

機関番号：14301  
 研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20340043  
 研究課題名(和文) SOI技術による低バックグラウンド・精密分光撮像・広帯域X線ピクセル検出器の開発  
 研究課題名(英文) Development of low-background, high energy resolution wide-band SOI X-ray sensor.  
 研究代表者  
 鶴剛(TSURU TAKESHI)  
 京都大学・大学院理学研究科・教授  
 研究者番号：10243007

研究成果の概要(和文)：各ピクセルに相関二重サンプリング回路と閾値判定回路を搭載する1mm角素子を開発した。X線撮像分光に成功し、空乏層厚み110 $\mu$ mに到達した。ヒット情報出力に成功した。高い出力ゲインを達成した(3.65 $\mu$ V/電子)。回路調整で電子換算ノイズは目標の10個以下(RMS)に到達する見込みである。

研究成果の概要(英文)：We successfully developed an X-ray SOI pixel sensor with the size of 1mm x 1mm having a CDS and threshold circuit in each pixel. We demonstrated imaging-spectroscopy capability, output of hit information and achieved 110 $\mu$ m for the thickness of the depletion layer and high node sensitivity of 3.65 $\mu$ V/e. We have prospect of reaching a readout noise of less than 10e.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20年度	3,200,000	960,000	4,160,000
21年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
22年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：X線 $\gamma$ 線天文学, SOI型シリコンピクセルX線 $\gamma$ 線検出器

#### 1. 研究開始当初の背景

熱的な高温プラズマは宇宙における物質の基本的存在形態の一つであり、その観測的研究から期待される物理量は、物質や重力質量の分布など宇宙の構造を示す基本量である。一方、この宇宙の構造が形成される過程で高温プラズマの衝突が起こり、熱平衡から外れた物質や高エネルギー粒子(宇宙線)の「非熱的宇宙」が発生して来たことが分かって来た。

それを端的に示すのが、申請者らが「すざく」衛星を用いて行った銀河中心領域拡

散X線放射の観測結果である。熱的プラズマの連続成分(熱制動放射)や電離輝線(6.7, 6.9keV)では説明できない稜関数型連続成分と中性輝線(6.4keV)が検出された。この非熱的成分は8keV以上で卓越し、光度は熱的放射に匹敵する。超新星残骸や銀河団高温ガスも同様である。H.E.S.S.未同定天体のように、ほとんどのエネルギー放射をTeVバンドで行う天体すら存在する。すなわち非熱的宇宙にはこれまでの想像を越える大きなエネルギーが集中している可能性がある。

この非熱的宇宙の発生過程を解明するに

は、その雛型である超新星残骸、銀河中心領域、銀河団など空間的に広がった天体の広帯域・精密撮像分光が必要である。そのために観測装置は以下の性能を同時に持たなければならない。

- ・ 精密分光：130eV(FWHM)@6keV
- ・ 精密撮像：1 秒角
- ・ 広帯域：0.3-40keV
- ・ 低バックグラウンド：10keV, 40keV X線それぞれに対し  $1 \times 10^{-5}$ ,  $1 \times 10^{-7}$  c/s/keV/1mm<sup>2</sup> 以下
- ・ 広視野・インテリジェント化・低コスト：モザイク可能、素子自体が ADC やデジタル信号処理機能を持つ

## 2. 研究の目的

現在稼働中の X 線天文衛星(チャンドラ, XMM, すざく)の焦点面検出器はいずれも軟 X 線用の X 線 CCD であり, 10keV 以上は観測不可能である。日本の次期 X 線衛星 NeXT では硬 X 線イメージャーと X 線 CCD を組み合わせるので広帯域は実現するが, 他の要求を満たすことはできない。計画中の衛星や開発中の検出器も同じである。そこで申請者は新しい半導体プロセスである SOI 技術に着目し, 上記の要求項目を全て満たす X 線用 SOI 検出器を開発する。これは世界に例を見ない日本独自の新型の検出器である。

## 3. 研究の方法

「熱的な高温プラズマの衝突による非熱的宇宙の発生過程の解明」には, 低バックグラウンド・精密分光・精密撮像・広帯域・広視野性能を同時に持つ検出器が必要である。既存又は開発中の検出器はいずれもそれを満足させることができない。そこで SOI 技術を用いて, 要求項目を満たす X 線 SOI 素子(図 1)とそれを用いた検出器を開発する。本経費で必要な要素技術の開発とその実証を行う。本科研費終了後に新たに

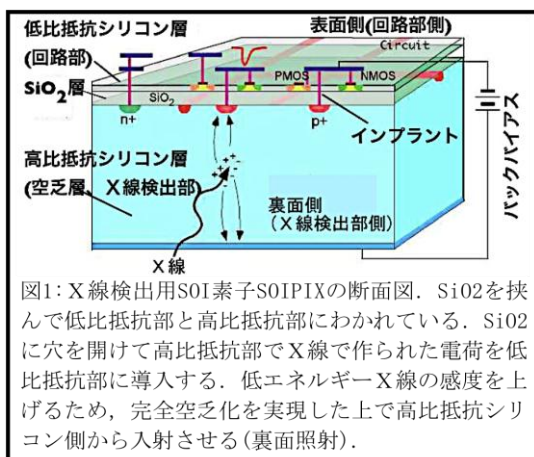


図1: X線検出用SOI素子SOIPIXの断面図。SiO<sub>2</sub>を挟んで低比抵抗部と高比抵抗部にわかれていて、SiO<sub>2</sub>に穴を開けて高比抵抗部でX線で作られた電荷を低比抵抗部に導入する。低エネルギーX線の感度を上げるため、完全空乏化を実現した上で高比抵抗シリコン側から入射させる(裏面照射)。

予算を得て、最終的に衛星搭載可能な検出器を開発する。

## 4. 研究成果

### 4-1. 成果概要

X線天文用に特化した初めてのX線SOIPIX素子「XRPIX1」の開発に成功した。読み出しノイズを下げるために、相関二重サンプリング(CDS)回路を素子に組み込んだ。マルチサンプリング方式で、電子換算読み出しノイズ14.6個(rms), エネルギー分解能250eV(FWHM, 6.4keV X線に対する値)を達成した。

トリガ出力回路を素子に組み込み、機能の正常動作に成功した。空乏層厚み140μmに到達した。

X線SOIPIX用アナログデジタル変換回路のテスト素子「XRPIX-ADC1」の設計と製造を行った。X線SOIPIX素子自身に内蔵することを目標にするため、SOIPIXと同じSOIプロセスで製造した。ASTRO-H搭載X線CCD用に開発したΔΣ型ADCをベースにした設計を持つ。シミュレーションから線形性9bit, 入力換算ノイズ26μV(rms)を得た。要求性能を満たしている。

以上のパイロット研究から、最終目標達成への重大な技術的障害は無く、基本的な見通しを得た。

### 4-2. SOIPIX

SOI(Silicon-On-Insulator)と呼ぶ新しい半導体技術を用いた新型のX線SOIピクセル検出器(以下, SOIPIX)の開発を行った。SOIはSilicon-On-Insulatorの略である。低比抵抗Si層の下に絶縁層(SiO<sub>2</sub>)を埋め込むことで、低比抵抗Si層のトランジスタの完全分離が可能で、寄生容量を小さくできる。高速・低消費電力、ラッチアップフリー、高い放射線耐性など、通常のCMOSに比べ優れた性能を持ち、宇宙での使用に最適である。

従来のピクセル検出器は、面状に電極を持つ特別な2次元アナログICの上にX線検出素子を置き、両者をバンプボンディングで繋ぐという複雑な構造を持つ。それに対しSOIPIX素子は図1の構造を持ち、完全に1つ素子として作ることができる。SiO<sub>2</sub>層の下に高比抵抗Siの厚い空乏層を設けてX線を検出する。SiO<sub>2</sub>層に穴を開けて設けたインプラントを通じ、生じた電荷を上部の低比抵抗Si層に作り込んだ回路部に導く。この方法で厚い空乏層(高比抵抗)と高速回路(低比抵抗)を無理なく両立できる。この優れた特長を利用し、SOIPIX素子とそれを用いたカメラを開発する。そしてASTRO-Hに続く次世代X線衛星に汎用広帯域撮像分光器として搭載する。

### 4-3. XRPIX1

XRPIX1 は初めての X 線天文用 SOIPIX 検出器である(図 2)。京都大学が KEK, A-R-Tec (株) と共同で設計・開発し, OKI セミコンダクタ (株) の CMOS SOI 0.2  $\mu\text{m}$  プロセスで製造した。XRPIX1 は平成 20-21 年度で開発した INTPIX2, INTPIX3 をベースに大幅に改良し, 下記の特徴を備える。

- INTPIX3 に対して全般的な見直しを行った。低ノイズのトランジスタレイアウトを採用, 十分な回路およびレイアウトレベルのシミュレーションを行った。
- 低読み出しノイズ化のため, 全てのピクセルに相關二重サンプリング(以下, CDS)回路を持つ。
- 高速読み出しと反同時計数を実現するため, 全てのピクセルに閾値回路を持つ。どれかのピクセルで閾値を超えると, ヒットタイミング出力とそのピクセルの座標の情報を出力する(ヒット情報出力)。
- 最適のキャパシタとトランジスタ品種を探すため, 素子を 4 ブロックに分け, 違う品種を実装した。
- 小型素子にしてプロセス費用を抑えた。ピクセルサイズ 30.6  $\mu\text{m}$  角, 32x32 ピクセル(1mm 角)である。
- 厚い空乏層を得るために比抵抗 700  $\Omega\text{cm}$  の CZ ウェハを使用した。

以下, XRPIX1 およびその改良版である XRPIX1b の成果を示す。

### 4-4. X 線スペクトルとゲイン

可視光を用いて画像取得が可能であることを確認した後, X 線源(109Cd, 241Am)および蛍光 X 線発生装置を利用して X 線照射実験を行った。動作温度は-50 $^{\circ}\text{C}$ , 1 回の露出時間は 1msec である。データの解析は「すぎく」などの X 線 CCD と同じ方法で行った。X 線スペクトル(シングルピクセルイベント)を図 3[左]に示す。違うキャパシタとトランジスタ品種を使った 4 つのブロック間で最も良いものを選んだ。分解能は X 線エネルギーに依存せず 1.1keV(FWHM)であった。ASTRO-H の硬 X 線イメージャーで搭載予定の DSSD とほぼ同じである。X 線が入射していないピクセルの

データから, 電子換算読み出しノイズ

100e(rms) と求められた。ピクセル間のゲインのばらつきは 1%(rms) で

あった。これは電子換算で 50e(rms)に相当する。エネルギー分解能はほぼこの読み出しノイズとピクセル間ゲインのばらつきで説明できることがわかった。平成 21 年度に報告した INTPIX3(エネルギー分解能 4keV(FWHM), 読み出しノイズ 380e(RMS))である。つまり 4 倍性能が向上した。

X 線エネルギーに対する出力電圧の関係を図 3[右]に示す。直線性は良く, 傾きからゲイン(ノードセンシティブティ)4.0  $\mu\text{V}/\text{e}$  が得られた。これは ASTRO-H に搭載する X 線 CCD に匹敵する。決して悪い値ではないが設計値の 1/4 に過ぎなかった。つまりセンサー部の容量が設計値の 4 倍であることを意味する。センサー部の PN 接合の容量はバックバイアスに依存するはずだが, 依存関係は無かった。従って PN 接合以外の寄生容量が 30fF ほどあると判断した。私たちの実験結果を受けて, 再度 OKI セミコンダクタと A-R-Tec がシミュレーションを見直して精密化し, BPW と呼ぶ構造が寄生容量源であることがわかった。

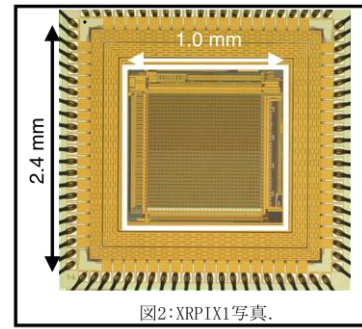


図2:XRPIX1写真.

### 4-5. ノイズ源の切り分け

XRPIX1 はピクセルの内部回路のいくつかの場所にテスト信号入力端子を設けている。それらの端子に疑似信号を入れ, X 線照射と同じ方法でデータ取得と処理を行った。複数のテスト端子間の結果を比較し, ピクセル内部回路の各要素が持つノイズを得た。2 カ所あるソースフォロアが 13e(1 カ所分), CDS 回路自身が発生する KTC ノイズが 70e, 列読み出しと素子出力アンプと外部読み出し回路の合計が 60e であった(二乗和で読み出しノイズ 100e に一致)。CDS 回路の ON/OFF 実験か

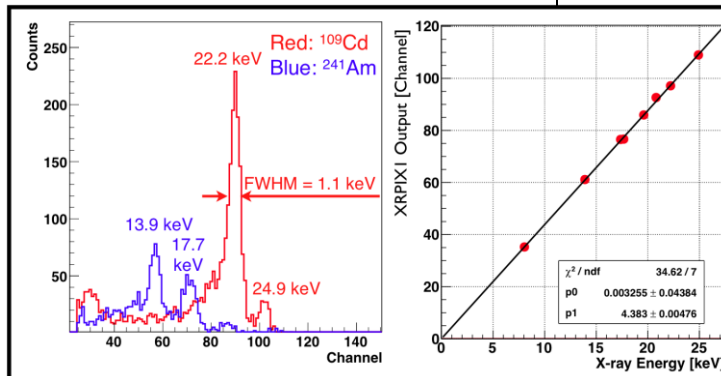


図3:[左]241Amと109Cdを利用してXRPIX1全面に照射して得たX線スペクトル。エネルギー分解能は1.1keV(FWHM)である。[右]さらにCu-Kを加えて得たX線エネルギーと出力の関係。左図の各ピークを中心チャンネルと対応するX線エネルギーをそれぞれ縦軸, 横軸に取った。1チャンネルは248  $\mu\text{V}$ である。実線は原点を通る直線でフィットした結果である。

ら、予定通り CDS 機能が低ノイズ化 (80e RMS) に寄与していることも実証した。

#### 4-6. マルチサンプリング読み出し(ローパスフィルタ)によるエネルギー分解能向上

3-2 の実験では逐次比較型 ADC を使い、ピクセル出力電圧を1回だけサンプリングしている。従って高周波ノイズもそのまま取り込んでしまう。X線 CCD ではこれと同じ問題を避けるために積分回路やマルチサンプリング型の  $\Delta \Sigma$  ADC を利用したローパスフィルタを採用している。そこで XRPIX1 でも逐次比較型 ADC を多数回サンプリングし平均値を取る事で、実効的なローパスフィルタを形成、高周波ノイズを落とす実験を行った。

ADC を連続サンプリングして得たピクセル出力波形を得る。X線が入射したタイミングで出力電圧がステップ関数的に上昇する。この電圧差が X線信号電荷量に対応する。実験では X線入射前後それぞれ 160 サンプリング (160  $\mu$  sec) の平均を取る事で高周波ノイズを落とし、両者の差から X線波高値を決めた。このようなイベントを多数集めヒストグラムを作り、X線スペクトルを得た(図4)。

Fe-K と Cu-K 輝線で K $\alpha$  と K $\beta$  の分離に成功し、エネルギー分解能 250eV (FWHM 6.4keV X線に対する値) に達した。読み出しノイズは 14.6e (rms) であった。いずれも 4-4 で示した 1回サンプリングに対し 4倍性能が向上した。

#### 4-7. ノイズの低減策

これまで示した評価実験から下記のノイズ低減策を立てた。

センサー部の BPW 構造を最適化し、寄生容量を削減することでゲインを向上させる。電気的なノイズはセンサー部ゲインに依存せず一定なので、実効的な電子換算ノイズは下がる。予備的なレイアウトデザインからゲインを2倍に向上可能と予測している。すなわちノイズは 1/2 になる。

素子のすぐ側に外付けアンプを追加し、外付けの読み出し回路上で受けるノイズを実効的に減らす。

CDS 回路部のキャパシタの容量を大きくし、そこで発生する KTC ノイズを下げる。キャパシタの MIM 構造に用いる絶縁体を SiO<sub>2</sub> から誘電率の大きい AlN に変更し、容量を 1.5 倍にする。キャパシタの面積を出来るだけ大きくする。予備的なレイアウトデザインから 4倍が可能だと予測している。以上から KTC ノイズは 1/2 程度になる。

高周波ノイズを下げるために、ASTRO-H 衛星の X線 CCD に使用予定の ASIC をベースにした  $\Delta \Sigma$  型のマルチサンプリング ADC を開

発する。この ADC は XRPIX-ADC1 として平成 22 年度に設計と製作を行った(後述)。

#### 4-8. 硬 X線の検出効率

開発の重

要目標は厚い空乏層を実現し高い硬 X線感度を得ることである。Cu-K 輝線 (8.04keV) と Mo-K 輝線 (17.4keV) の Si 中の飛程 (Attenuation Length) は 1 桁違う(それぞれ 66  $\mu$ m, 651  $\mu$ m)。これを利用し空乏層厚みを求めた。まず、検出効率の分かっている CdTe 検出器でこれら 2つの輝線の相対強度をキャリブレーションしておく。その上で 2つの輝線を XRPIX1 に照射し、検出したカウント比とキャリブレーション値を比較し、空乏層の厚みを求めた。バックバイアス (PN 接合の印可電圧) に 100V を印可して 140  $\mu$ m を実現した。空乏層厚みのバックバイアス電圧依存性は、比抵抗 700  $\Omega$ cm の PN 接合の理論予測値にほぼ一致した。

#### 4-9. ヒット信号出力機能の実証

LED を用いて積分時間中にパルス的な可視光を素子全体に照射した。図 5[左]はオシロスコープで観測したヒット出力波形である。LED で可視光の照射を開始して約 1msec 後にヒットタイミングが出力された。この 1msec は、トリガ閾値に到達するのに必要な可視光の積分時間である。この時間がトリガ閾値の設定や LED の光量に依存して変化することも確認できた。これは期待通りの動作である。

細く絞ったレーザー光線を 1つのピクセルにピンポイント照射し、ヒットピクセル座標情報出力をオシロスコープで観測した(図 5[右])。照射したピクセルの列番号と行番号に対応するヒット座標が出力されており、設計通りに動作することを確認した(この実験はオシロスコープの確認を容易にするために、素子の実力よりかなり遅いクロックで

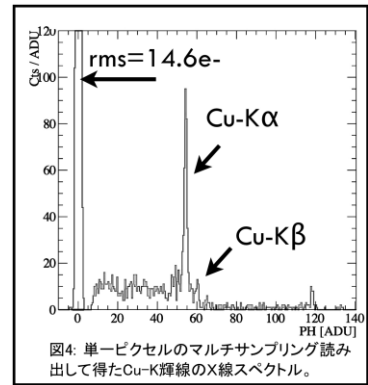


図4: 単一ピクセルのマルチサンプリング読み出して得たCu-K輝線のX線スペクトル。

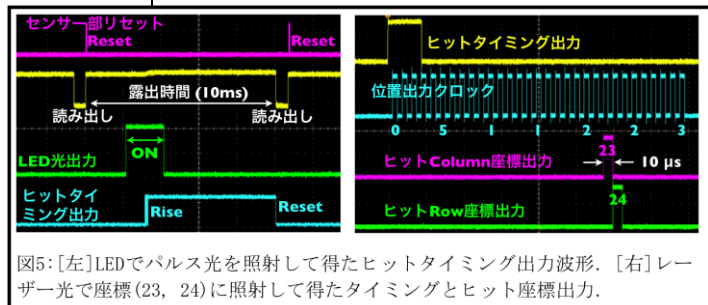


図5: [左]LEDでパルス光を照射して得たヒットタイミング出力波形。[右]レーザー光で座標 (23, 24) に照射して得たタイミングとヒット座標出力。

った).

#### 4-10. AD 変換回路のテスト素子「XRPIX-ADC1」の開発

本計画の最終形態では、X線 SOIPIX 素子自身に AD 変換回路を組み込み、素子外部のアナログ回路を不要にする。その結果システム全体の簡素化、信頼性の向上、コストダウン、耐外部ノイズ性能の向上を実現する。平成 22 年度に AD 変換回路をテストする SOI 素子 (XRPIX-ADC1) の設計と製作をした。

複数の AD 変換方式を検討し、高周波ノイズを落とす必要性と必要精度(ビット数)から  $\Delta \Sigma$  型に決定した。ASTRO-H 衛星の X 線 CCD カメラ用に開発した  $\Delta \Sigma$  型 ADC をベースに設計を行った。シミュレーションから線形性 9bit, 入力換算ノイズ  $26 \mu\text{V}$  の性能が得られている。X 線 SOIPIX のゲイン  $4 \mu\text{V}/\text{e}$  の場合、電子換算ノイズ  $6\text{e}(\text{rms})$  に相当し、要求性能を満たしている。

#### 4-11. まとめ

X 線衛星用 SOIPIX 検出器のパイロット研究を平成 20-22 年度に行った。その結果、基本的な X 線撮像分光に成功し、ヒット信号や CDS 回路など組み込んだ機能は全て正常に動作することを確認できた。読み出しノイズはまだ最終目標に到達していないが、改善策を準備中である。

裏面照射型の開発も進行中である。厚い完全空乏層との両立に必要な超高比抵抗の FZ ウェハ ( $1\text{k}\Omega\text{cm}$ ) と穴をあけたパッケージは入手し、ごく少数だがテスト素子の製作もした(評価はこれから)。AD 変換回路の開発も順調である。

以上から最終目標への基本的な見通しが得られ、技術的障害はないと確信することが出来た。

#### 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 24 件)

1. Detection of neutron-induced events and neutron/ $\gamma$ -ray discrimination with an imaging capability of a P-channel X-ray CCD, M. Sawada, T.G. Tsuru (全 5 名, 3 番目) 2010, NIM A, in press, 査読有
2. Suzaku observations of the Great Annihilator and the surrounding diffuse emissions, S. Nakashima, T.G. Tsuru (全 5 名, 3 番目) 2010, PASJ, 62, 971-979, 査読有
3. Discovery of K-Shell Emission Lines

of Neutral Atoms in the Galactic Center Region, M. Nobukawa, T.G. Tsuru (全 5 名, 3 番目) 2010, PASJ, 62, 423-429, 査読有

4. Soft x-ray imager (SXI) onboard ASTRO-H, H. Tsunemi, T.G. Tsuru H. Nakajima (全 15 名, 3 番目) 2010, SPIE, 7732, 773210-773210-11, 査読無
5. Developments of SOI Monolithic Pixel Detectors, Y. Arai (全 45 名, 1 番目) 2010, NIM A, 623, 186-188, 査読有
6. Development of SOI Pixel Process Technology, Y. Arai, T.G. Tsuru (全 58 名, 1 番目) 2010, NIM A, Accepted, 査読有
7. Discoveries of 3 K-Shell Lines of Iron and a Coherent Pulsation of 593s from SAX J1748.2-2808, M. Nobukawa, T.G. Tsuru (全 4 名, 4 番目) 2009, PASJ, 61, S93-S98, 査読有
8. Suzaku Observations of M82 X-1: Detection of a Curved Hard X-Ray Spectrum, R. Miyawaki, T.G. Tsuru (全 8 名, 7 番目) 2009, PASJ, 61, S263-S278, 査読有
9. An X-Ray Face-On View of the Sagittarius B Molecular Clouds Observed with Suzaku, S. G. Ryu, T.G. Tsuru (全 5 名, 5 番目) 2009, PASJ, 61, 751-761, 査読有
10. A Super Bubble Candidate in the Galactic Center and a Local Enhancement G359.77-0.09, H. Mori, T.G. Tsuru (全 6 名, 3 番目) 2009, PASJ, 61, 687-695, 査読有
11. Suzaku Observation Adjacent to the South End of the Radio Arc, R. Fukuoka, T.G. Tsuru (全 4 名, 4 番目) 2009, PASJ, 61, 593-600, 査読有
12. Time Variability of the Neutral Iron Lines from the Sagittarius B2 Region and Its Implication of a Past Outburst of Sagittarius A, T. Inui, T.G. Tsuru (全 4 名, 4 番目) 2009, PASJ, 61, S241-S253
13. X-Ray Reflection Nebulae with Large Equivalent Widths of the Neutral Iron  $K\alpha$  Line in the Sagittarius C Region, H. Nakajima, T.G. Tsuru (全 8 名, 2 番目) 2009, PASJ, 61, S233-S240, 査読有
14. A New Supernova Remnant Candidate and an Associated Outflow in the Sagittarius C Region, T.G. Tsuru (全 6 名, 1 番目) 2009, PASJ, 61, S219-S223, 査読有

15. X-Ray Observations of the Sagittarius D HII Region toward the Galactic Center with Suzaku, M. Sawada, T. G. Tsuru (全 6 名, 5 番目) 2009, PASJ, 61, S209-S218, 査読有
16. Suzaku Detection of Extended/Diffuse Hard X-Ray Emission from the Galactic Center, T. Yuasa, T. G. Tsuru, K. Nakazawa (全 15 名, 12 番目) 2008, PASJ, 60, S207-S222, 査読有
17. A Time Variable X-Ray Echo: Indications of the Past Flare of the Galactic Center Black Hole, K. Koyama, T. G. Tsuru (全 4 名, 4 番目) 2008, PASJ, 60, S201-S206, 査読有
18. Suzaku Spectroscopy of an X-Ray Reflection Nebula and a New Supernova Remnant Candidate in the Sgr B1 Region, M. Nobukawa, T. G. Tsuru, H. Nakajima, (全 10 名, 2 番目) 2008, PASJ, 60, S191-S200, 査読有
19. Suzaku Observation of G359.79-0.26, a New Supernova Remnant Candidate in the Galactic Center, H. Mori, T. G. Tsuru (全 5 名, 2 番目) 2008, PASJ, 60, S183-S190, 査読有
20. Discovery of X-Ray emission from the Dark Particle Accelerator HESS J1614-518 with the Suzaku Satellite, H. Matsumoto, T. G. Tsuru (全 5 名, 4 番目) 2008, PASJ, 60, S163-S172, 査読有
21. X-Ray Spectroscopy of SN1006 with Suzaku, H. Yamaguchi, H. Nakajima, T. G. Tsuru (全 10 名, 10 番目) 2008, PASJ, 60, S141-S152, 査読有
22. Performance of the Charge Injection Capability of Suzaku XIS, H. Nakajima, T. G. Tsuru, (全 20 名, 4 番目) 2008, PASJ, 60, S1-S10, 査読有
23. The SXI: CCD camera onboard the NeXT mission, H. Tsunemi, T. G. Tsuru (全 5 名, 2 番目) 2008, SPIE, 7011, 70110Q-70110Q-10, 査読無
24. Evaluation of the fully-depleted back-illuminated CCD for Subaru Suprime-Cam, Y. Kamata, T. G. Tsuru (全 9 名, 4 番目) 2008, SPIE, 7021, 70211S-70211S-9, 査読無

[学会発表] (計 7 件)

25. S. Nakashima, T. G. Tsuru et al., “Progress in Development of Monolithic Active Pixel Detector for X-ray Astronomy with SOI CMOS Technology”, TIPP 2011

26. .G. Ryu, T. Tsuru et al., “Design and Development of Trigger-driven Readout with X-ray SOI Pixel Sensor”, IEEE NSS/MIC 2011
27. S. Nakashima, T. Tsuru et al., “Development of a built-in Analog-to-Digital Converter for a X-ray Astronomy Detector with the SOI CMOS Technology”, IEEE NSS/MIC 2011
28. T. Tsuru et al., “Development and Performance of X-ray Astronomical SOI pixel sensor”, IEEE NSS/MIC 2011
29. S. G. Ryu, T. G. Tsuru et al., “Development of X-ray Imaging Spectroscopy Sensor with SOI CMOS Technology”, IEEE NSS/MIC 2010
30. (国際会議招待講演) The Suzaku Highlights, T. G. Tsuru (全 1 名, 1 番目) Vulcano Workshop 2008. 5. 26-31, Vulvano, Italy
31. (国際会議招待講演) The NeXT mission, T. G. Tsuru (全 1 名, 1 番目) Vulcano Workshop 2008. 5. 26-31, Vulvano, Italy

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 1 件)  
X線撮像装置 (アルミ/ポリイミド/アルミ遮光膜) 2009, 特願 2009-074656, 発明者: 高木慎一郎, 鶴剛, 他 6 名

○ 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等  
<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/ryu/html/SOIPPIX.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鶴 剛 (TSURU TAKESHI)  
京都大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 10243007

### (2) 研究分担者

新井 康夫 (ARAI YASUO)  
大学共同利用機関法人  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授  
研究者番号: 90167990