

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔令和3（2021）年度 中間評価用〕

令和元年度採択分  
令和3年3月31日現在

CALET 長期観測による銀河宇宙線の起源解明と暗黒物質探索

Long-term observations to study the origins of Galactic Cosmic Rays and search for Dark Matter with CALET

課題番号：19H05608

鳥居 祥二 (TORII Shoji)

早稲田大学・理工学術院・名誉教授



研究の概要（4行以内）

国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」に搭載された CALET の優れた観測性能を駆使した長期間観測より、未開拓な高エネルギー領域において宇宙線電子及び陽子・原子核成分、ガンマ線の高精度観測を実現することにより、銀河宇宙線の加速機構・伝播過程における未解明な課題を解決するとともに、宇宙科学最大の謎の一つとされる暗黒物質の探査を行う。

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：高エネルギー宇宙線、宇宙線加速機構、暗黒物質、国際宇宙ステーション

1. 研究開始当初の背景

宇宙における高エネルギー放射の最終的な理解には、その源となっている宇宙線の理解が必須である。そのためには、宇宙線の組成やスペクトルの高精度な観測が必要であり、地球に降り注ぐ宇宙線を宇宙空間で直接捉えることが不可欠である。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”による理解が進んでいるが、まだ加速や伝播に関する基本的な問題において未解明な課題が残されているだけでなく、“標準モデル”では理解できない観測結果が報告されている。

2. 研究の目的

本研究では「背景」で述べた宇宙線の謎の解明のため、国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験棟「きぼう」に搭載した観測装置 CALET (図1) により、2015年10月から観測を実施している。CALET はシャワー粒子の可視化機能を備えた、非常に厚い(30 放射長) カロリメータであり、GeV-TeV 領域の電子・ガンマ線の観測に加えて、陽子・原子核成分 ( $Z=1-40$ ) について核種毎に 10 GeV から 1 PeV 領域に至るエネルギースペクトルの観測を実施している。

このような CALET の優れた性能を駆使して、未開拓なエネルギー領域で宇宙線各成分の高精度観測を実現する。そして、銀河宇宙線の加速・伝播における未解決課題や新たな課題を解決するとともに、電子・ガンマ線観測により宇宙科学最大の謎の一つとされる、暗黒物質の探査を行うことが目的である。

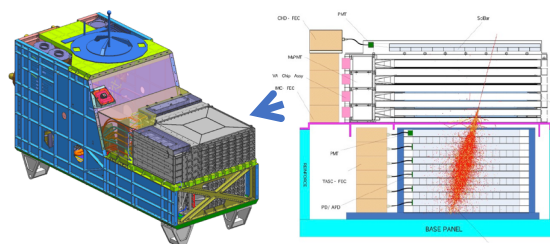


図1：CALET 全体の外観(左)及び観測装置の側面図と1 TeV 電子のシミュレーション例(右)。

3. 研究の方法

CALET の観測データは、国際宇宙ステーションから米国受信局、「つくば宇宙センター(TKSC)」を経由して、早稲田大学の「Waseda CALET Operations Center (WCOC)」で受信し、観測運用及び科学データ解析を実施している。観測運用のためのリアルタイムデータとは別に、ダウンリンク時のデータ欠損を補完した観測データ(1時間毎)を用いて科学データ解析を行なう。装置較正等のデータ補正を行った観測基礎データを定期的に作成・配信して、日米伊の国際共同研究チーム体制により科学解析を実施している。突発的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、特にリアルタイムデータから直接データ解析を行い、研究者ネットワークへの即時配信を行なっている。

これらの研究成果はできるだけ速やかに、国内外の会議で発表するとともに、重要な成果は国際的に著名な学術誌に投稿し、また WEB 等により広報を行う。

#### 4. これまでの成果

本研究で遂行しているCALETによる宇宙線観測は、観測開始以来5年間以上にわたって極めて順調に進行しており、期待通りのデータ取得が実施されている。軌道上観測は、高放射線帯におけるSingle Event Upset (SEU) などによる、一時的な放射線障害 (平均2.2回/年) を除いて、観測装置に起因する重大な故障は発生していない。その結果、すでに当初予定の5年間の観測期間を越えて、定常観測を継続的に実施できている。そして、これまでの観測期間において、高エネルギートリガー (>10 GeV) によって取得した観測量は、12.7億イベント以上に達している。これ迄の観測では、CALETの特徴である、1) 優れたエネルギー分解能 (~2%)、2) 卓越した電子/陽子識別性能 (~10<sup>5</sup>)、3) 超広域帯でのエネルギー測定 (1 GeV - 1 PeV) などの性能が、期待通りに達成されている。

以上のCALETの性能をフルに発揮した観測により、すでに10 GeV-5 TeV領域の電子、1 GeV-数100 GeV領域のガンマ線、10 GeV-数100 TeV領域における陽子・原子核成分の観測で成果が挙がっている。本研究における成果として、50 GeV-10 TeV領域の陽子[3]、1 GeV/nから2.2 TeV/nの炭素・酸素[1]のエネルギースペクトルの観測結果を論文発表している。これらはいずれも“標準モデル”における未説明課題である「衝撃波加速における上限エネルギーと電荷依存性」に知見を与える結果であり、本研究開始以前に発表している電子の観測結果と合わせて、“標準モデル”では理解が困難な「陽電子過剰」や「スペクトルの硬化」の解明についても重要な手掛かりを与える結果であるといえる。

これ迄に発表した成果や未発表の成果についても、最新の段階までデータ解析は順調に進展している。十分な統計量による初期的な結果が得られているものについては、すでに国内外の会議で発表しており、論文発表の準備が進んでいる。

その他、当初の研究計画では予期されなかった研究成果として、1-10 GeV 領域での電子・陽子観測による太陽変調モデルの構築があげられる。当初の計画では電子のみの観測であったが、解析手法の開発により陽子の太陽変調の観測が可能となり、両者の比較によりドリフトモデルによる理解が大きく進展しており、国内外の会議で発表している。さらに、宇宙天気予報に関する研究として、Relativistic Electron Precipitation (REP) の「あらせ」衛星、「きぼう」搭載 MAXI との共同観測により、その成因の解明[2]につながる観測結果を論文発表している。

なお、CALET の「きぼう」における観測運用は、当初は約 5 年間の予定であったが、JAXA による科学審査と装置性能・観測体制の審査により、延長運用が承認されている。

#### 5. 今後の計画

これまでの観測で得られた重要な観測結果のうち、まだ初期的結果として論文発表を行っていない研究成果について、継続して論文作成をすすめる。さらに、すでに論文発表した観測内容についても、その後の観測進展で統計量が 2 倍以上に増大しているため、より高精度かつ高エネルギー領域でのデータ解析を進め、速やかに論文発表を行う予定である。

CALET の観測運用は、2021 年 3 月に開催された、JAXA による「高エネルギー電子・ガンマ線観測装置 (CALET) 後期運用延長審査会」において、少なくとも 2024 年 12 月までの延長が承認されている。従って、現在の研究体制を維持して本研究計画期間を通じて観測を継続して実施することが可能である。この結果、予定していた観測期間が約 2 倍に拡大することになり、当初の予測を大幅に超える高統計かつ高エネルギー領域での観測が達成できる。

この観測運用の延長により、銀河宇宙線の加速・伝播機構の世界最高レベルの観測が達成できる見込みであり、本研究の主要課題である TeV 領域における電子の近傍加速源の検出や暗黒物質の探索において有意な結論が得られることが期待される。加えて、活動銀河核、ガンマ線バースト、重力波発生天体などの突発的現象における高エネルギーガンマ線 (>1 GeV) の観測機会が拡大することにより、マルチメッセンジャー天文学の一翼を担い、これらの天体现象の解明に重要な貢献ができると考えている。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1) “Direct measurement of the cosmic-ray carbon and oxygen spectra from 10 GeV/n to 2.2 TeV/n with the calorimetric electron telescope on the International Space Station”, O.Adriani, Y. Akaike, P. Maestro, M.Mori, T.Tamura, S.Torii, *et al.* (CALET Collaboration), *Physical Review Letters* 125, 251102 (2020).

2) “Plasma Waves Causing Relativistic Electron Precipitation Events at International Space Station: Lessons From Conjunction Observations With Arase Satellite”, R. Kataoka, Y.Asaoaka, S.Torii, *et al.*, *JGR Space Physics*, 125, e2020JA027875 (2020).

3) “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.Asaoaka, P.S.Marrocchesi, M.Mori, T.Tamura, S.Torii, *et al.* (CALET Collaboration), *Physical Review Letters* 122, 181102 (2019).

#### 7. ホームページ等

<https://calet.jp>

Email: [torii.shoji@waseda.jp](mailto:torii.shoji@waseda.jp)