

## 国際宇宙ステーションにおける宇宙線観測(CALET)



研究代表者 鳥居 祥二  
(先進理工学部 物理学科 教授)

### 1. はじめに

宇宙線電子望遠鏡 (CALET: CALorimetric Electron Telescope) は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験棟「きぼう」(JEM) 船外実験プラットフォーム (EF) 第2期利用公募において、2007年にポート占有ミッションとして選定され、ASI (イタリア宇宙機関)、NASAの協力を得て進められている早稲田大学発の日本が主導する国際共同ミッションである。CALET は、2010年にJAXA有人宇宙環境利用ミッション本部 (当時) においてプロジェクト承認を受け、その後約6年間の開発・試験を経て、2015年8月19日に、「こうのとり」5号機により打ち上げられ、JEM-EFの9番ポートに設置された。ミッションの期間は、定常運用として2年間であるが後期運用により観測状況に応じて5年間 (以上) は延長可能である。現在まで観測は極めて順調に実施できており、すでに定常運用終了審査を終えて、後期運用フェーズに入っている。

CALETの構想自体は、研究代表者である鳥居が2005年に早稲田大学理工学研究所に着任する以前から、気球実験の経験より発案し提案していたものであるが、ミッション提案の承認やISSでの観測実現は、理工学研究所の優れた研究環境なしには実現できなかつたと考えている。2007年以来3期に亘る理工研における本プロジェクト研究は、科学研究費基盤研究(S) (2009-2013年度, 2014-2018年度) や私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (研究拠点形成) (2011-2015年度) などの予算により、共同研究者をはじめとする30名に及ぶ招聘研究員・嘱託の研究活動によって実現したものである。

### 2. 研究目的

飛翔体による宇宙線観測の概要や意義は、すでに日本物理学会誌 67, 821 (2012) 等において解説しているが、CALET は高精度な宇宙線の観測により、宇宙線研究の新たな地平を切り拓くことを目的としている。CALET は、主検出器である電子観測に最適化されたカロリメータとガンマ線バースト検出器 (CGBM: CALET Gamma-ray Burst Monitor) によって構成されている。図1に、CALET システム全体の概念図と ISS-JEM/EF に設置された様子を示す。カロリメータでは、1 GeV-20 TeV のエネルギー領域で電子+陽電子 (全電子) スペクトルを精密測定することにより、近傍加速源や暗黒物質の探索に挑戦するとともに、宇宙線物理における“標準モデル”としての超新星残骸における衝撃波加速機構と銀河内拡散過程の高精度な理解を目指している [総説・著書1]。

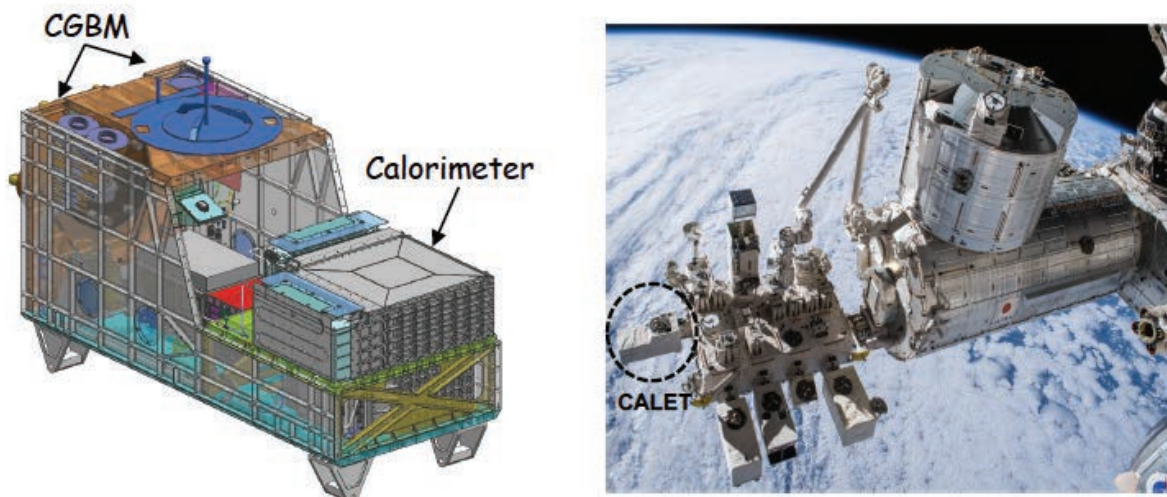


図1：ISS 日本実験棟「きぼう」に設置された CALET（右図）とその概念図（左図）。宇宙線・ガンマ線観測用のカロリメータ（CAL）とガンマ線バーストモニター（CGBM）から構成されている。

電子に注目する理由として、電子は宇宙線の主成分である陽子・原子核と異なり、銀河磁場によるシンクロトロン放射と星間光子による逆コンプトン散乱によりエネルギーの2乗に比例してエネルギーを失うことが挙げられる。このため、高エネルギー、つまり TeV 領域においては、電子の加速源は近傍（距離 1 kpc 以内）かつ若い（年齢 10 万年以内）天体に限られる。加速源が超新星残骸であればそのような候補は、Vela, Monogem, Cygnus Loop の 3 天体に限られることになり、その結果電子スペクトルはこれらの近傍加速源よる特徴ある構造を示すことが予測されている。

さらに、イタリアが開発しロシアが打ち上げた PAMELA 衛星や、ISS に搭載されている米国の AMS-02 によって観測された 10 GeV 以上での陽電子/電子比の上昇は、高エネルギー領域において銀河内での伝播過程で二次的に生成された陽電子に加え、未知の一次陽電子源の存在を示唆している。その起源としては天体物理学的なパルサー説から素粒子物理学的な暗黒物質説まで様々な可能性が提案されている。一次陽電子源においては電子・陽電子対が生成されているのが最も自然であり、その場合には全電子スペクトルにも一次陽電子の起源に対応するスペクトル構造が現れる。例えばパルサーの加速限界や暗黒物質の質量に対応する高エネルギー領域において、特徴的なスペクトル構造が存在する可能性が強く示唆されている。

CALET では、広いエネルギー領域での観測により、陽子・原子核について粒子あたり 1 PeV までの測定が可能である。このような高エネルギー領域では、超新星残骸における衝撃波加速モデルの加速上限エネルギーが、各原子核についてその電荷に比例して検出されることが期待されている。さらに、最近の PAMELA, AMS-02 および米国の南極周回気球実験である CREAM の観測により、陽子（およびヘリウム）の 200 GeV 領域で、単一冪のスペクトルに比べて高エネルギー側の粒子が多くなる変化（スペクトルの“硬化”）が報告されている。このような変化は、衝撃波加速モデルのみでは説明できないため、加速・伝播機構について新しい解釈が提案されている。CALET は、このようなスペクトルの変化を 50 GeV から数 100 TeV の広いエネルギー領域で、高い統計精度で測定できる性能を持っている。

加えて、CALET は 1 GeV から TeV 領域においてガンマ線検出性能を有している。個々の天体の観測については、装置規模が小さい（ $\sim 500 \text{ cm}^2 \text{ sr}$ ）ため非常に明るい天体のみの観測に留まるが、トランジェントなガンマ線源の検出や拡散成分の観測が TeV 領域まで可能である。さらに、CGBM のトリガ

一により、1 GeV以上のガンマ線バースト成分の検出を行うことによって、7 keVからTeV領域までの超広帯域の観測を目指している。この観測性能によって、広視野と相まって重力波対応天体の探索に関してもユニークな役割を果たすことができている、すでに重力波事象GW151226 についてX線、ガンマ線放射の上限値を報告している[論文11]。

その他に、太陽活動に伴う電子成分の太陽変調の観測による太陽・地球磁気圏の研究が進んでいる。新たな展開として、これまでの観測でバンアレン帯から大量に放出されるMeV領域の電子と、その高速振動が検出されており、このRelativistic Electron Precipitation (REP) 現象の観測により宇宙天気予報の高精度化に必要な電磁イオンサイクロトロン波 (EMIC) の解明が期待されている。

### 3. 研究成果

#### 3.1 観測装置

CALET は垂直方向の厚さが30放射長(r. l.)および1.3陽子相互作用長(m. f. p.)に相当するカロリメータである。エネルギー測定は、高精細に初期シャワーを可視化するイメージングカロリメータ (IMC: IMaging Calorimeter) と高精度な測定を行う全吸収カロリメータ (TASC: Total Absorption Calorimeter) によって行われる。電荷の絶対値により個々の粒子の原子番号を識別するため、電荷検出器 (CHD: CHarge Detector) が測定器最上部に設置されている。図2には、側面からみた検出器の概略図にシミュレートされた1 TeV電子シャワーを重ねて示している。一方、図3には、軌道上データから得られた1 TeV電子の例を示している。CALET は天頂から $\sim 45^\circ$  の視野を持ち、10 GeV以上の電子に対する有効幾何因子はエネルギーに依存せず約 $1040 \text{ cm}^2\text{sr}$ とほぼ一定である。装置構造やデータ取得システムの概要は論文7に記載されているが、図3に見られるように、TeV領域の電子シャワーがほぼ完全に装置内で検出できる性能を持っている。このことにより、電子観測においてこれまでにない卓越した電子・陽子選別性能 ( $10^5$ ) とエネルギー分解能 ( $\sim 2\%$ ) 等を実現している。

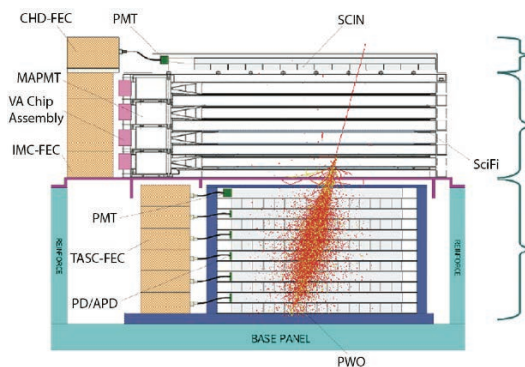


図2: カロリメータの概略的な側面図。検出器内でのシャワー発達を示すため1 TeV 電子事象が図中に重ねられている。

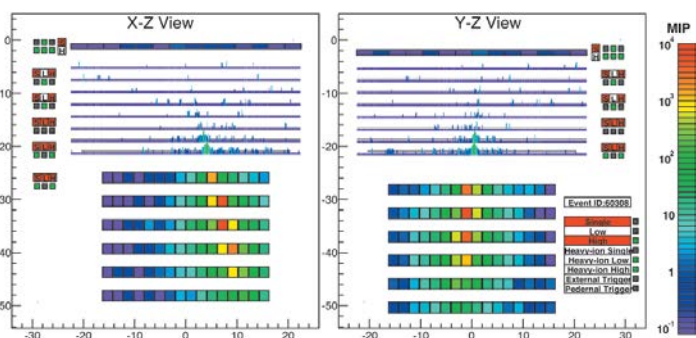


図3: 軌道上データによって得られた1 TeV 電子シャワーの候補。各センサーに付与されたエネルギーをMIP 単位で右に示すスケールの色の違いで示している。

TASC は結晶シンチレータ (PWO) をX, Y 交互に12 層を積層した (厚さ: 27 r. l.), ホドスコープ型の全吸収型カロリメータである。読み出しはトリガースIGNAL生成に用いる1 層目だけが光電子増倍管 (PMT) である。2層目から12層目まで全てアバランシェ・フォトダイオード (APD) とフォトダイオード (PD) のハイブリッドによる読み出しであり、APD とPD のゲイン比は50 : 1 で検出面積比が20 : 1 より、全体としてAPD とPD の利得比が約1000倍となるように設定されている。さらに、それぞれの出力を高・低2種類の利得で整形し、それぞれをサンプリングADC で読み出すこ

とで、各PWOにおいて6桁以上のダイナミックレンジを4chの出力で実現している。

IMC は、3 r. l. の厚さ (タングステン) があり、112本の64アノードPMTを用いて、7168本のシンチレーション・ファイバー (断面: 1 mm角) を読み出すイメージングカロリメータである。入射粒子のシャワー初期発達を高精度な位置分解能で測定して、入射粒子の電荷測定とシャワー開始位置決定により電子、ガンマ線および原子核を選別し、粒子の到来方向を測定する。

装置の最上部に設置したCHD は、32 mm幅にセグメント化した厚さ10 mmのプラスチックシンチレータをX、Y方向に各14本配置して、入射粒子の電荷をZ=1-40の領域で測定する機能を持つ。

図4に搭載装置の開発時におけるCHD、IMC、TASCの装置構造について示す。

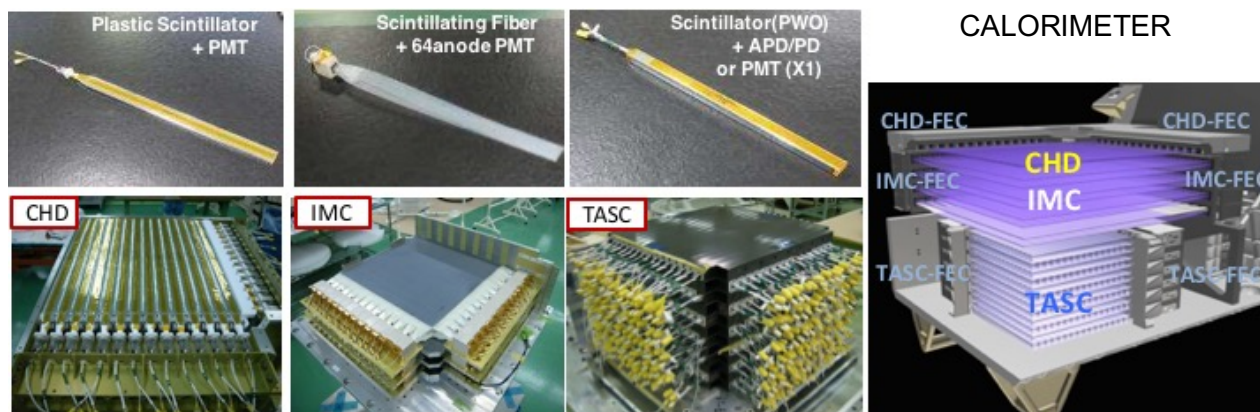


図4: 搭載装置開発時の装置内部構造. 上段には各検出器の装置構成要素, 下段にはそれらを組み上げた様子を示す. 右図は, カロリメータ全体の概念図.

### 3.2 観測運用

CALET の観測運用のため、JAXA と早稲田大学にそれぞれJAXA 地上局 (JAXA-GSE) と早稲田CALET 運用局 (Waseda CALET Operations Center; WCOC) が設置された。軌道上CALET で取得されたデータは、NASA 地上局を通じてJAXA 地上局にて受信される。リアルタイムデータは即座にWCOCにも配信され、JAXA とWCOCが協力して24 時間体制で観測状況の監視を行っている。科学解析用の生データ (Level-0) は一時間毎に欠損の補完や時系列補正が行われた後、JAXA からWCOCに送信される。WCOCではLevel-0 データを科学解析用基礎データ (Level-1) に変換後、国際チームへ配信している [論文7]。

CALET の科学運用は、軌道上での宇宙線への地磁気の影響を考慮してWCOCにて計画され、時刻付コマンド列が軌道上での観測モードを制御するのに使われる。CALET の主目的である全ての高エネルギー (>10GeV) シャワー粒子を取得するトリガーでのデータ取得を常時行うことに加え、較正データの取得モード、高磁気緯度における低エネルギー電子取得モード、低磁気緯度での低エネルギーガンマ線取得モード、超重原子核取得モードがISS の軌道に沿って計画される。

2018年7月31日の時点で観測日数は1032日を数え、約6.7億イベントの高エネルギー (>10 GeV) シャワー事象に加え、較正データや低エネルギー事象、超重粒子事象も順調に取得されている。軌道上でのデータ取得は継続的かつ極めて安定して行われており、データ取得の実時間の割合は85%を維持できている。そして、図5に示すような全粒子13.5億イベントによるTASCにおけるエネ

ルギー付与 ( $\Delta E$ )の分布が観測されている。図からわかるように、冪型のエネルギー分布が得られており、エネルギー測定は1 GeVから1 PeVの6桁のエネルギー領域で正常に行われていることが確認されている。

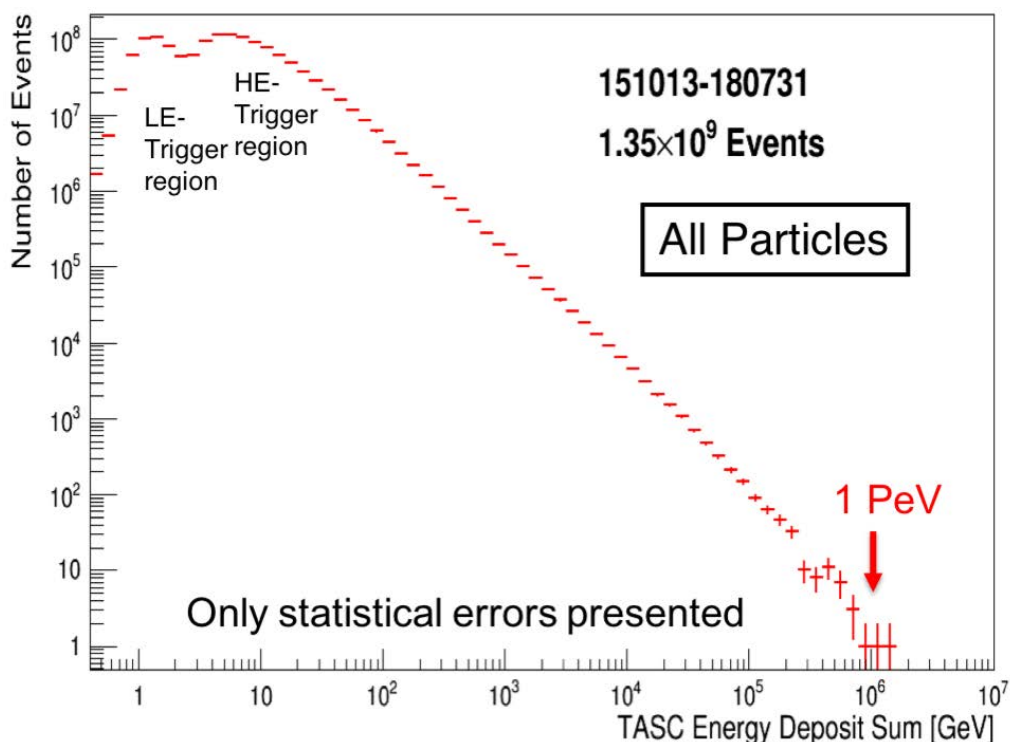


図5: 2015年10月13日の観測開始から2018年7月31日まで、1032日間の観測で得られた、TASCにおけるエネルギー付与 ( $\Delta E$ )の分布。低エネルギー(>1 GeV)トリガーのイベントを含めて約13.5億イベントが記録され、1 PeV ( $10^{15}$  eV)までのエネルギー測定が正確に行われている。

### 3.3 軌道上観測性能

エネルギー測定は、主にTASCにおける各PWOのレンジの異なる4系統の読み出し(ADC値)について、各系統における損失エネルギーへの変換係数の決定、各ゲインレンジの線形性の確認、隣接するゲインレンジの接続、の3つの方法を組み合わせることで実現されている。そして、これらの粒子入射位置や、温度、時間の変化に対する較正を高精度に行い、長時間観測における安定性を確認できている。エネルギー測定と軌道上データによる較正方法の詳細は論文8に記載されているが、各ゲインレンジでの線形性は地上での高輝度レーザ試験によって確認し、ADC値のエネルギーへの変換係数とゲインレンジ接続は軌道上データを用いて定期的に較正されている。エネルギー較正が十分な精度でなされた結果、30 GeV以上で2%のエネルギー分解能が達成されており、スペクトルの微細構造を観測するのに最適な検出器となっている。

その他に重要な性能として、入射粒子の電荷分解能が挙げられるが、この測定は主にCHDを用いて行われている。加速器のビーム実験でCHDの電荷識別性能は検証されているが、軌道上データを用いてCHDのX, Y層のシグナル相関から図6のような電荷分解能が得られている。電荷分解能は、素電荷(e)の単位で陽子で10%、CNOでは15%、Feの領域まで28%以下の値が、ビーム実験の結果と同じ精度で確認されている。そして、図6からわかるとおり、各原子核成分のフラックスを反映した $Z=1-28$ までの高精度な電荷分布が観測されている。

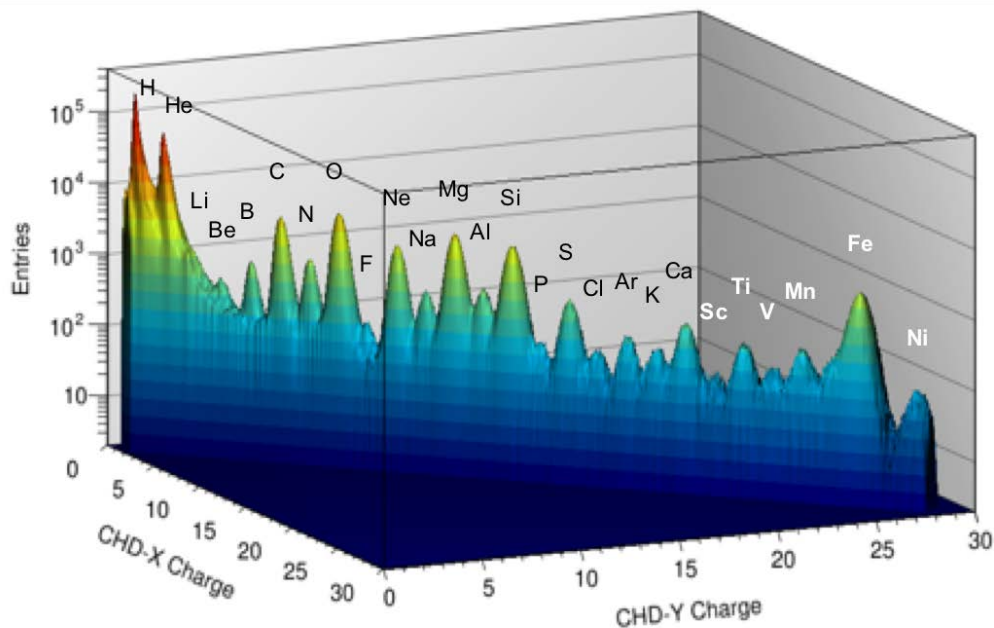


図6: CHDのX層とY層の相関より得られた各原子核成分の電荷分布.

### 3.4 初期観測成果

#### 3.4.1 電子+陽電子

CALET は、宇宙空間での直接観測による3 TeVまでの高精度電子識別に初めて成功し、高精度の全電子スペクトルの直接測定結果を世界に先駆けて2017年11月に発表している[論文6]。それに続いて、780日間の観測で取得された軌道上全データの解析により、高エネルギー側(>500 GeV)の統計量を約2倍に増やして、11 GeV-4.8 TeVのエネルギースペクトルを2018年6月に発表している[論文4]。その結果を、他の観測結果と比較して図7に示す。図からわかる通り、我々の結果は1 TeVまでAMS-02とはよく一致しているが、100 GeV 以上ではFermi/LAT等の結果とは有意な差が見られる。今回の結果から得られた知見は以下のようにまとめられる。

- 1) 1 TeV 以下では、AMS-02 の測定結果と誤差内でよく一致している。異なる測定原理による観測結果が一致したことは、系統誤差がよく理解されていることの証左となる。
- 2) これまでの宇宙における直接観測の限界を更新した。1-4.8 TeVの領域は、電子加速源の分布によるスペクトルのカットオフ構造が見られる。
- 3) CALET の結果は系統誤差を含めるとまだ有意とは言えないものの、AMS-02とは異なり200 GeV と1 TeV近辺に、暗黒物質やパルサーと関連する可能性があるスペクトルの微細構造の存在を示唆している。

今後の観測継続による統計量のさらなる増加と解析の深化により、TeV領域に存在することが期待される近傍加速源や暗黒物質によるスペクトル構造の検出を目指す。なお、CALET の最初の論文発表の後、中国科学院が初めて行った衛星による宇宙科学観測であるDAMPEも全電子スペクトルを発表した。この結果は、1 TeVまでの領域でむしろFermi/LAT の結果と一致しており、TeV 以上ではスペクトルのカットオフを報告している。DAMPEは、CALETと極めて類似したカロリメータ型の検出器であり、両者の比較・検討は今後の課題として非常に重要である。

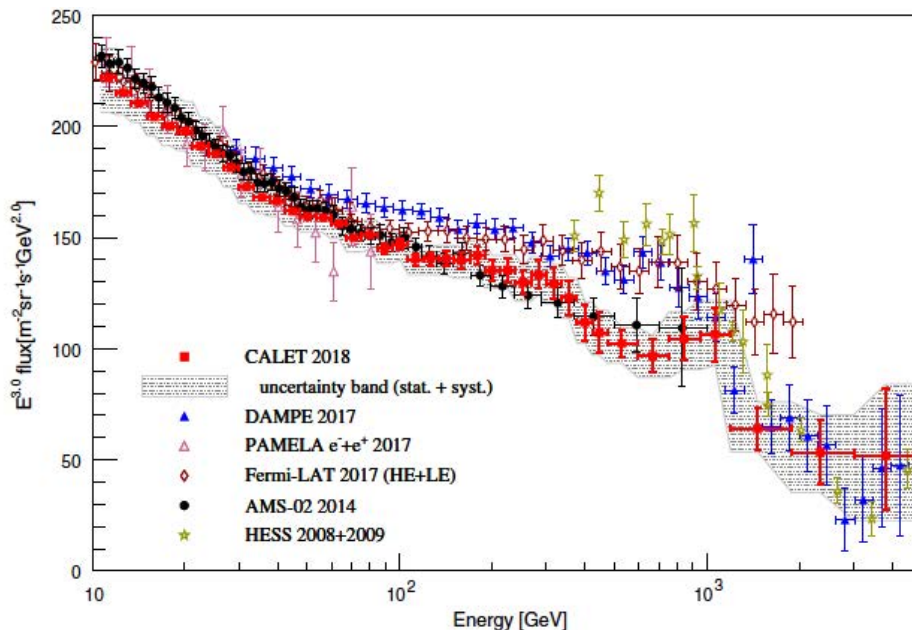


図7：CALETにより11 GeV-4.8 TeVの領域で測定された宇宙線全電子スペクトル。灰色帯として系統誤差を示す（ただしエネルギースケールの不定性は含まない）。これまでの観測のうち、宇宙空間での測定結果(DAMPE, PAMELA, Fermi-LAT, AMS-02)と地上からの観測結果(HESS)を共に示す。

### 3.4.2 陽子・原子核

CALET の運用時間のほとんどはシャワーエネルギーで10 GeV以上の観測を行っている。そして、イベントトリガーは主にTASC 1層目でのエネルギー損失量で行うため、陽子ではIMCまたはTASC 1層目内で相互作用を起こすイベントのみがトリガーされる。これは、電子に対する陽子雑音除去のためには非常に効果的であるが、陽子観測に対しては検出効率が10%程度と落ちる。電荷の増大とともにトリガー効率は良くなり、酸素 (Z=8) より重い原子核では電離損失のエネルギーだけで電子10 GeVのエネルギー閾値を上回るのので、ほぼ100%のトリガーがかかる。

図8に、重原子核のエネルギースペクトルの初期的な観測結果を示す。主要な原子核については、すでに100 TeV を超えるエネルギー領域まで観測が達成されており、今後の解析と観測でこの10倍程度のデータを取得することにより、1 PeVに迫る観測が実現できる見込みである。陽子、ヘリウムについては、スペクトルの“硬化”が見られる領域をカバーする核子あたり50 GeV-数10 TeVのデータ解析が実施されている[論文10]。

伝播機構の解明に重要な役割を果たすホウ素/炭素比のエネルギー依存性についても、TeV領域に及ぶデータ解析が進行中である。さらに、鉄より重い超重核も存在比がZ=40の領域まで観測され、これまでの気球実験 (Super-TIGER) とよく一致する初期的な結果が得られている。

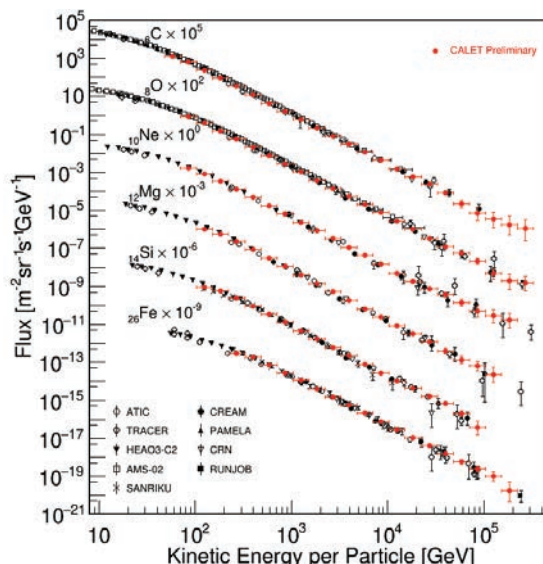


図8：主要な原子核成分のエネルギースペクトルの初期的な観測結果を、これまでの測定値と比較して示す。

### 3.4.3 ガンマ線

CALET は通常10 GeV以上の高エネルギートリガーで観測しているが、低地磁気緯度では荷電宇宙線が侵入して来ないため、低エネルギートリガーを併用して、1 GeV 以上のガンマ線の観測を行っている。また、CGBMがガンマ線バーストをとらえた直後にもこのトリガーを有効にして、高エネルギーガンマ線信号の観測を可能としている。ISS軌道の関係で、銀河座標系で見ると感度が全天では不均一になるが、銀河中心や銀河反中心領域は高感度で観測が可能である。ガンマ線と電子はともに電磁シャワーを起こすが、CHD及びIMC最上層に荷電粒子を示す信号があるかどうかで両者を判別することができる。ガンマ線候補事象に対しては、電子の場合と同様に飛跡から到来方向を求め、同架されたスターセンサ (Advanced Stellar Compass) から得られる方向データを基準として天球上での座標を算出する。

これまでの観測で得られたガンマ線の天球マップを図9に示す。Crab, Geminga, Vela, 活動銀河核CTA102などの点源が明らかである。これらの天体のエネルギースペクトルについてはFermi/ LATの結果とほぼ一致しており、検出器のシミュレーションから得られる観測性能が正しいことを示している[論文2]。

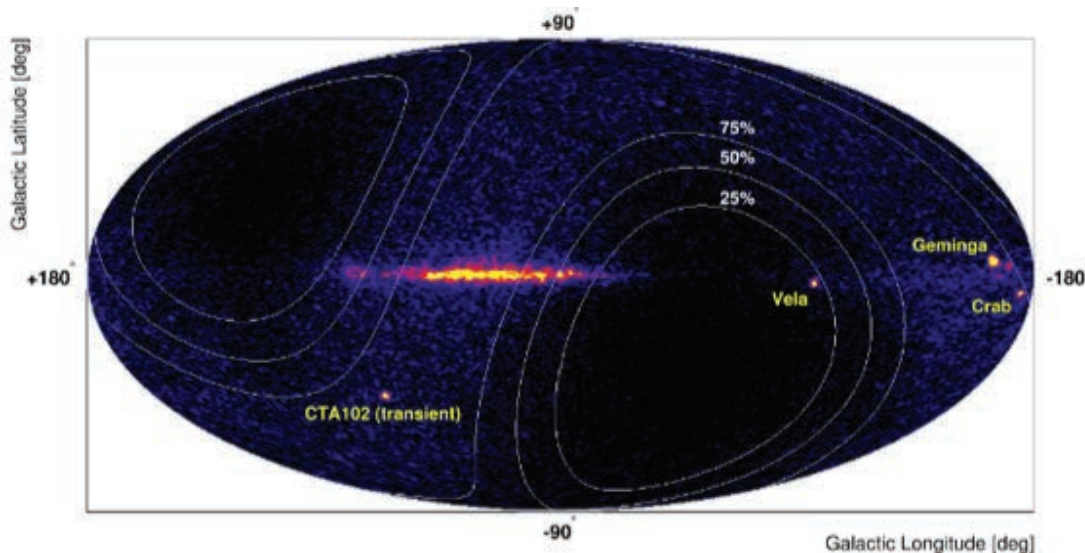


図9：CALET の約1.9年間の観測から得られた1 GeV 以上のガンマ線の天球マップ（銀河座標系）。等高線は（有効面積）×（観測時間）が最大値の何%であることを示し、天の北極および南極方向で小さくなっていることがわかる。いくつかの明るい点源がTransientな天体を含めて観測されている。

### 3.4.4 ガンマ線バーストと重力波源天体探査

CGBMは、約7 keV-1 MeVの帯域を観測するLaBr<sub>3</sub>(Ce)結晶を用いた硬X線モニター(HXM)2本と、約100 keV-20 MeVの帯域を観測するBGO結晶による軟ガンマ線モニター(SGM)1本から構成されている。加えてCGBMがバースト候補を検出した時には、前述したようにカロリメータのエネルギー閾値を1 GeVまで下げ、合わせてスターセンサのイメージデータを取得する観測モードに遷移する。この結果、CALET は約7 keVからTeV 領域のガンマ線バースト (GRB) を観測できる能力を有することになる。GRBは年間43イベントの割合で検出されており、2018年10月1日までの時点で130イベントが取得されている。その内、90%にあたる117例が継続時間 (T90) が2秒以上の長いGRBであり、10%に相当する13例がT90 < 2 秒の短いGRB と判定されている。さらに、太陽フレアにともなうGRBも検出されている。



特に興味深いイベントとしてGRB160107Aがあるが、このイベントでは10 keV以下のX線放射が先行していたことが、CGBMとMAXI-GSC 検出器の双方で観測されている。このようなX線precursor イベントは過去の観測でも報告されているが、このGRB では約45 秒も前に黒体輻射と思われる軟X線が検出されており、GRB 放射初期の物理状態に大きな示唆を与えている[論文5]。

短いGRB は、中性子星連星あるいはブラックホール・中性子星連星の衝突合体により発生するという説が最も有力であり、aLIGO の本格稼働前から重力波発生源として極めて有力であることが示唆されてきた。CALET 開発段階から重力波に伴う短いGRB 観測はCGBMの目標の一つであった。最初の重力波イベントはCALET の運用以前であったが、2番目のGW151226 については、前述のようにX、ガンマ線の上限值を与えることに成功している[論文11]。これらの重力波はブラックホール連星の合体で極めて良く説明でき、電磁波放射を伴わないことと整合した結果である。

続いて今夏には中性子星連星の合体と考えられる重力波イベント GW170817 の検出が早くも報告された。このイベントはCGBM (およびカロリメータ) の視野とは外れていてガンマ線の検出はできなかったが、CGBM は短いGRB を予想通りの頻度で観測しており、今後の重力波対応天体探査に期待がもたれる[論文3]。特にGW170817 に伴うGRB は極めて弱く、かなり特殊な例と考えられており、できるだけ多くの観測が必要である。重元素合成の鍵となるr プロセスの生成の場としてGRB 観測・重力波対応天体探査・マクロノヴァの観測が今後の宇宙物理学研究の大きな推進力となることが期待されている。

#### 3.4.5 太陽変調を受けた電子の観測

CALETでは、地磁気Rigidityが1 GV以下になるISS軌道空間で、電子流束の太陽変調観測を行っており、全体で5年間の観測により地球太陽磁気圏の研究と星間スペクトル (LIS) の導出を目的としたドリフトモデルの構築が行われている。さらに短期変動としての太陽フレアにともなう「フォーブッシュ減少」の研究も進行中である。また、地球磁気圏擾乱に伴うElectromagnetic Ion Cyclotron (EMIC) Waveによりバンアレン帯の電子が雪崩のように降り注ぐ現象である、Relativistic Electron Precipitation (REP)現象をISS で初めて観測している[論文12]。電荷測定器(CHD) はMeV領域の電子観測において、従来の装置を2桁程度上回る有効面積を持ち、1秒の時間分解能で流束の変動を観測できる。そのため、JAXAのジオスペース探査衛星「あらせ」の「その場観測」による電子密度変化との相関を調べることによって、EMIC Waveの詳細(活動性など)が明らかになることが期待されている。

#### 4. 共同研究者

氏名	本属(身分)
浅岡陽一	理工総研(主任研究員)
小澤俊介	理工総研(次席研究員)
長谷部信行	物理学科(教授)
笠原克昌	招聘研究員(芝浦工業大学・名誉教授)
田村忠久	招聘研究員(神奈川大学・教授)
清水雄輝	招聘研究員(神奈川大学・准教授)

招聘研究員

- 浅野勝晃 (東京大学宇宙線研究所・助教)  
市村雅一 (弘前大学・准教授)  
奥野祥二 (神奈川大学・助教)  
笠原克昌 (芝浦工業大学・名誉教授)  
片岡龍峰 (国立極地研究所・准教授)  
片寄祐作 (横浜国立大学・准教授)  
加藤千尋 (信州大学・教授)  
倉又秀一 (弘前大学・名誉教授)  
坂本貴紀 (青山学院大学・准教授)  
塩見昌司 (日本大学・准教授)  
柴田慎雄 (横浜国立大学・名誉教授)  
高橋一郎 (東京大学 IPMU・特任研究員)  
常定芳基 (大阪市立大学・准教授)  
寺澤敏夫 (東京大学宇宙線研究所・名誉教授)  
中川友進 (海洋研究開発機構・特任技術副主幹)  
\*中須賀真一 (東京大学工学部・教授)  
晴山 慎 (聖マリアンナ医科大学・助教)  
日比野欣也 (神奈川大学・教授)  
福家英之 (JAXA 宇宙科学研究所・助教)  
榎野文命 (JAXA 宇宙科学研究所・名誉教授)  
三宅晶子 (茨城工業高等専門学校・准教授)  
宗像一起 (信州大学・名誉教授)  
村上浩之 (立教大学・客員研究員)  
森 正樹 (立命館大学・教授)  
柳田昭平 (茨城大学・名誉教授)  
山岡和貴 (名古屋大学・准教授)  
吉田篤正 (青山学院大学・教授)  
吉田健二 (芝浦工業大学・教授)

\*嘱託

- 篠原秀明 (次世代宇宙システム技術研究組合)  
里型玲子 (次世代宇宙システム技術研究組合)  
間瀬一郎 (次世代宇宙システム技術研究組合)  
山口耕司 (次世代宇宙システム技術研究組合・代表理事)

\* プロジェクト研究「産業化を目的とする超小型衛星技術の開発」の参加者.

## 5. 研究業績

### 5.1 主要な学術論文 (\*責任著者)

1. “An Interpretation of the Cosmic Ray Electron + Positron Spectrum from 10 GeV to 3 TeV Measured by CALET on the ISS”, Saptashwa Bhattacharyya, Holger Motz, Yoichi Asaoka, Shoji Torii, International Journal of Modern Physics D, 28 (2019) 1950035.
2. “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.
3. “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.
4. “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).
5. "Detection of the thermal component in GRB 160107A", Kawakubo Yuta, Sakamoto Takanori, Torii Shoji, Yamada Yusuke, Yoshida Atsumasa et al. (CALET collaboration) Publication of the Astronomical Society of Japan, 70(1) p.61.
6. “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, N. Hasebe, K. Kasahara, S. Ozawa, Y. Shimizu, T. Tamura, \* S. Torii, et al. (CALET Collaboration), Phys. Rev. Lett. 119, 181101(6pp) (2017).
7. “On-orbit Operations and Offline Data Processing of CALET onboard the ISS”, \*Y. Asaoka, S.Ozawa, S. Torii, N. Hasebe, K. Kasahara, Y. Shimizu, T. Tamura et al. (CALET Collaboration), Astroparticle Physics, 100 (2018) 29-37 .
8. “Energy calibration of CALET onboard the International Space Station”, \*Y. Asaoka, Y. Akaike, Y. Komiya, R. Miyata, S. Torii, N. Hasebe, K. Kasahara, S. Ozawa, Y. Shimizu, T. Tamura et al. (CALET Collaboration), Astroparticle Physics, 91 (2017) 1-10.
9. “Decaying fermionic dark matter search with CALET”, S. Bhattacharyya, H.Motz, S.Torii, Y.Asaoka, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2017 (012) .
10. “The CALorimetric Electron Telescope (CALET) on the ISS: Preliminary Results from the On-orbit Observation since October, 2015”, S. Torii, for the CALET Collaboration, Proceedings of Sciences (ICRC2017) 1092 (16 pp) (2018). [Highlight Talk]

11. “CALET Upper Limits on X-ray and Gamma-ray Counterparts of GW 151226”, O. Adriani, \*Y. Asaoka, N. Hasebe, K. Kasahara, \*S.Nakahira, S. Ozawa,\*T.Sakamoto, Y. Shimizu, T. Tamura, S. Torii, et al. (CALET Collaboration), *The Astrophysical Journal Letters*, 829:L20 (5pp), 2016.
12. “Relativistic electron precipitation at International Space Station: Space weather monitoring by Calorimetric Electron Telescope”, \*R. Kataoka, Y. Asaoka, S. Torii, T. Terasawa, S. Ozawa, T. Tamura, Y. Shimizu, Y. Akaike, and M. Mori, *Geophysical Research Letters*, 43, 4119–4125 (2016).
13. “Energy calibration of Calorimetric Electron Telescope (CALET) in Space”, \*Niita Tae, \*Torii Shoji, Akaike Yosui, Asaoka Yoichi, Kasahara Katsuaki, Ozawa Shunsuke, Tamura Tadahisa, *Advances in Space Research*, 55(11), 2500-2508 (2015).
14. “A balloon experiment using CALET prototype (bCALET-2)”, \*Niita Tae, \*Torii Shoji, Kasahara Katsuaki, Murakami Hiroyuki, Ozawa Shunsuke, Ueyama Yoshitaka, Akaike Yosui, Tamura Tadahisa, Yoshida Kenji, Katayose Yusaku, Shimizu Yuki, Fuke Hideyuki, *Advances in Space Research*, 55(2), 753-760 (2015).
15. “CALET's sensitivity to Dark Matter annihilation in the galactic halo”, \*H.Motz, Y.Asaoka, S.Torii, S.Bhattacharyya, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2012(047)
16. “Beam test performance of a scintillator-based detector for the charge identification of relativistic ions”, \*P. S. Marrocchesi, O. Adriani, Y. Akaike, M. G. Bagliesi, A. Basti, G. Bigongiari, S. Bonechi, M. Bongi, M. Y. Kim, T. Lomtadze, P. Maestro, T. Niita, S. Ozawa, Y. Shimizu, S. Torii, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 659(1) 477-483.
17. “Calorimetric electron telescope mission: Search for dark matter and nearby sources”, Shoji Torii et al. (CALET collaboration), *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 630(1), 55-57.
18. “Simulated performance of the calorimetric electron telescope (CALET) experiment”, \*Y.Akaike, K.Taira, K.Kasahara, \*S.Torii, Y.Shimizu, K.Yoshida et al., *Advances in Space Research*, 45, 690-607 (2010).
19. “Dark matter model selection and the ATIC/PPB-BETS anomaly”, \*Chen Chuan-Ren, Hamaguchi Koichi, Nojiri Mihoko M., Takahashi Fuminobu, Torii Shoji, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2009(5).
20. “Dark matter search with the CALET detector on-board ISS”, \*S.Torii, K.Yoshida, K.Kasahara, T.Tamura, J.Chang et al. , *Advances in Space Research*, 41(12), 2032-2036 (2007).

## 5.2 総説・著書

1. 「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.
2. 「宇宙線を直接捉える」鳥居祥二, 日本物理学会誌 特集「宇宙線 100 周年」, 67(12), 821-827 2012. 12
3. 「CALET Mission for Exploring the High Energy Universe」鳥居祥二, 電気学会論文誌 A, 基礎・材料・共通部門, 132(8), 603-608, 2012.
4. 「シリーズ現代の天文学 第17巻 高エネルギー天文学 3.2章 飛翔体観測と観測技術 (pp. 132-151)」日本評論社, 鳥居祥二, 2008年10月20日
5. 「南極周回気球による高エネルギー宇宙電子線の観測」鳥居祥二, 山上隆正, 江尻全機, 日本物理学会誌, 60(12), 960-964, 2005.

## 5.3 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

## 5.4 競争的外部資金: 受託・共同研究資金

競争的外部資金 (直接経費のみ)

1. 日本学術振興会・科研費基盤研究(S)・「高精度直接観測で探る高エネルギー宇宙線の加速と伝播」(代表)・130,000千円・2014年度-2018年度
2. 文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (研究拠点形成)・「観測と技術を融合した先端的宇宙科学研究」・61,000千円・2011年度-2015年度
3. 日本学術振興会・二国間交流事業(中国)・「高エネルギー宇宙電子線観測による近傍加速源・暗黒物質の探索」(代表)・3,889千円・2011年度-2014年度
4. 早稲田大学・重点領域研究・「最先端宇宙科学観測による新たな宇宙像の探究」(代表)・19,500千円・2010年度-2012年度
5. 日本学術振興会・科研費基盤研究(S)・「日本学術振興会・科研費基盤研究S・「高精度直接観測で探る高エネルギー宇宙線の加速と伝播」(代表)・161,400千円・2009年度-2013年度
6. 宇宙航空研究開発機構・共同研究費・「きぼう」船外実験プラットフォーム第二期利用候補「高エネルギー電子, ガンマ線観測装置(CALET)」に関する共同研究(代表)・15,000千円・2007年度
7. 日本学術振興会・科研費特定領域・「CERN-LHC における高輝度ビーム実験用解像型カロリメータ検出回路の開発」(代表)・3,400千円・2007年度-2008年度
8. 日本学術振興会・二国間交流事業(中国)・「高エネルギー電子, ガンマ線の衛星観測」(代表)・4365千円・2006年度-2008年度
9. 財団法人三菱財団・助成金・「宇宙初期を探る暗黒物質検出技術の開発」(代表)・8,000千円・2006年度-2007年度

## 共同研究資金

1. 「産業化を目的とする超小型衛星技術の開発」次世代宇宙システム技術研究組合 7件  
2017年度1,300千円, 2016年度1,300千円, 2015年度1,300千円, 2014年度1,300千円,  
2013年度6,300千円, 2012年度6,200千円, 2011年度6,200千円
2. 「宇宙飛翔体を用いた宇宙線観測実験の研究」株式会社 IHI エアロスペース 4件  
2014年度1,552千円, 2013年度3,024千円, 2012年度3,024千円, 2011年度3,024千円

## 5.5 その他

### プレスリリース

1. 2018年6月27日 早稲田大学, 宇宙航空研究開発機構  
2年間のデータ蓄積により観測領域を拡張. 4.8テラ電子ボルトまでの高精度電子識別に成功
2. 2017年11月2日 早稲田大学, 宇宙航空研究開発機構  
宇宙からの直接観測で3テラ電子ボルトまでの高精度電子識別に初めて成功
3. 2016年10月5日 早稲田大学, 青山学院大学, 宇宙航空研究開発機構  
国際宇宙ステーション・「きぼう」船外搭載のCALETのX線・ガンマ線観測により, LIGO  
検出の重力波がブラックホール合体由来であることを裏付
4. 2016年5月18日 国立極地研究所, 早稲田大学, 宇宙航空研究開発機構  
国際宇宙ステーション「きぼう」に搭載したCALETで電子の“集中豪雨”を観測
5. 2015年10月22日 宇宙航空研究開発機構, 早稲田大学  
国際宇宙ステーション・「きぼう」日本実験棟搭載の高エネルギー電子, ガンマ線観測装置  
(CALET)により, 世界初のテラ電子ボルト (TeV) 領域の電子直接観測を開始

### 新聞報道

1. 2016年6月15日, 日経産業新聞 (8面), 「宇宙電子の集中豪雨, 早大などISSで初観測,  
オーロラ活動活発時に発生」
2. 2015年10月25日, 日本経済新聞 (23面), 「暗黒物質の正体, 観測狙う」
3. 2015年8月3日, 東京新聞 (4面), 「暗黒物質! 消滅の瞬間 残されたメッセージを追う」
4. 2015年7月6日, 産経新聞 (9面), 「暗黒物質の観測に挑戦 JAXA, 装置を来月打ち上げ」
5. 2015年5月16日, 朝日新聞 (e6面), 「今さら聞けない+ 暗黒物質 ISSで「正体」解明  
目指す」
6. 2015年4月23日, 読売新聞 (夕刊), 「「きぼう」暗黒物質に挑む, 観測装置を新設」
7. 2014年5月9日, 日経産業新聞 (10面), 「宇宙の謎に挑む観測機器」
8. 2013年4月22日, 産経新聞, 「宇宙最大の謎 暗黒物質に挑む」
9. 2012年4月1日, 日本経済新聞 (サイエンス欄) (及び電子版), 「暗黒物質の正体を探る  
進む観測体制の整備」
10. 2012年2月23日, 日本経済新聞 (3面), 「未知の素粒子, 暗黒物質観測 宇宙から」

#### 海外学術誌(解説記事)

1. 2016年5月, CERN Courier News p11, 「CALET sees events in millions」
2. 2015年8月7日 SCIENCE Vol.349 Issue 6248 p.572, 「Catching cosmic rays where they live」
3. 2015年3月15日, CERN Bulletin No.12-13/2015, 「CALET: A STOPOVER AT CERN BEFOREFLYING TO SPACE」
4. 2015年11月, CERN Courier News p11-12, 「CALET joins the International Space Station」
5. 2015年9月7日, CERN Bulletin No.37-38/2015, CALET DOCKED ON THE ISS」

#### テレビ放映

1. 2016年6月18日放映, ナショナルジオグラフィックチャンネル, 「Fly Me To The Stars : Japan's Space Challenge」
2. 2015年11月5日放映, NHK BSプレミアムチャンネル, コズミックフロント☆NEXT 「ダークマター 謎の物質の正体は?」

#### 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

#### CALET ホームページ

<http://calet.jp>

## 6. 研究活動の課題と展望

CALET プロジェクトは、「はじめに」で紹介したように理工学研究所の専任教員(研究重点教員)という優れた研究環境において実現したプロジェクトであり, ISS の JAXA プロジェクトとして初めて承認された大学との共同研究である. そして, 2010年に早稲田大学(研究担当常任理事)と宇宙航空研究開発機構(有人宇宙環境利用ミッション本部本部長)の間で結ばれた, “きぼう”日本実験棟 船外実験プラットフォーム第2期利用 高エネルギー電子・ガンマ線観測装置ミッション実施に関する覚書”により実施されてきている. これまで, 宇宙科学研究所が担っていた宇宙科学研究の一端を, 私立大学が主導する初めての大型宇宙科学ミッションを, 大型科研費の採択により理工学研究所のプロジェクト研究として実行してきたことの意義は大変大きいと考えている.

CALET は, 現在観測開始から約3年が経過し所期の観測成果が次々と得られている. そしてISSの優れた研究に授与される「ISS Award」を日本を代表して受賞したほか, JAXA 宇宙科学研究所賞特別賞を受賞している. 観測成果の中には, 宇宙科学最大の謎の一つである暗黒物質の探査や宇宙線加速源(超新星残骸, パルサー等)の謎に迫る重要な観測も含まれている. さらに, 最近の宇宙科学観測の大きな成果である重力波源の観測においても, 重力波検出装置(LIGO/Virgo, KAGRA 等)との共同研究による成果が期待されている. これまでに得られた初期的成果をもとに, 更なる観測継続とデータ解析の進展により, 少なくとも5年間の観測を達成して, これまでに未解明な高エネルギー宇宙の謎を明らかにすることを展望している.

以上に述べたように、CALET は大型研究にありがちなその一部のみに参加するというプロジェクトではなく、装置開発から観測運用、データ解析による研究成果発信まで一体的に本プロジェクトが主導したものであり、まさに理工学研究所を基盤とした早稲田発の研究であるといえる。

しかしながら、本人の定年にともない本プロジェクトを本格的に継続できる研究重点教員(戦略枠)の確保が難しく、理工学研究所の重点領域研究として研究発信を行う道が閉ざされるという非常に残念な状況がある。幸いながら、研究担当理事(石山先生)や理工総研所長(木野先生)のご助力により、早大-JAXAの覚書にもとづくCALET共同研究の継続のために、既存のCALETデータ受信・解析用研究室(WCOC)の研究力強化施設としての承認と、研究員の雇用確保が研究推進部の支援により実現している。本学のWaseda Vision 150に基づく「国際発信力や研究力向上への寄与」に対してご期待いただいた結果の特別なご支援であり、今後ともCALETによる早稲田発の研究成果を図10のような研究体制のもとに発信して行くことを、強く決意している次第である。

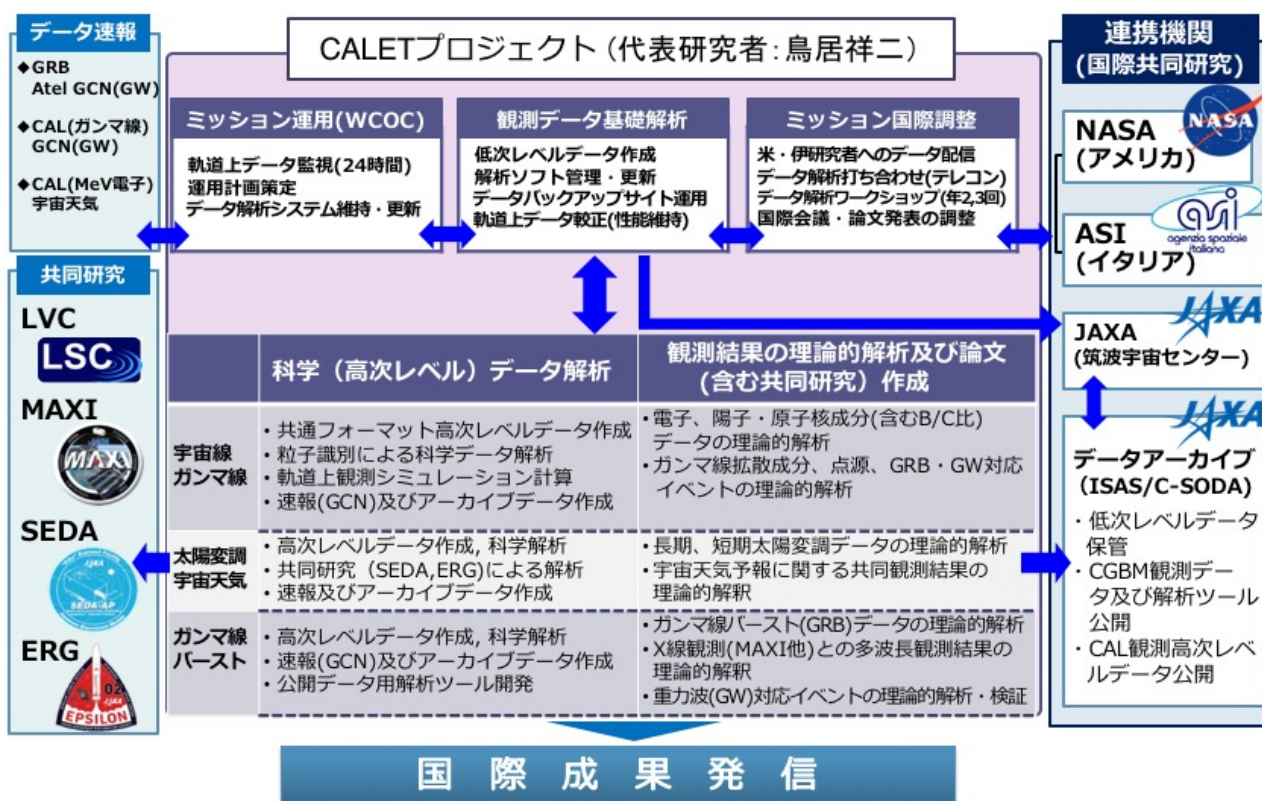


図10: CALETプロジェクトの研究体制図。早稲田大学は本プロジェクトの国際研究グループの拠点研究機関として、ミッション運用、観測データ解析、ミッション国際調整の全てを中核的に担っており、日米伊の研究者92名を代表して国際的な研究成果の発信に務めている。

本プロジェクト研究として同時並行で実施した「産業化を目的とする超小型衛星技術の開発」は、次世代宇宙システム技術研究組合(NESTRA)・代表理事山口氏と東京大学・中須賀教授による超小型衛星の開発に関する共同研究であり、「ほどよし衛星」の開発・製作やCALETの要素技術開発に大きな成果をあげていますが、ここでは紙面の関係で止むを得ず割愛させていただきましたことをお断りしておきます。