

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26670560

研究課題名(和文)硬X線TDIカメラによる超微細高感度画像取得の実証

研究課題名(英文)Verifying the minute and high-sensitive imaging using Hard X-ray TDI Camera

研究代表者

中嶋 大(Nakajima, Hiroshi)

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：70570670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：SDCCD素子と信号処理専用アナログASICを用いて、広帯域高感度CCDカメラシステムを完成させた。高エネルギー加速器研究機構にて30-80keVの硬X線照射実験を行った結果、ゲインの線形性、エネルギー分解能、検出効率のいずれについても、概ね期待される性能を得た。また、国立研究開発法人放射線医学総合研究所にある重粒子線がん治療装置HIMACをつかって、SDCCD素子に100MeVの陽子線照射実験をおこなった。従来型CCD素子に比べ、1桁近く優れた放射線耐性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Utilizing the driving and signal processing electronics developed for the CCD camera onboard Hitomi satellite, we measured the response of the SDCCD (Scintillator-Deposited CCD) against hard X-rays at a synchrotron radiation facility of the High Energy Accelerator Research Organization (KEK). The device was cooled down to -70 and was irradiated with monochromatic X-rays from 30 to 80keV. The quantum efficiency as a function of energy agrees with that expected from the designed thicknesses of Si and CsI(Tl) of the SDCCD. Radiation tolerance of the SDCCD was measured by irradiating the chip with protons (100 MeV/u). Radiation tolerance of the SDCCD is significantly better than those of the conventional CCDs, thanks to the additional implant below the gate electrodes and the resultant notch structure of the potential for the signal charges.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線イメージング CCD CsI シンチレータ ASIC

1. 研究開始当初の背景

高エネルギー電磁波の撮像検出器開発及び分光技術は、とりわけX線の場合、天文学に代表される基礎科学分野がリードしてきた。最も顕著な例として、ブラックホールに落ち込むガスが一般相対論効果により重力赤方偏移している様子が観測され、極限状態における物理が解明された。これを実現したのはX線 CCD カメラである。10 μ m レベルの微細画素を持つこと、信号電荷を計数することで精密分光も可能であること、といった特長から、現在軌道上の国際天文衛星全てに対し、打ち上げ当時最先端のカメラが搭載されている。最近の開発過程で、画素のさらなる微細化、ダイナミックレンジの広域化が進んだ。特に申請者が現在主導して開発している、編隊飛行衛星による宇宙硬X線走査計画に搭載予定のSDCCDは、CsIシンチレータを大面積CCD素子に密着させることで軟X線(<10 keV)だけでなく硬X線(10-100 keV)まで感度を持たせた、X線撮像検出器の究極形と言える(Tsunemi et al. 2011, NIMA, **652**, 508)。さらに信号処理にはASICを使用し、カメラの完全デジタル化も実現している(Matsuura et al. 2007, SPIE, **6686**, 66860L; Nakajima et al. 2009, IEEE TNS, **56**, 747)。

申請者が天文学分野で培ったX線撮像分光技術は、地上の広範な分野に応用可能である。特に医療用X線CT(コンピュータ断層撮影)は実現性が高い。現在CT撮影は、検査部位にもよるが一回あたり数十-100 mSv程度と、1年間で浴びる自然放射線の100倍近い被ばく量にも関わらず、CTのみで検出できる腫瘍の大きさは高々1cm程度である。被ばく量を低減しつつ、高解像度のイメージ取得が可能なカメラを開発し、腫瘍の早期発見を可能にすることが本研究の全体構想である。

2. 研究の目的

高解像度のX線画像を得るためには、検出器の位置分解能とコントラスト分解能の両者を向上させることが必要である。前者は画素を微細化することが解決策である。後者は、造影剤や骨の影によるコントラストが出来やすい、30-40 keVのX線を効率よく抽出した画像を得ることが重要となる。本研究では、SDCCD素子を用いることで現在主流のSiフォトダイオードやCMOSフラットパネルセンサに対して画素面積を10分の1とし、同時にCCDの高い分光能力を生かして、30-40 keVのX線による信号のみを抽出した高コントラスト画像取得の実証を期間内の実現目標に定める。さらに検査対象物に対してCCDを相対移動させ、その移動方向と移動速度を信号電荷転送のそれと一致させる(TDI動作)ことで、撮像素子の大きさに制限されない、1スキャンでの大面積画像取得実証を行うことが本研究の目的であった。

3. 研究の方法

申請者が行ってきた次期X線天文衛星搭載 CCDカメラの開発により、CCD駆動用回路およびデジタルインターフェース回路については、医療用X線画像取得に応用可能なレベルの性能が既に得られていた。SDCCD素子についても既に存在するプロトモデル素子を使用した。本研究では、残るアナログ信号処理回路基板を、TDI駆動が可能な形に改修した上で製作した。この際にASIC素子のパッケージングを行った。回路基板単体の性能試験の後、SDCCD素子と回路基板を接続してX線画像取得を行い、解像度の測定実験を行った。この時X線源は、実験室においては準単色X線源を用いるが、単色X線に対する応答関数を調べるために外部放射光施設での実験も行った。この実験で得られたX線画像の解像度を測定し、既存のX線CTセンサと比較した。

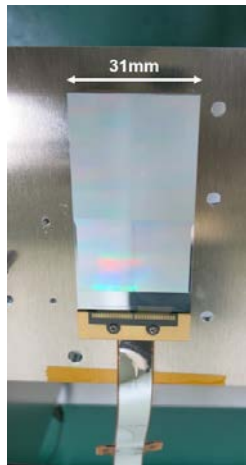
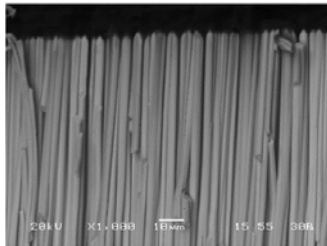
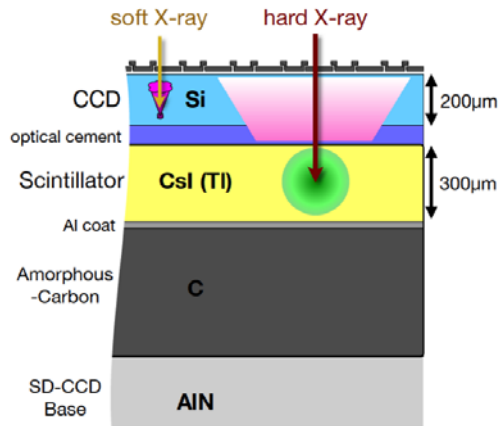


図 1. (上) SDCCD の断面構造。従来の X 線 CCD(水色)の裏面に CsI シンチレータ(黄色)を張り付けることで硬 X 線にまで感度を持たせている。(中央) CsI 柱状結晶の SEM (Scanning Electron Microscope) イメージ。柱状にすることでシンチレーション光の拡がりを抑える。(下) SDCCD 素子の写真。2016 年に打ち上げた X 線天文衛星「ひとみ」搭載素子と同じサイズ。

4. 研究成果

SDCCD 素子(図 1 右)と信号処理専用アナログ ASIC を用いて、広帯域高感度 CCD カメラシステムを完成させた。SDCCD は硬 X 線をシンチレータで吸収し可視光に変換、その可視光を CCD で検出するため(図 1 左)、CCD の優れた位置分解能を保ったまま硬 X 線領域まで高い検出効率を持たせている。CsI(Tl)で発生したシンチレーション光は、柱状結晶により広がりを抑えているものの(図 1 中央)、それでも CCD で検出されるまでに広がるため、従来の衛星搭載カメラとは異なるイベント判定が必要である(図 2 左)。そこで我々は、広がった電荷雲を 2 次元ガウス関数でフィットし、その積分として信号波高値を得ることとした(fitting 法: 図 2 中央)。これは、イベントを構成するピクセルの波高分布を Gaussian でフィットして得られた分散を電子雲の広がりとみなして、分散の大きさや扁平率から CCD イベントかシンチレタイイベント、または X 線由来でないバックグラウンドイベントかを判断する方法である。この新しい手法の有効性を確認したうえで、SDCCD の分光性能を評価するため、高エネルギー加速器研究機構(KEK) Photon Factory BL-14A にて 30-80keV の硬 X 線照射実験を行った。CsI(Tl)シンチレータで検出されたイ

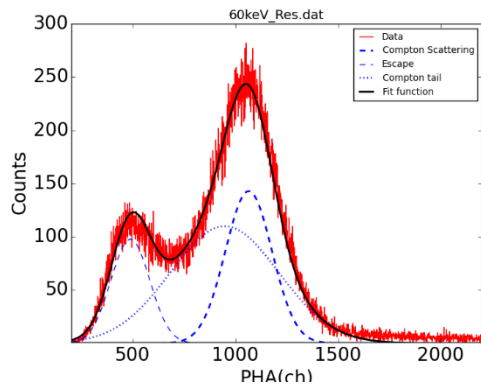
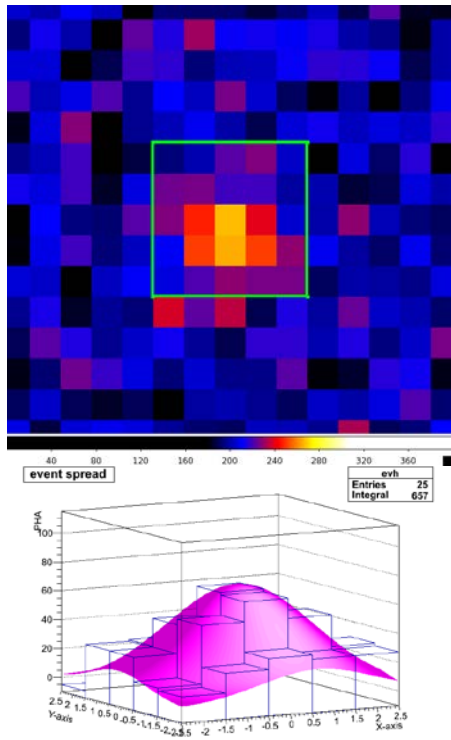


図 2. (上) SDCCD フレームイメージ上の、CsI で検出された X 線イベント付近を拡大した図。(中央) 左のイベントの波高値分布と、2次元ガウス関数モデルでフィットした結果。(下) 60keV 単色 X 線に対する SDCCD のスペクトル。

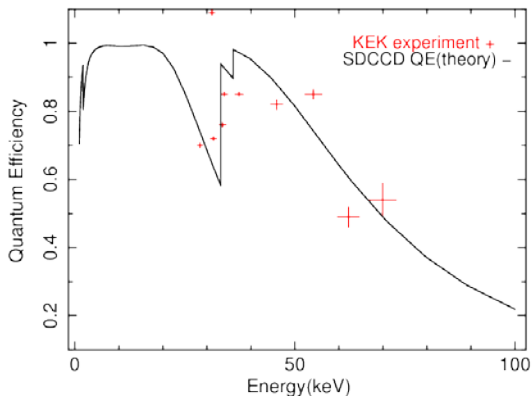


図 3. SDCCD の検出効率のエネルギー依存性(赤十字がデータ)。比較のため、Si と CsI(Tl)の厚みから予想される検出効率を黒線で示す。

ベントのパイルアップを防ぐために X 線強度を十分低減しつつ、撮像領域全体にわたり性能評価を行うために、アクリル散乱体を用いて非弾性散乱(コンプトン散乱)X 線を照射させた。そのため単色 X 線ではなく、ある程度幅を持ったエネルギーの散乱 X 線が入射している。実験中の素子温度は CCD-CsI 間にあるオプティカルセメントの性能維持温度下限である約 -70°C に冷却してシステムを駆動させた。フィッティング法で得たスペクトル(図 2 右)を解析した結果、入射 X 線エネルギー(keV) と信号波高値(ch) が 80keV に至るまで一次関数で良く再現出来ることを確認した。また、エネルギー分解能は 30-40keV では 40% 程度、50-80keV では 30% 程度であり、検出効率は 33.95keV(36.2keV 入射時) で 0.85、62.15(70keV 入射時) で 0.60 となり、ゲインの線形性、エネルギー分解能、検出効率のいずれについても、概ね期待される性能を得た(図 3)。

国立研究開発法人放射線医学総合研究所にある重粒子線がん治療装置 HIMAC をつかって、SDCCD 素子に 100MeV の陽子線照射実験をおこなった。素子撮像領域上の 3 点にそれぞれ軌道上相当時間 0.3 年、1 年、3 年分の陽子を照射し、CCD イベントの分光性能の時間及び経年変化を調べた。3 年分照射後のエネルギー分解能は時間

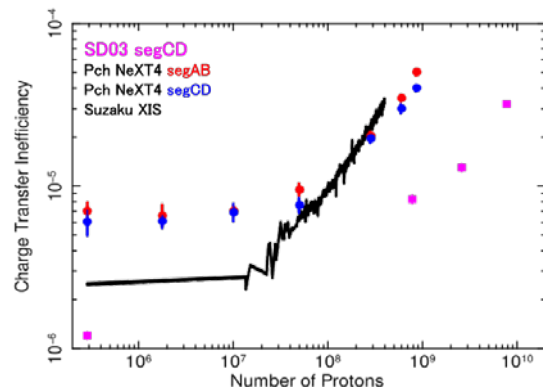


図 4. 照射した陽子数に応じた、SDCCD の電荷転送非効率の推移(マゼンタ)。従来型 CCD のデータを比較のために赤・青のデータで示す。

とともに回復し、数 10 時間後には照射前の数値よりわずかに大きい程度の値を示した。CTI の経年変化では、2016 年に打ち上げた X 線天文衛星「ひとみ」搭載 CCD である NeXT4 素子で同様の実験をしたときに比べ、1 桁近く電荷転送効率が良いことが分かった。また、2015 年まで 10 年間稼働したすぎく衛星搭載 XIS のそれと比べても、有意によい結果を示した(図 4)。この向上にも大きく寄与するのは、CCD に採用したノッチ構造であると考えられる。

以上の実験結果より、我々は、80keV までの広帯域において、位置分解能が従来型 CCD と同程度で、かつ放射線耐性が従来型 CCD よりも一けた高い素子を実現した。このカメラシステムを用いて TDI システムを構築することで、本研究の最終目的である、低被ばくの X 線微細画像取得が可能になると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① [Hiroshi Nakajima](#) et al., 「Astronomical Imaging with the X-ray Observatory Hitomi」、Nucl. Instru. Methods in Phys. Research A、査読有、2017、in Press
- ② Tomokage Yoneyama et al., 「Discovery of a keV-X-ray excess in RX J1856.5-3754」、Publication of the Astronomical Society of Japan、査読有、2017、in Press
- ③ [Hiroshi Nakajima](#) et al., 「Development of Low-noise High-speed Analog ASIC for X-ray CCD Cameras and Wide-band X-ray Imaging Sensors」、Nucl. Instru. Methods in Phys. Research A、査読有、831、2016、pp.283-287
- ④ Hiroshi Tsunemi et al., 「Soft x-ray imager (SXI) onboard ASTRO-H」、Proc. of SPIE、査読無、9905、2016、pp.990510
- ⑤ [Hiroshi Nakajima](#) et al., 「Screening of ASIC for signal processing of Soft X-ray Imager onboard ASTRO-H」、JAXA Research and Development Report、査読有、JAXA-RR-14-007、2015、pp.1-10
- ⑥ Takaaki Tanaka et al., 「The Soft X-ray Imager (SXI) for the ASTRO-H mission」、Proc. of SPIE、査読無、9601、2015、pp.96010E
- ⑦ Fumiyoshi Kamitsukasa et al., 「Global Distribution of Ionizing and Recombining Plasmas in the Supernova Remnant G290.1-0.8」、Publication of the Astronomical Society of Japan、査読有、67、2015、pp.161-168
- ⑧ Satoru Katsuda et al., 「Kepler's Supernova: An Overluminous Type Ia Event Interacting with a Massive Circumstellar Medium at a Very Late Phase」、Astrophysical Journal、査読有、808、2015、pp.49
- ⑨ [Hiroshi Nakajima](#) et al., 「Performance of front-end mixed-signal ASIC for onboard CCD cameras」、Proc. of SPIE、査読無、9154、2014、pp.91541C
- ⑩ Fumiyoshi Kamitsukasa et al., 「Suzaku Discovery of Fe K-shell line from the O-rich SNR G292.0+1.8」、Publication of the Astronomical Society of Japan、査読有、66、2014、pp.66
- ⑪ Kumiko Nobukawa et al., 「Use of a charge-injection technique to improve performance of the Soft X-ray Imager aboard ASTRO-H」、Nucl. Instru. Methods in Phys. Research A、査読有、765、2014、pp.269-274
- ⑫ Kiyoshi Hayashida et al., 「Soft X-ray Imager (SXI) onboard ASTRO-H」、Proc. of SPIE、査読無、9144、2014、pp.914429

[学会発表] (計 15 件)

- ① 中嶋大、「X線天文衛星「ひとみ」による大質量 X線連星 IGR J16318-4848 の観測」、日本物理学会、2017.3.19、大阪大学
- ② 村上弘志、「X線天文衛星「ひとみ」搭載軟 X線撮像検出器 SXI の軌道上性能と校正の現状 II」、日本天文学会、2017.3.17、九州大学
- ③ Hiroshi Nakajima、「Hitomi Observation of the Highly Obscured High-Mass X-ray Binary IGR J16318-4848」、7 years of MAXI : monitoring X-ray transients (国際学会)、2016.12.5、理研
- ④ 中嶋大、「ひとみ衛星搭載軟 X線撮像検出器(SXI) : 軌道上性能と校正の現状」、日本物理学会、2016.9.24、宮崎大学
- ⑤ Hiroshi Nakajima、「Astronomical Imaging with the X-ray Observatory Hitomi」、Imaging 2016 (招待講演) (国際学会)、2016.6.13、ストックホルム
- ⑥ 今谷律子、「広帯域 X線イメージングセンサ SDCCD の硬 X線分光性能評価」、日本天文学会、2016.3.16、首都大学東京
- ⑦ 今谷律子、「広帯域 X線イメージングセンサ SDCCD の硬 X線分光性能評価」、宇宙科学シンポジウム、2016.1.6、宇宙研
- ⑧ 廣瀬真之介、「X線 CCD 信号読み出し ASIC の開発」、X線光学シンポジウム、2015.11.17、名古屋大学
- ⑨ Hiroshi Nakajima、「Development of Low-noise High-speed Analog ASIC for X-ray CCD Cameras and W-de-band X-ray Imaging Sensors」、10th International “Hiroshima” Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (国際学会)、2015.9.25、西安
- ⑩ Shota Inoue、「Modeling the spectral

response for the soft X-ray imager onboard the ASTRO-H satellite」、10th International “Hiroshima” Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (国際学会)、2015.9.25、西安

- ⑪ 中嶋大、「ASTRO-H 搭載軟 X線撮像検出器 SXI の現状」、日本天文学会、2015.9.10、甲南大学
- ⑫ 中嶋大、「次世代衛星搭載 CCD 高速低雑音処理 ASIC の開発」、日本天文学会、2015.3.21、大阪大学
- ⑬ 中嶋大、「次世代衛星搭載 CCD カメラ用 ASIC の開発(2)」、日本物理学会、2015.3.23、早稲田大学
- ⑭ 井上翔太、「次世代衛星搭載 CCD 高速低雑音処理 ASIC の性能」、日本天文学会、2014.9.12、山形大学
- ⑮ Hiroshi Nakajima、「Performance of front-end mixed-signal ASIC for onboard CCD cameras」、SPIE、2014.6.22、モントリオール

[その他]

ホームページ等

<http://wwwxray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/OskXrayTlabHP/ASIC.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中嶋 大 (NAKAJIMA, Hiroshi)

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号 : 70570670