特 集

宇宙線研究の最前線

CALET による国際宇宙ステーションにおける宇宙線直接観測

鳥居祥二节

早稲田大学理工学総合研究所 162-0044 東京都新宿区喜久井町17 [†]torii.shoji@waseda.jp

CALorimetric Electron Telescope (CALET) 実験は、国際宇宙ステーションにおける高エネルギー 宇宙線物理学のミッションであり、米国、イタリアとの国際共同研究として日本が主導的な役割 を果たしている。CALET の主要な目的としては、高エネルギー電子の近傍加速源の探求、銀河宇 宙線の加速・伝播機構の解明、及び暗黒物質の探索などがある。2015 年の10 月中旬に観測を開始 して以来、高エネルギーシャワー (>10 GeV) をトリガーする運用が、現在まで継続的かつ安定的 に行われおり、その観測成果について報告する。

Key Words: cosmic ray, γ -ray, γ -ray burst, space experiment, international space station, calorimeter

はじめに

宇宙線電子望遠鏡 (CALET: CALorimetric Electron Telescope) は国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験棟「きぼう」(JEM: Japanese Experiment Module) 船外実験プラットフォーム (EF: Exposure Facility) の9番ポートに搭載され、イタ リア宇宙機関 (ASI: Agenzia Spaziale Italiana), NASA の協力を得て進められている日本主導の 国際共同ミッションである。CALET は、約6 年間の開発・試験を経て、2015年8月19日に、 「こうのとり」5号機により打ち上げられ、10 月中旬より2年間の定常運用を経て、現在は後 期運用を実施しており、少なくとも2021年3 月までの観測を実施する予定である。現在まで 観測は3年間以上に亘って極めて順調に実施で きており、以下に示すようないくつかの重要な 成果がすでに得られている。

1. 研究目的

飛翔体による宇宙線観測の概要や意義は,す でに日本物理学会誌¹⁾等において解説している 線研究の新たな地平を切り拓くことを目的とし ている。CALET は、電子観測に最適化された 主検出器であるカロリメータとy線バースト 検出器 (CGBM: CALET Gamma-ray Burst Monitor) によって構成されている。図1に、CALET システム全体の概念図と ISS-JEM/EF に設置さ れた様子を示す。カロリメータでは、1GeV-20TeV のエネルギー領域で電子+陽電子(全電 子)スペクトルを精密測定することにより、近 傍加速源や暗黒物質の探索に挑戦するととも に、宇宙線物理における"標準モデル"として の超新星残骸における衝撃波加速機構と銀河内 拡散過程の高精度な理解を目指している²⁾。

が、CALET は高精度な直接観測により、宇宙

電子に注目する理由として,電子は宇宙線の 主成分である陽子・原子核と異なり,銀河磁場 によるシンクロトロン放射と星間光子による逆 コンプトン散乱によりエネルギーの2乗に比例 してエネルギーを失うことが挙げられる。この ため,TeV 領域においては,電子の加速源は近 傍(距離1kpc^{注1}以内)かつ若い(年齢10万年 以内)天体に限られる。加速天体の候補である



図1 カロリメータの概略的な側面図。検出器内でのシャワー発達を示すため1TeV 電子のシミュレーション例が 図中に重ねられている (Color online)

超新星残骸は、Vela, Monogem, Cygnus Loopの 3 天体に限られるため、電子スペクトルはこれ らの個々の近傍加速源による、特徴ある構造を 示すことが予測されている。

さらに、PAMELA 衛星や、ISS に搭載されて いる AMS-02 によって観測された10 GeV 以上 での陽電子/電子比の上昇は、高エネルギー領 域において銀河内での伝播過程で二次的に生成 された陽電子以外に、未知の一次陽電子源の存 在を示唆している。その起源としては天体物理 学的なパルサー説から素粒子物理学的な暗黒物 質説まで様々な可能性が提案されている。一次 陽電子源においては電子・陽電子対が生成され ているのが最も自然であり、その場合には全電 子(電子+陽電子)スペクトルにも一次陽電子 の起源に対応するスペクトル構造が現れる。例 えばパルサーの加速限界や暗黒物質の質量に対 応する,一次陽電子の高エネルギー極限におい て,特徴的なスペクトル構造が存在する可能性 が強く示唆されている。

CALETでは、電子成分に加えて広いエネル ギー領域での観測により、陽子・原子核につ いて1PeVまでの測定が可能である。このよ うな高エネルギー領域では、超新星残骸にお ける衝撃波加速モデルの加速上限エネルギー が、各原子核についてその電荷に比例して検出 されることが期待されている。さらに、最近 の PAMELA, AMS-02 及び米国の南極周回気球 実験である CREAM の観測により、陽子(及び ヘリウム)の200 GeV 領域で、単一冪のスペク トルに比べて高エネルギー側の粒子が多くなる 変化(スペクトルの"硬化")が報告されている。 このような変化は、衝撃波加速モデルのみでは 説明できないため、加速・伝播機構について新 しい解釈が数多く提案されている。CALET は、 このようなスペクトルの変化を50 GeV から数 百 TeV の広いエネルギー領域で、高い統計精 度で検証できる性能を持っている。

さらに、CALET は1GeV からTeV 領域に おいてy線検出性能を有している。個々の天 体の観測については、装置規模が小さい(~ 500 cm²sr) ため非常に明るい天体のみの観測に 留まるが、トランジェントなy線源の検出や拡 散成分の観測がTeV 領域まで可能である。さ らに、CGBM のトリガーにより、1GeV 以上の y線バースト成分の検出を行うことによって、 7keV からTeV 領域までの超広帯域の観測を目 指している。この観測性能によって、広視野と

^{注1} pc: バーセク。距離の単位で約3.26 光年。

相まって重力波対応天体の探索に関してもユ ニークな役割を果たすことができており,すで に重力波事象 GW151226 について X 線, y線 放射の上限値を報告している³⁾。

その他に、太陽活動に伴う電子成分の太陽変 調の観測による太陽・地球磁気圏の研究が進ん でいる。新たな展開として、これまでの観測で バンアレン帯から大量に放出される MeV 領域 の電子と、その高速振動が検出されており、こ の Relativistic Electron Precipitation (REP) 現象 の観測により宇宙天気予報の高精度化に必要な 電磁イオンサイクロトロン波 (EMIC)の解明が 期待されている。

2. 観測装置

CGBN

CALET は垂直方向の吸収層の厚さが30 放射 長(r.l.) 及び1.3 陽子相互作用長(m.f.p.)に相当 するカロリメータである。エネルギー測定は, 高精細に初期シャワーを可視化するイメージン グカロリメータ(IMC: IMaging Calorimeter)と 高精度なエネルギー測定を行う全吸収カロリ メータ(TASC: Total AbSorption Calorimeter)に よって行われる。電荷の絶対値により個々の 粒子の原子番号を識別するため,電荷検出器 (CHD: CHarge Detector)が測定器最上部に設置 されている。図2には、側面からみた検出器の 概略図に1TeV電子シャワーのシミュレーショ ン例を重ねて示している。一方、図3には、軌 道上データから得られた1TeV電子の例を示し ている。CALETは天頂から~45°の視野を持 ち、10GeV以上の電子に対する有効幾何因子 は、エネルギーに依存せず約1040cm²srとほぼ 一定である。装置構造やデータ取得システムの 概要は論文⁴⁾に記載されているが、図3に見ら れるように、TeV領域の電子シャワーがほぼ完 全に装置内で検出できる性能を持っている。こ の事により、電子観測においてこれまでにな い卓越した電子・陽子選別性能(10⁵)とエネル ギー分解能(~2%)を実現している。

TASC は結晶シンチレータ (PWO) を X, Y 交 互に12 層を積層した (厚さ:27 r.l.),ホドス コープ型の全吸収型カロリメータである。読 み出しはトリガーシグナル生成に用いる1 層目 だけが光電子増倍管 (PMT)である。2 層目か ら12 層目まで全てアバランシェ・フォトダイ オード (APD) とフォトダイオード (PD)のハ イブリッドによる読み出しであり,APD と PD のゲイン比は50:1 で検出面積比が20:1 より, 全体として APD と PD の利得比が約1000 倍と なるように設定されている。さらに,それぞれ



図2 ISS 日本実験棟「きぼう」に設置された CALET (右図) とその概念図 (左図)。宇宙線・y 線観測用のカロリ メータ (CAL) とy線バーストモニター (CGBM) から構成されている (Color online)

819



図3 軌道上データによって得られた1TeV 電子シャワーの候補。各センサーに付与されたエネルギーを MIP (Minimum Ionizing Particle) 単位で右に示すスケールの色の違いで示している (Color online)



図4 搭載装置開発時の装置内部構造。上段には各検出器の装置構成要素,下段にはそれらを組み上げた様子を示 す。右図は、カロリメータ全体の概念図(Color online)

の出力を高・低2種類の利得で整形し,それぞ れをサンプリング ADC で読み出すことで,各 PWO について6桁以上のダイナミックレンジ を4ch の出力で実現している。

IMCは、3 r.l.の厚さ(タングステン)があり、 X、Y 交互に16 層を積層した構造である。全部 で112 個の64 アノード PMT を用いて、7168 本 のシンチファイバー(断面:1mm角)を読み 出す、高精度な位置検出機能を備えたカロリ メータである。入射粒子の毛荷とシャワー開始 位置の検出により電子、y線及び原子核を選別 し、シャワー軸の決定により到来方向を測定す る。

装置の最上部に設置した CHD は,32 mm 幅 にセグメント化した厚さ10 mm のプラスチッ クシンチレータを X,Y 方向に各14 本配置し て,入射粒子の電荷を Z=1-40 の領域で測定す る機能を持つ。図4 に搭載装置の開発時におけ る CHD, IMC, TASC の装置構造について示す。

3. 観測運用

CALETの観測運用のため、JAXA地上局 (JAXA-GSE)と早稲田大学CALET運用局 (Waseda CALET Operations Center; WCOC) が設 置されている。軌道上観測で取得されたデータ は、NASA のリレー衛星システムにより NASA 地上局にダウンリンクされ、JAXA つくば宇宙 センターに転送される。リアルタイムデータは 即座に WCOC に配信され、JAXA と WCOC が 協力して24 時間体制で観測状況の監視を行っ ている。科学解析用の生データ(Level-0) は一 時間毎に欠損の補完や時系列補正が行われた 後、JAXA から WCOC に送信される。WCOC では Level-0 データを科学解析用基礎データ (Level-1) に変換後、国際チームへ配信してい る⁴⁾。

CALET の科学運用は、軌道上での宇宙線へ の地磁気の影響を考慮して WCOC にて計画さ れ、時刻付コマンド列が軌道上での観測モード を制御するのに使われる。CALET の主目的で ある高エネルギー(>10 GeV)シャワー粒子を 取得するトリガーでのデータ取得を常時行う観 測モード(高エネルギーモード)に加え、較正 データの取得モード、高磁気緯度における低エ ネルギー電子取得モード、超重原子核取得モー ドが ISS の軌道位置に応じて設定される。

2018 年7月31日の時点で観測日数は1032 日を数え,約6.7億イベントの高エネルギー (>10GeV)シャワー事象に加え,較正データ や低エネルギー事象,超重粒子事象も順調に取 得されている。軌道上でのデータ取得は継続的 かつ極めて安定して行われており,データ取得 の実時間の割合は85%を維持できている。そ して,図5に示すような全粒子13.5億イベント によるTASCにおけるエネルギー付与(ΔE)の 分布が観測されている。図からわかるように, 冪型のエネルギー分布が得られており,エネ ルギー測定は1GeVから1PeVの6桁のエネル ギー領域で正常に行われていることが確認され ている。

4. 軌道上観測性能

エネルギー測定は,主にTASCにおける各 PWOのエネルギーレンジの異なる4系統のレ ンジでの読み出しについて,各系統における損 失エネルギーへの変換係数の決定,各レンジに おけるゲインの線形性の確認,隣接するゲイン レンジ間の接続,の3つの方法を組合わせるこ



図5 2015 年10 月13 日の観測開始から2018 年7 月31 日まで,1032 日間の観測で得られた,TASC におけるエネ ルギー付与 (ΔE)の分布。低エネルギー(>1GeV)トリガーのイベントを含めて約13.5 億イベントが記録さ れ、1PeV (10¹⁵ eV) までのエネルギー測定が正確に行われている (Color online)



図6 CHDのX層とY層の相関より得られた各原子核成分の電荷分布 (Color online)

とで実現されている。そして、入射粒子の位置 や、温度、時間の変化に対する較正を高精度に 行うことにより、長時間観測における安定性を 維持している。エネルギー測定と軌道上データ による較正方法の詳細は論文⁵⁾に記載されてい るが、各ゲインレンジでの線型性は地上での高 輝度レーザ試験によって確認し、ADC 値のエ ネルギーへの変換係数とゲインレンジ間の接続 は軌道上データを用いて定期的に較正されてい る。エネルギー較正が十分な精度でなされた結 果、30 GeV 以上で2%のエネルギー分解能が達 成されており、全電子スペクトルの微細構造を 観測するのに最適な検出器となっている。

その他に重要な性能として,入射粒子の電荷 分解能が挙げられるが,この測定は主に CHD を用いて行われている。加速器のビーム実験で CHD の電荷識別性能は検証されているが,軌 道上データを用いて CHD の X,Y 層のシグナル 相関から図6 のような電荷分解能が得られてい る。電荷分解能は,素電荷(e)の単位で陽子で 0.1, CNO では0.15, Fe の領域まで0.28 以下の値 が,ビーム実験の結果と同じ精度で確認されて いる。そして,図6 からわかるとおり,各原子 核成分のフラックスを反映した Z=1-28 までの 高精度な電荷分布が観測されている。

5. これまでの観測成果

5·1 電子+陽電子

CALET は、宇宙空間での直接観測による 3TeV までの高精度電子識別に初めて成功し、 高精度の全電子スペクトルの直接測定結果を 世界に先駆けて2017年11月に発表している⁶⁾。 それに続いて、780日間の観測で取得された 軌道上全データの解析により、高エネルギー 側(>500GeV)の統計量を約2倍に増やして、 11GeV-4.8TeVのエネルギースペクトルを2018 年6月に発表した⁷⁾。その結果を、他の観測結 果と比較して図7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、100GeV 以上では Fermi-LAT 等の 結果とは有意な差が見られる。初期結果から得 られた知見は以下のようにまとめられる。

- 1)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。
- 2) これまでの宇宙における直接観測の限界 を更新する観測を達成し、TeV以上の領域 で電子加速源の分布によるスペクトルの カットオフ構造と矛盾しない結果が得られ



図7 CALET により11 GeV-4.8 TeV の領域で測定された宇宙線全電子スペクトル。灰色帯として系統誤差を示す (ただしエネルギースケールの不定性は含まない)。これまでの観測のうち,宇宙空間での測定結果 (DAMP-LE, PAMELA, Fermi-LAT, AMS-02) と地上からの観測結果 (HESS) を共に示す (Color online)

ている。

3) CALET の結果は,系統誤差を含めるとま だ有意とは言えないが,200 GeV と1 TeV 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。

今後の観測継続による統計量のさらなる増加 と解析の深化により, 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 クトル構造の検出が可能になると判断してい る。なお、CALET の最初の論文発表の後,中 国科学院が初めて行った衛星による宇宙科学 観測である DAMPE も全電子スペクトルを発 表した。この結果は、1TeV までの領域でむし ろ Fermi-LAT の結果と一致しており、TeV 以上 ではスペクトルのカットオフを報告している。 DAMPE は、CALET と極めて類似したカロリ メータ型の検出器であり、両者の比較・検討は 今後の課題として非常に重要である。

5・2 陽子・原子核

CALET の運用では常時10GeV 以上の高エネ ルギーモードでの観測を行っている。そして、 イベントトリガーは主に TASC 1 層目でのエネ ルギー損失量で行うため、陽子では IMC また は TASC 1 層目までで相互作用を起こすイベン トが主にトリガーされる。これは、電子に対す る陽子雑音除去のためには非常に効果的である が、陽子観測に対しては検出効率が10%程度 と少なくなる。電荷の増大とともにトリガー効 率は良くなり、酸素 (Z=8) より重い原子核で は電離損失のエネルギーだけで電子10GeV の エネルギー閾値を上回るので、ほぼ100 %トリ ガーがかかる。

図8に、重原子核のエネルギースペクトルの 初期的な観測結果を示す。主要な原子核につい ては、すでに100TeVを超えるエネルギー領域 まで観測が達成されており、今後の解析と観測 でさらに10倍程度のデータ取得が可能であり、 1PeVに迫る観測が実現できる。陽子、ヘリウ ムについては、スペクトルの"硬化"が見られ



図8 主要な原子核成分のエネルギースペクトルの初期的な観測結果を、これまでの測定値と比較して示す (Color online)

る領域をカバーする核子あたり50GeV-数10 TeV のデータ解析が実施されている⁸⁾。

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中である。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)とよく一致する初期的な結果が得られ ている。

5·3 y線

地磁気によるカットオフ・エネルギーが高い 低地磁気緯度では10GeV以下の荷電宇宙線が 侵入して来ないため、低エネルギートリガー を併用して、1GeV以上のy線の観測を行って いる。また、CGBMがy線バースト(GRB)を とらえた直後にもこのトリガーを有効にして、 CGBMでは検出できない高エネルギー成分の 観測を可能としている。ISS 軌道の関係で、銀 河座標系で見ると感度が全天では不均一になる が、銀河中心や銀河反中心領域は高感度で観 測が可能である。y線と電子の識別はCHDと IMCを用いて入射粒子の電荷の有無を判別す ることによって正確に行うことができる。y線 候補事象に対しては、電子の場合と同様にシャ ワー軸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。

これまでの観測で得られたy線の天球マッ プを図9に示す。Crab, Geminga, Vela, 活動銀 河核 CTA102 などの点源が明らかである。これ らの天体のエネルギースペクトルについては Fermi-LAT の結果とほぼ一致しており,検出器 の観測性能が正しく理解されていることを示し ている⁹。

5・4 y線バーストと重力波源天体探査

CGBMは、約7keV-1MeVの帯域を観測 するLaBr₃(Ce)結晶を用いた硬X線モニ ター (HXM)2本と、約100keV-20MeVの 帯域を観測する BGO 結晶による軟y線モニ ター (SGM)1本から構成されている。加えて CGBM がバースト候補を検出した時には、前 述したようにカロリメータのエネルギー閾値 を1GeVまで下げ、合わせてスターセンサの イメージデータを取得する観測モードに遷移 する。この結果、CALET は約7keV から TeV 領域の GRB を観測できる能力を有する。GRB は年間43イベントの割合で検出されており、 2018年10月1日までの時点で130イベントが 取得されている。その内,90%にあたる117例 が継続時間(T90)が2秒以上の長い GRB であ り、10%に相当する13例がT90<2秒の短い GRBと判定されている。さらに、太陽フレア にともなう GRB も検出されている。

特に興味深いイベントとして GRB160107A があるが、このイベントでは10keV 以下の X 線放射が先行していたことが、CGBM と MAXI-GSC 検出器の双方で観測されている。 このような X 線 precursor イベントは過去の観 測でも報告されているが、この GRB では約45 秒も前に黒体輻射と思われる軟 X 線が検出さ



図9 CALET の約1.9年間の観測から得られた1GeV 以上での y 線の天球マップ(銀河座標系)。等高線は(有効面積)×(観測時間)が最大値の何%であるかを示し、天の北極及び南極方向で小さくなっていることがわかる。いくつかの明るい点源がトランジェントな天体を含めて観測されている(Color online)

れており,GRB 放射初期の物理状態に大きな 示唆を与えている¹⁰⁾。

短い GRB 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、LIGO 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 開発段 階から重力波に伴う短い GRB 観測は 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、y線 の上限値を与えることに成功している¹¹⁾。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 と整合した結果が得られた。

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 GW170817 の検出が早くも報告さ れた。このイベントは CGBM (及びカロリメー タ)の視野とは外れていてy線の検出はできな かった。しかし、もし視野内にあれば、CGBM は短い GRB を予想通りの頻度で観測してお り、今後の重力波対応天体探査に期待がもたれ る¹¹⁾。特に GW170817 に伴う GRB は極めて弱 く,かなり特殊な例と考えられており,できる だけ多くの観測が不可欠である。重元素合成の 鍵となる r プロセスの生成の場として GRB 観 測・重力波対応天体探査・マクロノーヴァの観 測が今後の宇宙物理学研究の大きな推進力とな ることが期待されている。

5・5 太陽変調を受けた電子の観測

CALETでは、地磁気カットオフが1GeV以 下になる ISS 軌道空間で、全電子流束の太陽 変調観測を行っており、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、Relativisitic Electron Precipitation (REP)現象を ISS で初めて観測している¹²⁾。 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。

6. まとめと今後の展望

CALET は宇宙空間における高精度直接観測 により、宇宙線全電子スペクトルを11GeV-4.8TeV の領域で達成している。その最高エネ ルギー領域には、まだ統計及び系統誤差の範囲 であるが、スペクトル構造が予見されている。 今後の解析の深化と統計量の増加により、原子 核成分の高エネルギー領域での観測の進展とと もに、宇宙線観測の新たな研究展開をもたらす ことが期待できる。なお、中性子星合体に由来 する重力波に付随した電磁波の観測から、中性 子星の物理に関する成果が多く現れてきてお り、日本発の重力波源観測装置として今後に CALET の貢献が期待できる。さらに、REP 観 測による宇宙天気予報についても他観測との共 同研究が進んでいる。

文 献

- 鳥居祥二,特集「宇宙線100周年」宇宙線を直接捉える,日本物理学会誌,67(12),821-827 (2012)
- 2) 鳥居祥二,浅岡陽一,森正樹,吉田篤正,(話題) CALETが開始した高エネルギー宇宙の新たな 探求,日本物理学会誌,73(6),388-392 (2018)
- Adriani, O., Asaoka, Y., Torii, S., et al., CALET Upper Limits on X-ray and Gamma-ray Counterparts of GW 151226, *Astrophys. J.*, 829, L20 (2016)
- Asaoka, Y., Ozawa, S., Torii, S., Adriani, O., et al., On-orbit Operations and Offline Data Processing of CALET onboard the ISS, *Astropart. Phys.*, 100, 29–37 (2018)
- Asaoka, Y., Akaike, Y., Komiya, Y., Miyata, R., et al., Energy calibration of CALET onboard the International Space Station, *Astropart. Phys.*, **91**, 1–10 (2017)

- 6) Adriani, O., Asaoka, Y., Torii, S., et al., 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, *Phys. Rev. Lett.*, **120**, 261102 (2018)
- Adriani, O., Asaoka, Y., Torii, S., et al., Energy Spectrumof Cosmic-Ray Electron and Positron from10 GeV to 3 TeV Observed with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station, *Phys. Rev. Lett.*, **119**, 181101 (2017)
- S. Torii, for the CALET Collaboration, The CALorimetric Electron Telescope (CALET) on the ISS: Preliminary Results from the On-orbit Observation since October, 2015, [Highlight Talk] Proceedings of Sciences (ICRC2017) 1092 (16pp) (2018)
- Cannady, N., Asaoka, Y., Satoh, F., Tanaka, M., et al., Characteristics and Performance of the CALorimetric Electron Telescope (CALET) Calorimeter for Gamma-Ray Observations, *Astrophys. J.*, 238, 5 (2018), Supplement Series
- Kawakubo, Y., et al., Detection of the thermal component in GRB 160107A, *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 70, 6 (2018)
- Adriani, O., Asaoka, Y., Mori, M., et al., Search for GeV Gamma-Ray Counterparts of Gravitational Wave Events by CALET, *Astrophys. J.*, 863, 160 (2018)
- Kataoka, R., Asaoka, Y., Torii, S., Terasawa, S., et al., Relativistic electron precipitation at International Space Station: Space weather monitoring by Calorimetric Electron Telescope, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 4119–4125 (2016)

Abstract

Frontiers in Cosmic Ray Research Direct Cosmic-ray Observations with CALET on the International Space Station

Shoji ToRII⁺: WISE, Waseda University, 17 Kikuicho, Shinjuku-ku, Tokyo 162–0044, Japan, [†]torii.shoji@waseda.jp

The CALorimetric Electron Telescope (CALET) space experiment, which has been developed by Japan in collaboration with Italy and the United States, is a high-energy astroparticle physics mission on the International Space Station (ISS). The primary goals of the CALET mission include investigating possible nearby sources of high energy electrons, studying the details of acceleration andpropagation of galactic cosmic rays, and searching for dark matter signatures. During an expected five-year mission, the CALET experiment is measuring the flux of cosmic-ray electrons (including positrons) to 20 TeV, gamma-rays to 10 TeV and nuclei with Z=1 to 40 up to 1,000 TeV. CALET has sufficient depth, imaging capabilities and excellent energy resolution to allow for a clear separation between hadrons and electrons and between charged particles and gamma rays. Since the start of operation at the ISS from mid-October, 2015, a continuous observation has been

maintained mainly by triggering high energy (>10 GeV) showers without any major interruption. The number of the triggered events is about 20 million per month, and the number will reach to nearly one billion as of mid of July, 2019. By using the data obtained, we will have a summary of the CALET observations up to the recent period.