

令和元年6月11日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2014～2018

課題番号：26220708

研究課題名(和文)高精度直接観測で探る高エネルギー宇宙線の加速と伝播

研究課題名(英文) Research on the Acceleration and Propagation of Cosmic Rays by High-precision Direct Observation

研究代表者

鳥居 祥二 (TORII, SHOJI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：90167536

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 133,000,000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日本実験棟「きぼう」に搭載したCALETによる高エネルギー宇宙線観測を約3.5年にわたって安定的かつ継続的に実施した。その結果、宇宙線の加速と伝播の研究に新たな展開をもたらす。(1) 1GeV-4.8TeV領域の電子、(2) 10GeV-数10TeV領域の陽子・原子核、(3) 1 GeV-数100GeV領域のガンマ線、等の観測に成功している。さらに、重力波源からの電磁放射の観測と太陽活動に伴う低エネルギー電子流束の長短期変動の観測(宇宙天気予報)を実施している。これらの成果は、国際会議での招待講演や国際的に著名な学術雑誌において発表されている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高エネルギー宇宙線の観測は宇宙科学に残されたフロンティアであり、本研究で得られた高エネルギー領域での電子、陽子・原子核の観測結果は、高エネルギー宇宙の研究や暗黒物質の探索といった宇宙科学の主要課題において重要な貢献を果たすことができる。加えて、太陽活動による低エネルギー電子流束の長短期変動の研究(宇宙天気予報)や、ガンマ線観測による重力波発生機構の解明に貢献が期待できる。これらの成果については、国際的学術雑誌で発表するとともに、適宜ホームページ等を通じて社会・国民に向けて成果発信を行うことによりその意義を広報している。

研究成果の概要(英文)：Over the past 3.5 years, CALET on the "Kibo" Laboratory aboard the International Space Station has carried out a program of stable, continuous, high-statistics observations of very energetic cosmic rays. The CALET data have demonstrated new features due to the detailed acceleration and propagation mechanisms of: (1) cosmic-ray electrons in the 1 GeV - 4.8 TeV energy range, (2) protons and heavy nuclei at 10 GeV - several tens of TeV, and (3) gamma-rays over the range 1 GeV - several hundred GeV. Moreover, search for electro-magnetic counterpart of gravitational waves and study on space weather by observing the low-energy electron flux have been carried out. The results have been published in high-impact international journals while being presented at several international conferences as invited talks.

研究分野：高エネルギー宇宙線物理学

キーワード：宇宙線 高エネルギー電子 宇宙線加速機構 銀河内伝播機構 暗黒物質 重力波 カロリメータ 国際宇宙ステーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙線の研究は、粒子の生成・消滅という素粒子・原子核物理学と、粒子の加速・伝播という宇宙物理学の2つの側面を持っており、観測される宇宙線の組成やスペクトルは両者が複雑にからみあった現象である。そのため、宇宙線の正確な理解のためには、組成やスペクトルの高精度な観測により各々の側面を正確に切り分ける必要があり、地球に降り注ぐ宇宙線を大気の希薄な高い高度で直接捉えることが不可欠である。このような飛翔体を用いた宇宙線の直接観測は、これまでに国内外で様々な装置が考案されて実施されて来た。特に2000年代に入ってから、素粒子実験で開発された粒子検出技術を駆使して、南極周回気球や宇宙機によるそれまでとは比較にならない高精度観測が実施されている。その結果、陽子・原子核に加えて電子や反陽子・陽電子といった反粒子を識別した高精度な観測データが得られている。

その結果、銀河宇宙線は「超新星残骸における衝撃波によって加速され、銀河磁場によって拡散的に伝播して銀河外へ漏れだす」という“標準モデル”による定性的な理解が進んでいる。一方、観測精度の向上にとともに、“標準モデル”だけでは理解できない、(1)陽電子・電子比率の“異常”と電子+陽電子(以降、全電子と呼ぶ)における“過剰”成分の存在、(2)陽子・ヘリウムにおけるエネルギースペクトルの“硬化”、などの“標準モデル”では説明が難しい観測結果が報告され、新たな理解が行われて非常に注目を集めている。そのため、宇宙空間における長期観測による高精度観測により、“標準モデル”の定量化とともに、それだけでは説明が困難な観測結果の高精度な検証を行うことが不可欠となっている。

2. 研究の目的

(1) 高エネルギー宇宙線電子、原子核、ガンマ線を精密観測し、特にまだ観測例が少ない高エネルギー領域におけるデータを蓄積することにより、宇宙線物理学の基本的課題である加速・伝播機構について定量的な解明を目指す。さらに、“標準モデル”では理解が困難な近年の観測結果(上述)の解明に不可欠な高精度な観測的検証を目指す。

(2) 電子は超新星爆発における衝撃波で加速され、シンクロトロン放射と逆コンプトン散乱によりエネルギーの二乗に比例したエネルギー損失を受けるため、陽子・原子核成分とは異なり、TeV領域では寿命が10万年以下になり、伝播距離が1 kpc以内に限られる。この条件を満たす超新星残骸(SNR)の候補は、Vela, Monogem, Cygnus Loop など数天体に過ぎず、これらの源を同定可能な特徴のあるスペクトル構造と非等方性がTeV領域で現れることが理論的に予測されている。このような構造や異方性が実際に検出できれば、荷電宇宙線による加速天体の同定が世界で初めて可能となり、加速機構や伝播過程について定量的な研究が可能となる。このため、1980年代より多くの観測が実施されてきたが、まだ数TeV領域まで到達しておらず本研究で実施するCALETによる観測によって初めて実現できる。本研究では、まだ観測例が少ないTeV領域における電子の精密観測により、近傍加速源の検出を試みる。

(3) AMS-02, PAMELA, Fermi/LAT 等により観測された10GeV以上の領域における陽電子比の増大と100GeV以上の領域での電子+陽電子(以後、全電子と呼ぶ)の過剰は、相互に関連していると考えられ、“標準モデル”にはない電子と陽電子を対生成する未知なプロセスの存在が示唆されている。このプロセスとして暗黒物質の対消滅・崩壊や近傍パルサー風星雲(PWN)における電子対生成などが候補にあげられる。この他にも、まだ未解明な伝播過程によるという説等もあり、優に1000編を越す理論的解釈が出版されている。本研究では、これらの正確な検証のため、全電子スペクトルのTeV領域に及ぶ高精度観測を実施して、陽電子比の観測結果と合わせて新たな陽電子・電子対生成源の解明を目指す。

(4) 荷電宇宙線に加えてガンマ線観測においては、銀河系内外拡散成分やいくつかの点源(Crab, Geminga, Vela など)の検出による、それらのガンマ線生成機構の解明を目指している。さらにガンマ線バーストモニターによるトリガーに同期して、これまで観測例の少ない1 GeV以上のバースト成分の検出により、ガンマ線バースト発生機構の研究を目的としている。

3. 研究の方法

(1) 観測装置 CALETは、宇宙線・ガンマ線を観測する主検出器であるカロリメータ(CAL)とガンマ線バースト検出器(CGBM)で構成され、補助的な装置としてGPS受信機(GPSR)及びスターセンサ(ASC)が搭載されている。CALは、電荷測定器(CHD: Charge Detector)、イメージング・カロリメータ(IMC: IMaging Calorimeter)、及び全吸収型カロリメータ(TASC: Total Absorption Calorimeter)により構成されている。宇宙線やガンマ線がCALに入射するとシャワー粒子が発生し、エネルギー閾値を越えたイベントに対してトリガーシステムが作動し、各検出器のデータを取得する。その際に各検出器で得られる独立な情報により、オフライン解析を駆使して粒子種別や到来方向・エネルギーの測定を行うことができる。

(2) 軌道上観測運用 CALETは約5年間の装置開発を経て、2015年8月に打ち上げられ、現在まで順調に観測を実施している。現在、軌道上観測装置のリアルタイム監視にもとづくミッション

ン運用を、本科研費等で早稲田大学理工学研究所内に構築した「Waseda CALET Operations Center (WCOC)」において実施している。観測データ(含むHKデータ)は、ISSからリレー衛星(NASA TDRS)を経由して、米国内受信システムにダウンリンクされ、インターネット経由で「つくば宇宙センター(TKSC)」に送信される。さらにインターネットを通じてWCOC にリアルタイムでRaw Dataが送信され、データ解析・蓄積が行われている。軌道上運用における装置監視やコマンド送信はTKSCにおいて遂行され、WCOC において24 時間体制での観測オペレーション及び観測スケジュールの立案などを研究者チームにより実施している。

(3) 観測データ解析 Raw Dataとは別に、ダウンリンク時のデータ欠損を補完した観測データ(Level 0データと呼ぶ)が1時間毎に送信され、このデータを用いて科学解析を実施している。Level 0に対して工学値変換を行い(Level 1)、装置較正と長期変動の補正を加えてLevel 2データをWCOC内で定常的に作成し、このデータを国内外に配布することにより国際共同研究チーム体制で科学データ解析を実施している。なお、突発的な現象であるガンマ線バーストや重力波イベントについては、即時的な解析が不可欠なため、特にLevel 0データから直接データ解析を行い、Gamma-ray Coordinates Network (GCN)等を通じて速報を行っている。

なお、研究進捗評価で得られた評価は「A」で、「研究遂行上の問題等は見られないので、適量のデータにより早期に成果が発表されること、及びデータ蓄積・処理・解析作業の加速を期待したい。」という評価を受けている。これまで、データ蓄積・処理・解析作業を加速しており、以下に示すように研究成果は順調に論文および国際会議等で発表されている[論文9]。

4. 研究成果

(1) 観測成果概要 CALET の観測は期待通りの軌道上性能を発揮して、ほとんど中断もなく順調な観測が実施され、装置の軌道上性能について十分な検証が行われている[論文 8,11]。そして、これまでの約3.5年間の観測により10 GeV以上の宇宙線イベントが約10億例取得されている。それらのデータ解析により、宇宙線各成分とガンマ線、ガンマ線バーストの観測結果を得て、それらの一部はすでに国際的に著名な雑誌において論文発表が行われている。

(2) 電子+陽電子 CALET は、宇宙空間での直接観測による3 TeVまでの高精度電子識別に初めて成功し、全電子スペクトルの高精度な直接観測の結果を世界に先駆けて2017年11月に発表している[論文10]。それに続いて、780日間の観測で取得された全データの解析により、高エネルギー側(>500 GeV)の統計量を約2倍に増やして、11GeV-4.8 TeVのエネルギースペクトルを2018年6月に発表している[論文5]。その結果を、他の観測結果と比較して図1に示す。図からわかる通り、我々の結果は1TeVまでAMS-02とはよく一致しているが、100 GeV以上ではDAMPE, Fermi/LAT等の結果とは有意な差が見られる。今回の結果から得られた知見は以下のようにまとめられる。

1TeV以下では、AMS-02の測定結果と誤差内でよく一致している。異なる測定原理による観測結果が一致したことは、系統誤差がよく理解されていることの証左となる。

これまでの宇宙における直接観測の限界を更新した。1-4.8 TeVの領域では、電子加速源の分布による(DAMPEの結果と矛盾しない)スペクトルのカットオフ構造が見られる。

CALETの結果は、系統誤差を含めるとまだ有意とは言えないものの、AMS-02とは異なり200 GeVと1TeV近辺に、暗黒物質やパルサーと関連する可能性があるスペクトルの微細構造の存在を示唆している。

これらの結果は、TeV領域に存在することが期待される近傍加速源(や暗黒物質)によるスペクトル構造の検出のための基礎的なデータであり、今後のTeV領域でデータ蓄積とデータ解析の深化により近傍加速源の有無について結論が得られる。現時点における観測結果からパルサーと暗黒物質の寄与について定量的な検証を行っている[論文2,12]。

(3) 陽子・原子核 CALETは、 $Z=40$ までの原子核の電荷分解能と1 GeV-1PeVの6桁にわたるエネルギー測定性能を有している。その結果、主要な原子核については、すでに100 TeVを超えるエネルギー領域までエネルギースペクトルの初期的な観測結果が得られている。今後の解析と観測継続でこの10倍程度のデータを取得することにより、1 PeVに迫る観測が実現できる見込みである[論文7]。陽子、ヘリウムについては、スペクトルの硬化が見られる領域をカバーする核子あたり50GeV-数10TeVのデータ解析が実施されている。陽子については、図2に示されている50GeV-10TeVの高精度なエネルギースペクトルを求めて、数100GeVでのスペクトルの硬化を検出した結果を投稿して、PRLにおいて発表している[論文1]。この結果は、初めての単一測定器による広いエネルギー領域での観測結果であり、これまでに提案されたモデルに厳しい制限を加えるとともに、今後の理論的検証に大きな貢献を行うことが期待できる。

伝播機構の解明に重要な役割を果たすホウ素/炭素比のエネルギー依存性についても、TeV領域に及ぶデータ解析が進行しており国際会議等で初期的結果を発表している。さらに、鉄より重い超重核も存在比が $Z=40$ の領域まで観測され、これまでの気球実験(Super-TIGER)とよく一致する結果を得て、国際会議等で発表している。

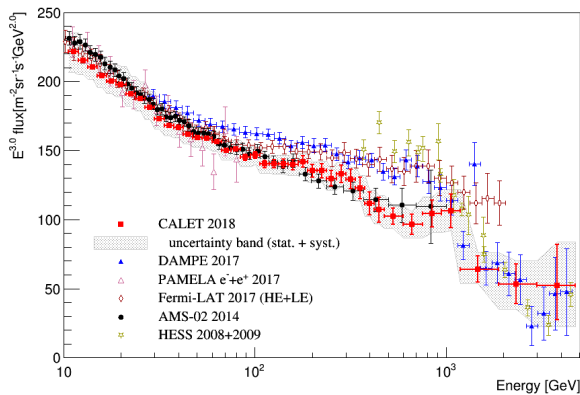


図 1 : 全電子エネルギースペクトル(PRL2018)

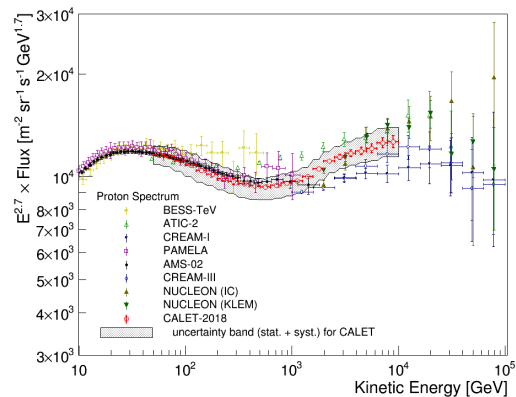


図 2 : 陽子エネルギースペクトル

(4) ガンマ線 CALET は通常10 GeV以上の高エネルギートリガーで観測しているが、低地磁気緯度では、1GeV以上のガンマ線の観測を低エネルギートリガーを併用して行っている。ガンマ線候補事象に対しては、電子の場合と同様に飛跡から到来方向を求め、同架されたスターセンサ (Advanced Stellar Compass) から得られる方向データを基準として天球上での座標を算出する。その結果、Crab, Geminga, Vela, 活動銀河核CTA102のエネルギースペクトルや銀河系内外の拡散ガンマ線成分の観測に成功している。これらの結果は、Fermi/LAT の結果とよく一致しており、検出器のシミュレーションから得られる観測性能が間違いなく達成されていることが示されており、今後の高エネルギー領域での観測による成果が期待できる[論文3]。

(5) ガンマ線バーストと重力波源天体探査 CGBMは、7keV-20MeVの領域に感度を持ち[論文6]、ガンマ線バーストが検出されると、CALにおけるエネルギー閾値を1GeVに下げて、バースト中の高エネルギー成分をトリガーする機能を備えている。この結果、CALET は約7 keVからTeV領域のガンマ線バースト (GRB) を観測できる能力を有することになる。GRBは年間43イベントの割合で検出されており、そのうち約10%がバースト間隔2秒以内の短いIGRB と判定されている。短いIGRB は、中性子星連星あるいはブラックホール・中性子星連星の衝突合体により発生するという説が最も有力であり、aLIGO の本格稼働前から重力波発生源として極めて有力であることが示唆されてきた。CALET は開発段階から重力波に伴う短いIGRB 観測がCGBMの目標の一つであった。最初の重力波イベントはCALET の運用以前であったが、2番目のGW151226 については、前述のようにX、ガンマ線の上限值を与えることに成功している[論文13]。これらの重力波はブラックホール連星の合体で極めて良く説明でき、電磁波放射を伴わないことと整合した結果である。続いて中性子星連星の合体と考えられる重力波イベントの検出が報告されており、今後の重力波対応天体探査に期待がもたれる[論文4]。

(6) 太陽変動を受けた電子の観測 CALETでは、地磁気によるcutoff rigidityが1 GV以下になるISS軌道空間で、電子流束の太陽変動観測を行っており、全体で5年間の観測により地球太陽磁気圏の研究と星間スペクトル(LIS) の導出を目的としたドリフトモデルの構築が行われている。さらに短期変動としての太陽フレアにともなう「フォーブッシュ減少」の研究も進行中であり、国際会議等において発表を行っている。また、地球磁気圏擾乱に伴うElectromagnetic Ion Cyclotron (EMIC)Waveによりバンアレン帯の電子が雪崩のように降り注ぐ現象である、Relativistic Electron Precipitation (REP)現象をISS で初めて観測している[論文14]。電荷測定器(CHD) はMeV領域の電子観測において、従来の装置を2桁程度上回る有効面積を持ち、1秒の時間分解能で流束の変動を観測できる。そのため、JAXAのジオスペース探査衛星「あらせ」の「その場観測」による電子密度変化との相関を調べることによって、EMIC Waveの詳細 (活動性など) が明らかになることが期待されている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計14件)(全て査読あり)

“Direct Measurement of the Cosmic-Ray Proton Spectrum from 50 GeV to 10 TeV with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station”, O. Adriani, Y.Asaka[4], M.Mori[47], S.Torii[79], et al. (CALET Collaboration)[90名], Phys. Rev. Lett. 122, 181102 (2019). [Editor's Suggestion]
DOI:10.1103/PhysRevLett.122.181102

“An Interpretation of the Cosmic Ray Electron + Positron Spectrum from 10 GeV to 3 TeV Measured by CALET on the ISS”, S.Bhattacharyya, H.Motz, Y.Asaka, S.Torii,

International Journal of Modern Physics D, 28(2019) 1950035.

DOI: 10.1142/S0218271819500354

"Characteristics and Performance of the CALorimetric Electron Telescope (CALET) Calorimeter for Gamma-Ray Observations", N.Cannady, Y.Asaka[2], S.Torii[5], M.Mori[7], et al. (CALET Collaboration)[93名], The Astrophysical Journal Supplement Series, 238:5(16pp), 2018.

DOI: 10.3847/1538-4365/aad6a3

"Search for GeV Gamma-Ray Counterparts of Gravitational Wave Events by CALET", O.Adriani, Y.Asaka[4], M.Mori[47], S.Torii[79], et al. (CALET Collaboration) [91名], The Astrophysical Journal, 863:160(9pp), 2018.

DOI: 10.3847/1538-4357/aad18f

"Extended Measurements of Cosmic-ray Electron and Positron Spectrum from 11 GeV to 4.8 TeV with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station", O.Adriani, Y.Asaka[4], S.Torii[80], et al. (CALET Collaboration) [92名], Phys. Rev. Lett. 120, 261102 (7pp) (2018).

DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.261102

"Detection of the thermal component in GRB 160107A", Y.Kawakubo[1], et al. [17名], Publication of the Astronomical Society of Japan, 70(1) p.61 (2018).

DOI: 10.1093/pasj/psx152

「CALET が開始した高エネルギー宇宙の新たな探求」鳥居祥二,浅岡陽一,森 正樹,吉田篤正, 日本物理学会誌(話題) 73(6) 388-392, 2018.6.

URL: <https://www.jps.or.jp/members/books/files/gakkaishi/73-06.pdf>

"On-orbit Operations and Offline Data Processing of CALET onboard the ISS", Y.Asaka[1], S.Ozawa[2], S.Torii[3], et al. (CALET Collaboration)[91名], Astroparticle Physics, 100 (2018) 29-37 .

DOI: 10.1016/j.astropartphys.2018.02.010

"The CALorimetric Electron Telescope (CALET) on the ISS: Preliminary Results from the On-orbit Observation since October, 2015", S. Torii, for the CALET Collaboration, PoS(ICRC2017) 1092 (16 pp) (2018). [Highlight Talk]

URL: <https://pos.sissa.it/301/1092/pdf>

"Energy Spectrum of Cosmic-Ray Electron and Positron from 10 GeV to 3 TeV Observed with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station", O.Adriani, Y.Asaka[4], M.Mori[47], S.Torii[79], et al. (CALET Collaboration) [91名], Phys.Rev.Lett. 119, 181101(6pp) (2017).

DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.181101

11 "Energy calibration of CALET onboard the International Space Station", Y.Asaka[1],Y.Akaike[2],S.Torii[5], et al. (CALET Collaboration) [94名], Astroparticle Physics, 91 (2017) 1-10.

DOI: 10.1016/j.astropartphys.2017.03.002

12 "Decaying fermionic dark matter search with CALET", S. Bhattacharyya, H.Motz, S.Torii, Y.Asaka, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2017 (012).

DOI: 10.1088/1475-7516/2017/08/012

13 "CALET Upper Limits on X-ray and Gamma-ray Counterparts of GW 151226", O.Adriani, Y.Asaka[4], S.Nakahira[57], T.Sakamoto[66], S.Torii[79], et al. (CALET Collaboration) [92名], The Astrophysical Journal Letters, 829:L20 (5pp), 2016.

DOI:10.3847/2041-8205/829/1/L20

14 "Relativistic electron precipitation at International Space Station: Space weather monitoring by Calorimetric Electron Telescope", R.Kataoka, Y.Asaka, S.Torii, T.Terasawa, S.Ozawa, T.Tamura, Y.Shimizu, Y.Akaike, M. Mori, Geophysical Research Letters, 43, 4119-4125 (2016).

DOI: 10.1002/2016GL068930

[学会発表](計11件)(招待講演のみ)

鳥居祥二, "高エネルギー電子・ガンマ線観測装置(CALET)", 2019年1月9日, 第19回宇宙科学シンポジウム(宇宙科学研究所)[宇宙科学研究所賞受賞講演]

Y.Asaka, "The CALorimetric Electron Telescope (CALET) on the International Space Station - Results from the First Two Years of Operation -", July 6-10, 2018, 26th Extended European Cosmic Ray Symposium and 35th Russian Cosmic Ray Conference

(Altai, Russia)

S.Torii, "The Calorimetric Electron Telescope (CALET) Experiment on the International Space Station", September 15, 2018, APS/JPS Joint Symposium celebrating the 60th anniversary of Physical Review Letters (Matsumoto, Japan)

S.Torii, "CALorimetric Electron Telescope (CALET) Collaboration on the International Space Station", July 23, 2018, JAXA/NASA Joint Workshop (Los Angeles, USA) [ISS Awards 受賞講演]

P.S.Marrocchesi, "Calorimetric Electron Telescope", July 19, 2018, 42th COSPAR Assembly (Pasadena, USA)

S.Torii, "The Calorimetric Electron Telescope (CALET) on the International Space Station: Latest results from the First Two-Years on Orbit" April 9-12, 2018, AMS Days (La Palma, Spain)

S.Torii, "Calorimetric Electron Telescope (CALET) on the ISS: Preliminary Results from the On-orbit Observation since October, 2015", July 12-20, 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2015) (Pusan, Korea) [Highlight Talk]

S.Torii, "CALET: Inflight Performance and Preliminary Results (in Japanese)", March 17-20, 2017, 72th Japan Physical Society Meeting (Osaka)

S.Torii, "The CALorimetric Electron Telescope (CALET) : Inflight Performance and Preliminary Results", September 12-16, 2017, TeV Particle Astrophysics (TeVPA2016) (Geneva, Switzerland)

S.Torii, "The CALorimetric Electron Telescope (CALET) on the ISS for High Energy Astroparticle Physics", April 9-11, 2015, International Space Station Research Investigations and Experiments, Russian Academy of Science (Moscow, Russia)

¹¹ S.Torii, "CALET: A joint JAXA/ASI/NASA mission on ISS", March 20, 2015, 2015-2030 New Horizon of Space, INFN (Rome, Italy)

[その他]

ホームページ等

(1)ホームページ

日本(早稲田大学) <https://calet.jp>

イタリア(ピザ INFN) <http://caalet.pi.infn.it>

米国(ルイジアナ州立大学) <http://calet.phys.lsu.edu>

JAXA <http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/calet/>

(2) 受賞・表彰

ISS Awards for Compelling Results in Physical Science and Material Development, "Direct Measurement of High Energy Cosmic-Ray Electron and Positron to the TeV Region" Shoji Torii and the CALET Team by CASIS, NASA, AAS, 2018.7.

宇宙科学研究所賞(特別賞), 「CALETによる高エネルギー宇宙線電子の観測」

鳥居祥二, 2019年1月9日, 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

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 森 正樹

ローマ字氏名: MORI, Masaki

所属研究機関名: 立命館大学

部局名: 理工学部

職名: 教授

研究者番号(8桁) 80210136

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 浅岡 陽一

ローマ字氏名: ASAOKA, Yoichi

所属研究機関名: 早稲田大学

部局名: 理工学術院総合研究所

職名: 主任研究員(研究院准教授)

研究者番号(8桁) 40345054