

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 7 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21403004

研究課題名（和文）CERN-SPS 加速器による宇宙線電子・ガンマ線観測装置の較正実験

研究課題名（英文）Calibration test of a detector for cosmic-ray electrons and gamma rays at CERN-SPS

研究代表者

田村 忠久（TAMURA TADAHISA）

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：90271361

研究成果の概要（和文）：CERN-SPS 加速器を用いたビーム照射実験によって、宇宙線観測装置 CALET のプロトタイプ検出器の性能評価を行った。検出器の各層でのエネルギー損失、シャワー軸再構成、粒子選別の解析を行い、エネルギー分解能、角度決定精度、粒子選別能力などの検出性能を確認することができた。また、それらをシミュレーションと比較することで、実機におけるデータ解析でも必須となるシミュレーションの把握も行えた。

研究成果の概要（英文）：We studied the performance of cosmic-ray detector CALET and calibrated it with the CERN-SPS accelerator. We made analyses of energy deposits in each detector layer, reconstruction of shower axes, and separation of electrons and protons. As a result, we obtained energy resolutions, angular resolutions, and rejection powers against protons. We compared them with simulated results, and it improved our understanding of the simulations which would be indispensable for data analyses of a flight model.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2010 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2011 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：宇宙線

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線電子、ガンマ線、スペースステーション、日本実験棟「きぼう」、CALET、暗黒物質、宇宙線原子核、宇宙線加速・伝播

1. 研究開始当初の背景

本研究を行うまでに、我々は国内の気球実験 BETS と南極周回気球実験 PPB-BETS によって電子観測を行い、10～1000 GeV 領域の電子強度を得ていた。PPB-BETS の結果では、統計精度が充分ではないものの 500～600 GeV 付近で冪型スペクトルからの約 3σ の電子過剰が見られる。これは、近傍超新星または暗黒物質からの影響の可能性がある。

他の実験でも、エマルジョン・チェンバー実験や、本来は原子核成分の観測装置である米国の ATIC が我々の成果に触発されて電子成分の解析を行った結果にも、同様な過剰が見られる。これらの結果を後押しするように、イタリアの PAMELA 衛星による 1.5～100 GeV の電子陽電子観測が、高い統計精度で陽電子比のスペクトルを出した。それは暗黒物質候補である余剰次元模型の

Kaluza-Klein 粒子からの予測と合っている。

このように、100 GeV を超える電子観測はにわかに活気を帯びた状況にあり、過剰が存在するとすれば、それが暗黒物質なのか、または電子加速源としての近傍超新星の影響なのかを突き止めたい。決定的な結論を出すために、我々が推し進めている CALET によるスペースステーションでの宇宙線観測の実現が急務となっている。

2. 研究の目的

宇宙線電子・ガンマ線観測計画 CALET は 1 GeV~20 TeV の電子観測を主目的とし、20 MeV~数 TeV のガンマ線、10 GeV ~1000 TeV の原子核の観測も目指している。検出器は、気球観測 (BETS、PPB-BETS) の経験と実績が基になっており、CALET 採択までの開発期間は 10 年に及ぶ。

CALET は、JAXA において 2010 年 3 月より開発フェーズへ移行した。JAXA および BETS、PPB-BETS メンバーが中心となった日本の研究機関が共同で開発を進めており、米国とイタリアも計画に参加している。宇宙ステーションへの打上げ予定は 2014 年であり、日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォームに取付けられる。我々は、シミュレーション、加速器ビーム実験、気球実験を実施することで装置の性能評価、開発製作を推進している。本研究では、CERN-SPS 加速器の電子・陽子ビームを用いた照射実験を 2009~2011 年の間に段階的に行って、装置性能の検証と較正を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) CALET の検出器は、我々が気球実験のために開発したシャワー粒子をシンチファイバーで画像としてとらえるイメージングカロリメータ (IMC) がもとになっている。IMC は、長さが 448 mm で断面が 1 mm 角のシンチファイバーを並べてベルト状にして X 方向と Y 方向に重ねたもの 8 層の間に、物質層としてタングステン板 7 枚 (計 3 放射長) を積み重ねた構成である。これに、さらに高エネルギー領域の観測を可能にするためにエネルギー分解能と粒子選別能力を増強する PWO シンチレータを用いた全吸収型カロリメータ

(TASC)、そして原子核観測のために追加した電荷検出器 (CHD) の組み合わせからなる。PWO は長さ 326 mm で、断面が 20 mm×19 mm であり、一層に 16 本を並べ、XY 方向を交互に 12 層 (計 27 放射長) 積層する。図 1 の左図は CALET に 1 TeV の電子が入射したときに発生するシャワーのシミュレーションである。これを検出器の X 方向に読み出した画像データが右のようになる。以下に年度毎の研究方法を述べる。

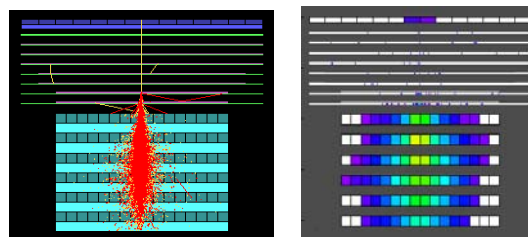


図 1 : 電子 1 TeV (シミュレーション)

(2) 初年度である 2009 年度には、IMC と TASC の部分的な性能評価試験を 8 月と 11 月に CERN-SPS の T2-H4 ビームラインにて電子、陽子、ミュー粒子のビームを用いて行った。8 月の実験では、TASC の結晶シンチレータ (BGO、PWO) を PD (フォトダイオード)、APD (アバランシェ PD)、PIN-PD 等の光検出器で読み出す試験を行い、11 月には TASC についての実験を主に行った。

(3) 2010 年度には、同じく CERN-SPS の T2-H4 ビームラインでのビーム照射実験を 9 月に行った。CALET は、2010 年 3 月に JAXA の開発フェーズに移行していたので、IMC と TASC について実機の部分的なプロトタイプを製作し、電子、陽子、ミュー粒子を照射した。IMC については X 方向のみではあるが 32mm 幅のシンチファイバーベルト 8 層にタングステンを 3 r. l. 分挿入したものを製作した。また、TASC については PWO 結晶シンチレータ 2 本を 8 層に組み、それを PMT や PD/APD で読み出した。さらに、IMC のシンチファイバーベルトの読み出しに用いる 64ch マルチアノード PMT のラストダイノード信号と、TASC 最上層の PWO を読み出す PMT 信号によるトリガーのテストも行った。

(4) 最終年度の 2011 年度も、CERN-SPS 加速器の T2-H4 ビームラインにおいて 9 月に電子、陽子、ミュー粒子の各ビームをプロトタイプ検出器に照射した。前年度のプロトタイプ検出器に対して、TASC については PWO を 1 層あたり 3 本にし、さらに実機と同じ 12 層に増強した。これにより、検出器の構成は、幅が IMC で実機の 1/14、TASC で同じく 1/8 であること以外は、粒子の通過する深さ方向では実機と同じ構成を実現して性能評価を行うことができた。

4. 研究成果

(1) 初年度の TASC の試験では、電子等の入射粒子によって検出器内で発生するシャワー粒子が光センサ (PD、APD) を直接通過するような場合の影響がどの程度になるかを試験した。シャワー粒子数が最大となるシャワー最大発達点付近での測定を行う必要があったが、CALET の TASC では PWO 結晶を用い

るが、その保有数に限りがあったため、光センサを取り付ける PW0 の前には鉛を代替品として置いた。厚み 2cm の PW0 は 4 本で 8.97 放射長なので、それに対応する鉛は 5cm (8.91 放射長) とした。図 2 は、鉛を用いた場合と PW0 のみの場合の電子シャワーの発達をシミュレーションしたものである。これによって、シャワー発達が同程度になるように、鉛板の間隔を調整した。

ビームラインに図 3 のようなセットアップを組み、エネルギーが 50~200 GeV の陽電子ビームを 30° の角度で入射した。PW0 の両端 (ビーム入射位置から見て左側 (L)、と右側 (R)) には、PW0 のシンチレーション光を検出する光センサ (PD、APD) と、その裏側でシャワー粒子のみを検出する遮光したものを重ね合わせて取り付けられた。

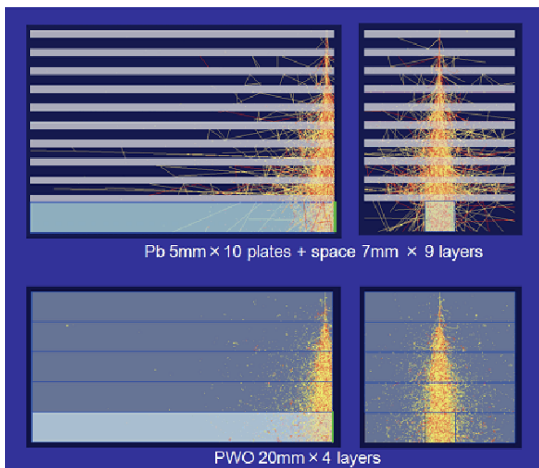


図 2 : 電子 100GeV が上から入射した場合のシャワー発達のシミュレーション。上図は、光センサ (PD、APD) を右端に取り付ける最下部の PW0 の前に 5 mm の鉛板 10 枚を 7 mm の隙間を空けて配置した場合。下図は、PW0 のみで組んだ場合。

図 4 に陽電子 100 GeV を入射したときの結果を示す。図 3 の L 側から 2cm の位置に向かってビームを入射した場合に、シンチレーション光による APD 出力に対するシャワー粒子による APD 出力の割合は、全イベントの 68% 収まるところで 7.7% となった。この影響によって、測定されたシンチレーション光分布のピークは 7% ずれることがわかった。同様に、入射位置 3.2cm では 1.7%、4.3cm ではずれないことがわかった。CALET では、IMC と TASC を合わせてシャワー軸を決定することができるため、それが光センサから 2~3cm になるイベントには補正を加えるか、除去すればよいことがわかった。

(2) 2010 年のビーム実験では、IMC と TASC のプロトタイプ検出器に電子、陽子、ミュー

粒子の各ビームを入射した。シャワー中の荷

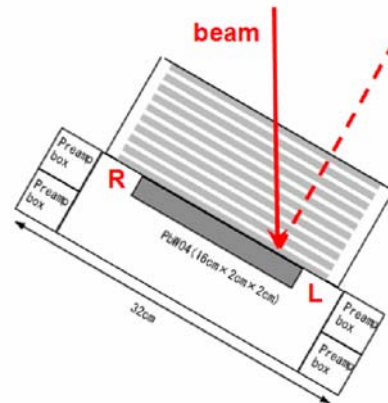


図 3 : 検出器のセットアップ (2009 年)。

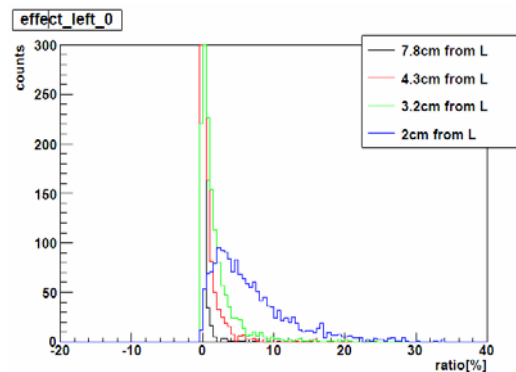


図 4 : 陽電子 100 GeV を入射したときの、図 2 の L 側の APD へのシャワー粒子の影響。横軸は、シンチレーション光による APD 出力に対するシャワー粒子による APD 出力の割合。縦軸はイベント数。

電粒子をシンチファイバーや PW0 シンチレータによって検出することによって、エネルギーや入射角度を決定するとともに入射粒子の判別も行う。ミュー粒子は、最小電離損失粒子によるゲインキャリブレーションに用いた。

陽子ビームについては十分な陽子の純度が得られなかったが、ミュー粒子ビームによって得られた 1 MIP (Minimum Ionizing Particle) のデータはシミュレーションをよく再現した。そして、電子ビームによって得られたデータについては、ミュー粒子によって得られた ADC 値の MIP 換算を施してシミュレーションと比較したところ、IMC や TASC 各層でのエネルギー損失、シャワーカーブ、エネルギー分解ともに、実験データとシミュレーションが良く一致する結果が得られていることを確認できた。

(3) 2011 年のビーム実験では、TASC の PW0 を 2010 年の 2×8 本から図 5 のように 3×12 本に増強し、ミュー粒子 23 万イベント、(陽)電子 38 万イベント、陽子 195 万イベントを取得した。取得データをもとに、検出器の各

深さでのエネルギー損失、シャワー軸再構成、

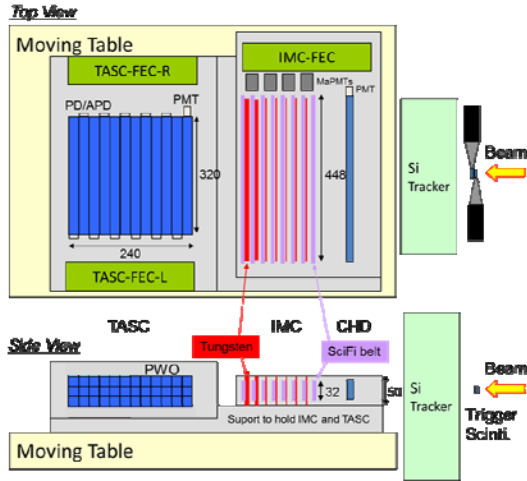


図 5：2011 年のプロトタイプ検出器のセットアップ。上図は上面図、下図は側面図。

粒子選別の解析を行い、エネルギー分解能、角度決定精度、粒子選別能力などの検出性能を確認することができた。それらのシミュレーションデータとの比較も行った。

図 6 は、電子 10 GeV を垂直入射したときの IMC の各層でのエネルギー損失分布である。シミュレーション (EPICS) とわずかなずれが見られるのは、ビームライン上流にある計数装置等の影響と考えられる。その物質量は 0.2 放射長分に対応する。

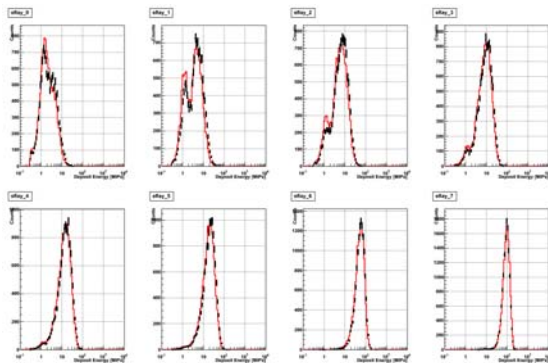


図 6：電子 10 GeV を入射したときの IMC の各層でのエネルギー損失分布。横軸は最小電離損失粒子 (MIP) に換算したエネルギー損失、縦軸はイベント数。赤線は EPICS によるシミュレーション、黒はビーム実験データの解析結果。

図 7 は電子を垂直入射したときの各入射エネルギーに対して、TASC の各 PWO でのエネルギー損失の合計によるエネルギー決定の精度である。縦軸のエネルギー分解能の定義は、各入射エネルギーに対して、TASC でのエネルギー損失分布で 68% のイベントが収まる幅を分布の平均値で割ったものである。入射エネルギーが 150 GeV 以上でエネルギー分解能は 2% を切っている。シミュレーションとの

差については、まだ詳細な解析が必要である。

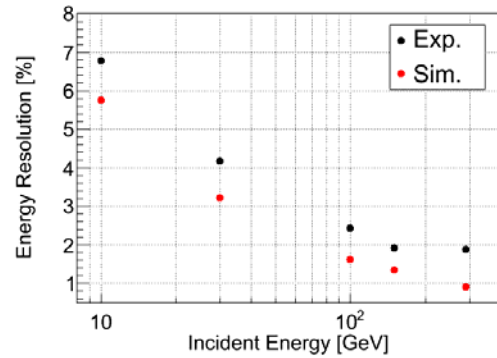


図 7：電子を入射したときのエネルギー分解能の入射エネルギー依存性。黒点がビーム実験のデータ解析結果、赤点が EPICS によるシミュレーション結果。

図 8 は電子を垂直入射したときの各入射エネルギーに対する角度分解能を示す。入射角度を決定するために、IMC と TASC のシャワー画像データにシャワー軸フィッティングを行う。IMC のシャワー画像データには、後方散乱粒子の軌跡も含まれるため、精度を上げるためには、まずはシャワー軸近傍でのエネルギー損失の割合が大きい TASC で仮のシャワー軸を求める。それをもとに、トラッキング精度のより高い IMC へとシャワー軸を追いつけていく工夫を行っている。

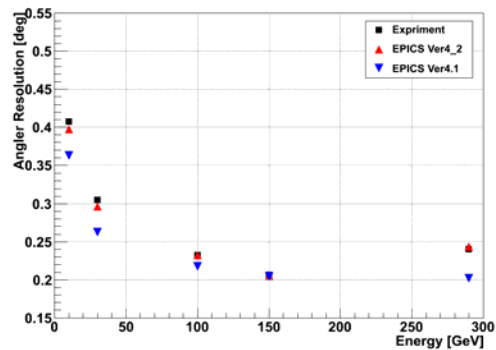


図 8：電子を入射したときの角度分解能の入射エネルギー依存性。黒点がビーム実験のデータ解析結果、赤点と青点は EPICS の異なるバージョンによるシミュレーション結果。

図 9 は、入射粒子の電子を選別して陽子を除去するための解析である。電子シャワーに対して陽子シャワーは横に広がる傾向がある。また、この検出器は放射長が 30 であるのに対して、相互作用長は 1.6 であるため、電子のほうがより早くシャワー発達し、TASC 最下層でのシャワー粒子は少なくなり、陽子は最下層でもシャワー発達が続く。この結果、TASC 全層でのエネルギー損失に対する TASC 最下層でのエネルギー損失の割合は、電子では小さく、陽子では大きくなる。これら 2 つ

のパラメータを縦横の2次元分布にすると、

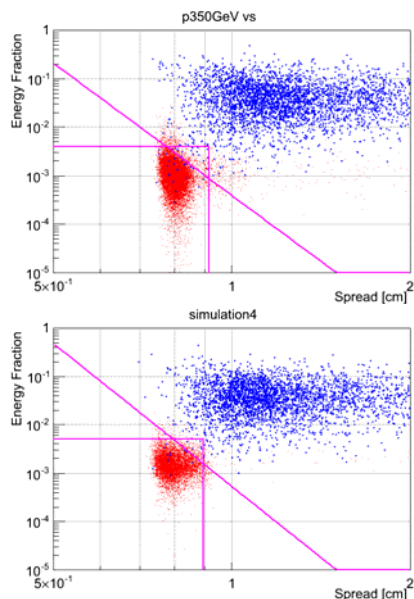


図9：シャワーの横広がり（横軸）とTASCでのエネルギー損失の全層に対する最下層の割合（縦軸）。これによって電子・陽子選別を行う。赤点は電子100 GeV、青点は陽子350 GeV（電子100 GeVと同じ範囲のエネルギー損失をしたイベントを選別）。上図はビーム実験のデータ解析結果、下図は核相互作用モデルとして2.5 GeV以下はphits、それ以上はdpmjet3を用いた。

図9のような閾線によって電子と陽子を選別することができる。電子に対する陽子の削減率を除去能と定義すると、ビーム実験データの場合が 8.1×10^{-5} であるのに対して、シミュレーションでは 5.8×10^{-5} という結果が得られた。若干の差は、さらに詳細な解析を待つ必要がある。

フライトモデルの性能評価は、これまでシミュレーションによっていたが、このプロトタイプモデルを用いたビーム実験によって、その性能を実証するだけでなく、シミュレーションについても把握することができ、本研究の目的が達成された。

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4件）

- ① M. Karube, S. Torii, T. Tamura, S. Ozawa, et al., “Performance of the CALET Prototype: CERN Beam Test”, 32nd INTERNATIONAL COSMIC RAY CONFERENCE, BEIJING 2011, 査読無, Vol.6, 2011, 376-379
- ② Y. Ueyama, S. Torii, T. Tamura, S. Ozawa, et al., “The Event Trigger System for CALET”, 32nd INTERNATIONAL COSMIC RAY

CONFERENCE, BEIJING 2011, 査読無, Vol.6, 2011, 380-383

- ③ Y. Katayose, S. Torii, T. Tamura et al., “Development of a High Dynamic Range Front-End Electronics for the Total Absorption Calorimeter of CALET”, PROCEEDINGS OF THE 31st ICRC, LODZ 2009, 査読無, 2009, <http://www.srl.utu.fi/AuxDOC/kocharov/ICRC2009/pdf/icrc0048.pdf>
- ④ T. Tamura, S. Torii, S. Ozawa, Y. Katayose et al., “Conceptual Design of Data Acquisition System for CALET on the ISS”, PROCEEDINGS OF THE 31st ICRC, LODZ 2009, 査読無, 2009, <http://www.srl.utu.fi/AuxDOC/kocharov/ICRC2009/pdf/icrc0572.pdf>

〔学会発表〕（計19件）

- ① 田村忠久, 鳥居祥二, 小澤俊介, 片寄祐作 他, “CERN-SPSによるCALETプロトタイプ性能実証試験の概要”, 日本物理学会第67回年次大会, 2012年3月24日, 関西学院大学（西宮上ヶ原キャンパス）
- ② 中村政則, 鳥居祥二, 小澤俊介, 田村忠久 他, “CERN-SPSによるCALET-IMCプロトタイプ性能実証試験”, 日本物理学会第67回年次大会, 2012年3月24日, 関西学院大学（西宮上ヶ原キャンパス）
- ③ 吉田圭佑, 鳥居祥二, 小澤俊介, 田村忠久, 片寄祐作 他, “CERN-SPSによるCALET-TASCプロトタイプ性能実証試験”, 日本物理学会第67回年次大会, 2012年3月24日, 関西学院大学（西宮上ヶ原キャンパス）
- ④ 渡邊仁規, 鳥居祥二, 小澤俊介, 田村忠久 他, “CALETで用いる電荷弁別型検出器(CHD)のビーム実験による性能試験”, 日本物理学会第67回年次大会, 2012年3月24日, 関西学院大学（西宮上ヶ原キャンパス）
- ⑤ 田村忠久, 鳥居祥二, 小澤俊介, 他, “CERN-SPS加速器によるCALET-IMCの性能評価”, 第12回宇宙科学シンポジウム, 2012年1月5日, JAXA/宇宙科学研究所（相模原）
- ⑥ 赤池陽水, 鳥居祥二, 小澤俊介, 田村忠久, 片寄祐作 他, “CERN-SPSビームによるCALET-TASC検出器の性能検証”, 第12回宇宙科学シンポジウム, 2012年1月5日, JAXA/宇宙科学研究所（相模原）
- ⑦ 中村政則, 鳥居祥二, 小澤俊介, 田村忠久 他, “加速器ビームによるCALET-IMC用シンチファイバー性能実証試験”, 日本物理学会第2011年秋季大会, 2011年9月16日, 弘前大学
- ⑧ 植山良貴, 鳥居祥二, 小澤俊介, 田村忠久 他, “CALET:CERN-SPSビーム実験による検出器性能評価”, 第11回宇宙科学シンポジウム, 2011年1月7日, JAXA/宇宙科学研究所（相模原キャンパス）
- ⑨ 奥野祥二, 田村忠久 他, “CALET:イメージ

ングカロリメータ (IMC) 前置回路”, 第 11 回宇宙科学シンポジウム, 2011 年 1 月 7 日, JAXA/宇宙科学研究所 (相模原キャンパス)

⑩ 赤池陽水, 鳥居祥二, 小澤俊介, 田村忠久, 片寄祐作 他, “CALETのためのCERN-SPSビーム実験報告”, 日本物理学会第66回年次大会, 2011年5月6日, 講演資料公開サイト

⑪ 荻部樹彦, 鳥居祥二, 小澤俊介, 田村忠久 他, “CALETプロトタイプビームの実験結果とシミュレーションの比較”, 日本物理学会第66回年次大会, 2011年5月6日, 講演資料公開サイト

⑫ 植山良貴, 鳥居祥二, 小澤俊介, 田村忠久 他, “ビーム実験によるCALETトリガーシステムの評価”, 日本物理学会第66回年次大会, 2011年5月6日, 講演資料公開サイト

⑬ 中村政則, 鳥居祥二, 小澤俊介, 田村忠久 他, “ビーム実験によるCALET-IMCの性能検証”, 日本物理学会第66回年次大会, 2011年5月6日, 講演資料公開サイト

⑭ 仁井田多絵, 鳥居祥二, 小澤俊介, 田村忠久 他, “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, 2011年5月6日, 講演資料公開サイト

⑮ 伊藤大二郎, 鳥居祥二, 小澤俊介, 田村忠久, 片寄祐作 他, “CALET-TASCのAPD/PD用前置回路”, 日本物理学会第66回年次大会, 2011年5月6日, 講演資料公開サイト

⑯ 相場俊英, 鳥居祥二, 小澤俊介, 田村忠久, 片寄祐作 他, “PD, APDを用いたPWOによるシャワー検出性能のビーム実験”, 日本物理学会第65回年次大会, 2010年3月22日, 岡山大学津島キャンパス

⑰ 相場俊英, 鳥居祥二, 小澤俊介, 田村忠久, 片寄祐作 他, “CALET開発報告 32: CERN-SPSビームによるTASCの性能評価”, 第10回宇宙科学シンポジウム, 2010年1月8日, JAXA宇宙科学研究本部 (相模原)

⑱ 田村忠久, “ISSでの宇宙線観測ミッションCALET”, 大阪市立大学理学部講演会 (招待), 2010年1月22日, 大阪市立大学理学部

⑲ 相場俊英, 鳥居祥二, 小澤俊介, 田村忠久, 片寄祐作 他, “CERN-SPSビームによるCALETコンポーネントの性能評価”, 日本物理学会2009年秋季大会, 2009年9月13日, 甲南大学

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

①国内 CALET ホームページ

<http://www.calet.rise.waseda.ac.jp/>

②米国 CALET ホームページ

<http://calet.phys.lsu.edu/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田村 忠久 (TAMURA TADAHISA)
神奈川大学・工学部・教授
研究者番号: 90271361

(2) 研究分担者

日比野 欣也 (HIBINO KINYA)
神奈川大学・工学部・教授
研究者番号: 80260991
奥野 祥二 (OKUNO SHOJI)
神奈川大学・工学部・助教
研究者番号: 90281451
有働 慈治 (UDOU SHIGEHARU)
神奈川大学・工学部・特別助手
研究者番号: 50506714

(3) 連携研究者

鳥居 祥二 (TORII SHOJI)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 90167536
笠原 克昌 (KASAHARA KATSUAKI)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 00013425
吉田 賢二 (YOSHIDA KENJI)
芝浦工業大学・システム工学部・准教授
研究者番号: 90260984
片寄 祐作 (KATAYOSE YUSAKU)
横浜国立大学・工学系研究科・准教授
研究者番号: 90323930
小澤 俊介 (OZAWA SHUNSUKE)
早稲田大学・理工学術院・講師
研究者番号: 60506715