

X 線 CCD 用可視光遮断膜の性能評価

池田翔馬, 幸村孝由, 河合耕平, 金子健太, 渡辺辰雄 (工学院大学),
常深博, 林田清, 中嶋大, 穴吹直久, 上田周太郎 (大阪大学),
鶴剛 (京都大学), 堂谷忠靖, 尾崎正伸, 藤永貴久 (ISAS/JAXA),
北本俊二, 村上弘志 (立教大学), 平賀純子 (東京大学),
森浩二 (宮崎大学), 他 ASTRO-H SXI チーム

2011 年 8 月

概要

我々は宇宙 X 線を検出するための X 線 CCD の開発を行っている。X 線 CCD は X 線以外に、可視光・紫外線にも感度があるため、可視光・紫外線を遮断する必要がある。Suzaku 衛星に搭載している XIS(X-ray Imaging Spectrometer) は CCD の前面に可視光・紫外線を遮断するための薄膜 (OBF: Optical Blocking Filter) を装備している。OBF はアルミニウムとポリイミドからなる厚さ ~2500 Å の薄膜で、アルミニウムで可視光を、ポリイミドで紫外線を遮光する。OBF は薄膜であるため、取り扱いが難しく、衛星を打ち上げる際の振動で破れる恐れがある。

そこで我々は可視光遮断対策として、CCD 素子表面に直接コートする OBL (Optical Blocking Layer) の開発を進めている。我々は OBL をコートした X 線 CCD を試作した。この OBL をコートした CCD (OBL-CCD) の性能を評価するために、我々は高エネルギー加速器研究機構のビームライン BL-11A において、2keV 以下の軟 X 線を照射し CCD のエネルギー分解能、読み出しノイズ、暗電流の測定を行った。また何もコートしていない CCD (NO-OBL-CCD) にも同様の実験を行い、OBL の有無で性能に違いがないか確認を行った。800eV, 1400eV の単色の X 線に対して、OBL-CCD のエネルギー分解能は、それぞれ $208 \pm eV$, $220 \pm 15eV$ と分かり、結果として、OBL をコートすることによって性能が劣化することがないことを確認した。また、読み出しノイズと暗電流はそれぞれ $16.1 \pm 0.7e^-$, $1.00 \pm 0.36e^-/s$ であった。

1 OBL

OBL はポリイミドの薄膜を 2 枚のアルミニウムの薄膜で挟み込んだ構造をしている。今回実験を行う上で、OBL をコートした CCD (OBL-CCD) と OBL をコートしていない CCD (NO-OBL-CCD) の 2 種類を使用した。OBL-CCD は 3 図 1 のように左半面に OBL、右半面に Al 単層をコートしている。OBL の性能を測る際には OBL をコートした左半面に光を照射する。OBL-CCD と NO-OBL-CCD の仕様はどちらも表 1 に示したとおりである。

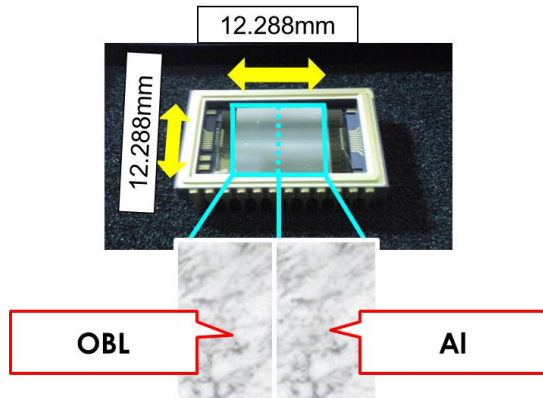


図1 OBL-CCD

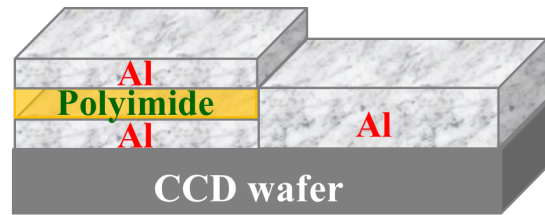


図2 OBLの断面図

表1 CCDの仕様

照射面	裏面照射型
転送方式	Full Frame Transfer 型
画素サイズ	24 μ m(H) \times 24 μ m(V)
画素数	512(H) \times 512(V)
垂直クロック相数	2相
水平クロック相数	2相
有効受光領域	12.288mm(H) \times 12.288mm(V)
空乏層厚	200 μ m

2 実験

OBLの有無によるCCDの性能の違いを調査するために、KEK-PFのBL11Aにおいて軟X線照射実験を行った。ここでは、実験のセットアップと取得したイメージについて記載する。

2.1 実験のセットアップ

図3に本実験のセットアップ写真を示す。写真右側がKEK-PFのBL11Aで、単色の軟X線が照射できるシステムになっている。写真左側が工学院大学の実験システムで、真空チェンバー内部にCCDが配置されており、X線が照射されるようになっている。BL11Aと真空チェンバーの間にはゲートバルブを3種類設けており、それぞれカプトン、タングステン、OBFを装備している。これらを挿入することでX線の強度を抑えることができる。

2.2 取得したイメージ

以上に示したセットアップで、1400eVのX線を照射して取得したイメージを図4に示す。どちらのイメージも左下の方に強度の高いX線が当たっているため、波高値の高いピクセルが多数存

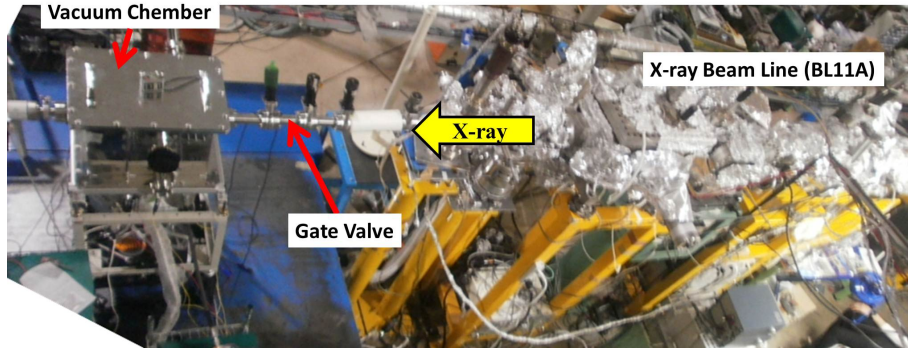


図 3 実験のセットアップ

在している。photon counting では 1pixel に 1 つ以上の X 線が入ってしまうと解析不能なため、この X 線の強度が高い領域は今回の解析では除外する。この領域以外の、X 線イベントが見える領域を解析対象として解析を行った。

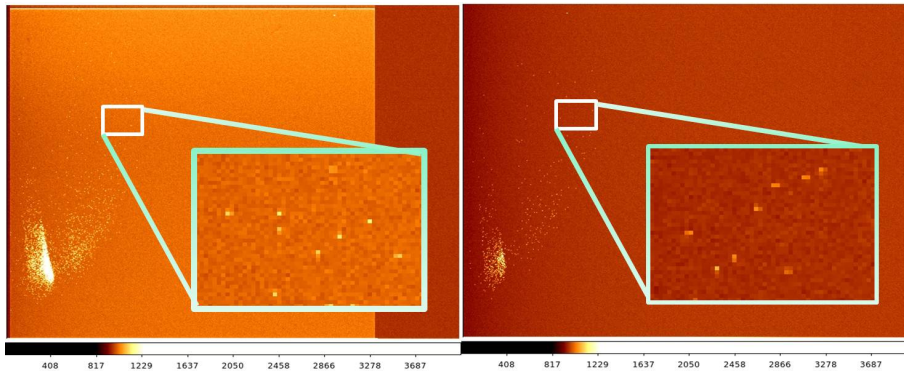


図 4 1400eV の X 線を照射して取得したイメージ。左：NO-OBL-CCD のイメージ。右：OBL-CCD のイメージ。四角枠内は拡大図。X 線イベントが見えている。

3 OBL-CCD と NO-OBL-CCD の性能比較

OBL の有無による CCD の性能の違いを調査するために、KEK-PF の BL11A において軟 X 線照射実験を行い、エネルギー分解能、暗電流、読み出しノイズの評価を行った。ここでは、実験のセットアップと性能評価について記載する。

3.1 解析方法

photon counting による解析の際に、以下に示すような方法で解析を行った。

- 解析したデータ
 - OBL の有無による性能を比較するため、OBL-CCD と NO-OBL-CCD で 1400eV と 800eV のエネルギーはどちらも取得しているため、1400eV と 800eV について解析した。また、OBL-CCD で取得している 1600eV と 1900eV のデータについても解析した。
- Event threshold の決定

Active 領域の 3 を超えるように設定した。

- Split threshold の決定

Grade 分岐比のバランスが極端に悪くならない (grade0 が少なすぎず、grade6 が多すぎない) ように閾値を設定した。

- Fitting について

CCD 表面の不感層によってエネルギーが吸収され、低いエネルギーとなった X 線があることを考慮し、main gaussian と sub gaussian と constant の関数で fitting を行った。

- Gain について

1400eV と 800eV の 2 点についてのスペクトルの center channel から傾きを求め、gain とした。

3.2 軟 X 線に対するスペクトルとエネルギー分解能

2 つの CCD に対して軟 X 線を照射した際に取得したスペクトルを図 5 に示す。NO-OBL-CCD に対して 800eV,140eV の 2 点、OBL-CCD に対して 800eV,1400eV,1600eV,1900eV の 4 点の X 線を照射している。800eV のスペクトルが 2 つのピークに見えているのは、1 つの pixel に 2 つの X 線イベントが侵入した pixel を抽出したため、1 つめのピークの 2 倍程度の位置にあることがわかる。どのスペクトルを見ても、低エネルギー側に尾を引いたような形になっているのは、X 線が CCD 前面にある何らかの不感層によって X 線のエネルギーが吸収されて、低いエネルギーとなって CCD が検出したためであると考えられる。また、特に 1900eV のスペクトルでテール成分が大きくなったのは、Si エッジのエネルギーを超えたため Si によって吸収され低いエネルギーとなり CCD が検出したイベントが多くあるためであると考えられる。

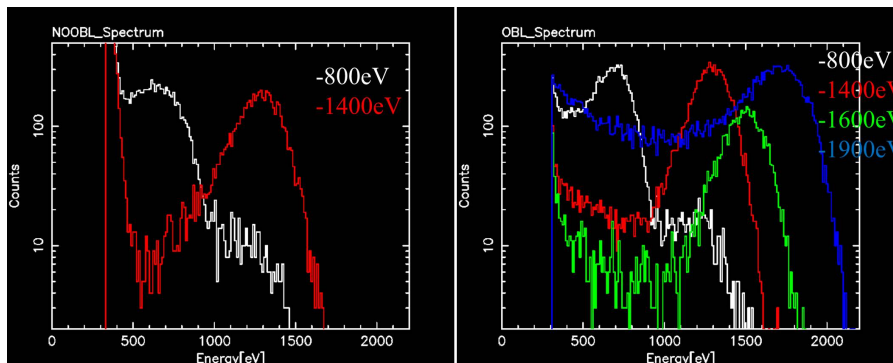


図 5 軟 X 線に対するスペクトル。左：NO-OBL-CCD に照射して得られたスペクトル。右：OBL-CCD に照射して得られたスペクトル。

続いて、OBL-CCD 単体で 1400eV と 1600eV のスペクトルを比較する。これは Al-edge の前後のエネルギーで OBL の Al コートによって X 線のエネルギーが吸収されていないか調べるためである。X 線本来の何にも吸収されていないスペクトルを main gaussian, CCD の前面にある何らかの不感層によってエネルギーが吸収され、低いエネルギーとなって検出されたスペクトルを sub gaussian, さらにテール成分を constant として解析を行っている。図 6 に OBL-CCD の 1400eV と 1600eV に対するスペクトルを示す。main gaussian と sub gaussian の面積比を計算すると

1400eV が 27 % , 1600eV が 23 % であった。Al edge の前後で main gaussian と sub gaussian の比を比較したところ有意な差はなかったことから OBL の Al による CCD 性能への悪影響がないことがわかる。

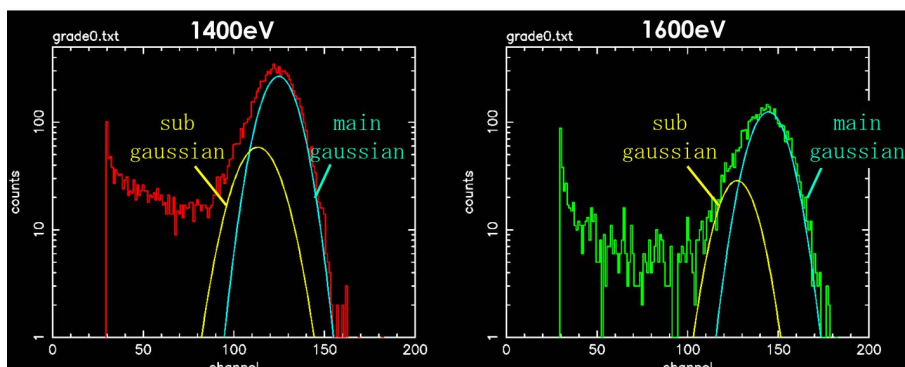


図 6 OBL-CCD のスペクトル。左：1400eV に対するスペクトル。右：1600eV に対するスペクトル。フィッティングの際に用いた二つの関数、main gaussian と sub gaussian の比を取り、1400eV と 1600eV を比較したところ有意な差はなかった。

2 つの CCD のそれぞれのエネルギーに対するエネルギー分解能は表 2 に示す。800eV と 1400eV で 2 つの CCD のエネルギー分解能を比較すると OBL-CCD の方が良いという結果になった。

表 2

	エネルギー分解能				
	gain	@800eV	@1400eV	@1600eV	@1900eV
NO-OBL-CCD	11.19 ± 0.05	258 ± 39eV	250 ± 23eV	---	---
OBL-CCD	10.47 ± 0.29	209 ± 13eV	221 ± 14eV	229 ± 13eV	252 ± 33eV

3.3 暗電流の評価

NO-OBL-CCD のエネルギー分解能が OBL-CCD と比較して悪い原因を調査するために、まず暗電流の調査を行った。2 素子それぞれ、VOC 領域と Active 領域のヒストグラムを比較した図を図 7 に示す。図を見ると NO-OBL-CCD は、VOC と Active のヒストグラムのピークの差が大きいことから暗電流が大きいことがわかる。また、表 3 に暗電流の計算結果を示す。計算結果からも同様に NO-OBL-CCD の暗電流が大きいことが分かった。今後は暗電流を抑えて実験を行う必要がある。

3.4 読み出しノイズの評価

暗電流と同様に、読み出しノイズの評価を行った。図 8 に示しているのは、HOC 領域のヒストグラムで、この FWHM が読み出しノイズに匹敵する。NO-OBL-CCD と OBL-CCD を比較すると、差がないことがわかる。また、表 3 に読み出しノイズの計算結果を示す。計算結果からも有意

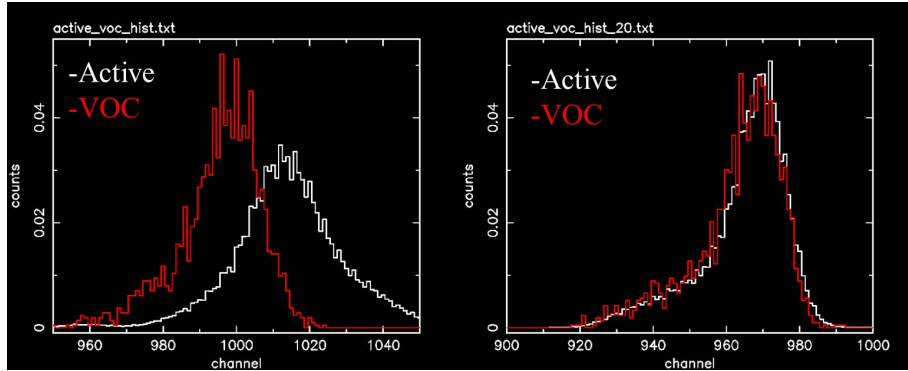


図7 暗電流の比較。左：NO-OBL-CCD。右：OBL-CCD。VOC領域とActive領域のヒストグラムを比較することで暗電流の大きさを求めることができる。

な差がないことがわかった。

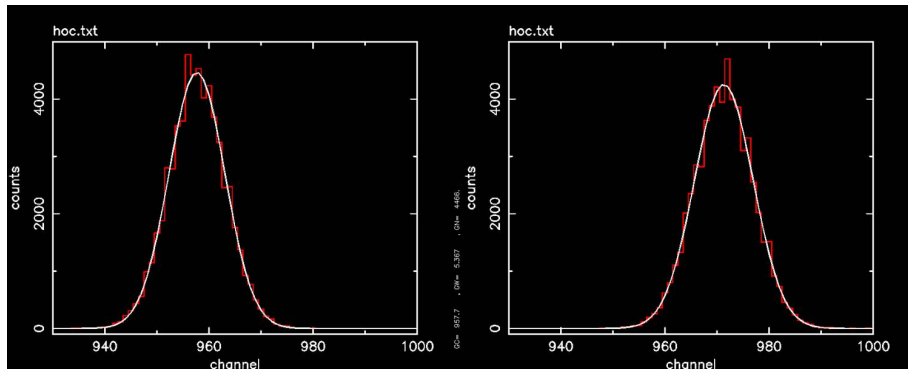


図8 HOC area のダークレベル。NO-OBL-CCD (左) と OBL-CCD (右) の HOC area の FWHM を比較した。Table3 に Read out noise の値を示している。

表 3

	暗電流 [e-/s]	読み出しノイズ [e-]
NO-OBL-CCD	10.2 ± 1.0	16.4 ± 0.3
OBL-CCD	1.00 ± 0.36	1.61 ± 0.7

4 まとめ

OBL-CCD のエネルギー分解能、読み出しノイズ、暗電流はそれぞれ $209 \pm 13\text{eV}@800\text{eV}$ (grade0) , $16.1 \pm 0.7\text{e-}$, $1.00 \pm 0.36\text{e-/s}$ であった。また NO-OBL-CCD はそれぞれ $258 \pm 39\text{eV} @800\text{eV}$, $16.4 \pm 0.3\text{e-}$, $10.2 \pm 1.0\text{e-/s}$ であった。2つの CCD の比較と、OBL-CCD の Al edge 前後のスペクトルの比較により、OBL をコートすることによって CCD に悪影響がないことが分かった。