

# 国際宇宙ステーションにおける高エネルギー宇宙線実験 (CALET)

## — Waseda CALET Operations Center (WCOC) の運用と科学成果発信 —

研究代表者 浅岡 陽一  
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

### 1. 研究課題

宇宙線電子線望遠鏡実験(CALET)は、JAXA と早稲田大学の共同プロジェクトである。国際宇宙ステーション(ISS)に大面積カロリメータを有する高機能粒子検出器を搭載することで、GeV–TeV( $10^9$ – $10^{12}$ eV)にわたる広いエネルギー領域で電子線とガンマ線流束の精密測定を行い、太陽系近傍の宇宙線加速源や暗黒物質を探索することを第一の目的としている。CALET は JAXA プロジェクトとして宇宙科学研究所による科学成果審査、及びプロジェクトを所掌する有人宇宙技術部門の技術評価審査を受けて遂行されている。2015年8月には H2-B ロケットによる CALET の打ち上げが成功し、HTV5 号機にて ISS へ輸送され日本実験棟の船外実験プラットフォームへ設置された。その後、機能確認のためのチェックアウト期間を経て10月より軌道上での観測を開始した。2年間の定常観測終了後には、フルサクセスの評価を受けて、「後期運用」が5年を目標に開始された。その観測データから、暗黒物質対消滅等の可能性が指摘されている sub-TeV での陽電子(+電子)過剰問題に決着をつけ、さらに 20TeV までの電子スペクトルの精密測定により近傍加速天体の証拠を発見することが強く期待されている。

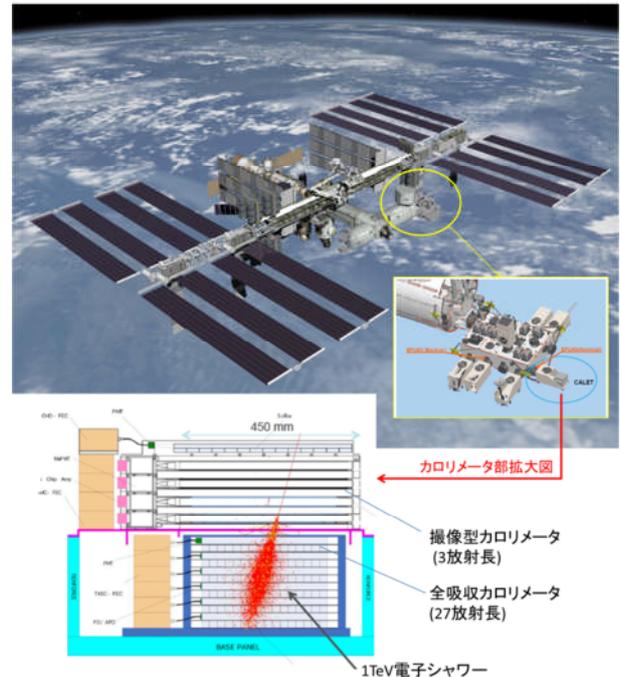


図 1：国際宇宙ステーション搭載 CALET 検出器の概要

CALET 検出器の最大の特徴は非常に分厚い、撮像型と全吸収型を組み合わせた高性能カロリメータである (図 1 参照)。30 放射長の物質量を誇るカロリメータは TeV 領域の電子シャワーを完全に吸収することができ、その分厚いカロリメータで撮像されるシャワー像の発達の違いから、電子成分の観測に際して多大なバックグラウンドとなる陽子事象を排除することができる。sub-TeV 領域での陽電子過剰問題に決着をつける上では、この分厚い高性能カロリメータによって実現される 2%のエネルギー分解能と十分なバックグラウンド除去能力が特に鍵となる。さらに 20TeV までの電子スペクトルを得るには、これらの特徴に加えて ISS 搭載によって可能となる大面積化と長期観測が非常に重要となる。宇宙線の主成分である陽子・ヘリウム等の核子成分に関しては、PeV ( $10^{15}$ eV) までの測定が可能であり、電子・ガンマ線も含めて、これまでの直接測定の限界を大きく更新するユニークな観測が実現できる。なお、反粒子の識別を主目的とした AMS-02 が陽電子比等

で高精度の結果を発表しているが[L. Accardo et al., PRL 113 (2014) 121101 等], 各サブ検出器がマグネットスペクトロメータの限界である約 1TeV をターゲットとして最適化されているため, AMS-02 では~1TeV がエネルギー決定の限界となる. 一方の CALET は, 電荷の正負を判定できないものの PeV までのエネルギー決定が可能であり, かつ高エネルギー領域では AMS-02 を大きく凌駕する面積立体角を有するため, AMS-02 と相補的な検出器となっている. 今後は, 共に ISS をプラットフォームとする両者が宇宙線の直接観測を牽引すること期待されている.

統計量や精度の限界に挑むことでユニークな物理目的を達成する CALET にとって, 長期間に渡る軌道上観測において測定器の性能を確保し高効率で観測を遂行することは欠くことのできない重要事項であると言える. 早稲田大学には, この目的でミッション運用やデータ解析を司る Waseda CALET Operations Center (WCOC) が設置されている(図 2 参照).

2015 年 10 月に ISS にて観測を開始した CALET は, 現在に至るまで順調に軌道上運用を継続している. 2016 年にはトランジェント事象に関連する観測結果を 2 編報告し, CALET による科学成果発信の口火を切ることができた. 2017 年初頭には CALET の軌道上エネルギー較正方法とその精度を詳説した論文を発表しており, 特にエネルギー測定精度が重要となる宇宙線スペクトル測定結果の報告に向けた準備が整った. 2017 年 11 月には主目的である全電子スペクトルを, 10GeV から 3TeV のエネルギー範囲で Physical Review Letter にて報告することができた. 2018 年 2 月に CALET の科学運用と WCOC におけるデータ処理に関する論文を発表している. 本研究の目的は, 早稲田大学に設置した Waseda CALET Operations Center (WCOC) の機能を駆使して高効率運用を継続すると共に, さらにデータ解析を進めて科学成果を発信することである.

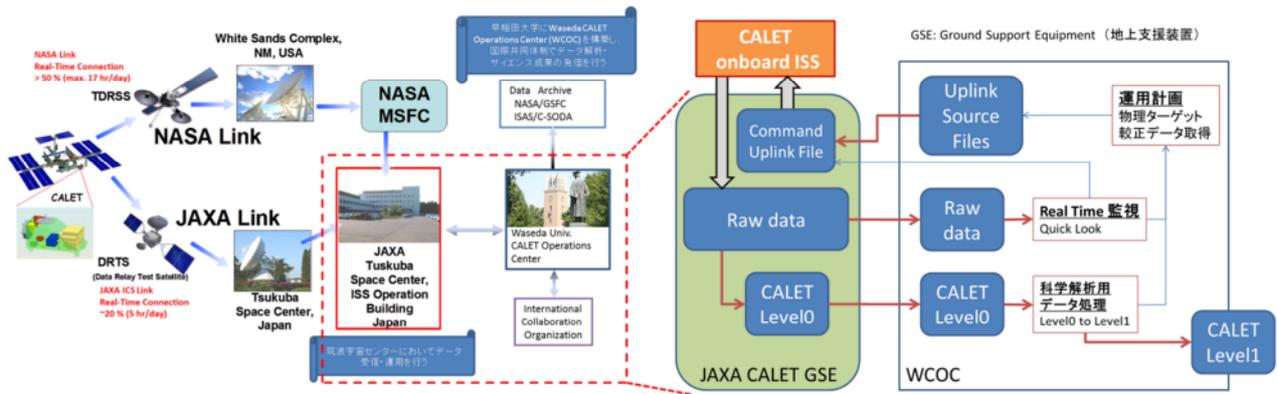


図 2: CALET データフローと地上システムの概要

## 2. 主な研究成果

CALET の軌道上運用が開始された現在では, JAXA に設置された地上システムと協力して WCOC での 24 時間体制での運用を行っており, 図 3(左)に示すように順調に実観測時間を蓄積している. 2013 年度から 2015 年度に実施した開発の成果が発揮され, WCOC はリアルタイム監視, 運用計画, 科学データ処理の 3 つの役割を十全に果たしている.

科学解析用の生データに相当する Level0 データは JAXA の地上システムにて作成され, WCOC に配信される. WCOC ではこれを科学解析用の基礎データである Level1 データに変換して国内外の共同研究者に配信している. Level1 データを用いて検出器の較正が行われ, 物理解析用の Level2 データが作成される. 各データセットを用いた解析は各機関で独立に行われるが, 論文化に使用される公式なデータセットは WCOC で作成することが決定されており, WCOC は CALET のデータ

解析において中心的な役割を担っている。現在まで Level1 データの国内外への自動配信を継続している。Level2 データについても装置較正や再構成アルゴリズムを更新して PASS-03 (第3版)までの作成を完了し物理解析に供している。以下に 2017 年度の主な研究成果をまとめる。

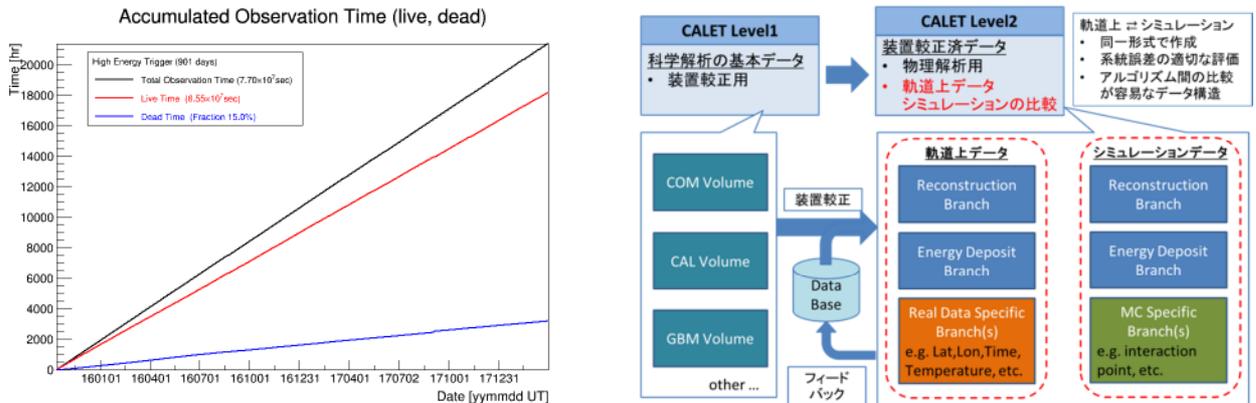


図 3 : (左) 2018 年 3 月末までの実観測時間の積算, (右) 高次データ作成のデータフロー

(1) 全電子スペクトル : (研究業績 4.1.4).

CALET は, TeV 領域を含む全電子スペクトルの精密測定による, 近傍加速源の発見及び暗黒物質の探索を第一の目的としている。CALET 検出器は (i) 電磁シャワー初期発達の特徴を活用した高効率飛跡再構成, (ii) TeV 電子シャワーの全吸収による 2% のエネルギー分解能, (iii) シャワー像の 3 次元可視化による  $10^5$  以上の陽子除去性能, の 3 点に特徴づけられる, TeV 領域を含む全電子(電子+陽電子)観測に最適化された検出器である(図 4(上)参照)。我々は 2017 年 6 月までの軌道上データを用いて 10GeV—3TeV までの全電子スペクトルを求め(図 4(下)参照), Physical Review Letters にて出版した [Adriani et al. (CALET collaboration), Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 181101]。CALET は電子観測において高い測定精度をもち, データ解析の精度が即スペクトル測定結果に反映されるため, 慎重な取り扱いが必須である。系統誤差の見積りも含めて本解析を中心的に行い, 代表研究者鳥居祥二教授とともに本論文の主著者となっている。本論文は CALET にとって初の本格的なエネルギースペクトル測定結果であり, 最も重要な観測対象に対する結果でもある。

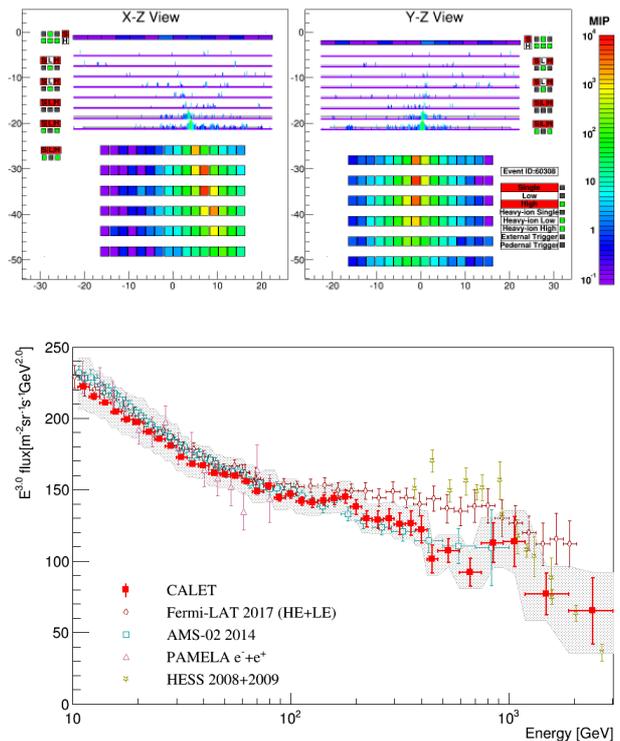


図 4(上) 1TeV 電子候補。検出器内でのシャワー発達が可視化され全吸収されている, (下) CALET による 10GeV—3TeV までの全電子スペクトル [Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 181101]。最近の宇宙からの直接測定結果と地上からの間接測定結果を比較している。

## (2) 科学運用：（研究業績 4.1.1).

WCOCには運用計画、リアルタイム監視、物理解析用データ処理の3つの役割があり、これらを通して科学運用を実施する。次席研究員として採用されてからの3年間で、早稲田大学におけるCALET専用地上システムであるWCOCの開発を完了した。WCOCでは、運用開始から常に24時間のシフト体制でCALETの運用状態を監視しており、JAXAと協力してCALETの安定稼働を支えている。現在は、観測スケジュールの策定とごくまれに発生する運用に関するトラブルへの対応、データ処理を中心的に行っている。2018年初頭には、WCOCにおける科学運用の詳細と実績をまとめた論文を出版することができた[Asaoka et al., *Astropart. Phys.* 100 (2018) 29].

## (3) トランジェント観測：（研究業績 4.1.2, 4.1.3).

2016年初頭に重力波の初の直接検出がLIGOチームにより発表された。今後は重力波事象に対する電磁波対応天体の同定が非常に重要なテーマとなっており、重力波と継続時間の短いGRBの同時観測が鍵を握っている。CALETはGW151226のX線・ガンマ線領域における対応天体を探索し、その潜在能力を示した[Adriani et al. (CALET collaboration), *ApJL* 829 (2016) L20]。本論文において、申請者はカロリメータの解析を担当し、1GeV付近の低エネルギー側のガンマ線観測手法を確立してGeVガンマ線流束に対して制限を与えた。この成果が科研費獲得(基盤研究B)に繋がっている。本課題では、重力波やGRBに同期したGeVガンマ線をはじめ、低エネルギー電子や宇宙天気に関するトランジェント現象の観測を目的として、高次データ作成をリアルタイム化し、データ取得から1時間程度の間ガンマ線事象探索を行うトランジェント探索システムを開発している。LIGO/Virgoの重力波観測Run2においても、GW151226に対する解析手法を発展させ、新規開発したトランジェント探索システムに組み込むことで、全ての重力波トリガーに対して探索を行った。Virgoとの初の同時観測イベントGW170814や中性子星連星の合体で電磁波放射との同時観測が達成されたGW170817についても1日以内に解析結果をチーム内に報告している。これらは共に視野外であったが、特にGW170817に関してはCGBMの観測は行われており、GW170817に対応する電磁波観測に関する歴史的な論文の共著者となっている[Abbott et al., *ApJL* 848 (2017) L12].

## 3. 共同研究者

鳥居祥二(理工学研究所・教授), 小澤俊介(先進理工学部・研究院講師), 笠原克昌(理工学研究所・招聘研究員), Holger Motz(国際教育センター・助教), 田村忠久(神奈川大学・教授), 清水雄輝(神奈川大学・准教授), 赤池陽水(CREST/NASA/GSFC・海外特別研究員), 他 CALET 共同研究者

## 4. 研究業績

### 4.1 学術論文

1. "On-orbit operations and offline data processing of CALET onboard the ISS", \*Y.Asoka S.Ozawa, S.Torii et al. (CALET collaboration; remaining 89 co-authors in alphabetical order), *Astroparticle Physics*, vol. 100 (2018) pp. 29-37. [Refereed].
2. "Detection of the thermal component in GRB 160107A", Yuta KAWAKUBO, Takanori SAKAMOTO, Yoichi Asaoka (6th) et al. (in total 17 authors), *Publ. Astron. Soc. Japan* 70 (2018) 6 (1-10) [Refereed].

3. “Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger”, B.P.Abbott, Y.Asaoka (3142th) et al. (in total 4103 authors), *Astrophysical Journal Letters* 848 (2017) L12. [Refereed].
4. “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.Asaoka (4th), \*S.Torii (81th) et al. (CALET collaboration; 91 co-authors in alphabetical order), *Physical Review Letters* {¥bf 119}, 181101 (2017).
5. “Decaying Fermionic Dark Matter Search with CALET”, \*S.Bhattacharyya, H.Motz, S.Torii, Y.Asaoka, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 08 (2017) 012.

(注：主著者には\*を示した)

#### 4.2 総説・著書 該当なし

#### 4.3 招待講演

1. 浅岡陽一他, CALET 共同研究者, 「CALET による 2 年間の宇宙線観測成果」, 2018 年 2 月, 平成 29 年度 ISEE 研究集会—太陽圏宇宙線シンポジウム, 名古屋大学.
2. Yoichi Asaoka for the CALET collaboration, “CALET preliminary results on the cosmic ray observations for the first two-years on the ISS”, The 2017 Cosmic Ray Anisotropy Workshop (CRA 2017), October 2017, Guadalajara, Mexico.

#### 4.4 受賞・表彰 該当なし

#### 4.5 学会および社会的活動

1. Yoichi Asaoka for the CALET collaboration, “Search for GeV Gamma-Ray Counterparts of Gravitational Wave Events with CALET”, *Gravitational wave physics and astronomy: Genesis*, March 2018, Kashiwa, Japan.
2. Shoji Torii, Yoichi Asaoka (presenter) for the CALET collaboration, “CALET : Summary of the First Two-Years on Orbit”, *TeV Particle Astrophysics 2017 (TeVPA 2017)*, August 2017, Columbus, Ohio, USA.
3. Yoichi Asaoka (Presenter) for the CALET collaboration, “Analysis and Preliminary Results for the Cosmic Ray Electron Spectrum from CALET”, *35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017)*, July 2017, Busan, Korea; *Proceedings of Science (ICRC2017)* 205.
4. S. Ozawa and Y. Asaoka for the CALET collaboration, “CALET on-orbit operations and data analysis system at the Waseda CALET Operations Center”, *35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017)*, July 2017, Busan, Korea; *Proceedings of Science (ICRC2017)* 16.
5. R. Miyata, Y. Asaoka and S. Torii for the CALET collaboration, “Full Dynamic Range Energy Calibration of CALET onboard the International Space Station”, *35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017)*, July 2017, Busan, Korea; *Proceedings of Science (ICRC2017)* 207.
6. S. Komiya, G. Bigongiari, S. Torii and Y. Asaoka for the CALET collaboration, “MIP Calibration and the Long-term Stability of CALET onboard the International Space Station”, *35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017)*, July 2017, Busan, Korea; *Proceedings of Science (ICRC2017)* 206.

7. M. Mori and Y. Asaoka for the CALET collaboration, "Search for gamma-ray emission from electromagnetic counterparts of gravitational wave sources with the CALET calorimeter", 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017), July 2017, Busan, Korea; Proceedings of Science (ICRC2017) 637.
8. H. Motz, Y. Asaoka, S. Bhattacharyya and S. Torii for the CALET collaboration, "Searching for Anisotropy in Electron+Positron Cosmic Rays with CALET", 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017), July 2017, Busan, Korea; Proceedings of Science (ICRC2017) 265.
9. S. Bhattacharyya, H. Motz, S. Torii and Y. Asaoka for the CALET collaboration, "Searching Fermionic DM Decay Signal with CALET", 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017), July 2017, Busan, Korea; Proceedings of Science (ICRC2017) 919.
10. 浅岡陽一(発表者), 鳥居祥二, 赤池陽水, 宮田諒平, 小澤俊介, 笠原克昌, 宮崎美有, 他 CALET チーム, 「CALET による 10GeV–3TeV の全電子スペクトル観測結果」, 2018 年 3 月, 25pK202-7, 日本物理学会, 東京理科大学.
11. 浅岡陽一他, CALET 共同研究者(ポスター), 「CALET による 10GeV から 3TeV の全電子スペクトル観測」, 2018 年 1 月, 宇宙科学シンポジウム, JAXA/ISAS.
12. 鳥居祥二, 浅岡陽一(発表者), 「飛翔体観測による高エネルギー宇宙線加速天体の研究～CALET 2 年間の軌道上観測成果～」, 2017 年 12 月, 東京大学宇宙線研究所共同利用発表会, 東京大学宇宙線研究所.
13. 浅岡陽一(発表者), 鳥居祥二, 小澤俊介, 笠原克昌, 宮崎美有, 宮田諒平, 赤池陽水, 他 CALET チーム, 「CALET の電子観測性能と初期観測結果」, 2017 年 9 月, 13aU31-2, 日本物理学会, 宇都宮大学.

## 5. 研究活動の課題と展望

研究活動の課題は軌道上運用とデータ解析に大別される。

**【軌道上運用】** WCOC を継続的に運用する。これまでの成果をもとに、2017 年度から科研費基盤(B)「CALET データ解析のリアルタイム化によるトランジェント現象の観測」(研究代表者:浅岡陽一)が採択されている。ISS 船外実験プラットフォームという高エネルギー宇宙線実験にとって貴重な実験の場で最大限の成果を挙げられるように、主目的である高エネルギー電子観測を最優先しながらも、重力波や GRB の GeV 領域ガンマ線対応天体探索や AGN 等のフレア等に起因するガンマ線トランジェントの観測、太陽変調・超重粒子および REP 現象(MeV 領域電子の雪崩現象)の観測を実施し、サイエンス成果の最大化を目指す。

**【データ解析】** 高統計の精密観測に見合う緻密な解析を実施する。データ解析においては、海外の共同研究者との協力および競争が重要なファクターとなる。ISS 搭載装置開発、WCOC の開発及び軌道上運用といった、日本及び早稲田大学の非常に大きな成果を強調しつつ、データ解析でも国際チームを牽引していくことが重要と考えている。

世界的にも注目度の高い CALET 実験で、効率的な運用を長期間継続し、適切なデータ解析を行うことで、検出器のポテンシャルを最大限活用した物理成果を上げることが最大の目標である。