を高エネルギー領域へ進展させるためには統計量が重要な側面を持つことと、まだ未解析のデータを多く残していることから、今後も重要な成果を出せる見込みである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 12件 / うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 O. Adriani, Y. Akaike et al., (CALET Collaboration)	4. 巻 130
2. 論文標題 Charge-Sign Dependent Cosmic-Ray Modulation Observed with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 211001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevlett.130.211001	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 131
2. 論文標題 Direct Measurement of the Spectral Structure of Cosmic-Ray Electrons + Positrons in the TeV Region with CALET on the International Space Station	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 191001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevlett.131.191001	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 -
2. 論文標題 Direct measurements of cosmic-ray iron and nickel with CALET on the International Space Station	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Advances in Space Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.asr.2024.03.052	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 Y. Akaike et al. (CALET Collaboration)	4. 巻 -
2. 論文標題 Direct measurements of cosmic rays with the calorimetric electron telescope on the international space station	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 SciPost Physics Proceedings	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21468/SciPostPhysProc.13.040	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 Y. Akaïke et al. (CALET Collaboration)	4. 巻 -
2. 論文標題 The Calorimetric Electron Telescope (CALET) on the International Space Station: Results from the first eight years on orbit	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Advances in Space Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.asr.2024.04.035	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. Akaïke et al. (CALET Collaboration)	4. 巻 130
2. 論文標題 Direct Measurement of the Cosmic-Ray Helium Spectrum from 40 GeV to 250 TeV with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 171002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.130.171002	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. Akaïke et al. (CALET Collaboration)	4. 巻 129
2. 論文標題 Cosmic-Ray Boron Flux Measured from 8.4 GeV/n to 3.8 TeV/n with the Calorimetric Electron Telescope 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 251103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.251103	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. Akaïke et al. (CALET Collaboration)	4. 巻 129
2. 論文標題 Observation of Spectral Structures in the Flux of Cosmic-Ray Protons from 50 GeV to 60 TeV with the Calorimetric Electron Telescope 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 101102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.101102	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 933
2. 論文標題 CALET Search for Electromagnetic Counterparts of Gravitational Waves during the LIGO/Virgo O3 Run	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 85 ~ 85
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac6f53	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 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 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23件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 14件）

1. 発表者名 赤池陽水, 他CALETチーム
2. 発表標題 CALETにおけるTeV領域電子の選別手法の改良
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤池陽水, 他CALETチーム
2. 発表標題 CALETによる10GeVから7.5TeVの電子のエネルギースペクトル測定結果
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yosui Akaike, Shoji Torii for the CALET Collaboration
2. 発表標題 The cosmic-ray electron and positron spectrum measured with CALET on the International Space Station
3. 学会等名 38th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤池陽水
2. 発表標題 ISS搭載CALETによる8年間の軌道上観測の成果
3. 学会等名 太陽地球環境と宇宙線モジュレーション
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Y. Akaike on behalf of the CALET Collaboration
2. 発表標題 The Calorimetric Electron Telescope (CALET) on the International Space Station; Results from the First Six Years on Orbit
3. 学会等名 44th COSPAR Scientific Assembly (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Akaike on behalf of the CALET Collaboration
2. 発表標題 Direct Measurements of Cosmic Rays with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station
3. 学会等名 21st International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤池陽水、他CALETチーム
2. 発表標題 CALETによる宇宙線原子核成分観測の最新成果
3. 学会等名 第23回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤池陽水、他CALETチーム
2. 発表標題 CALETによる8.4GeV/nから3.8TeV/nのホウ素/炭素比の観測結果
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤池陽水、他CALETチーム
2. 発表標題 CALETによる鉄とニッケルのエネルギースペクトルとB/C比の観測
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Torii, Y. Akaike on behalf of 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

1. 発表者名 Y. Akaike, P. Maestro on behalf of the CALET Collaboration
2. 発表標題 Measurement of the 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 H. Motz, O. Adriani, Y. Akaike et al.
2. 発表標題 Investigation the Vela SNR's Emission of Electron Cosmic Rays with CALET at 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 E. Berti, L. Pacini, S. Gonzi, Y. Akaike on behalf of the CALET Collaboration
2. 発表標題 The analysis strategy for the measurement of the electron flux 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 F. Stlizi, C. Checchia, Y. Akaike on behalf of the CALET Collaboration
2. 発表標題 Measurement of the iron 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

1. 発表者名 Y. Akaike for the CALET Collaboration
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 赤池陽水、他CALETチーム
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、他CALETチーム
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、鳥居祥二、小林兼好、田村忠久、森正樹、浅岡陽一
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会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Tamura, Y. Akaike and K. Kobayashi for the CALET Collaboration
2. 発表標題 Status of the operations of CALET for 7.5 years on the International Space Station
3. 学会等名 38th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 P. Maestro and Y. Akaike for the CALET Collaboration
2. 発表標題 Boron flux in cosmic rays and its flux ratio to primary species measured with CALET on the International Space Station
3. 学会等名 38th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 F Stolzi, C. Checchia, G. Bigongiari, Y. Akaike for the CALET Collaboration
2. 発表標題 Iron and Nickel fluxes measured by CALET on the International Space Station
3. 学会等名 38th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 N. Cannady, Y. Akaike and S. Torii for the CALET Collaboration
2. 発表標題 Event-by-Event Analysis for TeV Electron Candidates with CALET on the International Space Station
3. 学会等名 38th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Miyake, K. Munakata and Y. Akaike for the CALET Collaboration
2. 発表標題 Cosmic-Ray modulation during Solar Cycles 24-25 Transition Observed with CALET on the International Space Station
3. 学会等名 38th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>7.5 TeVまでの宇宙線電子のエネルギースペクトル測定に成功  <a href="https://www.waseda.jp/inst/research/news/75880">https://www.waseda.jp/inst/research/news/75880</a>          宇宙線太陽変調の顕著な違いを観測  <a href="https://www.waseda.jp/top/news/90562">https://www.waseda.jp/top/news/90562</a>          銀河系を伝播する宇宙線を高精度観測  <a href="https://www.waseda.jp/top/news/86418">https://www.waseda.jp/top/news/86418</a>          宇宙線の鉄/ニッケル成分の高精度観測  <a href="https://www.waseda.jp/top/news/79755">https://www.waseda.jp/top/news/79755</a>          DARTS: CALET  <a href="https://www.darts.isas.jaxa.jp/astro/calet/">https://www.darts.isas.jaxa.jp/astro/calet/</a></p>
--

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