

2019 (令和元) 年度 共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名	和文：飛翔体観測（CALET）による高エネルギー宇宙線加速天体の研究 英文：Study on High Energy Cosmic Ray Sources by Observation in Space		
研究代表者	早稲田大学	理工学術院総合研究所	名誉教授（招聘研究教授） 鳥居祥二
参加研究者	早稲田大学	理工学術院総合研究所	主任研究員 浅岡陽一
	早稲田大学	国際教育センター	准教授 MOTZ Holger
	早稲田大学	芝浦工業大学	名誉教授 笠原克昌
	東京大学	宇宙線研究所	名誉教授 寺澤敏夫
	東京大学	宇宙線研究所	准教授 浅野勝晃
	神奈川大学	工学部	教授 田村忠久
	神奈川大学	工学部	准教授 清水勇輝
	立命館大学	理工学部	教授 森 正樹
	横浜国立大学	工学研究院	准教授 片寄祐作
	弘前大学	工学研究科	准教授 市村雅一
	芝浦工業大学	システム工学部	教授 吉田健二
	信州大学	理学部	教授 宗像一起
	茨城大学	理学部	名誉教授 柳田昭平
	茨城工業高等専門学校	国際創造工学科	准教授 三宅晶子
	大阪市立大学	理学研究科	准教授 常定芳基
	NASA	GSFC	研究員 赤池陽水
	（他 大学院生 6名）		
研究成果概要	<p>宇宙線の加速・伝播機構の体系的な解明と近傍加速源・暗黒物質の探索を主な目的としたCALorimetric Electron Telescope (CALET)は、2015年8月に打ち上げられ、国際宇宙ステーション「きぼう」船外実験プラットフォームで軌道上観測を順調に実施している。現在までにすでに約4.5年にわたって、早稲田大学 CALET Operations Center (WCOC)にて観測運用を継続的に実施し、装置の軌道上性能について十分な検証が行われている。10 GeV以上の高エネルギーイベントの観測量は10億イベントを超えており、国際共同研究チームによるデータ解析が進展している。そして、JAXAによる観測成果の審査により、2021年3月までの「延長運用」が承認されている。</p> <p>これまでに、データ解析の基礎となる軌道上データの解析方法を確立し、装置性能の長期変動を確実に較正することにより、(1) 電子エネルギー分解能 ($>100\text{GeV}$): $< 2\%$、(2) エネルギー測定レンジ: $1\text{GeV}-1\text{PeV}$、(3) エネルギー測定の系統誤差: $\sim 1\%$ 等、という所期の性能を達成している。このため、軌道上の観測データを較正したデータ(L2)を作成し、観測イベントについてシャワー軸の飛跡再構成、入射粒子の電荷測定、カロリメータに付与されたシャワーエネルギー測定、を高精度に実施している。データは、日米伊の国際共同研究機関において独立な科学解析を行い、定期的なチーム会議とテレコンにより解析結果の相互検証を継続的に実施している。</p> <p>その結果、2019年には宇宙機搭載装置としては世界で初めて 50GeV から 10TeV までの陽子エネルギースペクトルを PRL に発表した(図1)。この結果は、これまでの宇宙機や気球に搭載された異なる観測装置から報告されていた数 100GeV 領域でのスペクトルの硬化を最高精度で観測したもので、PRLにおいて Editor's Suggetion に採択されている。このような単一観測からの乖離(特に硬化)は、従来の宇宙線加速・伝播の標準モデルでは説明が難しく、新たな加速源や伝播過程が数多く提案されている。</p>		

図1に示す通り、CALETの結果は1TeVまでAMS-02とはよく一致しており、数TeV以上ではこれまでの気球に搭載されたカロリメータの結果に対して高精度な観測を実現している。図2に示すスペクトルの冪の変化の解析から、以下のことが示されている。

- ① 図2(a)に見られるように、全エネルギー領域において単一冪のスペクトルは3 σ 以上の有意性で棄却される。
- ② エネルギー領域を50GeV-500GeVと1TeV-10TeVに分けた場合の単一冪の値は、それぞれ -2.81 ± 0.03 と -2.56 ± 0.04 となり、両領域の間で冪の値には 0.30 ± 0.08 の変化（硬化）が存在することが有意に示されている。
- ③ スペクトル硬化のエネルギーは 496 ± 175 GVであり、AMS-02の結果より大きな値であるが、その理由としてCALETが高エネルギー側に広い観測を実現していることが考えられる。
- ④ 図2(b)に見られるように、2TeV以上でエネルギースペクトルの軟化傾向が示唆されているが、この傾向はその後に発表されたDAMPEの結果と矛盾しない。

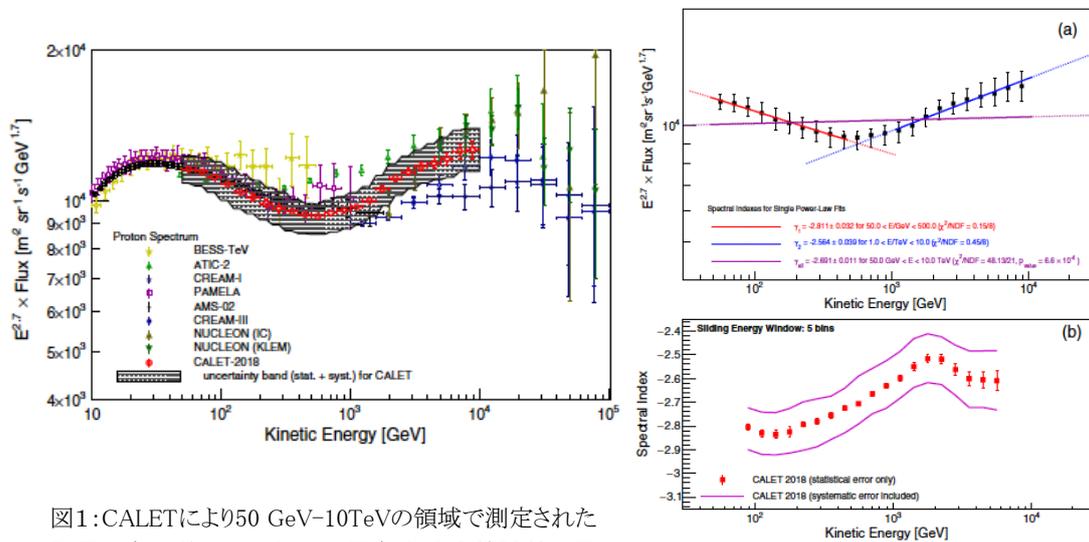


図1: CALETにより50 GeV-10TeVの領域で測定された陽子エネルギースペクトル、灰色帯は系統誤差を示す。これまでの観測のうち、宇宙機による測定結果(PAMELA, AMS-02, NUCLEON)と気球観測の結果を共に示す。

図2: (a)単一冪によるフィッティング結果を冪の変化がある場合とない場合で示す。(b)冪が連続的に変化した場合のエネルギー依存性。

さらに原子核の主要な一次成分について100TeV領域に至るエネルギースペクトル、及びTeV領域までのB/C比が得られている。とくに炭素、酸素については、すでに査読論文において発表した初期的なエネルギースペクトルの最終結果を、PRL等の国際的に著名な雑誌へ論文投稿を準備している。ガンマ線観測では、すでに観測性能を含む1GeV-100GeVの観測結果を、ApJL(2018)に論文を発表しているが、その後のデータ解析の進展により、これまでに比べて4倍のFOVを持つデータが得られている。その他、LIGO/VirgoのO3ランにおける重力波源のフォローアップ観測や、太陽活動にともなう低エネルギー電子・陽子の短期・長期変動について継続的観測を実施している。

今年度における共同利用の研究成果としては、大型計算機によるシミュレーション計算の実施や、研究会での成果発表などが挙げられる。これらの研究成果は、上記を含む査読付き論文5編、国際会議プロシーディングス9編、及び国内外会議発表28件にて公表した。