

# ASTRO-H 衛星搭載 X 線 CCD カメラで用いる CCD の放射線耐性試験

宮崎大学 工学部教育研究支援技術センター

○西岡 祐介

## 1. はじめに

2015 年に打ち上げ予定の ASTRO-H 衛星に搭載される軟 X 線 CCD カメラ (Soft X-ray Imager;SXI) には、新規に開発した CCD が搭載される。この CCD は、より広いエネルギー帯域での検出効率の向上を目指して開発し、過去の衛星で搭載された CCD に比べて 2 倍以上厚い空乏層を実現したが、宇宙での利用実績に乏しいため、放射線耐性の評価が必要となる。放射線耐性の具体的な評価項目の 1 つに電荷転送損失 (Charge Transfer Inefficiency;CTI) の増加の度合いがある。

一般に CCD は衛星軌道上で、陽子を主とする放射線により損傷を受けることが知られており、陽子が CCD に入射すると、CCD を構成している Si 結晶中に格子欠陥が生じる。このため、CCD の電荷転送経路に電荷トラップができ、この電荷トラップに信号電荷が捕獲されることにより CTI が増加してしまう。これは分光性能の劣化に繋がるため、陽子の照射量による性能劣化を見積もる必要がある。

そこで、SXI に搭載される CCD の放射線耐性を調べるため、九州大学のタンデム加速器を用いて陽子照射試験を行った。ここでは、陽子照射によって放射線損傷を与えた CCD での CTI の性能評価について報告する。

キーワード : X 線 CCD, タンデム加速器, Charge Transfer Inefficiency (CTI)

## 2. X 線 CCD カメラ

### 2.1 X 線 CCD の概要

X 線 CCD は、検出面に入射される X 線光子について、入射位置とエネルギーが測定できる検出器であり、ピクセルサイズで決まる高い位置分解能と適度なエネルギー分解能を持つことから、X 線望遠鏡の焦点面検出器として広く使われている。

X 線 CCD は、一般的なデジタルカメラに使われている可視光用 CCD と同様に、光電効果により X 線を検出する。可視光用 CCD の場合、1 つの光子が CCD に入射して光電吸収されると、1 つの電子正孔対ができる。可視光用 CCD では、1 ピクセルに多数の光子が入射するため、生成された電子正孔対の数を数えれば、入射した光子の数、すなわち入射光の強度を知ることができるが、入射光のエネルギー (色) を直接計ることはできないため、カラーの画像を取得するためには、光の三原色に対応したフィルターを通して各色の強度を測定する必要がある。一方、X 線 CCD では、1 つの光子が CCD に入射して光電吸収されると、そのエネルギーに比例した多数の電子正孔対ができる。この生成された電子の数を数えることにより、入射した X 線のエネルギーを知ることができる。



図1 X線 CCD の外観

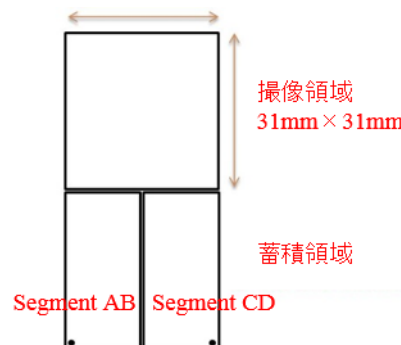


図2 CCD の概略図

ここで、図1に SXI に搭載される CCD の写真、図2にこの CCD の概略図を示す。この CCD は、上半分が

撮像するための領域、下半分がデータを蓄積するための領域に分かれており、データを蓄積するための領域には直接、X線が入射しないようにカバーがされている。また、データは CCD の半分ずつ別々に読み出している (segment AB および CD)。データを取得する流れとしては、露光中、撮像するための領域に入射したデータを蓄積するための領域に転送し、その領域でそのデータを読み出す。その間に撮像するための領域では、次の露光を行うことを繰り返している。

## 2.2 放射線損傷とその緩和法

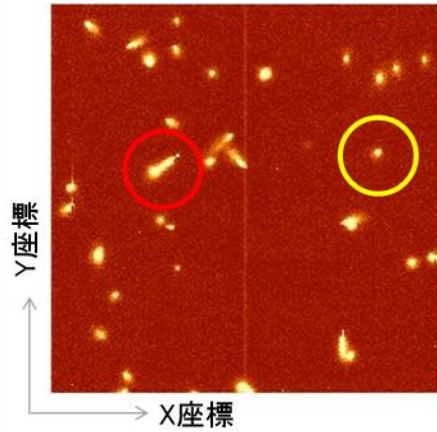


図3 XIS で取得された画像

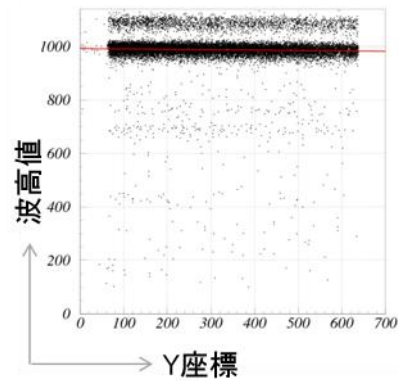


図4 転送回数と波高値の関係

宇宙空間で X 線 CCD を用いる場合、宇宙線による放射線損傷の評価が重要となる。図 3 に現在、宇宙空間で運用されている「すざく」衛星に搭載されている X 線 CCD カメラ XIS で取得した画像を示す。図中の黄丸で示した点で見えるのが X 線、赤丸で示した線で見えるものが宇宙線のイベントである。この図から X 線だけではなく、宇宙線も CCD に入射してきていることが分かる。宇宙線の構成要素は主に陽子、電子、ガンマ線である。これまで、従来の X 線 CCD に関して、条件を変更しながら、CTI の増加の度合いが調べられており、CTI を同じ照射量で比べた場合、電子に比べて陽子の方が劣化を引き起こす割合が高いことが分かっている。これは陽子が CCD に衝突することによって生じる Si 原子内の格子欠損が X 線 CCD の放射線損傷の主要因であることを示している。この格子欠損が原因で生じた電荷トラップによって、1 回転送を行う度に失われる電荷の割合のことを CTI といい、式 (1) で定義される。

$$Q = Q_0 \times (1 - CTI)^{2Y} \tag{1}$$

Q は転送後の電荷量、 $Q_0$  が転送前の電荷量を示す。図 4 に転送回数と波高値の関係を示す。横軸に転送回数の半分である Y 座標、縦軸に各ピクセルの信号電荷である波高値を表し、転送によって失われる信号電荷を調べることができる。この図を作成するには、CCD 全面に既知のエネルギーが入射しなくてはならないため、今回は  $^{55}\text{Fe}$  の放射線源を用いた。図 4 の濃い部分が約 5.9keV に相当する波高値、薄い部分が約 6.5keV に相当する波高値となり、濃い部分を式 (1) でフィッティングすることにより、図中の赤い線が得られる。この赤い線の傾きが式 (1) の CTI であり、損傷前は傾きがほぼ水平だが、損傷後は転送中に電荷トラップにより電荷を失うため、傾いてしまう。

この放射線損傷を緩和する方法として、いくつか方法がある。1 つ目は、電荷注入 (Charge-Injection; CI) 法である。図 5 に CI 機能の概略図を示す。図中の横軸に方向、縦軸に時間の流れを示しており、X 線イベントの電荷が転送される様子を表している。CI 機能は、放射線損傷によって Si 結晶中に

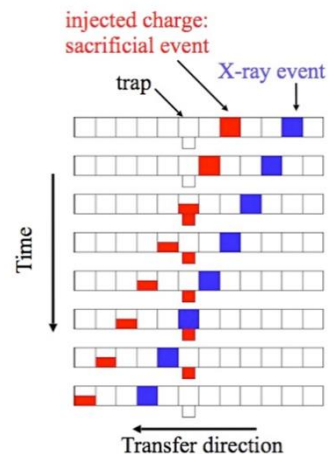


図5 電荷注入機能の概略図

生じた電荷トラップを埋めるために犠牲電荷を注入する機能のことである。図中の赤で示された犠牲電荷を意図的に注入することにより、後から転送される X 線イベントの電荷を失わずに転送することができる。この CI 機能がない場合、転送されてきた X 線イベントの電荷が電荷トラップにより捕らえられ、本来持っていた電荷量より低く見積もられてしまう。2つ目は、温度による最適化である。電荷トラップにより、捕えられた電荷が再放出されるまでの時間は、温度に依存することが分かっており、捕えられた信号電荷の情報を拾うことができる。

そこで、今回、ASTRO-H 衛星に搭載される X 線 CCD の放射線耐性と、これらの緩和法でどの程度、緩和できるかを調べるために陽子照射による放射線耐性試験を行った<sup>2)</sup>。

### 3. 実験内容

#### 3.1 実験に用いた素子

本実験には、図 6 で示す撮像領域のサイズが 30.720mm×30.720mm の CCD-NeXT4 EM03 素子と図 7 で示す撮像領域のサイズが 7.680mm×6.144mm の Astro-H mini-CCD05 素子を用いる。今後、EM03 素子を大型素子、mini-CCD05 素子を小型素子と呼ぶ。2つの素子の違いは、大きさによる違いのみである。大型素子は、図 6 に示すようなカメラシステム内に設置し、散乱ビームを照射しながらデータを取得した。このカメラシステムは、3.3 節で示す散乱槽の外部にフランジに接続し、散乱ビームが大型素子のほぼ中心に照射されるようになっている。また、大型素子には常時 <sup>55</sup>Fe からの X 線が照射された。一方、小型素子はカメラシステムに搭載せず、3.3 節で示す散乱槽内に置いた治具に取り付け、ビームの照射だけを行った。小型素子は後日、<sup>55</sup>Fe からの X 線を照射し、データを取得した。



図 6 大型素子とカメラシステムの外観



図 7 小型素子の外観

#### 3.2 実験施設

本実験は、2012 年 2 月 1 日から 2012 年 2 月 5 日の 5 日間、九州大学のタンデム加速器を使用して行った。図 8 に、九州大学のタンデム加速器施設の概観を示す。本実験では、散乱槽内に直入射したビームではなく、散乱ビームを素子に照射する方法をとり、実験諸元を表 1 に示す。

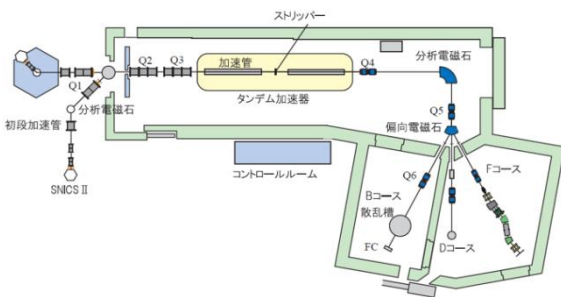


図 8 タンデム加速器施設の概観

表 1 実験諸元

項目	値
加速器からの陽子ビームのエネルギー	10.5MeV
CCD 素子に入射する陽子ビームの中心エネルギー (FWHM)	6.7±0.8MeV
加速器のビーム強度	50nA – 1μA
CCD 素子に入射する陽子の最大強度	2.4×10 <sup>4</sup> cnt s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>
総照射陽子数	9.3×10 <sup>8</sup> cnt cm <sup>-2</sup>



### 3.3 実験セットアップ

図9に、散乱槽内部の実験セットアップの概略図、図10に実際に散乱槽内にセットアップした際の写真を示す。図9に示すように散乱槽の左側からタンデム加速器で加速された陽子ビームが入射し、散乱槽中央に固定したカーボン薄膜の散乱体で散乱される。大型素子を搭載したカメラシステムは、散乱角  $90^\circ$  の位置にある散乱槽下側のフランジに接続させた。小型素子はカメラシステム内ではなく、散乱槽下側の回転リング上に治具を取り付け、設置した。本実験で、タンデム加速器からの直入射ビームではなく、散乱させたビームを CCD に照射した理由は、

- (1) ビーム強度を落とすため
- (2) 強度を正確にモニタするため

の2点である。直入射ビームの強度は、本実験の目的には強すぎるため、散乱させることで強度を落している。また、ビーム軸に対して CCD と対象な位置に半導体検出器 (Solid State Detector; SSD) を設置し、ビーム強度を正確にモニタできるようにした。また、散乱体にカーボン薄膜を用いた理由は、カーボンの第一励起状態が  $4.4\text{MeV}$  と比較的大きいことなどが挙げられる。ここで、 $4.4\text{MeV}$  の非弾性散乱されたビームは、CCD 素子の前に設置した  $130\mu\text{m}$  厚のアルミ薄膜で構成されるビーム減速材で取り除いた。また、回転ステージ上に散乱ビームを完全に防ぐ厚さのアルミ板を設置して、タンデム加速器からビームが照射されている状態でも CCD 素子にビームが照射されないようにした。これは、最初のビーム照射の際、まず、SSD で期待するビーム量・スペクトルが取得できているかを確認するために、CCD にビームが照射されないようにするためである。

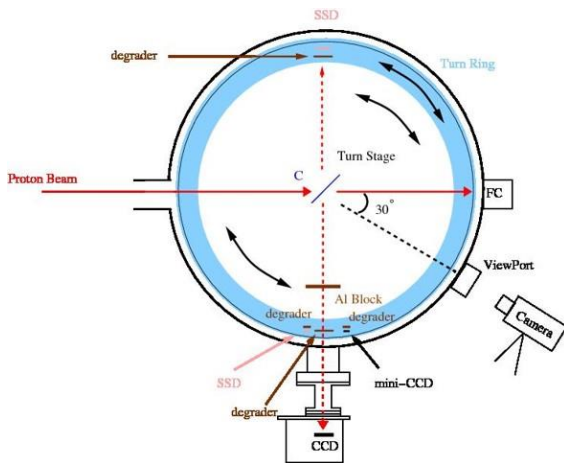


図9 散乱槽内のセットアップ概略図

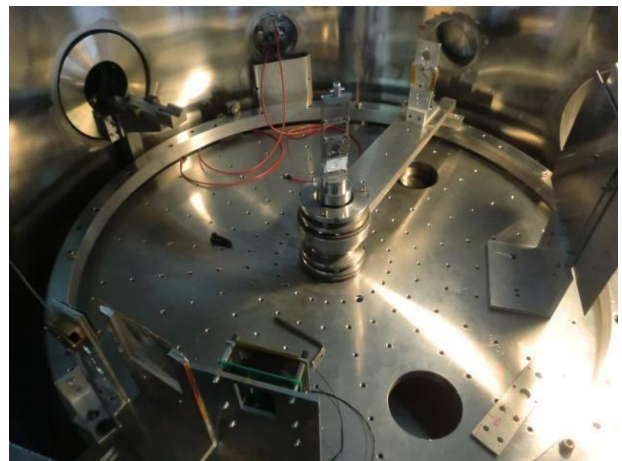


図10 散乱槽内のセットアップ写真

## 4. 実験結果

### 4.1 CTI の吸収線量依存性

本実験により、取得したデータは ASTRO-H 衛星軌道上の年数換算で、ビーム照射前・2日・0.5ヶ月・2.2ヶ月・6.6ヶ月・1.1年・2.2年・3.3年分相当の計8点である。各8点において、CI機能なしとありの2種類の状態で、 $^{55}\text{Fe}$  から照射される X 線のデータを取得した。大型素子は画素数が  $1280 \times 1280$  だが、読み出す際に  $2 \times 2$  ピクセルの情報をまとめているため、データとしては  $640 \times 640$  の画素数となる。以下で示す座標は、全てこの読み出したデータに対するものである。図11に CI機能なしの状態データ取得した Y 座標と波高値の関係、図12に CI機能ありの状態データ取得した Y 座標と波高値の関係を示す。いずれもの図も上図がビーム照射前、下図が 3.3 年相当分照射後のデータである。図11、図12の上下の図の比較より、3.3 年相当照射後は Y 座標の大きい画素、つまり、転送回数が多くなるにつれて波高値が低くなっていることが分かる。これは放射線損傷により生じた電荷トラップによって CTI が増加したことに起因する。また、図11と図12の比較から、図12の方で傾きが緩やかになっていることから、電荷注入を行うことで CTI の増加を緩

和できていることが分かった。次に、図 13 に CI 機能なしの状態でのデータ取得した際の CTI と吸収線量の関係、図 14 に CI 機能ありの状態でのデータ取得した際の CTI と吸収線量の関係を示す。いずれの図も縦軸が CTI、横軸が総照射陽子数、または吸収線量を ASTRO-H 衛星軌道上の年数に換算した時の値を示している。大型素子は、CCD の左右半分を別々に読み出しているため、各点で、2 つの CTI の値 (赤点と青点) が示されている。一方、小型素子は、大型素子よりも中心に近いところに置かれているため、同じビーム照射時間でも照射された総陽子数が多くなっている。また、小型素子のデータ (緑点) は CI 機能なしの状態のみデータを取得している。これらの結果を過去の結果と比較するため、「すざく」衛星搭載 X 線 CCD カメラ XIS の CCD で得られた CTI が宇宙空間でどの程度増加したか (黒線) も示している。この比較から、SXI に搭載される CCD は、現在運用中の XIS に搭載されている CCD とほぼ同程度の放射線耐性を持つことが分かった。

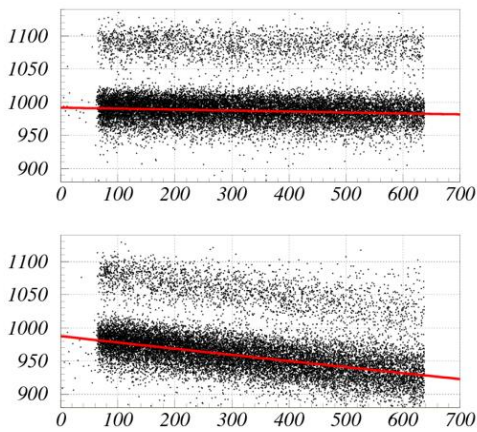


図 11 CI 機能なしの状態での取得した Y 座標とイベント波高値の関係 (上は照射前、下は 3.3 年分照射後)

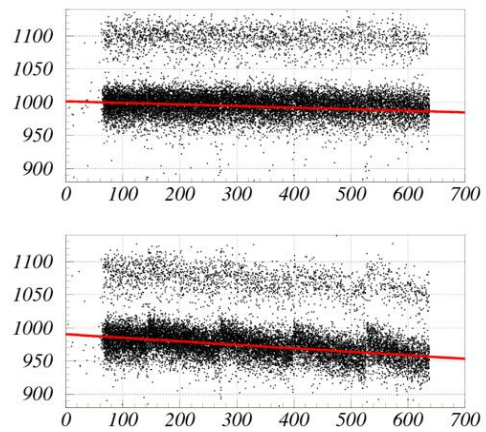


図 12 CI 機能ありの状態での取得した Y 座標とイベント波高値の関係 (上は照射前、下は 3.3 年分照射後)

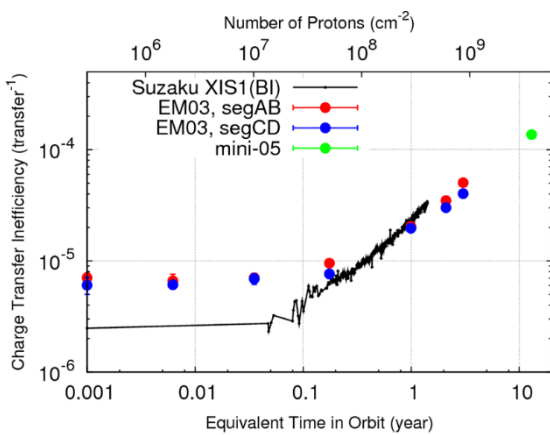


図 13 CI 機能なしの状態での CTI の吸収線量依存性。吸収線量を ASTRO-H 衛星軌道上の年数に換算してある

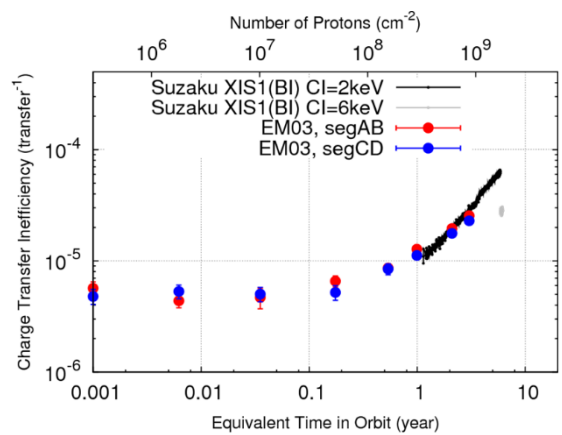


図 14 CI 機能ありの状態での CTI の吸収線量依存性。吸収線量を ASTRO-H 衛星軌道上の年数に換算してある

## 4.2 温度依存性

次に、CTI の温度依存性を調べるため、放射線損傷実験の後に損傷した大型素子を用いて大阪大学で追実験を行った。CCD 前面に  $^{55}\text{Fe}$  からの X 線を照射させ、 $-140^{\circ}\text{C}\sim-70^{\circ}\text{C}$  の範囲で CI 機能なしとありのデータ取得を行った。なお、九州大学での実験時の動作温度は  $-110^{\circ}\text{C}$  である。図 15 に大型の温度毎に調べた CTI の変化を示す。縦軸が CTI の値、横軸が温度を示しており、この図でも CI 機能なしのデータに比べて CI 機能ありの方で CTI が改善されていることが分かる。また、放射線損傷実験の際、 $-110^{\circ}\text{C}$  で駆動していたが、この図より、冷やせば冷やすほど性能が良くなるのが分かり、 $-140^{\circ}\text{C}$  まで冷やすと CTI は約 2 倍以上改善されるという結果となった。

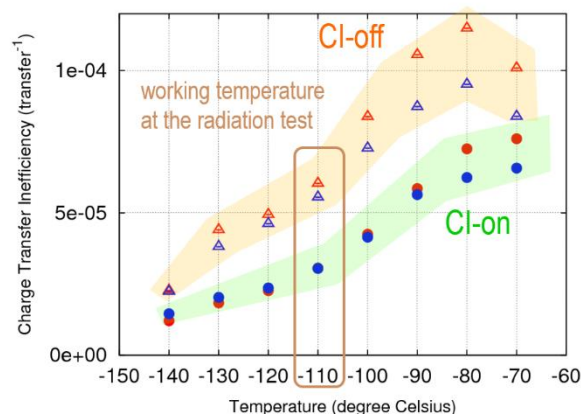


図 15 CI 機能の有無による CTI の温度依存性

## 5. まとめ

ASTRO-H 衛星に搭載される CCD の放射線耐性を調べるために九州大学のタンデム加速器を使用して、陽子照射実験を行った。実験に得られた結果により、本実験で用いた CCD の放射線耐性は現在、宇宙空間で運用中の「すざく」衛星に搭載されている CCD と同程度ということ、また、放射線損傷の緩和法の 1 つである電荷注入法により CTI の性能劣化の度合いが抑えられたことを確認できた。そして、CTI の温度依存性を調査した追実験により、CCD の駆動温度を変更することでも CTI を改善できることが確認できた。

### 参考文献

- 1) Tomida et al, MAXI-CCD 電子ビーム照射実験レポート, 2002
- 2) 森 浩二, CCD-NeXT4 放射線損傷実験 実験計画書, 2012