

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) の開発と運用—

研究代表者 浅岡 陽一
(理工学研究所 次席研究員 (研究院講師))

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性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。2015年8月にはHTV5号機によるCALETの打ち上げが成功し、ISSへの設置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。今後2年間(目標5年)の長期観測が予定されており、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。

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)。放射長の30倍という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ためには、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

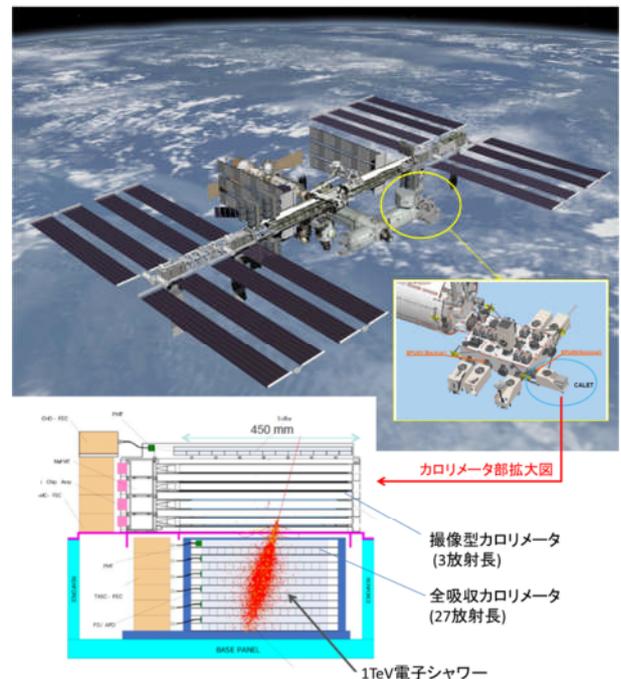


図 1：国際宇宙ステーション搭載 CALET 検出器の概要

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と言える。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。特に主目的である宇宙線電子スペクトルの観測結果を報告することが最重要課題となる。

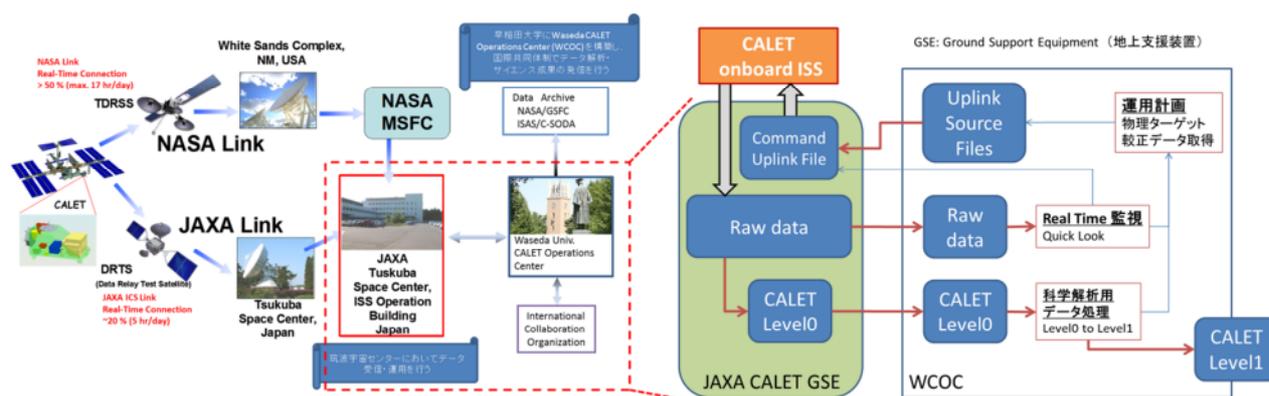


図 2： CALET データフローと地上システムの概要

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、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うことになる。2015 年度前半には Level1 データのフォーマット定義を最終化し、観測開始後は Level1 データの国内外への自動配信を継続している。以下に 2016 年度の主な研究成果をまとめる。

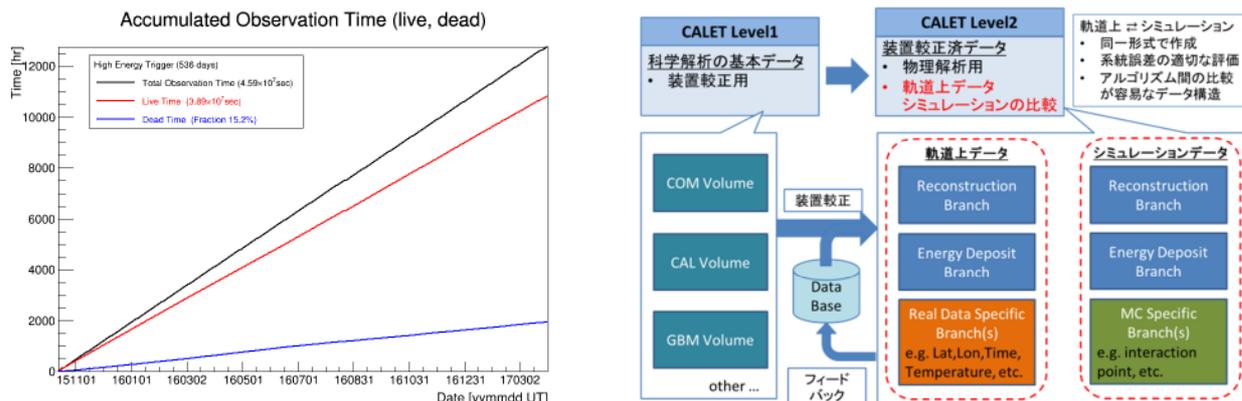


図 3 : (左) 2017 年 3 月末までの実観測時間の積算, (右) 高次データ作成のデータフロー

- (1) **高次データ処理** : 2016 年には Level2 データ構造の最適化を日本チームの主導で実施し, 初の公式データとなる PASS-01 をリリースした. Level2 データでは各宇宙線事象に対して, 複数の飛跡再構成や粒子識別等のアルゴリズムの適用結果を記録し, 比較検討が行えるようにしている. モンテカルロシミュレーション (MC) データも完全に同一の形式で作成する. 現在では, 図 3(右) に示すような装置較正, Level2 データ作成, データの確認という反復的なプロセスの中で較正精度やイベント再構成アルゴリズムの高精度化を実施している.
- (2) **装置較正** : Level2 データ作成に必要な装置較正は, 国際チーム承認の元, 検出器開発を担当した日本チームが責任を持って行っている. 特に, CALET の性能の鍵を握るエネルギー較正に関しては, その詳細方法と較正精度の推定, 系統誤差の評価を論文にまとめた(研究業績 4.1.1). 数 10GeV 以上の領域で 2% のエネルギー分解能を達成し, TeV 領域に渡る宇宙線電子スペクトルの微細構造を研究し, 近傍加速源の発見や暗黒物質の探索を行うために欠くことのできない重要な装置性能を証明した.
- (3) **初期成果発信** : CALET は観測開始間もなく電荷識別用大面積のシンチレータ検出器(CHD) のカウントレートを用いて, 宇宙天気に関連する MeV 電子の雪崩現象を検出し, 論文発表した(研究業績 4.1.3.). 2016 年初頭には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 (研究業績 4.1.2.).

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. "Energy Calibration of CALET Onboard the International Space Station", *Y. Asaoka, Y. Akaike, Y. Komiya, R. Miyata, S. Torii, et. al., Astroparticle Physics 91 (2017) 1.

doi:10.1016/j.astropartphys.2017.03.002 [Refereed].

2. "CALET UPPER LIMITS ON X-RAY AND GAMMA-RAY COUNTERPARTS OF GW151226", O. Adriani, *Y. Asaoka(4th), H. Motz (52th), *S. Nakahira (56th), S. Ozawa (60th), *T. Sakamoto (72th), S. Torii (86th), et al. (96 co-authors in alphabetical order) ApJ 829 (2016) L20. doi:10.3847/2041-8205/829/1/L20 [Refereed].
3. "Relativistic electron precipitation at International Space Station: Space weather monitoring by Calorimetric Electron Telescope", Ryuho Kataoka, Yoichi Asaoka, Shoji Torii, Toshio Terasawa, Shunsuke Ozawa, Tadahisa Tamura, Yuki Shimizu, Yosui Akaike, and Masaki Mori, Geophys. Res. Lett. 43, doi:10.1002/2016GL068930 [Refereed].

4.2 総説・著書 該当なし

4.3 招待講演

1. 「高エネルギーガンマ線でみる極限宇宙 2016」招待講演, "Preliminary results from gamma-ray observations with the CALorimetric Electron Telescope (CALET)", Y. Asaoka for the CALET Collaboration (*in English*), 2016年12月, 東京大学宇宙線研究所.

4.4 受賞・表彰 該当なし

4.5 学会および社会的活動

1. 日本物理学会口頭発表, 「CALET-CALによるガンマ線観測初期解析」, 浅岡陽一, 他 CALET チーム, 2017年3月, 21aSP-1, 日本物理学会, 大阪大学.
2. ISAS シンポジウムポスター発表, 「CALETにおけるガンマ線観測の初期成果」, 浅岡陽一 他 CALET 共同研究者, 2017年1月, JAXA/ISAS.
3. 日本物理学会口頭発表, 「CALET-CALによるガンマ線観測初期解析」 浅岡陽一, 他 CALET チーム, 2016年9月, 21pSP-2, 日本物理学会, 宮崎大学.

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、それを阻害しない範囲で重力波や 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】 高統計の精密観測の名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。