

国際宇宙ステーションにおける高エネルギー宇宙線観測（CALET）

研究代表者 鳥居 祥二
(先進理工学部 物理学科 教授)

1. 研究課題

宇宙線の研究は、粒子の生成・消滅という素粒子・原子核物理学と、粒子の加速・伝播という宇宙物理学の2つの側面を持っており、観測される宇宙線の組成やスペクトルは両者が複雑にかみあった現象である。そのため、宇宙線の正確な理解のためには、組成やスペクトルの高精度な観測により各々の側面を正確に切り分ける必要があり、地球に降り注ぐ宇宙線を大気の希薄な高い高度で直接捉えることが不可欠である。このような飛翔体を用いた宇宙線の直接観測は、これまでに国内外で様々な装置が考案されて実施されて来た。

本研究では、早稲田大学-JAXAの共同研究として、国際宇宙ステーション（ISS）日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォーム（JEM-EF）において高エネルギー宇宙線観測装置 CALET（Calorimetric Electron Telescope）により、日本初の本格的な宇宙線観測を宇宙空間で実施している。CALETにより、従来の直接観測では得られなかった高エネルギー領域での全電子（電子+陽電子）成分（1 GeV-20 TeV）と陽子・原子核成分（数 10GeV-PeV）、及びガンマ線（1 GeV-10 TeV）の観測を高精度で行うことにより、宇宙線物理学の基本的課題である加速・伝播機構について定量的な解明を目指している。さらに、原因がまだ未解明な「陽電子・電子フラックスにおける”過剰”」や「陽子・ヘリウムスペクトルの”硬化”」といった、これまでの観測結果を高精度に検証し、それらの原因を解明することを目指している。宇宙物理学上の最大の謎である暗黒物質や新たな宇宙線加速源（パルサー風星雲など）などが、それらの原因の有力な候補としてあげられているが、いずれの場合であっても起源が解明されれば宇宙物理学に大きなインパクトを与えることになる。さらに、本研究の主目的である、TeV領域の全電子観測による近傍加速源（SNR）の検出ができれば、初めて荷電粒子の加速源を直接的に検証が可能となり、加速と伝播について決定的な理解が得られる。

2. 主な研究成果

CALETは観測開始以来、現時点まで約3.5年にわたって極めて順調な観測が継続的に行われている。主要な観測モードである高エネルギー（ $>10\text{GeV}$ ）トリガーによる観測は、観測実時間（live time）の割合が約85%で安定的かつほぼ一定の条件で極めて順調に行われており、これまでの総観測量は約10億に達している。このような安定的運用に加えて、装置性能の長期変動を定期的に較正することにより、観測の基礎となる軌道上データのエネルギー測定について、（1）電子エネルギー分解能（ $>100\text{GeV}$ ）： $< 2\%$ 、（2）エネルギー測定領域：1 GeV-1PeV、（3）エネルギー測定系統誤差：約1%等を達成している。

早稲田大学CALET Operations Center（WCOC）において、軌道上の観測データ（L1）からエネルギーなどの較正を行ったデータ（L2）を継続的に作成して、国内外の研究チームと共同してデータ解析

を実施することにより、以下の研究実績を挙げている[5]。1) 主要目的である高エネルギー電子 (>10 GeV) 観測では、入射粒子の電子/陽子識別によりTeV領域に及ぶ観測を達成し、論文発表[3, 4]を行なった。2) 陽子・原子核に関しては、入射粒子の電荷決定を $Z=1-40$ において達成し、主要な一次核について100TeV近辺までエネルギースペクトル、B/C比のエネルギー依存性、及び鉄核より重い超重核のフラックスを国際会議(COSPAR他)と日本物理学会等にて発表している。3) ガンマ線観測では、銀河内拡散成分やVela, Crab, Gemingaなどの代表的なソースや変動天体(CTA102)が検出し、解析手法とともに論文発表[1]を行った。さらに、4) 重力波発生天体における電磁波成分の検出やガンマ線バーストの観測結果についても論文[2]を発表している。

3. 共同研究者

長谷部信行 (理工研/物理学科 教授)

小澤俊介 (先進理工学部 物理学科 次席研究員)

浅岡陽一 (理工研 次席研究員)

Holger Motz (国際教育センター 助教)

笠原克昌 (芝浦工業大学 名誉教授 招聘研究員)

田村忠久 (神奈川大学 工学部 教授 招聘研究員)

清水雄輝 (神奈川大学 工学部 准教授 招聘研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- 1) "Characteristics and Performance of the CALorimetric Electron Telescope (CALET) Calorimeter for Gamma-Ray Observations", *N.Cannady, *Y.Asaoka, F.Sato, M.Tanaka, S.Torii, M.L.Cherry, M.Mori, N. Hasebe, K. Kasahara, S. Ozawa, Y. Shimizu, T. Tamura, et al. (CALET Collaboration), *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 238:5 (16pp), 2018.
 - 2) "Search for GeV Gamma-Ray Counterparts of Gravitational Wave Events by CALET", O.Adriani, *Y.Asaoka, N. Hasebe, K.Kasahara, *M.Mori, S. Ozawa, Y. Shimizu, T. Tamura, S.Torii, et al. (CALET Collaboration), *The Astrophysical Journal*, 863:160 (9pp), 2018.
 - 3) "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", O. Adriani, *Y. Asaoka, N. Hasebe, K. Kasahara, S. Ozawa, Y. Shimizu, T. Tamura, *S.Torii, et al. (CALET Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* 120, 261102 (7pp) (2018).
 - 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, H.Motz, S. Torii, et al. (CALET Collaboration), *Physical Review Letters*, 119 (2017) 181101.
 - 5) "On-orbit operations and offline data processing of CALET onboard the ISS", Y.Asaoka, S.Ozawa, S.Torii et al. (CALET Collaboration), *Astroparticle Physics*, 100 (2018) 29-37.
- 他、国際会議 Proceedings 論文 8件。

4.2 総説・著書

「CALET が開始した高エネルギー宇宙の新たな探求」, 鳥居祥二, 浅岡陽一, 森 正樹, 吉田篤正, 日本物理学会誌(話題) 73(6) 388-392, 2018. 6.

4.3 招待講演

- 1) “高エネルギー電子・ガンマ線観測装置 (CALET)”, 2019 年 1 月 9 日, 第 19 回宇宙科学シンポジウム (宇宙科学研究所) [宇宙科学研究所賞受賞講演]
- 2) “The CALorimetric Electron Telescope (CALET) on the International Space Station – Results from the First Two Years of Operation –”, July 6-10, 2018, 26th Extended European Cosmic Ray Symposium and 35th Russian Cosmic Ray Conference (Altai, Russia)
- 3) “The Calorimetric Electron Telescope (CALET) Experiment on the International Space Station”, September 15, 2018, APS/JPS Joint Symposium celebrating the 60th anniversary of Physical Review Letters (Matsumoto, Japan)
- 4) “CALorimetric Electron Telescope (CALET) Collaboration on the International Space Station”, July 23, 2018, JAXA/NASA Joint Workshop (Los Angeles, USA) [ISS Awards 受賞, 招待講演]
- 5) “Calorimetric Electron Telescope”, July 19, 2018, 42th COSPAR Assembly (Pasadena, USA)
- 6) “The Calorimetric Electron Telescope (CALET) on the International Space Station: Latest results from the First Two-Years on Orbit,” April 9-12, 2018, AMS Days (La Palma, Spain)

4.4 受賞・表彰

- 1) ISS Awards for Compelling Results in Physical Science and Material Development, “Direct Measurement of High Energy Cosmic-Ray Electron and Positron to the TeV Region” Shoji Torii and the CALET Team by CASIS, NASA, AAS, 2018.7.
- 2) 宇宙科学研究所賞 (特別賞), 「CALET による高エネルギー宇宙線電子の観測」鳥居祥二 2019 年 1 月 9 日, 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

4.5 学会および社会的活動

オンライン講義 WasedaX : Free online courses from Waseda University

"Cosmic Rays, Dark Matter and the Mysteries of the Universe", Shoji Torii, Holger Motz

5. 研究活動の課題と展望

CALET による観測はすでに 3.5 年を経過して、今後 JAXA との共同研究として 2021 年までの観測が予定されている。観測の主要目的である TeV 領域での電子観測による暗黒物質及び近傍加速源の探索が実施されており、現在すでに初期的な 5TeV までの観測結果について論文発表を行っている。その他のガンマ線、陽子・原子核観測の結果についても論文発表を行った。宇宙科学観測として大変難しい課題である長期間に亘る安定的な軌道上運用が実現されており、WCOC における 24 時間体制による運用モニターや国際共同研究によるデータ解析も順調に実施されている。このため、2019 年度内には観測全般に関わる成果を国内外で公表するとともに、主要な雑誌に発表を予定している。今後の課題としては、鳥居が代表者として早稲田大学を中心に実施している JAXA との共同研究体制を維持しながら、理工総研、研究推進部、研究戦略センターの強力な支援を受けて、研究継続を実現することにより所期の観測目的を達成することにある。