

田島宏康, 奥村暁, 日高直哉, 佐藤雄太, 山根暢仁 (名大STE研), 片桐秀明, 重中茜 (茨城大理), ほかCTA-Japan Consortium

## Abstract

Cherenkov Telescope Array (CTA)は、次世代の超高エネルギーガンマ線観測のための国際共同実験であり、大中小三種類の口径の望遠鏡を適切に配置することで、20 GeV から300 TeV以上のエネルギー領域においてこれまでの十倍の検出感度を実現することを目指す。目標感度を達成するためには、多数の望遠鏡を配置することが必要となるため、費用の最適化が重要な鍵となる。光学系に副鏡を採用する望遠鏡では、焦点距離を短くでき画像が縮小できるため、小さなピクセルの多チャンネル光検出器を活用することで、カメラ費用の大幅な低減を可能にする。我々が開発する小口径望遠鏡用焦点面カメラは、64ピクセルを高密度に配列する約6 cm角のカメラ・モジュール32個で構成される。信号処理には、0.5-1 GHzで波形を記録でき、トリガー回路やデジタル化回路も内蔵する16チャンネルの集積回路を開発することで、少数の電子部品だけでカメラ・モジュール構成することを可能とし、費用の低減と信頼性の向上を実現する。光検出効率を改善するため、光検出器には半導体光電子増倍素子を採用している。現在、小口径望遠鏡用のフルスケールカメラを試作し、カメラとしての総合性能の評価を進めている。

## 小口径望遠鏡

小口径望遠鏡は、1 TeVから100 TeVのガンマ線観測に最適化され、宇宙線のスペクトルが変化する1000 TeV領域までの宇宙線加速源と加速機構の研究を可能にする。10 TeV以上のガンマ線は宇宙赤外線背景放射との相互作用による減衰が激しいため、その観測対象のほとんどは銀河系内のガンマ線源となる。そのため小口径望遠鏡は、銀河面をより広く観測できる南ステーションにのみ設置される予定である。小口径望遠鏡では低費用の望遠鏡を多数設置することで、飛来頻度の少ない高エネルギーガンマ線の検出感度の向上を可能にしている。

従来のDavies-Cotton光学系を基本にした設計では、たとえ望遠鏡口径を小さくしてもカメラには一定の画素数が必要となるため、装置全体の費用を下げるのは困難であった。そこで最近では、副鏡の採用により焦点面上での画像を縮小することで、多チャンネルの光検出器を活用してカメラの費用をさらに低減できる光学系が提案されている。この光学系では非球面鏡が必要となるため、それに付随する費用や、精度の高い光学素子のアライメントおよびその制御の困難が懸念されるものの、小口径ではその要求が緩和されるため、小口径望遠鏡に向けた技術と考えられている。

小口径望遠鏡の一つであるGamma-ray Cherenkov Telescope (GCT)では、日本、イギリス、フランス、オランダ、アメリカ合衆国、オーストラリアが参加して国際共同開発を推進している。図1にGCTの全体図を示す。主鏡と副鏡の口径はそれぞれ4 mと2 m、焦点距離は2.3 mで、焦点面におけるプレートスケール0.026度/mmと9度の視野を実現する。望遠鏡は経緯台で方向制御され、その可動範囲は、水平方向に±270度、垂直方向に91度である。また、市販部品を多用することで費用を最適化している。表1にGCT光学系の仕様を示す。

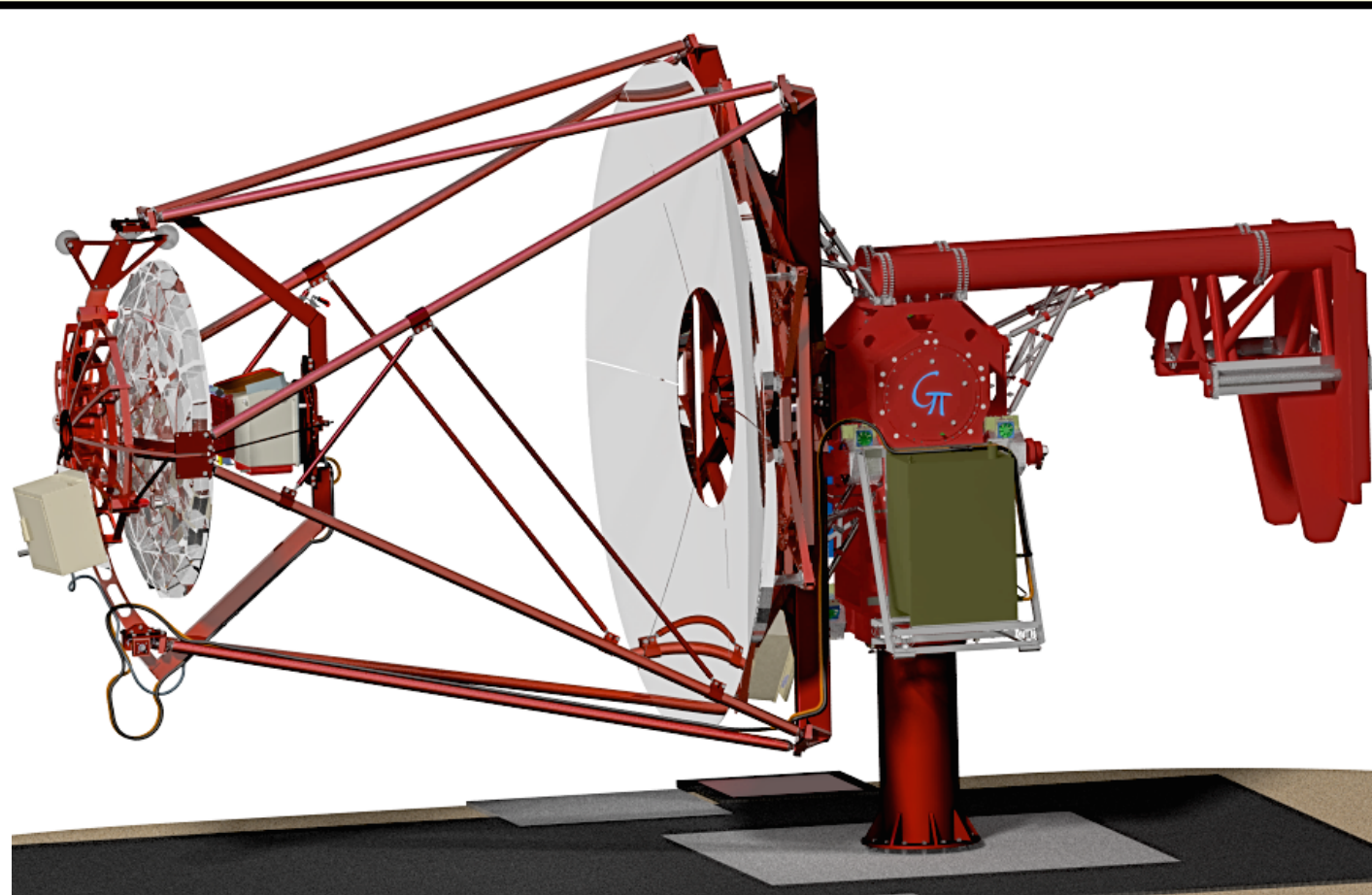


図1 小口径望遠鏡の一つであるGamma-ray Cherenkov Telescopeの概念図 (CTA提供)

表1 Gamma-ray Cherenkov Telescopeの光学系仕様

主鏡直径	4 m
副鏡直径	2 m
焦点距離	2.283 m
プレートスケール	0.026°/mm
視野	9°
重量	9 t

## 焦点面カメラ

GCTに搭載する焦点面カメラは、51.5 mm角のモジュールを図2に示すように32個配列して構成され、約8度の視野を持つ。独立したモジュールから構成することで、組み立て時の取り扱いや故障時の取り替え等を容易にしている。各モジュールは8×8に配列された約6.4 mm角の光検出器(0.17度に相当)とその信号処理電子回路から構成され、各モジュールからのデータは、カメラ後部の処理回路基板上で一括処理された後、中央のデータ収集装置に転送される。表2にGCT焦点面カメラの主要な仕様を示す。

GCT焦点面カメラの光検出器には、光検出効率や信頼性、耐久性に優れた半導体光電子増倍素子を採用する。半導体光電子増倍素子からの電気信号は、その構造的な要因から数百nsの長い減衰時間を持つため、プリアンプ回路で増幅、波形整形して半値幅を10 nsまで短縮することで、素子あたり10 MHz以上が予測される背景夜光からガンマ線事象との重複を最小にする。

プリアンプで整形された電気信号は、専用集積回路TARGETで処理する。TARGETは、一定の大きさの電気信号を検出する波高弁別回路と、1 GHzで波形情報を16 μsまで記録しデジタル化する回路を16チャンネル集積する。各モジュールに搭載された4個のTARGETは、1個のField Programmable Gate Array (FPGA)で制御されるとともに、デジタル化された波形データもFPGAによって処理され、後部の処理基板上に転送される。このように独自開発の集積回路をモジュールに組み込むことで、少ない部品点数で主要な機能を実現し、費用の低減や信頼性の向上に大きく寄与している。

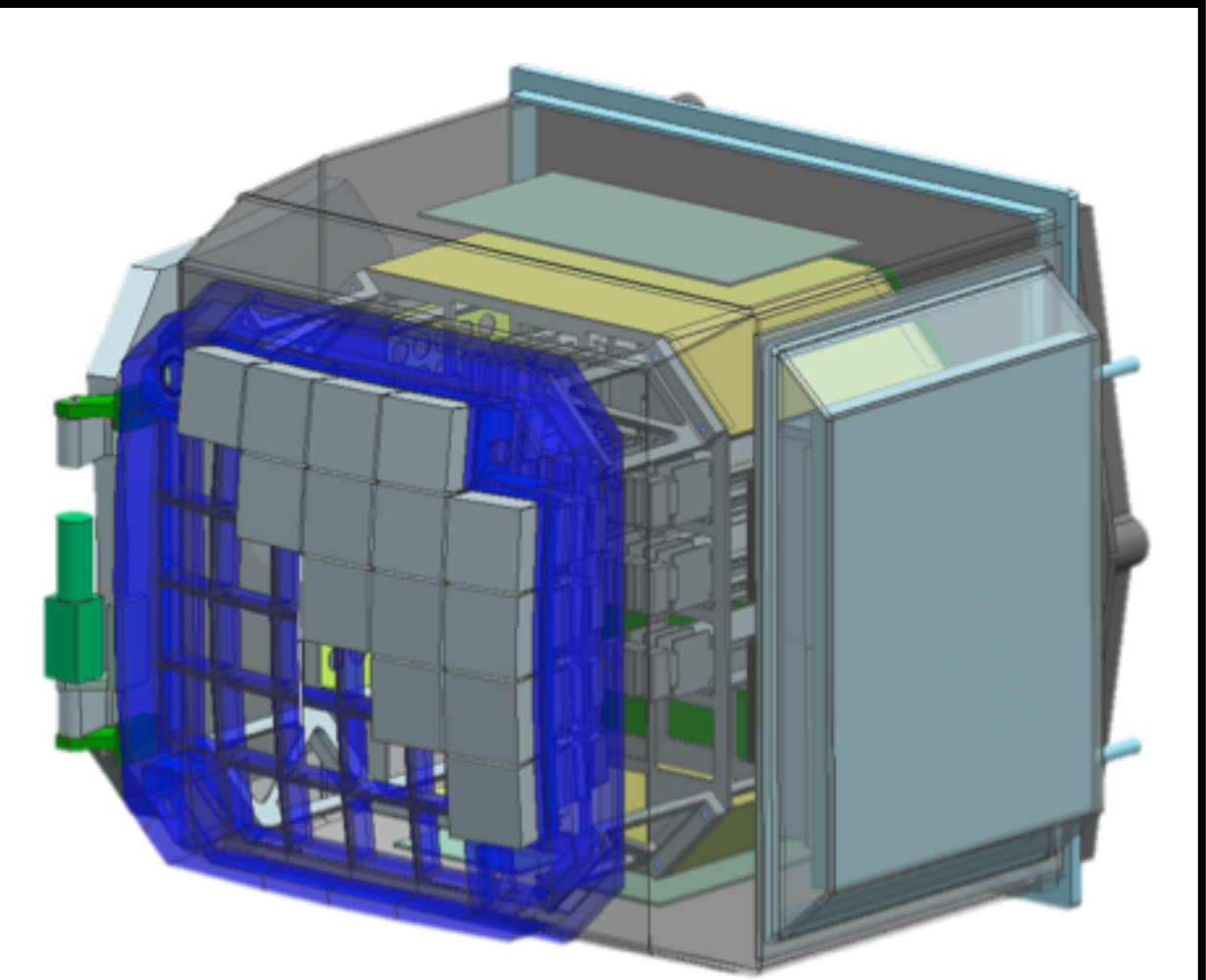


図2 GCTに搭載する焦点面カメラ。紙面手前側に並んだ正方形が光検出器である (CTA提供)

表2 GCT焦点面カメラの主要な仕様

画素数	2,048
モジュール数	32
モジュールあたりの画素数	64
平均画素ピッチ	6.4 mm
視野	8°
重量	75 kg
消費電力	450 W

## 開発状況

GCT焦点面カメラの開発において、日本グループは専用集積回路TARGETの開発・性能評価、半導体光電子増倍素子の開発・性能評価、ソフトウェアの開発で貢献してきている。

専用集積回路TARGETの開発においては、基本設計や仕様決定から主導し、集積回路やそれを搭載した基板の製造、波高弁別回路の性能評価を担当している。第2世代のTARGET集積回路の波高弁別回路の性能評価の結果、検出できる信号レベルが十分に低くできず、要求される性能と比較して2倍程度悪いことが判明したため、図3に示す第3世代のTARGETでは、波高弁別回路とデジタル化回路のダイナミックレンジを改良した。その結果、第2世代のTARGETでは1.4 Vのダイナミックレンジであったが、第3世代のTARGETでは2 Vのダイナミックレンジに改善されていること、かつ直線性も改善していることを図4に示すとおり検証した。残念ながら波高弁別回路の性能は十分でなかったが、波形記録回路からの干渉が原因であることを確認し、第4世代では波高弁別回路と波形記録回路を別の集積回路にすることで解決すること

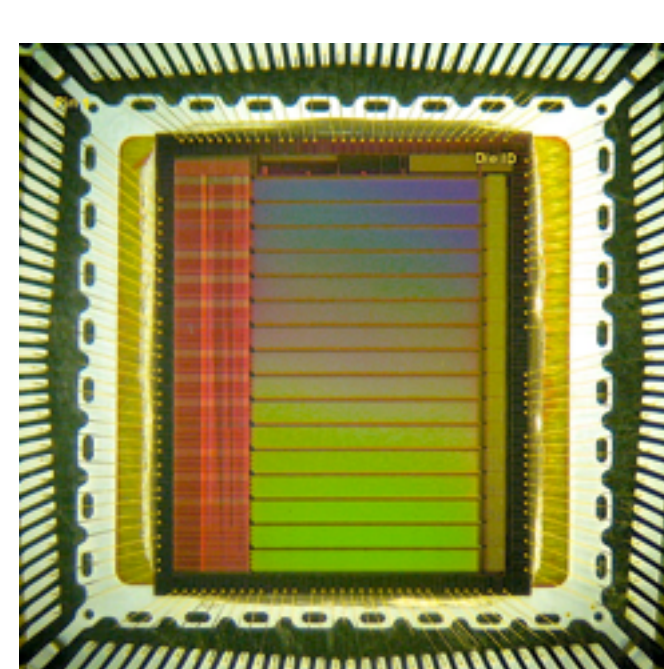


図3 第3世代TARGETの写真

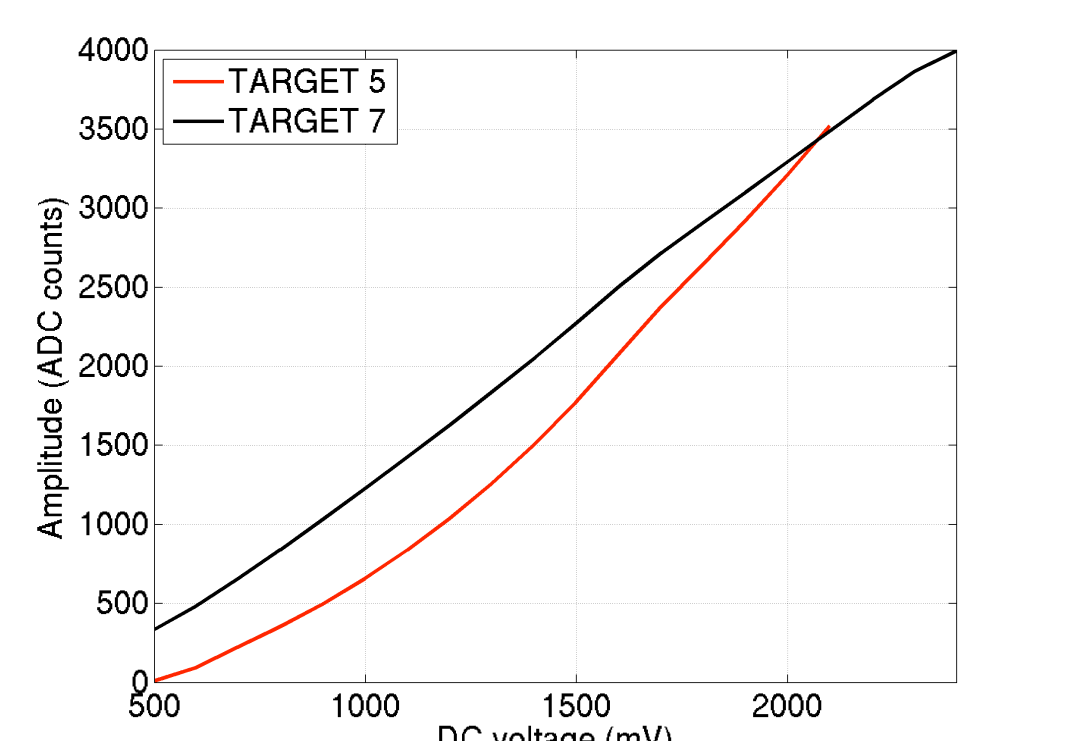


図2 第2世代と第3世代TARGETのダイナミックレンジ、直線性の比較

にした。現在、第4世代の集積回路の製造を完了し、評価を開始しつつある。

半導体光電子増倍素子の開発においては、光電子増幅過程で発生するクロストークと呼ばれる素子特有の現象を抑制することが主な課題となっている。クロストークが発生すると実際の受光量よりも多くの光子が計数されるため、その発生頻度が高いと、背景夜光から1光子しか受光していない場合でも多数の光電子を検出してしまうため、ガンマ線事象との区別が困難となるおそれがある。その影響をシミュレーションで評価するとともに、クロストークを低減した半導体光電子増倍素子の開発を進めている。すでにクロストークを当初の1/10以下に抑制した素子が開発されており、仕様を決定しつつある。

現在、焦点面カメラのプロトタイプを組み立て、その立ち上げに取り組んでおり、データ収集および較正のソフトウェアは、日本グループの奥村が主導して開発している。2015年11月までに実験室での測定を完了し、GCT試作望遠鏡に搭載し、性能検証のための観測を開始する予定である。

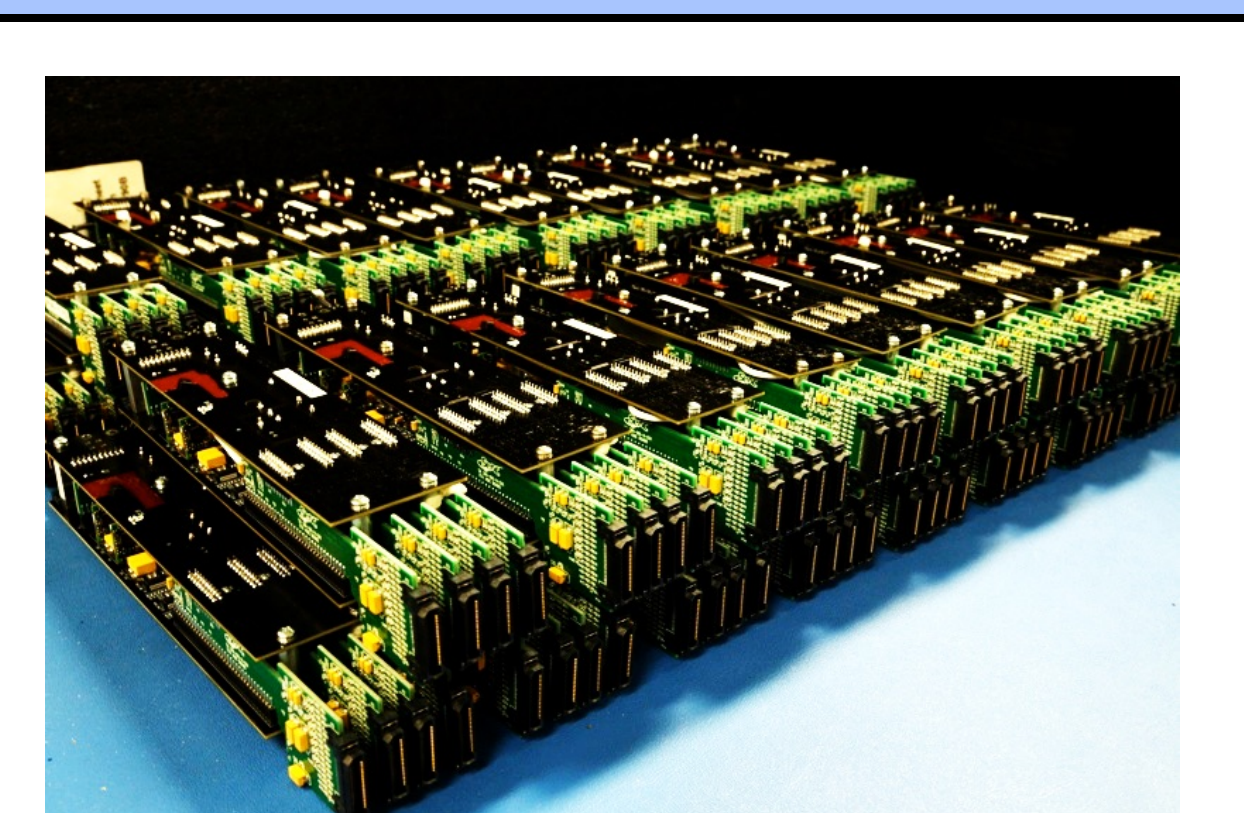


図5 GCT焦点面カメラ用モジュール (上) とカメラプロトタイプ (下) (CTA提供)