

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2013

課題番号：21224006

研究課題名(和文) 高エネルギー電子・陽電子観測による暗黒物質・近傍加速源の探索

研究課題名(英文) Search for dark matter and cosmic-ray nearby sources by observing high energy electrons and positrons

研究代表者

鳥居 祥二(Torii, Shoji)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：90167536

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 162,200,000円、(間接経費) 48,660,000円

研究成果の概要(和文)：高エネルギー電子・陽電子の直接観測による宇宙線近傍加速源と暗黒物質の探索を目的として、国際宇宙ステーション日本実験棟に搭載するCALorimetric Electron Telescope (CALET)の開発を実施した。CALETは当初予定の気球搭載型プロトタイプ(bCALET)による観測に対して、30倍以上の統計量が得られるだけでなく、宇宙空間での高精度観測が可能である。bCALETによるCALETの観測性能実証と、熱構造モデルによるCERN-SPSでのビーム実験等により、搭載装置性能を確認した。その結果、世界に先駆けたTeV領域における電子観測を実現することが確認できている。

研究成果の概要(英文)：We have been developing the CALorimetric Electron Telescope (CALET) to search for dark matter and cosmic-ray nearby sources by observing high energy electrons and positrons on the Japanese Experiment Module of the International Space Station. The event statistics expected by the CALET observation is 100 times more than that by the balloon-borne prototype (bCALET) which had been originally scheduled. CALET is moreover capable of carrying out an observation with excellent accuracy as a space experiment. The capability for electron observation was proven by the bCALET balloon experiment, and the performance of flight model was investigated by the CERN-SPS beam test of the thermal-structure model and the simulation calculation. We have finally confirmed that the five-year mission of CALET will achieve the electron observation in the TeV region first in the world.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線(実験) 電子観測 高エネルギー 暗黒物質 加速機構 超新星 パルサー 国際宇宙ステーション

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙で既知粒子が占めるエネルギー密度はわずかに 4%程度であるのに対して、正体が不明な暗黒物質が 23%を占めており、その解明が宇宙物理学上の最重要課題となっている。これまで、宇宙背景放射における揺らぎの観測 (WMAP など) や宇宙の大規模構造の観測 (SDSS など) から、暗黒物質は “Non-baryonic Cold Matter” であることが分かっている。その最有力な候補が、“Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)” である。WIMP の質量は数 10 GeV 以上あり、素粒子の標準模型には候補となる素粒子が存在しない。しかし、標準模型を超える TeV スケールで現れる新しい素粒子模型において導入される新しい素粒子には、WIMP の条件を満たすものがあることが示されている。WIMP は電氣的に中性で安定でなければならないことから、①超対称性 (SUSY) 模型における最も軽い (安定な) Lightest Supersymmetric Particle (LSP), または②余剰次元模型における Kaluza-Klein (KK) 粒子の最も軽く安定な Lightest KK particle (LKP), が有力な候補となっている。

(2) このように、暗黒物質の正体は宇宙初期に生成された素粒子 (が残存したもの) である可能性が極めて高い。その発見は素粒子物理学にとっても最重要な課題であり、数多くの探索実験が行われている。探索実験は次の2つに大別される。①飛来した WIMP が原子核と衝突して生成する反跳粒子を検出する直接実験。② WIMP の対消滅で生成される粒子を検出する間接実験。直接実験は地上や地中で行われるが、ニュートリノ以外の間接実験は大気の影響を受けない宇宙空間 (に近い環境) での観測が不可欠である。このため観測機会が限られる一方で、バックグラウンドとなる天体起源の粒子が冪型のエネルギースペクトルであるのに対して、検出が可能な特徴的スペクトル構造を持つという利点がある。特に、電子・陽電子成分はバックグラウンドの推定が容易で、WIMP の対消滅で電子・陽電子対が直接生成されるモードが存在するため、反陽子やガンマ線の観測とともに WIMP 検出の有力な手段となっている。

(3) 宇宙線電子・陽電子成分の PAMWLA 衛星による観測から、陽電子が電子+陽電子 (以下、全電子) に占める割合 (陽電子比) のエネルギーに伴う増大が 10 -100 GeV の領域で観測され、それに符合する全電子エネルギースペクトルの異常 (“過剰”) が、気球観測から 600-800 GeV の領域で報告された。これらは、以下に述べるように “標準モデル” による理解が困難であり、新たな近傍加速源や暗黒物質の存在を示唆するものとして、多くの理論的解釈が試みられている。

2. 研究の目的

(1) 我々は、平成 5 年度に科学研究費の配分を受けて以来、シンチファイバーを用いたイメージング・カロリメータ (BETS : Balloon borne Electron Telescope with Scintillating fibers) の開発と南極周回気球 (PPB) などによる観測を実施してきた。そして、世界に先駆けてアクティブな装置による高エネルギー全電子成分の観測に、1 ~1000 GeV のエネルギー領域で成功している。この観測は同一原理を用いた装置の観測としては、世界で最も広範囲なエネルギー領域をカバーしていた (申請時)。

(2) 電子は超新星爆発の際に発生する衝撃波で加速され、シンクロトロン輻射と逆コンプトン散乱で (エネルギーの二乗に比例して) エネルギー損失を受け、拡散過程によって銀河内を伝播すると考えられている。この “標準モデル” によれば、TeV 領域ではエネルギー損失のため、電子の寿命が 10 万年以下になり、伝播距離が 1 kpc 以内に限られる。この条件を満たす近傍ソースの候補は超新星残骸では Vela, Monogem, Cygnus Loop など数例にすぎない。したがって、TeV 領域ではこれらのソースを同定可能な、特徴を持つスペクトル構造が現れることが理論的に予測されている。本研究では、モデルの詳細なパラメータの決定や近傍ソース存在を示す兆候を確実に検出することを目指している。

(3) これまでの日米の気球実験 (ECC, ATIC) で観測された 500~600 GeV 領域の全電子の過剰は、我々の実施した PPB-BETS の観測結果においても、統計的に有意とはいえないが ($\sim 3\sigma$)、これらと矛盾せずに観測されている。しかし、超新星残骸としての近傍ソースの直接的寄与は 1 TeV 以下では考えにくいので、陽電子比の増大も同時に説明するために、新たな加速源として近傍パルサー又は WIMP の対消滅で生じる電子・陽電子対の寄与であるとする説が数多く提案されている。

(4) 最近の Fermi/LAT の観測からは気球実験のような顕著な過剰は見られないものの、やはり標準モデルでは説明の難しい全電子成分の過剰が観測されている。さらに、AMS-02 の観測では PAMELA と一致する陽電子比の増大が 350 GeV まで観測されている。しかし、これらの観測でもまだその成因は謎のままである。その原因として、これらの検出器における電子・陽電子の観測が TeV 以下の領域に留まっており、エネルギー分解能や電子選別性能も充分でない点が挙げられる。例えば、WIMP を起源とする場合には、その質量に相当するエネルギー領域で全電子エネルギースペクトルや陽電子比の急激なカットオフの存在が期待される。一方、パルサー説ではそれほど急激なカットオフが見られないことが示唆されている。

(5) 本研究では、これまでの観測では困難であった TeV 領域での観測が可能で、優れたエネルギー分解能 ($\sim 2\%$) と高精度な電子識別能力 ($e/p \sim 10^5$) を持つ観測装置を開発して、全電子成分の過剰における高エネルギー側のカットオフを検出することを目指している。そして、近傍パルサー又は WIMP のいずれかについて結論を得るとともに、TeV 領域で期待される近傍ソース (超新星残骸) の直接検出を達成する。このため、当初は全世界の総観測量 (申請時; $10 \text{ m}^2\text{srd}$) を上回る、高精度気球観測を実施する予定であった。しかし、観測に必要な圧力気球の開発遅延により、研究期間内での観測実現が不可能となった。一方、国際宇宙ステーション日本実験棟 (きぼう) における「高エネルギー電子、ガンマ線観測装置 (CALET: Calorimetric Electron Telescope)」が、JAXA の公募によって採択されたことにより、当初の研究目的に対して、遥かに高度なレベルで達成することが可能となった。

3. 研究の方法

(1) 本研究の申請時における計画は、平成 21 年度に、国内でプロトタイプ気球観測システムの製作とテストフライトを行い、平成 22 年度以降に南半球 (または北極域) 一周の気球飛行により、暗黒物質・近傍加速源の存在を定量的に研究することであった。このため、南極周回気球実験などの気球観測に経験のある研究者を中心に研究組織を形成した。平成 21 年度は当初計画通り、それまでの気球観測装置の開発と観測実績を基に、気球搭載型電子観測装置 (bCALET: balloon borne CALET) の 2 号機 (bCALET-2) を開発し、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の大樹航空宇宙実験場において気球観測を実施した。そして、目標どおり平成 23 年度内に、データ解析もすべて終了し、総合的な論文として成果をまとめた。

(2) 平成 22 年度以降は、CALET プロジェクトが平成 26 年度の打ち上げ (観測期間 5 年) を目標に JAXA で正式承認されたため、気球実験を遥かに上回る成果が期待できる CALET ミッションにより研究目的を達成する事とした。このため、早稲田大学と JAXA の共同研究として、CALET の要素技術開発・性能検証実験を本研究により開始した。

(3) 研究組織、研究方法、役割分担は平成 21~23 年度と平成 22~25 年度では、それぞれの期間の目的に応じて図 1 のような構成となっている。なお、CALET の開発には日本の他に米、伊から宇宙機関 (NASA, ASI) を含む約 24 の研究機関 (約 80 名) が参加している。

(4) 平成 24 年度以降は、詳細設計審査をへて搭載装置の製作が開始されており、コンポ

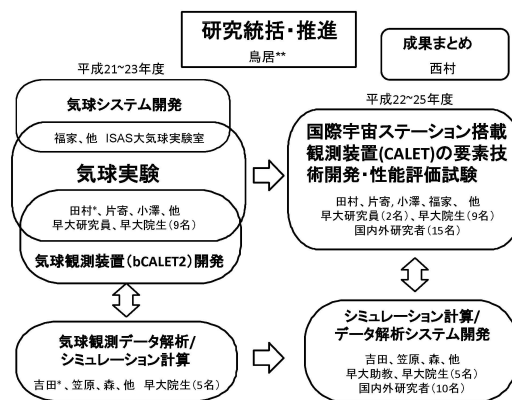


図1: 研究組織図。

ネットの性能実証試験や、CERNでの熱構造モデルを用いたビーム実験による搭載装置の性能実証を実施している。平成 25 年度からは軌道上データ解析システムの構築に着手した。すでに、搭載装置コンポーネント試験はほぼ完了しており、地上試験による装置較正データの取得も実施している。平成 26 年度夏期には総合システム試験を実施して、年度内に打ち上げを行う準備が進んでいる。

4. 研究成果

(1) 本研究の目的は、高エネルギー全電子成分の高精度観測により、近傍加速源及び暗黒物質の探索を実施することである。このため、電子観測に最適化した CALET による観測で、これまで未開拓な TeV 領域に至る観測を目指している。CALET の技術実証のために開発した、bCALET-2 は CALET の約 $1/4$ のスケール ($GF: 320 \text{ cm}^2\text{sr}$) で、CALET と同構造のイメージング・カロリメータ (IMC) と全吸収型カロリメータ (TASC) で構成されている。IMC は 4096 本のシンチファイバー (1mm 角) を 64 アノード PMT で読み出し、TASC では 60 本の BG0 ログ ($2.5\text{cm} \times 2.5\text{cm} \times 30\text{cm}$) を 4 ケタ以上のダイナミックレンジで PIN-PD で読みだしている。このような多チャンネル読み出し技術が気球実験で実証されたことは世界的にもあまり例がなく、CALET の技術実証として非常に大きな意義があった。気球実験は、高度 35 km のレベルフライトで約 2.5 時間の観測により、1 GeV 以上のトリガーで約 12,000 イベントを取得し、1~100 GeV の電子観測に成功している。図 2 に観測装置の概要を示す。bCALET-2 による観測結果は、JAXA 研究開発報告 (査読付) に、観測装置とデータ解析を網羅した包括的な論文として発表している。

(3) bCALET-2 の観測で得られた電子 (一次+二次) のエネルギースペクトルを図 3 に示す。国内の気球観測では飛行時間が制限されるために、高エネルギー側の観測は数 10 GeV



図2: bCALET-2の外観図。装置全体を円筒形の圧力容器(バツセル)におさめるため、装置下部にDAQシステムや電源を設置している。

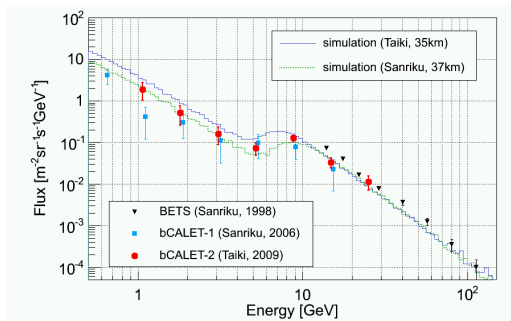


図3: bCALET-2で得られた電子エネルギースペクトル(●)と、シミュレーションおよびbCALET-1(■)、BETS(▼)データとの比較。シミュレーションでは、大樹町上空35kmにおける地磁気の影響を考慮している。10 GeV付近には、Rigidityによる一次電子のカットオフが見られる。

にとどまるが、これまで観測が行われてこなかった Rigidity Cut-off (<10GeV)以下の領域で、電子・ガンマ線のエネルギースペクトルが得られた。これらの観測結果は、シミュレーション計算の予測とよく一致しており、観測装置性能とデータ解析に高い信頼性が証明され、CALET 開発のための技術実証に成功したといえる。

(3) CALET は「きぼう」船外実験プラットフォームに標準ペイロードとして設置できるように設計されており、図4のように①電荷測定器(CHD: Charge Detector)、②イメージング・カロリメータ(IMC: Imaging Calorimeter)、③全吸収型カロリメータ(TASC: Total Absorption Calorimeter)の3つのコンポーネントから構成されている。図4には1TeVの電子が入射した場合のシャワーの発達状況を示すシミュレーションを同時に示すが、CALETは約30X₀の厚さがありTeV領域の高精度な電子観測が可能である。

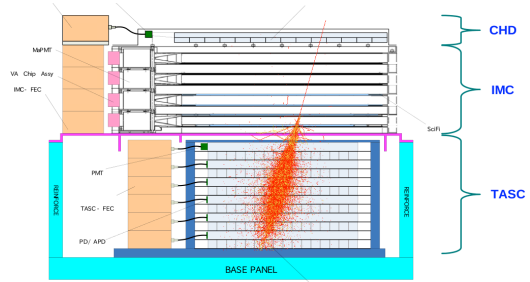


図4: CALETの側面概念図と電子1TeVによるシャワーのシミュレーションの例。装置サイズは、上部(CHD/IMC)が45cm×45cm、下部(TASC)が32cm×32cmで、高さは約50cm。

本研究により、各コンポーネントの検出器と前置回路システムの要素技術開発と性能検証試験を実施した。さらに、IMC、TASC及びCHDを結合したCALETのスケールモデルを製作して、米伊の研究チームと共同してCERN-SPSでのビーム照射実験を平成23年に行い、シミュレーションとの比較により所期の性能を確認している。なお、CALETは研究の重要性が認められ、CERNの「Recognized Experiment」として採択されている。CHD単体については、ドイツのGSI及び放射線医学研究所のHIMACで重原子核ビームの照射実験を実施し、期待どおり鉄核(Z=26)以上の原子核まで検出性能が確認されている。

(5) CALETは詳細設計フェーズを経て、搭載装置(PFM)の製作が開始されており、打ち上げに向けて製作・試験が進捗している。これと並行して、熱構造モデル(STM)を用いた搭載装置の開発及び性能評価試験を行った。単体テストの後、各コンポーネントをくみ上げて、搭載装置と同構造の装置(センサーは一部ダミー品)を作製し、CERN-SPSの電子・陽子ビーム実験を国際研究チームで実施した(図5)。この試験では、読み出し回路も一部に搭載品のBBMを用いて、装置構造だけでなく電子回路も搭載品を模擬している。

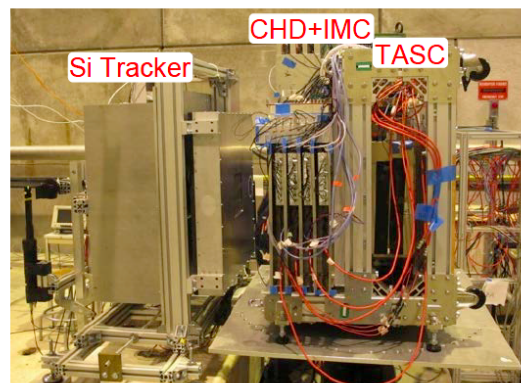


図5: CERN-SPSにおけるCALET熱構造モデルを用いたビーム実験の概観。

その結果, end-to-end 試験としての性能検証が実現している. 実験結果とシミュレーション計算は非常によく一致しており性能確認を達成できた事により, 本研究で計画した搭載装置の機能・性能検証をほぼ終了している.

(7) CALET の 5 年間の電子観測規模は約 $220 \text{ m}^2 \text{ sr day}$ であり, 当初の長時間気球実験を約 30 倍上回る量である. その結果, CALET の観測により, TeV 領域で予測される Vela からの電子同定 (図 6) や暗黒物質の探索 (図 7) に大きな可能性をもたらすことが出来る. さらに, ガンマ線や陽子・原子核観測の同時観測が可能であり, 直接観測としては最高エネルギー領域 (10^{15} eV) での観測により, 未解決であった宇宙線の起源・加速機構の解明に大きく貢献できると確信している.

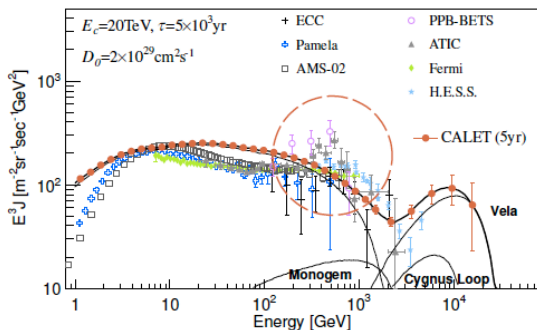


図 6: 全電子の観測結果 (微分フラックス $\times E^3$) 及び CALET の 5 年間の観測予測.

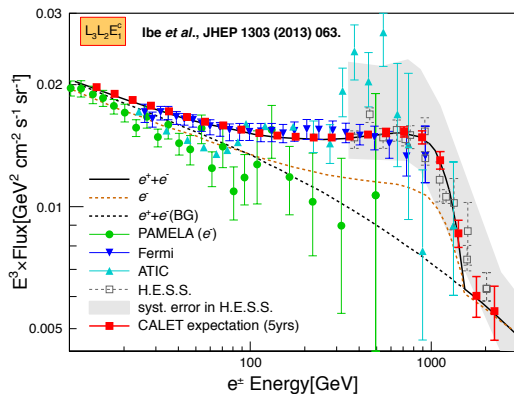


図 7: LSP 崩壊で期待される全電子スペクトルと CALET による観測予測.

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

① CALET mission for exploring the high energy universe: S. Torii, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials 132(8) (2012) pp. 603-608.

(査読有) DOI: 10.1541/iejdm.132.603

② 宇宙線を直接捉える: 鳥居祥二, 日本物理

学会誌 67(2012) pp. 821-826.

(査読有) <http://www.jps.or.jp>

③ 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: 仁井田多絵, 鳥居祥二(2), 小澤俊介(3), 笠原克昌(4), 田村忠久(12), 吉田健二(13), 片寄祐作(14), 福家英之(16), 他 (16 名), 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR11-008 (2012) pp. 17-46.

(査読有) <http://www.isas.jaxa.jp>

④ Beam test performance of a scintillator-based detector for the charge identification of relativistic ions:

P. S. Marrocchesi, S. Torii(15) et al. (15 名), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 659 (2011) pp. 477-483.

(査読有) DOI: 10.1016/j.nima.2011.08.034

⑤ Calorimetric electron telescope mission. Search for dark matter and nearby sources: S. Torii for the CALET Collaboration, Nuclear Instruments Methods in Physical Research Section A, Vol. 630, pp. 55-57. (2011)

(査読有) DOI: 10.1016/j.nima.2010.06.026

⑥ Overview of the CALET Mission to the ISS: S. Torii, for the CALET collaboration, Proc. of ICRC, Vol. 6 (2011) pp. 344-347. (査読無) <http://icrc2011.ihep.ac.cn/new.htm>

⑦ Calorimetric Electron Telescope (CALET) to observe cosmic-ray electrons and gamma-rays on the International Space Station: T. Tamura and S. Torii, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, Vol. 623, pp. 428-430 (2010). (査読有)

DOI: 10.1016/j.nima.2010.03.025

⑧ Simulated performance of the calorimetric electron telescope experiment: Y. Akaike, K. Taira, K. Kasahara, S. Torii, Y. Shimizu, T. Tamura, Advances in Space Research 45, pp. 690-697 (2010). (査読有) DOI: 10.1016/j.asr.2009.11.002

⑨ Dark matter model selection and the ATIC/PPB-BETS anomaly: Chuan-Ren Chen, Koichi Hamaguchi, Mihoko M. Nojiri, Fuminobu Takahashi and S. Torii J. Cosmol. Astropart. Phys. JCAP05 (2009) 015 (査読有) DOI: 10.1088/1475-7516/2009/05/015

⑩ CALET Mission on JEM/EF of the ISS: S. Torii for the CALET Collaboration, Journal of the Physical Society of Japan, 78 (2009) Supplement A, pp. 68-73. (査読有) <http://jpsj.ipap.jp>

⑪ Electron Spectrum in 10-1000 GeV from BETS & PPB-BETS and Future Balloon Observation: T. Tamura(1), S. Torii(2), K. Yoshida(3), et al. (26 名), Journal of the Physical Society of Japan, 78 (2009) Supplement A, pp. 57-62.

(査読有) <http://jpsj.ipap.jp>

〔学会発表〕(計 14 件)

- ①CALET プロジェクト:「きぼう」曝露部における高エネルギー宇宙線・ガンマ線観測: 鳥居祥二, 第 14 回宇宙科学シンポジウム, (JAXA 宇宙科学研究所・相模原), 2014. 1. 9
- ②CALET 実験と高エネルギー電子観測: 鳥居祥二, 日本物理学会秋季大会 宇宙線・宇宙領域シンポジウム 招待講演 (高知大学), 2013. 9. 22.
- ③The Calorimetric Electron Telescope (CALET) for High Energy Astroparticle Physics on the International Space Station: S.Torii, TeV Particle Astrophysics 2013 (University of California, Irvine) 2013. 8. 28.
- ④The Calorimetric Electron Telescope (CALET) for High Energy Astroparticle Physics on the International Space Station: S.Torii, 33rd International Cosmic Ray Conference (Rio de Janeiro, Brazil) 2013. 7. 5.
- ⑤The CALET mission for high energy astroparticle physics on the International Space Station: K.Yoshida, 39th COSPAR Scientific Assembly (Mysore, India), 2012. 7. 17
- ⑥Cosmic-ray Electrons and Atmospheric Gamma-rays in 1-30 GeV Observed with Balloon-borne CALET Prototype Detector: T.Niita, 39th COSPAR Scientific Assembly (Mysore, India), 2012. 7. 18
- ⑦Performance of the CALET Calorimeter by CERN-SPS Beam Test: Y.Akaike, 39th COSPAR Scientific Assembly (Mysore, India), 2012. 7. 19.
- ⑧Collaboration for Calorimetric Electron Telescope (CALET) on the International Space Station: S.Torii, 11th Japan-Italy Joint Committee on Cooperation in Science and Technology, (Tokyo), 2011. 5. 15.
- ⑨CALET Mission for Japanese Experiment Module on ISS: S.Torii, 38th COSPAR Scientific Assembly, (Bremen, Germany), 2010. 7. 20.
- ⑩Electron observation with the balloon borne CALET prototype detector: K.Yoshida, 38th COSPAR Scientific Assembly, (Bremen, Germany), 2010. 7. 21.
- ⑪The Future Prospects for Electron Measurements, the Frontier above 1 TeV: S.Torii, The 11th Meeting of the American Astronomical Society High Energy Astrophysics Division, (Hawaii, USA), 2010. 3. 2.
- ⑫High energy Electron Spectrum from PPB-BETS Experiment in Antarctica: Kenji Yoshida, The 11th Meeting of the American Astronomical Society High Energy Astrophysics Division, (Hawaii, USA), 2010. 3. 3.

⑬The CALET mission to search for the nearby cosmic-ray sources and for dark matter: S.Torii, Focus week on indirect dark matter search, (IPMU, University of Tokyo, 2009. 12. 9

⑭宇宙線電子・陽電子観測の現状と将来(招待講演): 鳥居祥二, 日本物理学会秋季大会 (甲南大学), 2009. 9. 13.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.crlab.wise.sci.waseda.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鳥居 祥二 (TORII, Shoji)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 9 0 1 3 6 7 3 6

(2) 研究分担者

田村 忠久 (TAMURA, Tadahisa)
神奈川大学・工学部・教授
研究者番号: 9 0 2 7 1 3 6 1

吉田 健二 (YOSHIDA, Kenji)
芝浦工業大学・システム工学部・教授
研究者番号: 9 0 2 6 0 9 8 4

(3) 連携研究者

笠原 克昌 (KASAHARA, Katsuaki)
早稲田大学・理工学術院 (理工学研究所)・
招聘研究員
研究者番号: 0 0 0 1 3 4 2 5

小澤 俊介 (OZAWA, Shunsuke)
早稲田大学・重点領域研究機構・次席研究員
研究者番号: 6 0 5 0 6 7 1 5

片寄 祐作 (KATAYOSE, Yusaku)
横浜国立大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 9 0 3 2 3 9 3 0

森 正樹 (MORI, Masaki)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号: 8 0 2 1 0 1 3 6

福家 英之 (FUKE, Hideyuki)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙
科学研究所・助教
研究者番号: 1 0 3 9 2 8 2 0

西村 純 (NISHIMURA, Jun)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙
科学研究所・名誉教授
研究者番号: 4 0 0 1 3 0 1 9