

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01940

研究課題名（和文）光子計数法による可視光時間領域天文学の開拓

研究課題名（英文）Time-domain optical astronomy with photon counting technique

研究代表者

中森 健之（Nakamori, Takeshi）

山形大学・理学部・教授

研究者番号：30531876

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：独自に開発したガイガーアバランシェフォトダイオードアレイを用いた、可視光子計数法による高速撮像システムを開発した。16画素センサの信号をFPGAで処理して、100 nsの時間分解能で光子到来時刻を付与するシステムを構築した。また64画素の素子も新たに開発し、視野が大きくなり効率的な観測が実現した。これらのシステムを広島大学かなた望遠鏡に搭載し、電波望遠鏡と連携してかにパルサーを観測した。合わせて、可視光突発現象に対する観測性能を評価するための測光実験を行い、従来にない高速撮像性能を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体センサを用いた、貸天体観測用の超高速撮像カメラ技術が確立した。信号処理系の小型化によって移植性が向上したため、搭載できる望遠鏡の候補が広がり、今後の活用が期待される。これまで実現できなかった、ミリ秒以下の時間分解能を実現できたため、ごく短時間の高度変動を引き起こす、局所的な天体環境の変動にたいするプローブを得た。また、電波望遠鏡と光学望遠鏡との連携した観測ネットワークの基盤を形成できた。

研究成果の概要（英文）：We have developed a high-speed imaging system based on the optical photon counting method using our developed Geiger avalanche photodiode array. 16-pixel sensor signals are processed by FPGA, and a system to acquire photon arrival times with a time resolution of 100 ns is composed. A 64-pixel sensor has also been newly developed, which provides a larger field of view and more efficient observation. These systems were installed on the Kanata Telescope at Hiroshima University, and the Crab pulsar was observed with the radio telescope. In addition, photometry experiments were conducted to evaluate the observational performance of the system for optical transients and high-speed imaging performance was demonstrated.

研究分野：高エネルギー宇宙物理学

キーワード：時間領域天文学 フォトンカウンティング 中性子星 半導体センサ

### 1. 研究開始当初の背景

電波での広域探査で偶然見つかった高速電波バースト (Fast Radio Burst; FRB) は、ミリ秒程度の継続時間で突発的に電波強度が増光する現象である。電波観測から見積もられる距離指標 (dispersion measure) によると、銀河系外に発生源があると考えられている。等方的な放射を仮定して見積もられる総放出エネルギーは  $10^{42}$  erg 程度にも及ぶ。FRB の起源について様々なモデルが提唱されているが、若い中性子星の突発的な巨大パルス起源とするモデル (Cordes & Wasserman, MNRAS, 457,232, 2016 他) や、マグネターと呼ばれる強磁場中性子星のバースト現象を起源とするモデル (Wang et al., ApJ, 852, 140, 2018) がある。

### 2. 研究の目的

本研究は膨大なエネルギーをミリ秒程度の短時間に放出する突発現象である高速電波バースト (FRB) の正体を明らかにすることを目指す。FRB は中性子星・カニパルサーで頻発していることが知られる巨大電波パルス (GRP) との関連が注目されている一方、そもそも GRP の放射機構が未だ十分に理解されていない。本研究は、GRP に同期した可視光放射の探索をマイクロ秒以下の時刻精度で行う。多波長同時観測から放射モデルに強い制限を与え、パルサー磁気圏の放射機構と GRP の起源を明らかにする。GRP の深い理解に基づいて FRB の発生機構に迫る。単光子の検出能力と高速応答性を合わせ持つ半導体光撮像素子を開発して、高感度・高時間分解能の可視光観測を行う。本研究を通じて可視光天文学を時間領域に拡張する観測基盤を構築する。

### 3. 研究の方法

本研究では独自に開発した半導体撮像素子を用いて Crab パルサーの超高速可視撮像観測を行った。このセンサは、高い S/N 比で単光子計数が可能であり、ナノ秒の応答速度を持つため、到来した光子ごとに高い精度のタイムスタンプを付与できる。観測精度を向上させるため 8x8 画素に拡張したセンサを開発し、同時に信号処理とデータ収集系も開発する。そして、電波望遠鏡と連携した Crab パルサーの同時観測を行う。まず電波のデータから GRP の発生時刻を特定した後、パルサーの自転周期ごとに位相分解した可視光子の到来頻度分布を算出し、GRP の有無によって可視光子数の変化を探索する。

### 4. 研究成果

本研究の成果は以下の 3 点に大別でき、以下で順に述べる。

- (1) かなた望遠鏡への搭載実験
- (2) 信号処理系の小型化開発
- (3) 大面積素子の開発と観測実験

(1) について、4x4 画素のガイガー APD アレイセンサを開発し、口径 35 cm の市販望遠鏡で Crab パルサーの周期信号を検出したという論文を出版した。データ収集は汎用の NIM モジュールと VME バス、およびデスクトップ PC で行った。同システムをかなた望遠鏡に搭載して Crab パルサーを観測し、図 1 に示す結果が得られた。定常パルスを 1 秒間の露光で 6 以上の統計的有意度で検出できた。飯館電波望遠鏡と同時観測をしており、GRP との相関を調べた。GRP 数に付随する可視光増光を検出するためには、GRP 数・可視光子数ともにさらにデータを蓄積する必要がある。

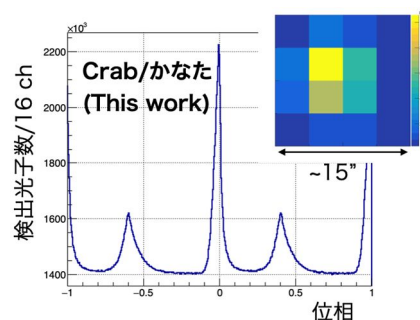


図 1 初期版システムをかなた望遠鏡に搭載して取得した Crab パルサーのパルス波形とイメージ。

(2) について、かなた望遠鏡での観測を通じて直面した課題の 1 つが、信号処理系が大掛かりで重量物であったことである。移植性の向上のためにシステム全体の小型集積化を目指した。まず初めに、専用に設計したフロントエンド回路基板を制作し、要求を満たす増幅率、帯域、デジタル化の動作を確認した。このフロントエンド回路と市販の FPGA 評価ボードを接続し、光子検出時刻の収集システムを構築した。GNSS モジュールと接続することで絶対時刻の取得と安定した時刻精度を実現した。100 ns の時間分解能で単光子検出時刻が記録できることを、実験室中の LED 照射実験により実証した。3 軸ステージを搭載した治具を再設計し、より扱いやすい観測システムを組み上げた。観測できる治具とソフトウェア群も整備した。特に、合焦と導入に不可欠なモザイク撮像システムを FPGA 系に対応させた。

この16画素+FPGAシステムをかなた望遠鏡に搭載し、Crab パルサーの観測を行った。そのときの様子を図 2 に示す。1秒間の露光で有意なパルス信号を検出し、動作実証ができた。また飯館電波望遠鏡と同時観測も実施できた。その一方で、かなた望遠鏡の撮像データの時間推移を見ると、追尾精度に対してセンサのサイズが小さすぎるという課題が顕著に認められた。連続観測中の10分程度で、天体の結像位置がセンサ視野から外れていくことがわかった。安定した長時間露光観測を実施するための方策を検討し、センサの大面积化が重要であることを確認した。

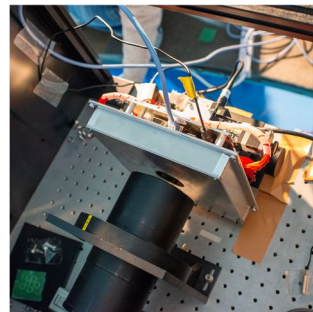


図 2 かなた望遠鏡にシステムを搭載した様子

(3) について。センサの面積が小さいことで観測の効率と測光精度に課題があった。これを改善するためにセンサの大面积化を進めた。メーカと打ち合わせを重ね、図 3 に示すような、8x8 画素のガイガーAPD アレイセンサを制作した。搭載する光学系により最適な画素サイズが異なるため、4種類のピクセルサイズを制作した。ゲインカーブとダークカウントレートを測定し、4x4 画素センサと同等の性能であることを確認した。

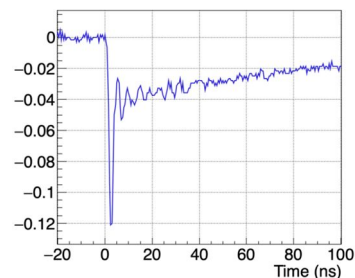
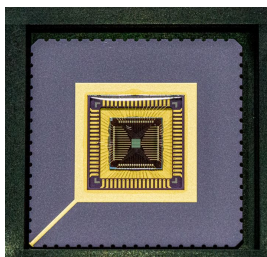


図 3 8x8 画素ガイガーAPD アレイ (左) と 1 光子検出時の出力波形 (右)

64 画素の読み出し回路を集積化するため、KEK で開発されているアナログ ASIC の採用を検討した。この ASIC は 16 チャンネルの入力を持ち、それぞれについて低速と高速のアンプを内蔵している。高速アンプの後段にはコンパレータがあり、外から与えたいしきい値で弁別されたデジタル出力を持つ。我々の用途にはこの機能を利用することで多チャンネル化したセンサでも信号処理系の集約が期待される。この ASIC の評価基板と 64 画素センサを組み合わせ、一光電子に対応したパルス信号を ASIC 内蔵のコンパレータで判別し、対応した出力が得られることを確認した。そして 8x8 画素センサの読み出し回路系を構築した。半導体の流通事情を鑑み、4x4 センサの読み出し回路を 4 系統並列させ、中継基板群を制作することにより実現した。4 枚の FPGA 評価ボードを制御することで 64 画素のデータ収集が可能になった。GNSS モジュールから供給されるクロックを分配する基板を制作し、同モジュールから UART で受け取るシリアルデータは随時 FPGA ボードをリレーさせた。制御ソフトウェアも 4 ボード化に合わせて拡張し、全体を同時に操作できるよう整備した。また回路系の変更に伴い、観測実験用の治具も新たに制作しなおした。これらのシステムをかなた望遠鏡に設置し、動作実証とともに観測実験を行った。

はじめに、V バンドフィルタを通して恒星光をセンサに入射し、撮像測光した。カタログの等級と、計測した光子フラックスとの線形性を確認した。次に、望遠鏡を動かすことによって恒星像がセンサ視野の中から動いて外れていく様子を撮像し、動画として再構成できることを実証した。続いて、1/30 秒で開閉するシャッタを光路上に設置し、恒星の光を短時間だけ入射した。このときの検出光子数の時間変化を測定し、その結果、図 4 に示すように、シャッタ速度と矛盾しないライトカーブを得た。また露光時間と限界等級の関係も見積もった。最後に、かにパルサーを撮像観測した。電波望遠鏡と同時観測は実現できなかったが、翌日に電波望遠鏡で取得されたかにパルサーのタイミング情報と矛盾しない周期のパルス波形を取得する事ができた。

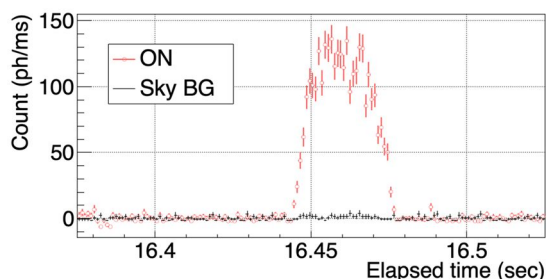


図 4 10.3 等星の光がシャッタによって短時間だけ入射したときのライトカーブ。

これらの開発によって、可視光の高速連続撮像システムが確立したと言える。GRP の増光や FRB の可視対応天体の探索をはじめ、様々なサブミリ秒の短時間変動天体の観測研究に対する強力なツールが実現できた。このシステムさらに整備して完成したパッケージができれば、様々な望遠鏡に搭載した超高速撮像観測ネットワークの形成が期待できる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 中森健之	4. 巻 40
2. 論文標題 IMONY: カスタムMPPCを天体観測用高速動画カメラに	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 高エネルギーニュース	6. 最初と最後の頁 176-184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nakamori Takeshi, Ouchi Yuga, Ogihara Risa, Terasawa Toshio, Kato Yuhei, Shibata Shinpei	4. 巻 73
2. 論文標題 Development of an optical photon-counting imager with a monolithic Geiger Avalanche Photodiode array	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 66-77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psaa106	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nakamori Takeshi, Ouchi Yuga, Ogihara Risa, Terasawa Toshio, Kato Yuhei, Shibata Shimpei, Akitaya Hiroshi, Kawabata Koji S.	4. 巻 11454
2. 論文標題 Development of an optical photon counting imager using a monolithic Geiger APD array	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 1145418
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560925	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 中森健之	4. 巻 780
2. 論文標題 暗い可視光天体の高速測光システムの開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Isotope News	6. 最初と最後の頁 7-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 中森健之
2. 発表標題 ガイガーAPDアレイによる高速天体撮像システムの改良開発
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤凜
2. 発表標題 ガイガーAPDアレイを用いた天体観測装置の測光精度評価
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中森健之
2. 発表標題 コンパクト天体を狙う高速可視測光システムの本格稼働へ
3. 学会等名 中性子星・超新星残骸及び関連天体研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takeshi Nakamori
2. 発表標題 Development of photon counting imager for fast optical transients
3. 学会等名 Transients and variables (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中森健之
2. 発表標題 かなた望遠鏡と光子計数法によるCrabパルサー巨大電波パルスの可視電波同時観測
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中森健之
2. 発表標題 MPPCを応用した高感度高速撮像システムの開発と性能評価
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中森健之
2. 発表標題 光子係数法による時間領域可視光天文学の開拓
3. 学会等名 山田科学振興財団研究交歓会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中森健之
2. 発表標題 カスタムMPPCのデジタル読み出しシステムの開発
3. 学会等名 計測システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤凜
2. 発表標題 可視天体の高感度・高時間分解観測装置の開発
3. 学会等名 可視赤外観測装置ワークショップ2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中森健之
2. 発表標題 光子計数法による高速撮像システムと改良
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中森健之
2. 発表標題 かなた望遠鏡を用いた光子計数法によるCrab pulsarの撮像観測
3. 学会等名 せいめい+大学望遠鏡ユーズーズミーティング
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中森健之
2. 発表標題 MPPCによるCrabパルサーの観測とシステムの改良
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中森健之
2. 発表標題 Crab pulsarの光学光子計数観測
3. 学会等名 第11回 光・赤外線天文学大学間連携ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中森健之
2. 発表標題 パルサーの可視観測
3. 学会等名 中性子星および関連現象
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeshi Nakamori
2. 発表標題 Development of an optical photon counting imager using a monolithic Geiger APD array
3. 学会等名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation（国際学会）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>天体観測用の超高速動画カメラ技術をやまがた天文台で実証  <a href="https://www.sci.yamagata-u.ac.jp/news/detail/664/">https://www.sci.yamagata-u.ac.jp/news/detail/664/</a>          （特集）科研費取得教員の声 - 光子計数法による可視光時間領域天文学の開拓 -  <a href="https://www.sci.yamagata-u.ac.jp/news/detail/455/">https://www.sci.yamagata-u.ac.jp/news/detail/455/</a>          学長定例記者会見を開催しました（12/2）  <a href="https://www.yamagata-u.ac.jp/jp/information/press/20201202_02/">https://www.yamagata-u.ac.jp/jp/information/press/20201202_02/</a></p>
---



## 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	寺澤 敏夫  (Terasawa Toshio)		
研究協力者	川端 弘治  (Kawabata Koji)		
研究協力者	中岡 竜也  (Nakaoka Tatsuya)		
研究協力者	庄子 正剛  (Shoji Masayoshi)		
研究協力者	三澤 浩昭  (Misawa Hiroaki)		
研究協力者	土屋 史紀  (Tsuchiya fuminori)		
研究協力者	武井 大  (Takei Dai)		
研究協力者	米倉 寛則  (Yonekura Yoshinori)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------