

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2014

課題番号：23244051

研究課題名(和文)大面積・半導体チェレンコフ・カメラの開発研究とその実証

研究課題名(英文)Development and verification of a large-area semiconductor Cherenkov camera

研究代表者

田島 宏康 (TAJIMA, HIROYASU)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授

研究者番号：80222107

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、本質的に光効率の高い半導体光電子増倍素子を高密度に配列することでチェレンコフ望遠鏡の光検出器としての要求を満たすことを検証した。並行して、高密度読み出しを可能とする高速波形記録集積回路を開発し、その試作モジュールをチェレンコフ望遠鏡試作機に搭載し、宇宙線による空気シャワーの信号を撮像することに成功し、その性能を現実的環境下で実証した。

研究成果の概要(英文)：Silicon photomultiplier (SiPM) has intrinsically high photon efficiency. We have verified that a dense array of SiPM satisfy requirements for a photosensor of a Cherenkov telescope. In addition, we have developed application specific integrated circuits (ASICs) for high speed waveform recording in order to process signals from a dense array of SiPMs. We have built a prototype camera using those ASICs and installed in a prototype Cherenkov telescope. Using this prototype telescope, we have verified the performance of the camera in the real-life environment by successfully taking images of air showers produced by cosmic rays.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線 宇宙物理 素粒子実験 放射線

## 1. 研究開始当初の背景

1990年代のコンプトン・ガンマ線衛星によって開花したガンマ線宇宙物理学は、2000年代の H.E.S.S., MAGIC, VERITAS などのチェレンコフ望遠鏡の活躍により TeV ( $10^{12}$  電子ボルト) 領域のガンマ線へエネルギー帯域を伸ばし、さらに Fermi 衛星によりガンマ線天体の数が 1000 を超えるなどその発展期を迎え、パルサーからのガンマ線放射、宇宙線の起源、宇宙での非熱的過程、活動銀河やガンマ線バーストの相対論的ジェット、銀河間空間を満たす赤外・可視領域背景放射等の問題が徐々に解き明かされつつある。中でも、H.E.S.S.による超新星残骸のガンマ線画像や、Fermi 衛星によるガンマ線バーストからの第 2 のガンマ線放射成分の発見などは記憶に新しい。

この研究分野をさらに飛躍的に発展させるため、ヨーロッパではチェレンコフテレスコープアレイ計画 (CTA) が、米国では Advanced Gamma-ray Imaging System (AGIS) が提案され、検討が進められてきた。近年我々日本グループが CTA に参加し、米国の AGIS も 2010 年になって CTA に合流するに至り、CTA は日米欧を中心とする次世代高エネルギーガンマ線観測施設として世界で唯一の国際共同研究施設となる。さらに Fermi 衛星が 2018 年頃には運用を終える可能性が高いことを考えると、高エネルギーガンマ線観測施設としてさらに重要性を増す。

CTA は、低エネルギー帯域に感度を持つ大口径 (~24 m)、中間エネルギー帯域に感度を持つ中口径 (~12 m)、高エネルギー帯域に感度を持つ小口径 (~6 m)、三種類のチェレンコフ望遠鏡 60 台からなり、図 1 に示すように数 10 GeV から 100 TeV までの広いエネルギー範囲での観測を可能とし、銀河系内、銀河系外の高エネルギー天体を観測する。およそ 1 年の観測時間 (有効観測時間 1000 時間) で TeV ガンマ線領域において初めて全天の走査が可能で、10 mCrab (mCrab はかに星雲の 1000 分の 1 の強度) の感度で全天のガンマ線強度分布を作成する予定である。個々の興味深い天体に関しては、より長時間の観測により 1 mCrab の感度で観測が可能である。

ただし、CTA では開発要素を極力排して早期の実現を優先して設計しているため、必ずしも現状の技術的可能性を有効に利用して性能の向上に寄与させることができていない。特に 10 GeV 付近とそれ以下のエネルギー帯域は、将来的に Fermi 衛星が運用を終えると大きな空白となることが見込まれ、多波長観測には大きな問題となる。観測エネルギー閾値の下限を向上させるためには、望遠鏡の大型化や光検出器の量子効率の改善によるチェレンコフ光の収集効率の改善が有効である。しかし、望遠鏡の大型化は費用がその口径の 3 乗程度に比例して増大するため、CTA に採用された 24 m 程度が実質的な限界

である。(建設中の H.E.S.S.-II では、27 m の口径を採用しているが、技術的危険度が高く費用も膨大である。) 従来からチェレンコフ・カメラに用いられている光電子増倍管の量子効率の改善は、光電面の改良等で進んでいるが、最先端のウルトラ・バイアルカリ光電面でもピーク値でようやく 45% を達成したに過ぎない。その上、光電子の収集構造の制限から全ての光電子増倍管に採用できるわけではない。

そこで本研究では、本質的に量子効率が良い (~70%) 半導体光電子増倍素子 (以後、SiPM と略す) を採用した大面積のチェレンコフ・カメラを開発・実証し、将来的に CTA の性能向上に貢献することを目指す。

## 2. 研究の目的

本研究では、本質的に量子効率の高い半導体光電子増倍素子を高密度に配列した開口率が高く大面積のモジュールを組み立てる技術を開発し、研究代表者が開発を進めた高密度読み出しを可能とする高速波形記録集積回路を組み合わせた大面積・半導体チェレンコフ・カメラを実用化する。その試作モジュールを稼働中のチェレンコフ望遠鏡に搭載し、その性能を現実的環境下で実証することを目的とする。この実証試験により、チェレンコフ望遠鏡の観測可能帯域を 10 GeV 以下まで広げる目途がつけられ、赤方偏移 4-6 までの活動銀河核・ガンマ線バーストなどの銀河系外天体の詳細な観測につながる。

## 3. 研究の方法

本研究では、SiPM の中でも最も有望な浜松ホトニクス製の 6 mm 角の Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) を高密度で  $8 \times 8$  の配列で並べた MPPC モジュールを開発する。この 6 mm MPPC 素子は、3 mm で分けられ  $2 \times 2$  の 4 チャンネル構成になっているが、読み出しを束ねて 1 チャンネルとして取り扱う。ただし、市販されている 6 mm 角の MPPC の外形寸法は  $9.0 \times 8.2 \text{ mm}^2$  であるため、9 mm 間隔で配列すると開口率が 44% となり損失が無視できない。より高密度の実装を可能にするため、MPPC をケースなしの状態で購入し、6.4 mm 角の裸素子を 6.6 mm 間隔で配列する。この措置により、 $8 \times 8$  の MPPC を封止するためのケース等による 1 mm 幅の損失を考慮しても 76% の開口率を実現でき、最も開口率の大きな部類の Multi-anode 光電子増倍管 (以下、MAPMT と略す) である H8500 の 89% と比較しても遜色ないレベルに達する。この方法で実現されるモジュールの外形寸法も約 5.5 cm で、H8500 の 5.2 cm とほぼ同等となり、代替品として取り扱うことが可能となる。天頂からのチェレンコフ光の波長分布で重み付けした有効量子効率に開口率を掛け合わせた有効検出率は、MPPC で約 34% となり、市販されている H8500 の 15% (バイアルカリ)

と比較してかなり良好である。ただし、H8500は有効検出効率20%程度が見込まれるスーパー・バイアルカリ光電面も特注で入手可能である。

前述のMPPCモジュールを読み出すためには、5.5 cm角に64チャンネルという高密度の電子回路が必要となる。研究代表者が開発を進めきた高速波形記録集積回路(固有名称: TARGET ASIC)は、16チャンネルの同時読み出しが可能で、トリガー回路やアナログ・デジタル変換回路も内蔵している。このため、このLSIとField Programmable Gate Array (FPGA)と少数の電子部品だけで電子回路モジュールを構成でき、MPPCの高密度読み出しには最適である。また、このLSIは、他の類似したLSIと比較して4倍以上の記録時間を持つため、トリガー待ち時間に余裕を持つ特徴がある。ただし、MAPMTに最適化して開発されたため、増幅率の違い等を考慮して若干の改良を加えて製造する。電子回路モジュールは、すでに試作機が存在し、性能試験を行っている。本研究では、MPPCの増幅率が温度に依存することから、バイアス電圧を調節して温度補償する機能を追加する。この温度補償回路は、似たような温度特性を持つ半導体光素子であるAvalanche Photo-Diode (APD)で実用経験があり、その性能は実証されている。

こうして製作した電子回路モジュールとMPPCの8×8配列モジュールを組み合わせることで、カメラ・モジュールとする。このように、電子回路モジュールとMPPCモジュールを独立に構成することにより、MAPMTと交換して使用することが容易となる。また、6 mm角の素子サイズは、光学系の結像能力と比較して小さすぎる傾向にあり、将来さらに大面積のSiPMが安定供給可能になった場合に、簡単な変換基板を用いて容易に対応できる。カメラ・モジュールは、最初は少数を試作し、LED等を用いて量子効率・開口率・波長応答・時間分解能等の基礎特性を測定して、性能が十分であることを確認する。これらの温度依存性も測定して、温度補償回路が期待どおりに動作していることを確認する。前述の試験の結果、必要であればLSI・電子回路・集光器等を修正した後、実証試験に必要な面積を確保できる数のモジュール(約7モジュール)を製作する。

この試作モジュールを現在稼働中のチェレンコフ望遠鏡であるMAGICに搭載し、現実的な使用環境下での性能(光量、時間分解能、温度依存性等)を実証する。前述の通り、MPPCの有効検出効率は、MAPMTをかなり上回る見込みであるが、これらの光検出器の波長応答が異なるため、実際のガンマ線のシャワーからのチェレンコフ光での検出総光量を測定することは、その性能を評価する上で本質的である。

#### 4. 研究成果

本研究の主目的は、量子効率の高い半導体光電子増倍素子(SiPM)を高密度に配列した開口率が大きく大面積のモジュールを組み立てる技術を開発することにある。そのためには、高密度にSiPM素子を配列する技術とその信号を高密度に処理するための高速波形記録集積回路を開発する必要がある。

SiPMをCTAで採用するにあたっては、その特性が光電子増倍管より優れていることを検証する必要がある。そこで、SiPMと光電子増倍管H8500のチェレンコフ光の波長領域における光検出効率を測定し、SiPMの光検出効率が約2倍程度あり非常に有望であることを確認した。ただし、SiPMでは、一つの光子の入射に対して複数の光子に対応する信号を出力するクロストークとよぶ現象があり、クロストークによって入射光子数より大きな電子信号を出力することで、光子数の少ないバックグラウンドをガンマ線シャワーの現象と間違えてしまうことが課題となる。そこで、2013年度にクロストークレートを抑制するSiPM素子を試作し、クロストークレートが1/5以下に改善することを確認したが、光検出効率も低下する副作用があることが判明した。クロストークレートを抑制するための構造が不感領域となることが原因であることがわかっているため、2014年度にクロストークレートの抑制効果を保ちつつ不感領域を当初のSiPM素子と同程度にする改善をした素子を試作した。2015年には、さらに当初のSiPM素子より不感領域を補足した素子を開発し、光検出効率とクロストークレートで当初の素子を上回る特性を持つことを確認した。図1は、光検出効率(PDE)とクロストークレートの測定結果を示している。当初のSiPM素子(黒線)と比較すると、最新のSiPM素子(LCT5)は低いクロストークレートで高いPDEを達成している。SiPMは数十ミクロンの増倍セルの集まりで、セルが大きいほど不感領域の割合が減りPDEが高くなることがわかっているが、同時にクロストークレートも高くなる。今回の測定では、クロストークレートが6%以下の領域では、セルの大きさが50 μmのSiPM素子(LCT5-50-x)の方が75 μmのSiPM素子より高いPDEを持つものに対して、クロストークレートが6%以上の領域では、75 μmのSiPM素子の方が高いPDEを持つことがわかった。また、3 mm角の素子(LCT5-xx-3)は、6 mm角のSiPM素子(LCT5-xx-6)よりも高いPDEを持つことがわかったが、原因を調査中である。また、浜松ホトニクス以外の製造業者(SensL)のSiPM素子(FJ-35-6)も同様に測定したが、PDEがあまり高くないことがわかった。

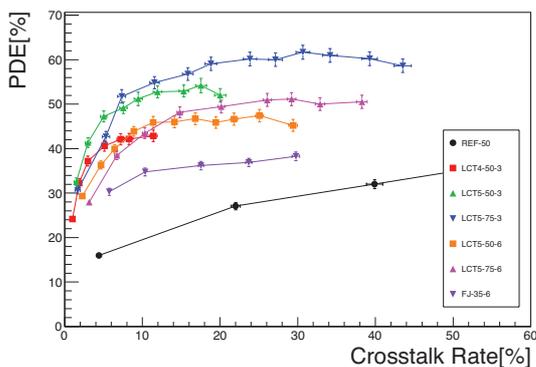


図 1: SiPM の光検出効率(PDE)とクロストークレートの測定結果

個々の SiPM 素子の性能向上と並行して、SiPM 素子の高密度実装による開口率の向上にも取り組んだ。本研究開始当初は、SiPM 素子と基板は、ワイヤーボンディング接続のための電極等で不感領域が発生していた。しかし、2013 年度にシリコン素子の裏側まで電極を貫通する技術(TSV)が実用化され、SiPM 素子の裏側で直接接続することで、ワイヤーボンディング接続による不感領域がなくなり、SiPM 素子を 0.2 mm 程度の間隔で配列できるようになった。その結果、6 mm 角の SiPM 素子で本研究の目標の一つであった 75%の開口率を大きく上回る 90%以上の開口率が実現できるようになった。これは、MAPMT の 89%も上回り、SiPM 素子の光検出効率と開口率を合わせると、SiPM は MAPMT の 2.4 倍以上の光検出効率を達成できることになる。ただし、現状では 3 mm 角の SiPM 素子の方が高い PDE を持つが、開口率は 86%程度に低下する。さらに、3 mm 角の SiPM 素子の開口率を改善するため、レンズで不感領域の光を有感領域に集光する方法について、シミュレーションを用いて調査した結果、95%程度の開口率を実現できることを確認し、3 mm 角の SiPM 素子でも使用可能であることを検証した。

本研究のもう一つの柱は、高密度の SiPM 信号を処理する高速波形記録集積回路(固有名称: TARGET)を開発することにある。TARGET では、入力波高値を多数の波形記録用キャパシタに一定の時間間隔で記録することによって、1 GHz 以上の高速記録を可能にしているが、長時間の波形記録には非常に多くのキャパシタが入力負荷となり、周波数特性の悪化につながる。実際に第一世代の TARGET では、1024 個のキャパシタに対応する入力容量が原因となり、150 MHz 程度の周波数特性しか達成できなかった。第二世代の TARGET では、キャパシタ構造を 2 重にして初段のキャパシタ数を 64 に制限して入力容量を抑制し周波数特性を改善した。初段のキャパシタは、32 個ずつに分割し、最初の 32 個のキャパシタに波形を記録している間に残りの 32 個のキャパシタの波形情報を後段のキャパシタに転送する。この方法を採用することで、初段の 64 個のキャパシタの

みが入力の負荷なるため、周波数特性は後段のキャパシタ数に依存しなくなる。そのため、第二世代の TARGET では、16,384 個のキャパシタを集積することで 1 GHz において 16  $\mu$ s 以上の波形記録を可能としている。この改良の結果、周波数特性は、要求値の 380 MHz を大きく上回る約 500 MHz まで改善した。

また、第二世代の TARGET では、一定の閾値以上の入力信号を検出してデジタル信号を出力するトリガー回路を集積したが、波形記録回路からの干渉によって検出できる信号閾値が十分に低くできず、要求される性能と比較して 2 倍程度であることが判明した。その問題を解決するため、増幅ゲインにばらつきのある MAPMT に対応するため組み込んだゲイン調節用の回路を削除することで回路を簡素化し、初段のアンプを 2 段にすることでゲインを高め、後段における雑音の影響低減を目指した第三世代の TARGET を開発した。しかし、結果的にアンプを 2 段にしたことかえって雑音が増加し、性能が劣化した。集積回路中の干渉を抑制するには、ガードリング等の導入で回路を分離するなど有効な方法があるが、今後の開発スケジュールを考慮して、TARGET からトリガー回路を切り離して、トリガー用に独立した集積回路を開発するという新たな方針を立てた。そこで、波形記録回路が動作していない状態での第二世代の TARGET のトリガー性能を測定し、図 2 の通り要求を十分に達成していることを検証し、この方法で十分な性能を得る見込みがあることを確認した。

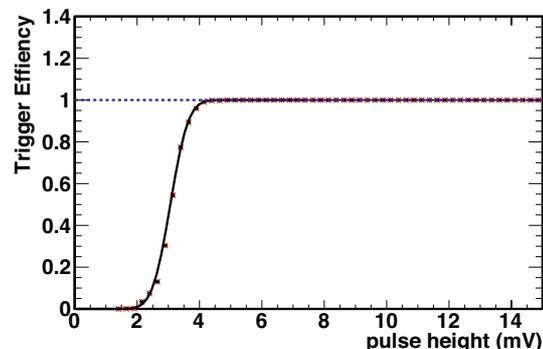


図 2: 第二世代 TARGET のトリガー効率の波高依存性、トリガー効率が 50%になる電圧がトリガー閾値となる。

また、第三世代の TARGET では、デジタル化回路を改良することで波形記録のダイナミックレンジを 50%程度向上させた。図 3 の入力電圧とデジタル出力の対応に示す通り、第二世代 TARGET では 0.7 V から 2.1 V の 1.4 V のダイナミックレンジであり、かつその中での直線性もあまり良くないが、第三世代 TARGET では 0.5 V から 2.5 V と 2 V のダイナミックレンジに改善されており、直線性も大きく改善していることを確認した。

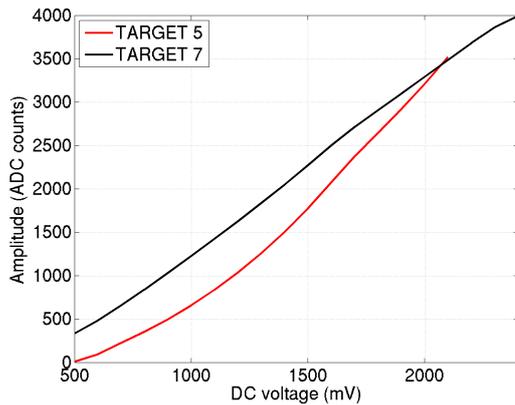


図 3: 第二世代 TARGET (TARGET5)と第三世代 TARGET (TARGET7)のダイナミックレンジ、直線性の比較

集積回路の開発と並行して、SiPM の高密度アレイの信号を処理するためのカメラモジュールを開発した。TARGET は 16 チャンネルの波形記録、デジタル化回路とトリガーなど、カメラの信号処理に必要な基本機能を全て持つため、FPGA と少数の周辺回路で読み出し回路を実現でき、ピクセルあたりの費用を従来の回路の 1/6 以下にできる特徴を持つ。我々のグループが設計、製造した第二世代 TARGET を搭載する 64 チャンネルのカメラモジュール 32 個からなる試作カメラを組み立て、パリ天文台に設置した CTA 小口径望遠鏡の試作機 (図 4) に搭載し、試験観測を実施した。その結果、図 5 に示す通り、CTA の試作望遠鏡では初めて空気シャワーの撮像に成功した。この試験観測により、本研究のもう一つの目的である高密度の高速波形記録集積回路の開発に関して、現実的な環境下での動作実証ができた。



図 4: パリ天文台に設置した CTA 小口径望遠鏡試作機

ただし、この試作望遠鏡では、光検出器に MAPMT を採用しており、本研究の研究目的の一つである SiPM を採用した試作望遠鏡による現実的環境下での実証をすることはできなかった。(現在 SiPM を採用したカメラを制作中) そのため、SiPM の特性を組み込んだモンテカルロ・シミュレーションを実施し、必要な性能を達成できることを確認した。また、SiPM の特性を 5°C から 40°C の範囲で測定し、光検出効率やクロストークレイトに

温度依存性がないことを確認した。今後さらに試作望遠鏡の実データによる検証を進める予定である。

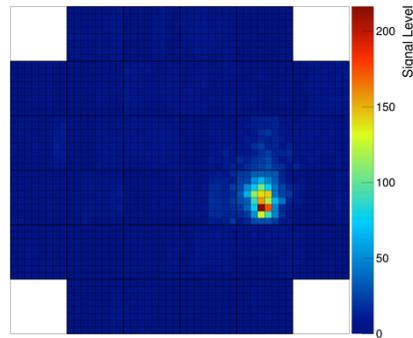


図 5: TARGET 電子回路を搭載した CTA 試作望遠鏡で撮像した空気シャワー

## 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 3 件)

1. 「Development of the camera for the large size telescopes of the Cherenkov Telescope Array」 Inoue, Y. et al., Proceedings of SPIE 9151 (2014) 42 (査読なし)
2. 「Gamma-ray burst science in the era of the Cherenkov Telescope Array」 S. Inoue, et al., Astroparticle Physics, 43 (2013) 252 (査読あり)
3. 「Introducing the CTA concept」 B. S. Acharya, et al., Astroparticle Physics, 43 (2013) 3 (査読あり)

[学会発表] (計 17 件)

1. 「CTA 小口径望遠鏡用焦点面検出器の試作器開発」田島宏康 日本物理学会年会 2015/3/21~2015/3/24 早稲田大学
2. 「Tracking with Fermi LAT Tracker and Detector Development for a Future Satellite」田島宏康 The 23rd International Workshop on Vertex Detectors 2014/9/15~2014/9/19 チェコ共和国
3. 「Search for Dark Matter with Cosmic Gamma-ray Observations」田島宏康 KMI cosmology workshop 2014 2014/11/26 ~ 2014/11/28 Nagoya University
4. 「CTA 報告 85 : Schwarzschild-Couder 型望遠鏡用の焦点面カメラの開発状況」奥村暁 日本物理学会秋季大会 2014/9/18 ~2014/9/21 佐賀大学
5. 「CTA 計画デュアルミラー望遠鏡用の波形記録集積回路の性能評価」河島孝則 日本物理学会秋季大会 2014/9/18 ~ 2014/9/21 佐賀大学

6. 「CTA 計画デュアルミラー望遠鏡用波形記録集積回路のトリガー性能の評価」  
河島孝則 日本物理学会年会 2014/3/27  
～2014/3/30 東海大学
7. 「Quest for Dark Matter with Cosmic  
Gamma-ray Observations」田島宏康  
KMI International Symposium 2013  
2013/12/11 ～ 2013/12/13 Nagoya  
University
8. 「CTA 計画半導体光検出器 MPPC を用いた  
チェレンコフカメラの開発」日高直哉  
日本物理学会秋季大会 2013/9/20～  
2013/9/23 高知大学
9. 「CTA デュアルミラー光学系用焦点面カ  
メラの開発」田島宏康 日本物理学会秋季  
大会 2013/9/20～2013/9/23 高知大学
10. 「CTA 計画 チェレンコフカメラに向け  
た半導体光検出器 MPPC の性能評価及び  
トリガー効率の詳細評価」日高直哉 日本  
物理学会年会 2013/3/26～2013/3/29  
広島大学
11. 「MPPC を用いた Cherenkov Telescope  
Array 焦点面カメラの開発」奥村暁 第4  
回次世代光センサーワークショップ  
2012/12/25～2012/12/26 大阪大学
12. 「CTA 計画に向けた  
Schwarzschild-Couder 光学系とチェレン  
コフ撮像カメラの開発」奥村暁 日本天文  
学会秋季年会 2012/9/19～2012/9/21  
大分大学
13. 「CTA 計画チェレンコフカメラに向けた  
半導体光検出器 MPPC の性能評価及び較  
正法の開発」日高直哉 日本物理学会秋季  
大会 2012/9/11～2012/9/14 京都産業  
大学
14. 「CTA デュアルミラー光学系用の 1 GHz  
波形記録回路 TARGET の開発と性能評  
価」奥村暁 日本物理学会年会  
2012/3/24～2012/3/27 関西学院大
15. 「チェレンコフ望遠鏡焦点面検出器向け  
た半導体光検出器 MPPC の性能評価」  
日高直哉 日本物理学会年会 2012/3/24  
～2012/3/27 関西学院大
16. 「デュアルミラー光学系用のカメラモジ  
ュールの開発と性能評価」奥村暁 日本物  
理学会秋季大会 2011/9/16～2011/9/19  
弘前大学
17. 「Development of an ASIC for Dual  
Mirror Telescopes of the Cherenkov  
Telescope Array」奥村暁 32nd  
International Cosmic Ray Conference,  
2011/8/11～2011/8/18 北京

[その他]

ホームページ等

<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/CR/research/gamma/index.html>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

田島 宏康 (TAJIMA HIROYASU)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授  
研究者番号：80222107

### (3)連携研究者

手嶋 政廣 (TESHIMA MASAHIRO)  
東京大学・宇宙線研究所・教授  
研究者番号：40197778

窪 秀利 (KUBO HIDETOSHI)  
京都大学・理学研究科・准教授  
研究者番号：40300868

折戸 玲子 (ORITO REIKO)  
徳島大学・ソシオ・アーツ・サイエンス研究  
部・助教  
研究者番号：80579417

片桐 秀明 (KATAGIRI HIDEAKI)  
茨城大学・理学研究科・准教授  
研究者番号：50402764

松原 豊 (MATSUBARA YUTAKA)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授  
研究者番号：80202323

山本 常夏 (YAMAMOTO TOKONATSU)  
甲南大学・理工学部・准教授  
研究者番号：40454722