

# 斜入射法を用いたX線用CCDの軟X線帯域の検出効率の測定

○幸村孝由, 池田翔馬, 矢部一成, 宮川賢人(工学院大学), 金子健太(東京理科大), 常深博, 林田清, 穴吹直久, 中嶋大, 薙野綾(大阪大学), 堂谷忠靖, 尾崎正伸, 富田洋, 木村公, 岩井将親, 井澤正治, 近藤恵介 (ISAS/JAXA), 鶴剛, 内田裕之, 大西隆雄(京都大学), 村上弘志(東北学院大), ASTRO-H SXI team

## 1. 概要

我々が開発している宇宙X線用CCDは裏面照射型のもので、CCD素子の表面には可視光遮光用に厚さ100nmのアルミニウムをコーティングしている。このアルミニウムは、2keV以下の軟X線にとっては、不感層となるため、軟X線帯域で高い検出効率を持つ裏面照射型のX線CCDの検出効率は、このアルミニウムの厚みで決まる。

我々は、レファレンス検出器を用いずに検出効率の測定が可能となる斜入射照射法を採用し、昨年と今年の2回、高エネルギー加速器研究機構の放射光施設において検出効率の測定を行った。特に、アルミニウムと酸素のK吸収端付近のXAFS(X-ray Absorption Fine Structure)構造を含むエネルギー帯域を重点的に検出効率の測定を行った。その結果、酸素のK輝線付近で83%の高い検出効率を持つことが分かった。また、昨年度の結果と比較して、0.5keV以下の帯域の検出効率に有意な差がないことから、コンタミによる影響は検出できない程度であることが分かった。

## 2. 開発しているX線CCD

我々が開発しているX線CCDは、ASTRO-H衛星に搭載するX線CCD(Soft X-ray Imager; SXI)で、浜松トニクス社製の裏面照射型CCD(BI-CCD; Back illuminated CCD)である。このBI-CCDは裏面照射であることに加え、200μmと非常に厚い空乏層を持つため0.4-12keVの広いエネルギー帯域で高い検出感度を誇る(関連講演;本シンポジウムP2-8, P2-246, P2-248)。一方、裏面照射型X線CCDは、天体からの可視光に加えて、地球大気からの紫外線にも感度があるため、我々が開発しているSXI用のX線CCD(Fig1)は可視光と紫外線を遮光する必要があり、その遮光対策として、**OBL**(**O**ptical **B**locking **L**ayer)と呼ぶ遮光膜を直接CCD素子の表面にコーティングし、可視光を遮光する。また、コンタミ源の汚染から、CCD素子を保護する目的に加え、この紫外線の遮光用に、SXIIは**CBF**(**C**ontamination **B**locking **F**ilter)を装備する。特に、2keV以下の軟X線帯域では、このCBFとOBLが不感層となるため、SXIの性能を表す指標である検出効率はCBFとOBLの厚みで決まる。

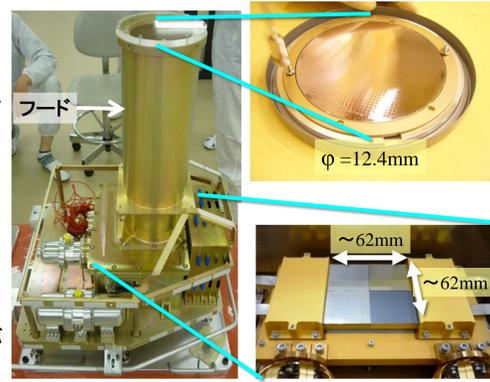


Fig1. SXIカメラシステム(左写真)。フード部分の上面にCBF(右写真)を装備している。CBFは、厚さ200nmのポリイミド(C<sub>22</sub>H<sub>10</sub>O<sub>4</sub>N<sub>2</sub>)の表面に、厚さ30nmのアルミニウムをコーティングした薄膜である。フードの仮面に、4枚のBI-CCD素子をモザイク状に配置している(右下写真)。この4枚のBI-CCDによって、SXIIは31'x31'の広い視野を観測することができる。また、このBI-CCD素子の表面には、厚さ100nmの単層のアルミニウムからなるOBLがコーティングされている。

## 3. X線に対する基本性能

軟X線帯域の検出効率に使用したX線CCDは、SXIのフライト品と同等の性能を持つ小型のBI-CCDを用いた(Fig.2)。

放射性同位体<sup>55</sup>FeからX線を照射して取得した小型BI-CCDのエネルギースペクトルと性能評価実験の結果をFig.3ならびにTable.1に示す。また、OBLをコーティングしていない小型BI-CCDの測定結果も参考として示す。

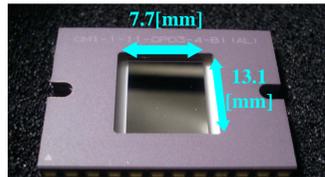


Fig2. 小型BI-CCD素子。1画素のサイズは24μm口で、空乏層の厚み、OBLを含めた表面処理・厚みはSXIのフライト用X線CCDと同じものである。

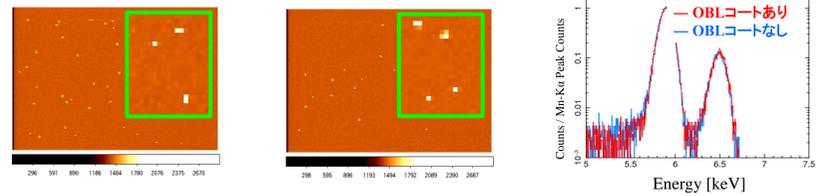


Fig3. 左図は<sup>55</sup>FeからのX線を照射したときに取得したX線イメージ。SXIのフライト品と同様に、データを取得する際には、2x2pixelsにbinningし、フレーム転送型として駆動してデータを取得している。左がOBLコートありの小型BI-CCD(OBL-CCD)、右がOBLコートなしの小型BI-CCD(No-OBL-CCD)のX線イメージ。緑枠内は、拡大図で、X線を検出していることが分かる。右図はOBL-CCDとNo-OBL-CCDで取得したエネルギースペクトル。

Table1. OBL-CCDとNO-OBL-CCDの性能評価結果

	Energy Resolution @ 5.9keV	Dark Current	Read out Noise
NO-OBL-CCD	147.7±0.6eV	0.09±0.03 e-/s/pixel	6.08±0.07 e-
OBL-CCD	147.4±0.5eV	0.09±0.04 e-/s/pixel	5.62±0.06 e-

※真空層内の真空度は-10<sup>-7</sup>Torr, CCDは-123°Cに冷却している。

Table.1に示した結果から**エネルギー分解能、暗電流といったBI-CCDの素子の基本性能がフライト品と同等であることが分かった**。また、OBLをコーティングしたことによる性能の変化もないことが分かった。

## 4. 軟X線帯域の検出効率の測定

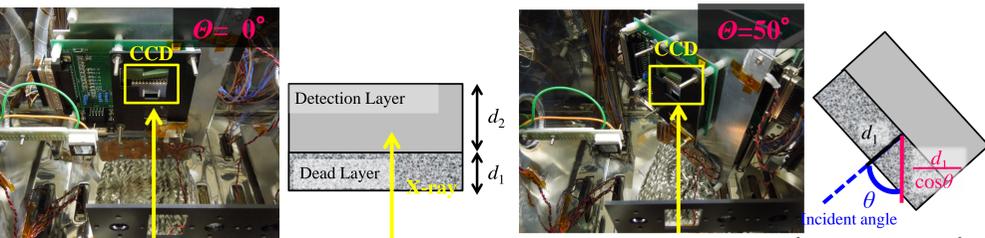
### 4.1 OBL-CCDの検出効率の測定方法(斜入射照射法)

検出効率を測定するには、照射するX線の絶対強度を求める必要がある。そのためには、予め検出効率が分かっている放射線検出器(レファレンス検出器)で、X線の絶対強度を測定する方法などがある。ただし、X線源からのX線の強度が時間変動したり、レファレンス検出器自身の系統誤差などが問題となる。我々は、これらの問題点を克服するために、斜入射照射法を用いて、BI-CCDの検出効率を測定した。

斜入射照射法では、BI-CCDに照射するX線の強度 $I_0$ が時間変動しない条件の下で、入射角度を $\theta=0^\circ$ と $\theta=50^\circ$ (さらに $60^\circ$ )に変えて(Fig.4)、2通りの角度で測定したX線の強度の比 $I_{50^\circ}(E)/I_0(E)$ を求める。この強度比は、

$$\frac{I_{50^\circ}(E)}{I_0(E)} = \exp\left\{-\left(1 - \frac{1}{\cos 50^\circ}\right)d_1 k_1\right\} \times \left[1 - \exp\left\{-\left(1 - \frac{1}{\cos 50^\circ}\right)d_2 k_2\right\}\right]$$

となり、入射X線の強度に依らないことが分かる。この強度比を、様々なエネルギーのX線を照射して測定することで、不感層の厚み( $d_1$ )を求めることができる。



$I_0(E) = I_0 \times \exp(-d_1 k_1) \times \{1 - \exp(-d_2 k_2)\}$   
 $I_{50^\circ}(E) = I_0 \times \exp\left(-\frac{d_1 k_1}{\cos 50^\circ}\right) \times \left\{1 - \exp\left(-\frac{d_2 k_2}{\cos 50^\circ}\right)\right\}$   
 $I_0$ : incident X-ray intensity  
 $I_0, I_{50^\circ}$ : detected X-ray intensity at  $\theta=0^\circ$  and  $\theta=50^\circ$   
 $k_1, k_2$ : attenuation length of dead layer and detection layer  
 $d_1, d_2$ : thickness of dead layer and detection layer

Fig4. 真空容器内部の写真(上段の2枚)。BI-CCDはθステージ上に設置し、入射角度を変えることができる。左と右の写真と図は、入射角度がそれぞれ0°と50°の時のものになる。0°入射時に比べ、50°入射の方が、OBLの厚み $d_1$ が、 $1/\cos 50^\circ$ 倍だけ厚くなる事が分かる。

斜入射実験では、入射X線の強度が安定していることが不可欠である。そこで、本研究ではX線の強度が安定しているKEK-PFのBL-11Aで実施した。実施した時期は、2012年3月と、2013年5月の2回である(Fig.5)。

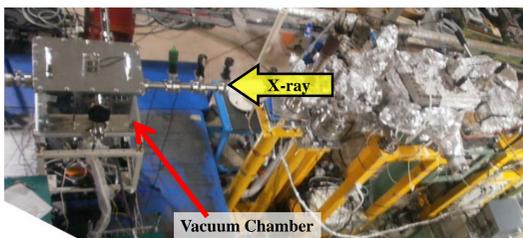


Fig5. KEK-PFのBL-11Aの下流にセットアップした実験装置の写真(左)。

### 4.2 OBL-CCDの検出効率の測定結果とまとめ

入射角度が $0^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ の時に、光子計数モードで取得したエネルギースペクトルをFig.6に示す。0.2-1.8keVのエネルギー帯域で取得した $0^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ 入射時のエネルギースペクトルの強度比をFig.7に示す。Fig.7の結果から、OBLとCCD素子表面の不感層の厚みの設計値から算出した値が測定結果をよく再現できることが分かった。

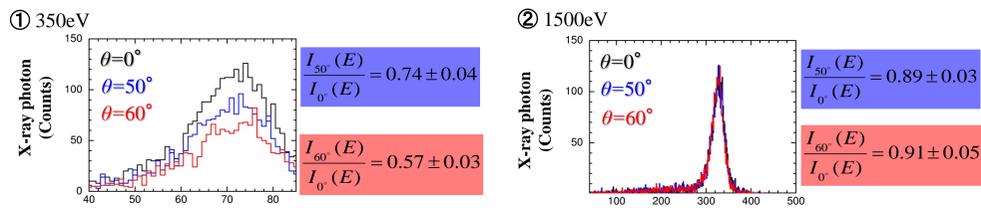


Fig6. 350eV(左)と1500eV(右)のX線を照射したときに取得したBI-CCDのエネルギースペクトル。左図から、入射角度が $0^\circ$ のものに比べ、 $50^\circ, 60^\circ$ の時にBI-CCDで検出した光子数が小さいことが分かる。これは、X線の入射角度が大きいくほど、X線にとって不感層となるOBLの厚みが厚くなることで、OBLで吸収されるX線の光子数が増え、結果としてX線CCDで検出するX線の光子数が減ったことによるものである。左図と右図を比較すると、薄いOBLの厚み程度では、角度を変えて不感層の厚みを2倍にしても、高いエネルギーのX線にとっては、OBLは不感層にならず、BI-CCDで検出するX線の光子数は変わらないことが分かる。

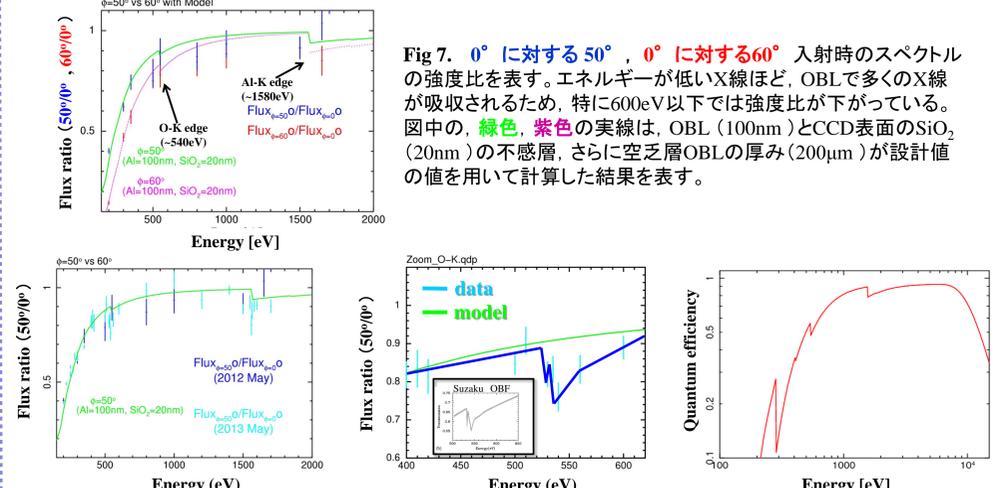


Fig7.  $0^\circ$ に対する $50^\circ, 0^\circ$ に対する $60^\circ$ 入射時のスペクトルの強度比を表す。エネルギーが低いX線ほど、OBLで多くのX線が吸収されるため、特に600eV以下では強度比が下がっている。図中の、緑色、紫色の実線は、OBL(100nm)とCCD表面のSiO<sub>2</sub>(20nm)の不感層、さらに空乏層OBLの厚み(200nm)が設計値の値を用いて計算した結果を表す。

Fig8. 2012年と2013年の強度比の結果(左)。0.5keV付近の左図の拡大図(中)。公開しているSXIの検出効率(右)。0.5keV以下の低エネルギー側の強度比について、2012年と2013年の測定結果を比較したところ、両者に有意な差がないことから、軌上のSuzaku XISで見られる**コンタミ物質の付着が、地上実験では斜入射実験で測定できないくらい少ないと分かった**(Fig.8の左図)。また、0.5keV付近の測定データと予想値との間には、測定誤差範囲を超える差が見られる。**この差はEAFS(Extended Absorption Fine Structure)によるもの**と考えられる(Fig.8の中図)。この結果をもとに、SXIのレスポンスとして公開しているCBFも含めたSXIの検出効率はFig.8の右図に示す通りである。