

博士論文概要

論文題目

高エネルギー宇宙線観測装置 (CALET) の
軌道上観測性能に関する研究

Study on the on-orbit performance of a high
energy cosmic ray detector (CALET)

申請者

仁井田	多絵
Tae	NIITA

物理学及応用物理学専攻 実験宇宙物理学研究

2014年12月

(受理申請する部科主任会開催年月を記入)

本研究は、国際宇宙ステーション (International Space Station; ISS) に搭載される高エネルギー宇宙線観測装置 CALET (CALorimetric Electron Telescope) の軌道上観測性能を、気球実験及び加速器ビーム実験により検証し、観測時に十分な性能を実現するために不可欠な装置較正方法についてまとめたものである。CALET は、宇宙線の直接観測としては最高エネルギー領域である、1 GeV-10 TeV の電子・ガンマ線と 10 GeV-1000 TeV の原子核成分を観測対象としており、宇宙科学における重要課題である宇宙線の加速・伝播の定量的解明と暗黒物質探索を主要な目的としている。本研究では、試作モデルを用いた気球実験及び加速器実験を行い、Monte Carlo シミュレーションを用いたデータ解析手法の開発により、エネルギー測定や粒子識別等に関する軌道上観測性能について高精度な結果を導出した。さらに軌道上観測運用における正確な装置較正のための具体的方法を開発し、その結果 CALET で期待される観測成果について考察した。

第 1 章ではまず宇宙線研究の歴史と現状、そして課題について述べる。過去 100 年の研究により、宇宙線は超新星残骸における衝撃波で加速され、銀河磁場による拡散を受けて銀河内を伝播するという標準モデルが確立されつつあるが、その直接的な検証は未だ実現していない。これは拡散によって源の位置情報が失われ、加速源を特定できないことに起因する。実際に加速領域から“逃走”した粒子のスペクトルを観測するためには、伝播中のエネルギー損失が大きく、近傍の加速源からしか到達しない TeV 領域の電子観測が必須である。また近年、陽電子比の過剰や陽子・ヘリウムスペクトルの“硬化”など、上記の標準モデルでは理解できない事象が幾つか観測されており、新たな近傍加速源や暗黒物質と関連して、それらの解明が重要課題となっている。電子・陽電子の過剰成分については、暗黒物質の対消滅や近傍パルサーにおける電子対生成など諸説提唱されているが、決定的な結論を得るためには、観測エネルギーの高エネルギー領域への拡大と高精度化が必要とされている。こうした課題に答える新たな観測計画が、CALET プロジェクトである。CALET は、これまでほとんど直接観測が行なわれてこなかった TeV 領域の電子観測に最適化された装置であり、陽電子比の増大が問題となっている 10 GeV 領域から電子+陽電子スペクトルを高精度で観測し、スペクトルの微細構造やカットオフの有無を明らかにすることができる。

第 2 章では、宇宙線観測における理論的な土台について述べる。現在宇宙線のべき型スペクトルを説明する加速理論として広く受け入れられているのは、超新星残骸の衝撃波による統計的フェルミ加速である。加速・生成されたハドロン成分の銀河内伝播は、通常 Leaky-Box と呼ばれる銀河系からの“漏れだし”のみを考慮した単純なモデルで扱われている。しかし、高エネルギー電子成分に関しては拡散過程でのエネルギー損失の寄与が大きいため、銀河系内での密度が非一様となり、地球に到達するのは若い近傍加速源からの電子に限られる。このような電子（陽電子）は、べき型スペクトルから逸脱する。さらに近傍パルサーにおけ

る電子・陽電子対生成、暗黒物質の崩壊や対消滅等の寄与も提案されている。本章では代表的なモデルの基本的なシナリオとそこから導かれる観測予測について述べる。

第3章では、第1、2章を踏まえて CALET 実験の概要と検出器の性能について述べる。CALET は電荷検出器 (CHarge Detector; CHD)、解像型カロリメータ (IMaging Calorimeter; IMC)、全吸収型カロリメータ (Total Absorption Calorimeter; TASC) という3つの装置要素から構成されている。その最大の特徴は、1mm 角のシンチレーティングファイバーを用いた上部の IMC と、無機シンチレータを積層した下部の TASC の組み合わせにより、宇宙線の生成するシャワーを初期発達から収束に至るまで三次元的に可視化する能力である。これによって、従来困難であった高エネルギーにおける高精度のエネルギー決定、粒子識別、及び到来方向決定を実現し、スペクトルの微細構造やカットオフ等の検証、異方性の検出を行なうことが CALET では可能となっている。本章では、搭載装置の CAD モデルにより検出器構造を正確に取り入れた Monte Carlo シミュレーションによって、電子、ガンマ線、原子核それぞれに対するエネルギー分解能、角度分解能、粒子識別性能等を導出し、上記の目的に対して十分な基礎性能を有することを示した。

第4章では、前章で述べた装置性能の実証と解析手法の開発のため、2009年に行なった気球実験の観測結果について述べる。この実験では CALET の約 1/3 スケールの気球搭載型プロトタイプ検出器 (bCALET) を開発し、北海道大樹町高度 35 km における約 2.5 時間のフライトにより、1–30 GeV の電子および大気ガンマ線を観測した。データ解析においては、まずフライト前に行なわれた大気ミュオン (最小電離粒子) 試験で各シンチレータの出力を較正した後、Monte Carlo シミュレーションによって最適化した手法により、エネルギー決定、シャワー軸再構成、電子・ガンマ線/陽子識別を行なった。シャワー横拡がり等の各種パラメータは、実験データとシミュレーションでよい精度で一致しており、想定通りの性能が得られていることが確認された。大気上空における電子フラックスは、地球磁場による rigidity-cutoff の影響を受けた一次電子と、大気中で生成された二次電子のスペクトル形状を反映しており、シミュレーション予測とよい精度で一致した。また、BETS、AMS-01 等の過去の実験結果とも矛盾のない結果となった。これにより、CALET の低エネルギー側の宇宙線観測性能、最小電離粒子を用いた装置較正やデータ解析手法の妥当性が、総合的に実証されている。

第5章では、2012年に CERN-SPS 加速器で行なわれた加速器実験のデータ解析結果を用いたシミュレーションの精度検証について述べる。この実験では実機の熱構造モデルを使用し、電子 10–290 GeV、陽子 30–400 GeV、ミュオン 150, 180 GeV を照射した。データ解析においては、まずミュオンのデータを用いて回路ノイズ、シンチレータの発光量の温度依存性、クロストーク等の検出器特性

を導出し、それらをシミュレーション計算に取り入れた上で、電子・陽子照射時の粒子数分布、角度分布、シャワー横拡がり分布等を実験とシミュレーションとで比較した。両者は各エネルギーにおいてよい精度で一致しており、シミュレーションにおける検出器構造、検出器応答の再現性が保証されたと言える。

第6章では、実際のISS軌道上での装置運用を見据え、宇宙線を用いた軌道上における装置較正方法の開発を行った。CALETの高いエネルギー分解能を長期にわたって実現するためには、定期的なエネルギー較正が重要であり、このため最小電離粒子を検出するトリガーモードが特別に用意されている。地上における装置較正では、大気ミューオンを用いることができるが、軌道上では最もフラックスの大きな宇宙線陽子を用いる。しかし、陽子の多くは検出器中で核相互作用によりシャワーを生成するため、装置較正に使用するには、核相互作用せず検出器を通過したイベントを選別する必要がある。本章では、シミュレーションコードATMNC3 (ATmospheric Muon and Neutrino Calculation 3-dimensional version) を用いて、ISS軌道上の宇宙線フラックスを導出し、陽子イベント取得レートの確認と、シャワー粒子除去のためのイベント選別アルゴリズムの開発を行なった。その結果、90分間 (ISS軌道1周期) のデータ取得で十分な精度で陽子による装置のエネルギー較正が可能であり、高いエネルギー分解能が軌道上観測において十分に維持可能であることが確認された。

第7章では、上記の結果をもとにCALETの観測性能をまとめ、科学的な成果の展望を述べる。重要なものとしては、(1) TeV領域の電子については、5年間の観測でスペクトル導出と異方性の検出が十分に可能であり、これによって近傍加速源の同定が期待されるだけでなく、10 GeV以上での陽電子過剰の解明 (近傍パルサー or 暗黒物質) に貢献できる。(2) 暗黒物質由来の (ライン) ガンマ線が存在すれば、高いエネルギー分解能で検出可能であり、電子観測結果と合わせて暗黒物質の理論モデルに強い制限を与えることができる。(3) 原子核成分では、特に近年話題となっている数百 GeV 領域における陽子・ヘリウムスペクトルの“硬化”の有無について、最終的な結論を得る事が期待でき、さらに100 TeVを超える高エネルギー領域の精密観測により、超新星残骸における加速上限エネルギーの検証が可能である。

第8章では、本論文のまとめを行うとともに、今後の展望について概説する。CALETは2015年夏期にH-II Bロケットによって打ち上げられ、ISSの日本実験棟船外実験プラットフォームに設置される。搭載直後はデータの正常性の確認を含めた装置較正が主眼となり、本論文で述べた軌道上装置較正手法に基づいてイベント取得とデータ解析を行なう。その後本格的な高エネルギー宇宙線の測定を開始し、5年間の観測によって宇宙線の加速・伝播機構の定量的理解と暗黒物質のモデル特定を目指す予定である。

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

氏名 仁井田 多絵 印

(2015 年 5 月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文○ (査読有)	<u>T. Niita</u> , S. Torii, Y. Akaike, Y. Asaoka, K. Kasahara, S. Ozawa, T. Tamura, “Energy Calibration of Calorimetric Electron Telescope (CALET) in Space”, <i>Advances in Space Research</i> , 55, pp.2500-2508, 2015
論文○ (査読有)	<u>T. Niita</u> , S. Torii, K. Kasahara, H. Murakami, S. Ozawa, Y. Ueyama, Y. Akaike, T. Tamura, K. Yoshida, Y. Katayose, Y. Shimizu, H. Fuke, “A balloon experiment using CALET prototype (bCALET-2)”, <i>Advances in Space Research</i> , 55, pp.753-760, 2015
論文○ (査読有)	赤池陽水、浅岡陽一、上野史郎、田村忠久、寺澤敏夫、富田洋、鳥居祥二、中川友進、 <u>仁井田多絵</u> 、「CALET の運用及びデータ解析・管理システムの概要」、『宇宙科学情報解析論文誌』、宇宙航空研究開発機構（JAXA）、第三号、pp.99-107、2014
論文○ (査読有)	<u>仁井田多絵</u> 、鳥居祥二、小澤俊介、笠原克昌、村上浩之、赤池陽水、植山良貴、伊藤大二郎、荻部幹彦、近藤慧之輔、九反万理恵、田村忠久、吉田健二、片寄祐作、清水雄輝、福家英之、「気球搭載型 CALET プロトタイプ (bCALET-2) による電子・ガンマ線観測」、『大気球研究報告』、宇宙航空研究開発機構（JAXA）、JAXA-RR-11-008、pp.17-46、2012
論文 (査読有)	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, <u>T. Niita</u> , S. Ozawa, Y. Shimizu, T. Torii, “Beam test performance of a scintillator-based detector for the charge identification of relativistic ions”, <i>Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A</i> , 659, pp.477-483, 2011
論文○ (査読無)	<u>T. Niita</u> , and the CALET Collaboration, “CALET Calibration on ISS Orbit Using Cosmic Rays”, <i>Proc. of 33rd International Cosmic Ray Conference</i> , ID #0435, 2013
論文 (査読無)	Y. Ueyama, S. Torii, K. Kasahara, <u>T. Niita</u> , P. S. Marrocchesi, Y. Katayose, T. Tamura, Y. Akaike, S. Ozawa, M. Nakamura, S. Kaneko, R. Katahira, A. Murata, J. W. Mitchell, “The CALET Structure and Thermal Model used for beam test at CERN”, <i>Proc. Of 33rd International Cosmic Ray Conference</i> , ID #0647, 2013
論文○ (査読無)	<u>T. Niita</u> , S. Torii, K. Kasahara, T. Tamura, K. Yoshida, Y. Katayose, H. Murakami, S. Ozawa, Y. Shimizu, Y. Akaike, Y. Ueyama, D. Ito, M. Karube, K. Kondo, M. Kyutan, “Measurements of Cosmic-ray Electron and Gamma-ray Flux with Balloon-Borne CALET Prototype”, <i>Proc. of 32nd International Cosmic Ray Conference</i> , 6, pp.21-24, 2011
論文 (査読無)	Y. Shimizu, O. Adriani, Y. Akaike, C. Avanzini, M. G. Bagliesi, A. Basti, G. Bigongiari, M. Bongi, G. Castellini, D. Ito, M. Karube, K. Kasahara, M. Y. Kim, K. Kondo, T. Lomtadze, M. Nakamura, P. Maestro, P. S. Marrocchesi, F. Morsani, <u>T. Niita</u> , S. B. Ricciarini, S. Torii, Y. Ueyama, “The CALET CHD for determination of nuclear charge”, <i>Proc. of 32nd International Cosmic Ray Conference</i> , 6, pp.391-394, 2011

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文 (査読無)	S. Ozawa, S. Torii, K. Kasahara, H. Murakami, Y. Akaike, Y. Ueyama, D. Ito, M. Karube, K. Kondo, <u>T. Niita</u> , T. Tamura, Y. Katayose, K. Yoshida, Y. Saito, H. Fuke, J. Kawada. "The balloon-born CALET prototype detector (bCALET)", Proc. of 32 nd International Cosmic Ray Conference, 6, pp.71-74, 2011
論文 (査読無)	清水雄輝、鳥居祥二、笠原克昌、小澤俊介、赤池陽水、相場俊英、植山良貴、甲斐友一朗、 <u>仁井田多絵</u> 、田村忠久、吉田健二、片寄祐作、他 bCALET グループ、「bCALET による電子エネルギースペクトルの観測」、『大気球シンポジウム：平成 22 年度』、宇宙科学研究所、pp.124-127、2010
論文 (査読無)	小澤俊介、鳥居祥二、笠原克昌、清水雄輝、村上浩之、赤池陽水、相場俊英、植山良貴、甲斐友一朗、伊藤大二郎、近藤慧之輔、 <u>仁井田多絵</u> 、田村忠久、吉田健二、片寄祐作、他 bCALET グループ、「気球搭載型宇宙線電子観測装置 bCALET の開発」、『大気球シンポジウム：平成 22 年度』、宇宙科学研究所、pp.128-131、2010
国際学会 (口頭)	<u>T. Niita</u> , S. Torii, S. Ozawa, K. Kasahara, H. Murakami, Y. Akaike, Y. Ueyama, D. Ito, M. Karube, K. Kondo, M. Kyutan, T. Tamura, K. Yoshida, Y. Katayose, Y. Shimizu, H. Fuke, "Cosmic-ray Electrons and Atmospheric Gamma-rays in 1-30 GeV Observed with Balloon-borne CALET Prototype Detector", 39 th COSPAR, PSB.1-0027-12, Mysore India, Jul 2012
国際学会 (ポスター)	<u>T. Niita</u> , and the CALET Collaboration, "CALET Calibration on ISS Orbit Using Cosmic Rays", 40 th COSPAR, E1.6-0051-14, Moscow Russia, Aug 2014
国際学会 (ポスター)	Y. Akaike, O. Adriani, G. Bigongiari, S. Bonechi, G. Castellini, G. Collazuol, V. di Felice, A. Gherardi, K. Kasahara, R. Katahira, Y. Yusaku, T. Kotani, M. Kyutan, P. Maestro, P. S. Marrocchesi, L. Marcelli, J. Mitchell, N. Mori, A. Murata, Y. Nakagawa, M. Nakamura, <u>T. Niita</u> , S. Okuno, S. Ozawa, F. Palma, S. Ricciarini, C. de Santis, Y. Shimizu, R. Sparvoli, T. Tamura, S. Torii, Y. Ueyama, E. Vannuccini, K. Yoshida, K. Yoshida, "Performance of a CALET Prototype Calorimeter at the CERN-SPS", 39 th COSPAR, E1.15-0069-12, Mysore India, Jul 2012
国内学会 (口頭)	<u>仁井田多絵</u> 、鳥居祥二、浅岡陽一、小澤俊介、田村忠久、清水雄輝、赤池陽水、木村寿利、他 CALET チーム、「CALET フライトモデルミュオン試験結果」、『日本物理学会 2014 年秋期大会』、19aSC-3、佐賀大、2014 年 9 月
国内学会 (口頭)	<u>仁井田多絵</u> 、鳥居祥二、笠原克昌、小澤俊介、浅岡陽一、片平亮、村田彬、赤池陽水、他 CALET チーム、「シミュレーションを用いた CALET の粒子識別手法の開発」、『日本物理学第 69 回年次大会』、28aTS-1、東海大、2014 年 3 月
国内学会 (口頭)	<u>仁井田多絵</u> 、鳥居祥二、笠原克昌、小澤俊介、赤池陽水、他 CALET チーム、「CALET 検出器の軌道上キャリブレーション方法の開発」、『日本物理学会 2013 年秋期大会』、22pSP-5、高知大、2013 年 9 月

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
国内学会 （口頭）	<u>仁井田多絵</u> 、赤池陽水、鳥居祥二、笠原克昌、小澤俊介、中川友進、植山良貴、九反万里恵、中村政則、吉田圭佑、渡辺仁規、「シミュレーション計算を用いた CALET 搭載モデルの性能検証」、『日本物理学会第 68 回年次大会』、29aBF-1、広島大、2013 年 3 月
国内学会 （口頭）	<u>仁井田多絵</u> 、鳥居祥二、笠原克昌、小澤俊介、中川友進、植山良貴、九反万里恵、中村政則、吉田圭祐、渡辺仁規、赤池陽水、吉田健二、田村忠久、片寄祐作、清水雄輝、他 CALET チーム、「シミュレーション計算による CALET 搭載装置の軌道上性能検証」、日本物理学会 2012 年秋期大会、13aSP-1、京都産業大、2012 年 9 月
国内学会 （口頭）	<u>仁井田多絵</u> 、鳥居祥二、小澤俊介、赤池陽水、植山良貴、中村政則、田村忠久、奥野祥二、「CALET-IMC のシンチファイバーベルト開発」、日本物理学会第 66 回年次大会、26aGX-12、新潟大（中止・web 掲載）、2011 年 3 月
国内学会 （口頭）	<u>仁井田多絵</u> 、鳥居祥二、笠原克昌、小澤俊介、赤池陽水、相場俊英、植山良貴、甲斐友一朗、田村忠久、吉田健二、他 bCALET-チーム、「bCALET-2 観測による宇宙線電子フラックスの解析報告」、日本物理学会 2010 年秋期大会、11aSH-5、九州工業大、2010 年 9 月
国内学会 （ポスター）	<u>仁井田多絵</u> 、鳥居祥二、笠原克昌、小澤俊介、浅岡陽一、赤池陽水、他 CALET チーム、「シミュレーション計算を用いた CALET の軌道上キャリブレーション手法の開発」、『第 14 回宇宙科学シンポジウム』、P2-019、宇宙科学研究所、2014 年 1 月
国内学会 （ポスター）	赤池陽水、寺澤敏夫、鳥居祥二、笠原克昌、小澤俊介、浅岡陽一、植山良貴、 <u>仁井田多絵</u> 、片平亮、金子翔伍、村田彬、下村健太、斎藤優、田中真文、土川恵理子、田中忠久、片寄祐作、清水雄輝、P. S. Marrocchesi、P. Maestro、G. Bigongiari、S. Bonechi、P. Brogi、O. Adriani、N. Mori、S. Oleksandr、R. Sarvoli、L. Marcelli、V. Di Felice、F. Palma、A. Basti、S. Tolaini、A. Orsini、J. W. Mitchell、B. Rauch、他 CALET チーム、「CERN-SPS における熱構造モデルを用いた CALET 性能実証実験」、『第 14 回宇宙科学シンポジウム』、P2-015、宇宙科学研究所、2014 年 1 月
国内学会 （ポスター）	小澤俊介、赤池陽水、植山良貴、笠原克昌、金子翔吾、斎藤優、田村忠久、鳥居祥二、 <u>仁井田多絵</u> 、村田彬、他 CALET チーム、「CERN-SPS 重粒子ビームによる CALET の電荷分解能測定」、『第 14 回宇宙科学シンポジウム』、P2-016、宇宙科学研究所、2014 年 1 月
国内学会 （ポスター）	<u>仁井田多絵</u> 、赤池陽水、鳥居祥二、笠原克昌、小澤俊介、中川友進、植山良貴、九反万里恵、中村政則、吉田圭佑、渡辺仁規、「シミュレーション計算を用いた CALET の軌道上性能検証」、『第 13 回宇宙科学シンポジウム』、P2-030、宇宙科学研究所、2013 年 1 月
国内学会 （ポスター）	小澤俊介、笠原克昌、片平亮、金子翔吾、鳥居祥二、 <u>仁井田多絵</u> 、村田彬、渡辺仁規、片寄祐作、荻野竜平、清水雄輝、「重イオンビーム実験による CALET-CHD の電荷分解能」、『第 13 回宇宙科学シンポジウム』、P2-032、宇宙科学研究所、2013 年 1 月