

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 理工研が募集する次席研究員 (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

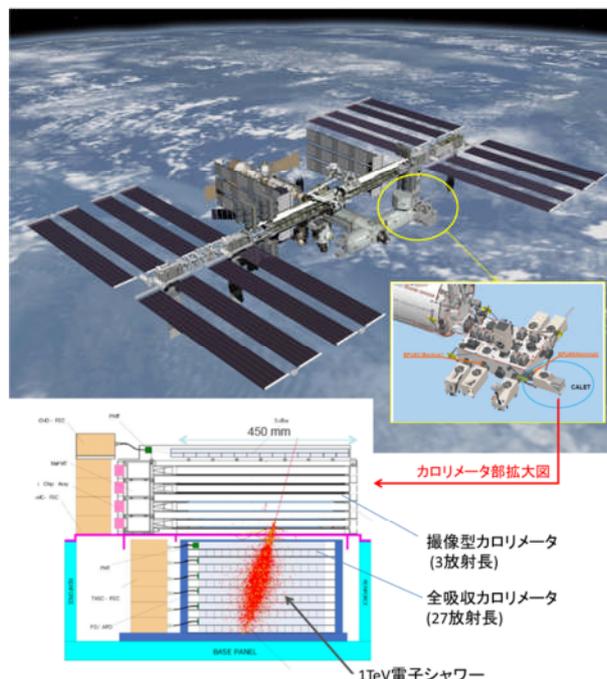


図 1：国際宇宙ステーション搭載 CALET 検出器の概要

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。本研究では、WCOC におけるリアルタイムデータ監視やデータ処理システムの構築を完成させ、CALET の打ち上げ後には実運用に適用して高効率運用を実現することを目的とする。さらに取得した観測データを詳細に解析し、科学的成果へとつなげていくことを目指す。

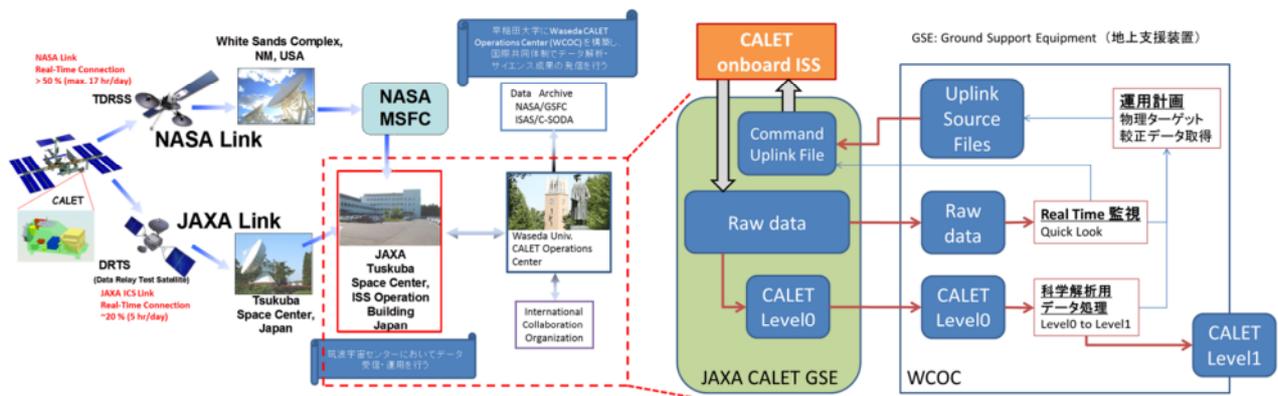


図 2 : CALET データフローと地上システムの概要

2. 主な研究成果

2015 年度の前半は、WCOC に課された以下の 3 つの役割を十全に果たせるように、システム構築の最終化を実施した。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。以下に主な研究成果をまとめる。

- (1) **リアルタイム監視** : CALET の観測状態をリアルタイムに監視するための、宇宙線イベントデータと状態監視データを集約して可視化する Quick Look (QL) システムを、実運用に耐える安定性を保ったままより高機能化した。特に 24 時間運用を支援するための自動診断機能や観測スケジュールの確認機能を追加している。また、WCOC での 24 時間監視を実現するため、国内の共同研究者を集めて運用訓練を実施し、運用開始に備えた。実運用開始後は初期機能確認の段階からリアルタイム監視システムを駆使し、定常運用開始以降も安定運用に貢献している。さらに、取得データの正当性や観測モード遷移の妥当性を網羅的・統計的にチェックするため、科学解析用データを定期的に処理する”Data Quality Check”システムを構築し、WCOC における 24 時間監視の中で定期的にモニター結果をチェックする体制を構築した。
- (2) **運用計画** : CALET の運用は、コマンドシーケンスを時刻と共に記載したスケジュールコマンドファイルを活用して実施される。定常運用時の最優先事項は TeV 領域の電子スペクトルを高精度で決めるため、高エネルギーシャワー粒子のデータを継続的に取得し続けることだが、一方で装置校正用のペDESTAL や最小電離信号抽出用のトリガーモードを用いたデータ取得も必要

である。また、CALET によって可能になる GRB 同期 GeV ガンマ線データの取得、高緯度地方での低エネルギー電子データ取得など、主たる物理目的に影響を与えない範囲で CALET の成果を最大化することも重要である。実運用を開始した 2015 年度は、軌道上での実観測状況をフィードバックして観測予測シミュレーションの精度を向上させると共に、それぞれの観測モードの要請と地磁気緯度により刻々と変化する軌道上観測環境を考慮して観測スケジュールを自動作成するツールの開発を行い、実運用に適用した。

- (3) 科学データ処理：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。Level0 データは時系列補正、欠損補完は成されているものの、受信した全パケットを単純に結合した形式で、地上への伝送用フォーマットを踏襲している。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する。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。スペクトルデータや物理ターゲット毎のサブセットは、Level3 以降の高次データとなる。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。現在は図 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の向上と Level2 データ構造の最適化を行っている。

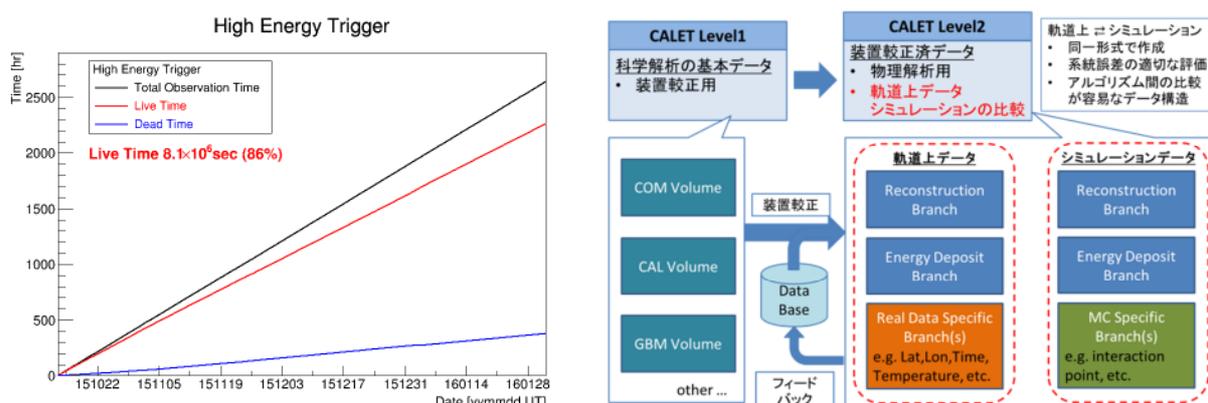


図 3： (左) 2016 年 1 月末までの実観測時間の積算、(右) 高次データ作成のデータフロー

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), 赤池陽水 (先進理工学部・助手), 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), 他 CALET 共同研究者

4. 研究業績

4.1 学術論文

1. Tae Niita, Shoji Torii, Yosui Akaike, Yoichi Asaoka, Katsuaki Kasahara, Shunsuke Ozawa, Tadahisa Tamura, "Energy calibration of Calorimetric Electron Telescope (CALET) in space", Adv. Space Res. 55 (2015) 2500-2508. [Refereed]

2. Y. Asaoka for the CALET Collaboration, “Development of the Waseda CALET Operations Center (WCOC) for Scientific Operations of CALET” , Proceedings of Science (ICRC2015) 603. [not Refereed]
3. H. Motz, Y. Asaoka S. Torii and S. Bhattacharyya, “CALET’s sensitivity to Dark Matter annihilation in the galactic halo” , Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 12 (2015) 047. [Refereed]
4. Ryuho Kataoka, Yoichi Asaoka, Shoji Torii, Toshio Terasawa, Shunsuke Ozawa, Tadahisa Tamura, Yuki Shimizu, Yosui Akaike, Masaki Mori, “Relativistic electron precipitation at International Space Station: Space weather monitoring by Calorimetric Electron Telescope”, Journal of Geophysical Research, in press. [Refereed]

4.2 総説・著書

該当なし

4.3 招待講演

該当なし

4.4 受賞・表彰

該当なし

4.5 学会および社会的活動

1. 国際会議ポスター発表, “Development of the Waseda CALET Operations Center (WCOC) for Scientific Operations of CALET”, Y. Asaoka for the CALET Collaboration, August 2015, The Hague, ICRC2015.
2. 日本物理学会発表 (共同研究者), 「Waseda CALET Operations Center (WCOC)におけるミッション運用」, 神尾泰寿他 CALET 共同研究者, 2015年9月, 26pSJ-2, 日本物理学会, 大阪市立大学.
3. ISAS シンポジウムポスター発表, 「Waseda CALET Operations Center (WCOC) におけるミッション運用」, 浅岡陽一他 CALET 共同研究者, 2016年1月, JAXA/ISAS
4. 日本物理学会口頭発表, 「ISS 軌道上における CALET の電子観測条件最適化」 浅岡陽一他 CALET 共同研究者, 2016年3月, 19aAZ-2, 日本物理学会, 東北学院大学

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] 2015年度までに開発したシステムを継続的に運用して, 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太陽変調や超重粒子, 低エネルギーγ線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挙げるのが最大の目標である。