



次期天文衛星搭載用X線CCD素子の性能評価 軟X線応答と特殊モード動作

○片多修平, 林田清, 薙野綾, 中嶋大, 穴吹直久, 常深博, 佐々木将軍, 上田周太朗, 井上翔太(大阪大学), 幸村孝由(工学院大学), 金子健太(東京理科大学), 堂谷忠靖, 尾崎正伸, 富田洋, 井澤正治, 近藤恵介(ISAS/JAXA), 鶴剛, 田中孝明, 内田裕之, 信川正順, 大西隆雄(京都大学), 村上弘志(東北学院大学), 森浩二(宮崎大), 他ASTRO-H/SXI チーム

我々は、衛星搭載用の軟X線CCDカメラの開発を行っている。2keV以下の軟X線帯域は、高温プラズマ中の高階電離したイオンからの輝線が多数存在するため、電子温度や元素組成比などの物理パラメータを測定するためには検出器の応答関数を精密に較正する必要がある。特にX線CCDの場合、光子のパイルアップを防ぐため、天体の明るさに応じて撮像の方法を変化させている。具体的には視野の一部分のみを撮像する"Windowモード"や、間欠的に露光する"Burstモード"などである。本研究では、同素子の軟X線(2keV以下)応答に関して、放射光施設におけるEM素子を用いた実験と、阪大のクリーンルームにおけるFM候補素子を用いた実験の結果を報告する。プロトタイプ素子で問題になっていた顕著なテイル成分が一桁以上削減されていることを示し、応答関数のモデルを紹介する。あわせて、実効的な露光時間を短くした特殊観測モード(Windowモード、Burstモードなど)の試験結果についても報告する。

➤ 軟X線応答の評価

- 衛星搭載用大型CCD素子のプロトモデルには、軟X線応答における低エネルギー側のテール強度が大きいう問題が存在した
- 特殊な表面処理が施された小型CCD素子(Pch-mini04)の開発により軟X線応答の改善を確認[2]
- 大型CCD素子(Pch-NeXT4)の製作では、ほぼ同じ表面処理を採用
- 今回はPch-NeXT4のEM素子(EM03-04, EM03-07)をKEK-PF BL-11Aに持ち込み、0.35-1.9keVの単色軟X線を照射し、応答を測定
- FM素子スクリーニング実験のデータを用いてFM候補12素子についても応答を測定した

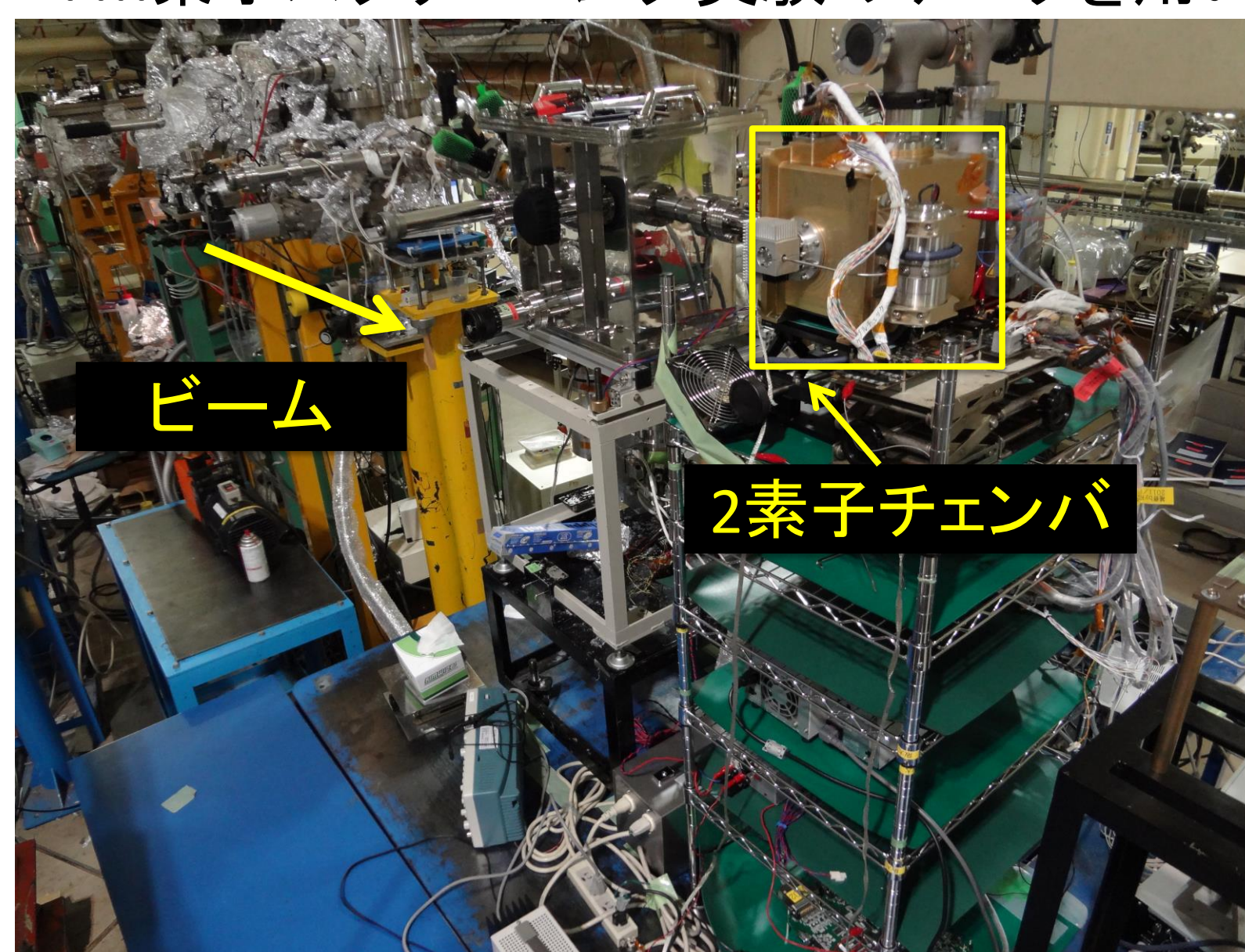


図1: KEK-PF BL-11Aでの実験のセットアップ

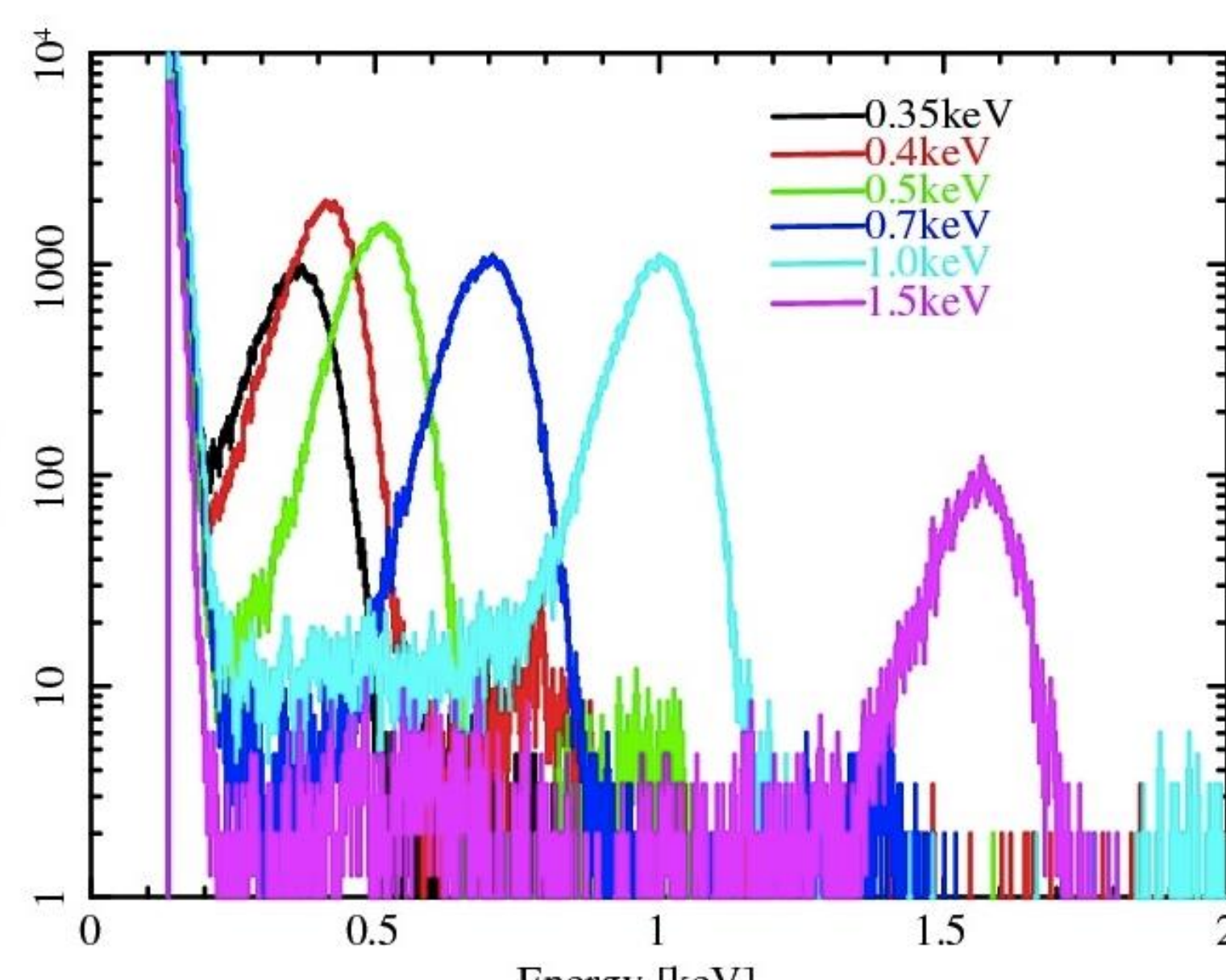


図2: KEK実験で得られたスペクトル (2012年10月、Seg AB、Grade0)

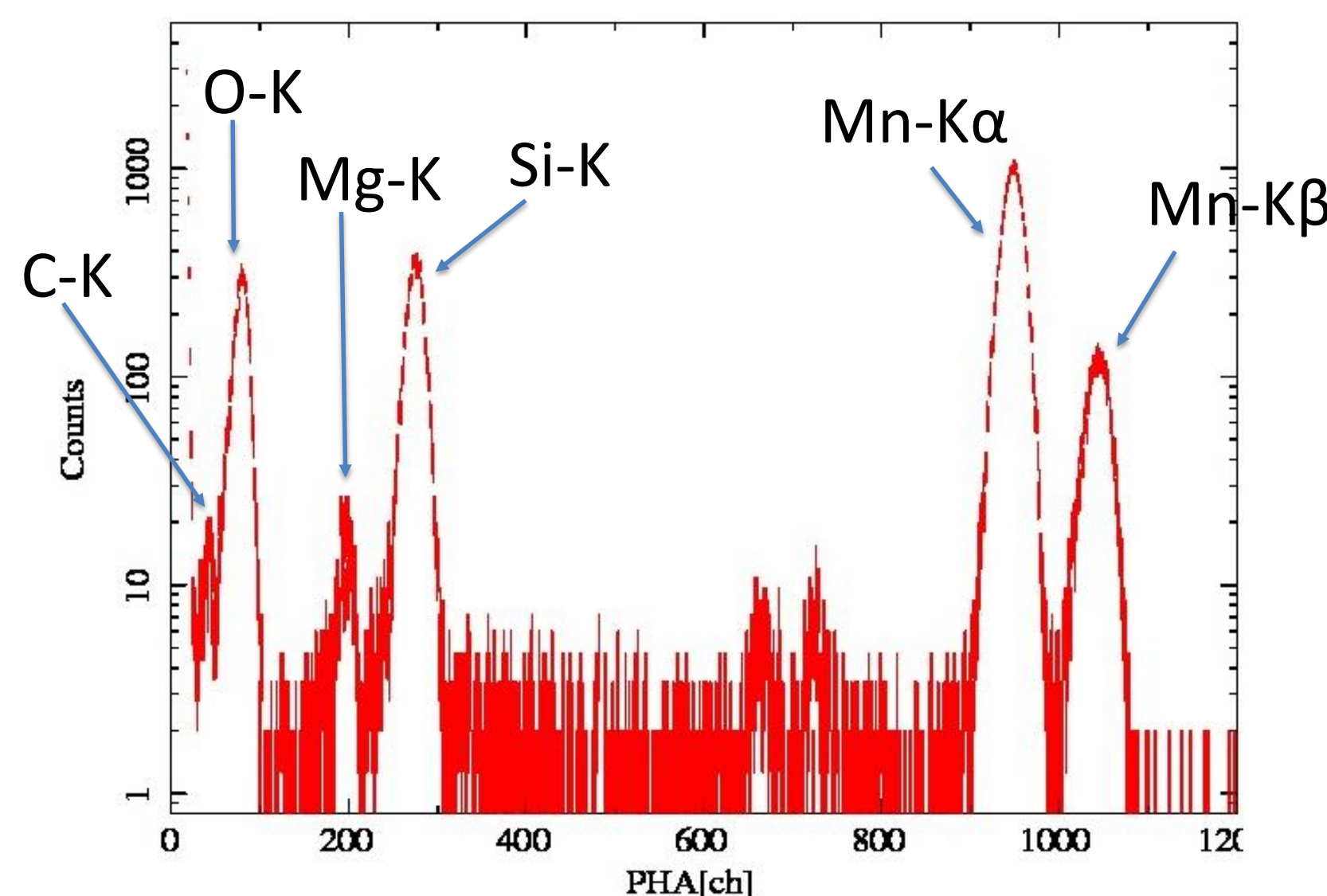


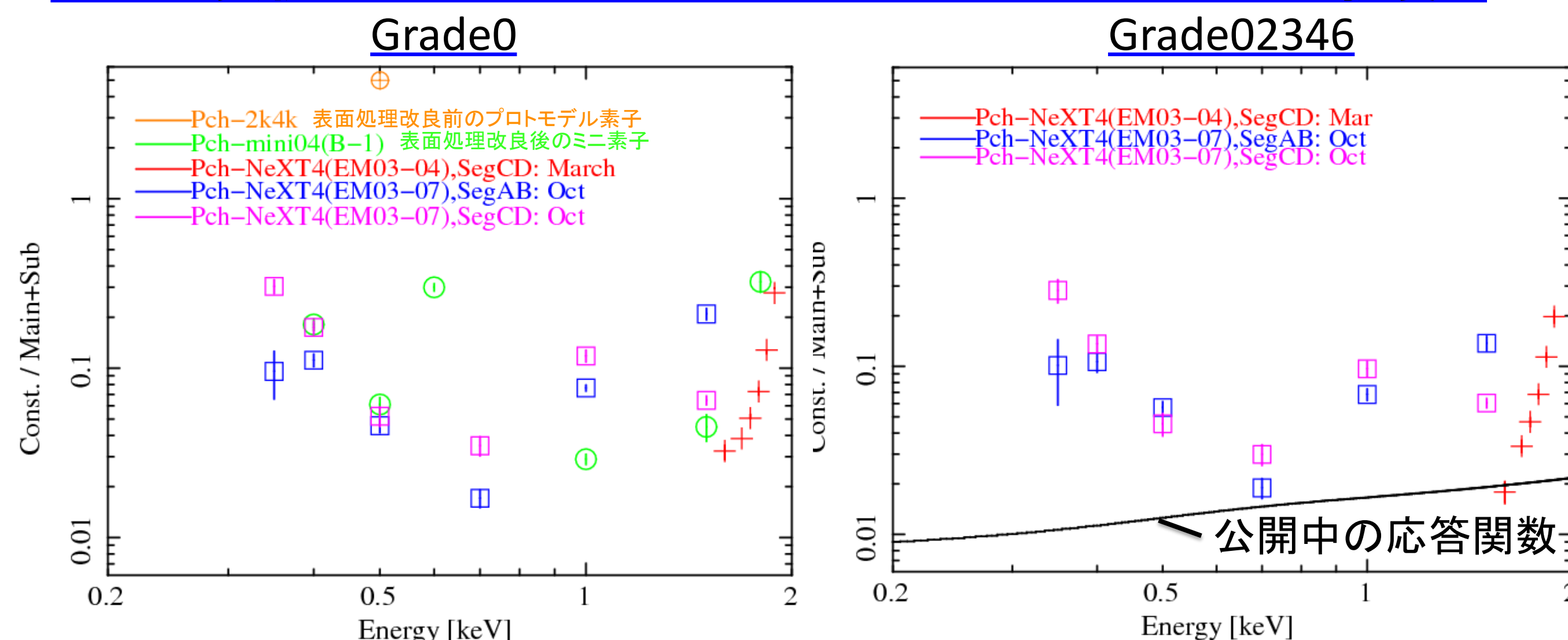
図3: スクリーニング実験で得られたスペクトル (2012年10月、Seg AB、Grade0)

- KEK-PF実験では0.35keV-1.9keVの様々なエネルギーの単一X線を照射(図2)
- スクリーニング実験ではX線発生装置とターゲットを用いてMn-K α , Mn-K β , Si-K, O-KがCCDに当たっていて(図3)、ここではSi-K, O-Kの応答を調べる
- それぞれの輝線についてGaussian二つに一定成分を加えた三成分のモデルでフィッティングを行った

結果

Main Gaussian+Sub GaussianとConst.の強度比

図4: KEK実験データでのMain Gaussian+Sub GaussianとConst.の強度比



各エネルギーにおいて、セグメントごと、素子ごとのばらつきがファクタ2程度に収まっている。プロトタイプ素子(Pch-2k4k)では低エネルギー側で強度比が1を超えていた(~5 @0.5keV)のでそれに比べると一桁程度の改善があることも同時にわかる。また、ASTRO-H/SXIチームが公開中の応答関数[4]は一定成分を過小評価しているため、応答関数の変更を検討する必要がある。

図5: スクリーニング実験データでのMain Gaussian+Sub GaussianとConst.の強度比

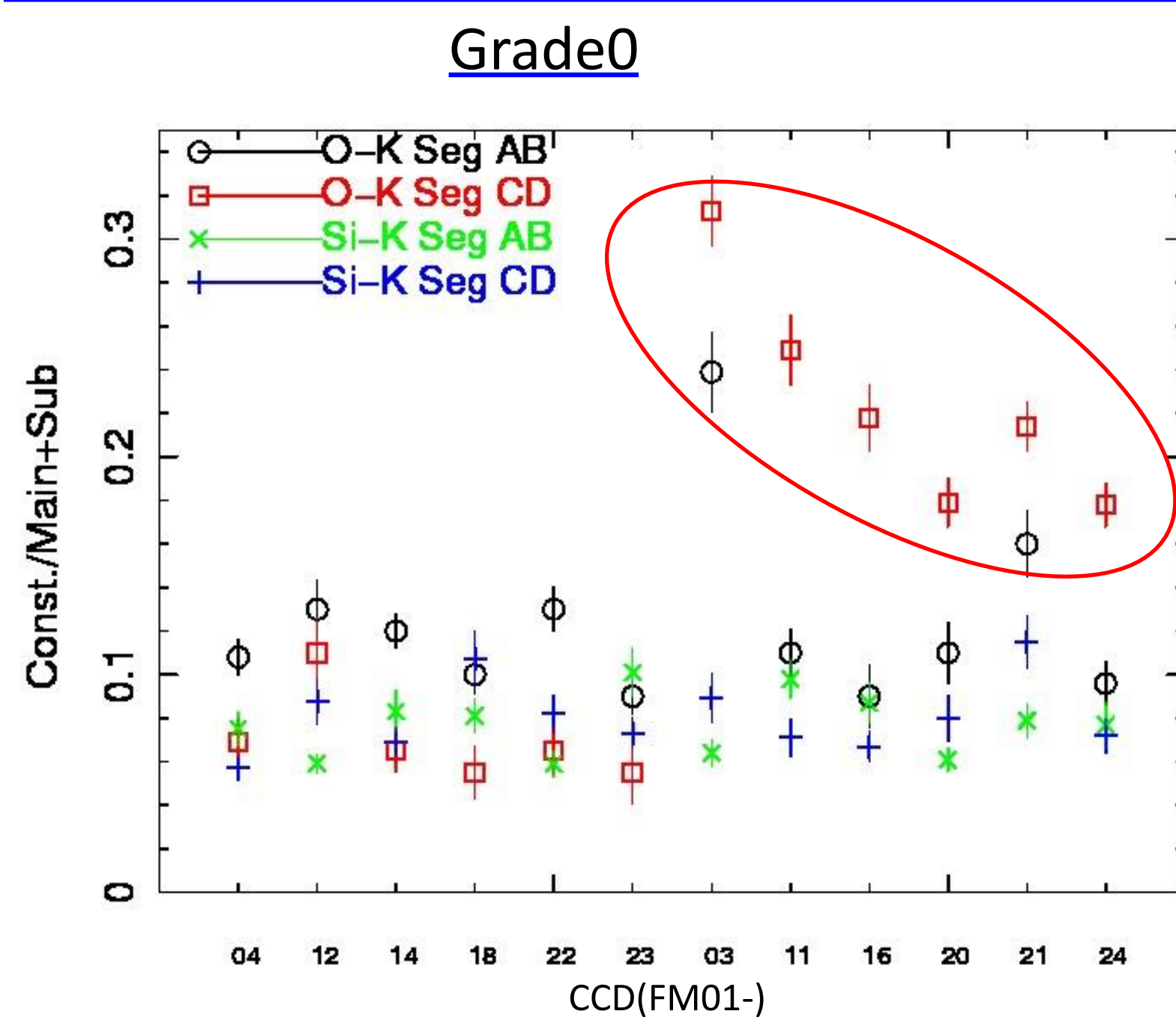


図5にFM候補12素子についてテール強度を評価した値をまとめた。おおむね0.1程度で分布しているものの、一部(図5赤丸で囲った点)で0.2~0.3と他に比べて有意に高い個所が見られた。図3に示したC-KとO-Kが切り分けられていないために一定成分を高く見積もっている可能性が考えられており、これについては現在調査中である。

➤ 特殊モードの評価

X線CCDの場合、光子のパイルアップを防ぐため、天体の明るさに応じて撮像の方法を変化させている。具体的には視野の一部分のみを撮像する"Windowモード"や、間欠的に露光する"Burstモード"などである。今回試験を行ったのは以下の5つ。

- Normal Mode
- Burst 2s full Window Mode
- Burst 0.1s full Window Mode
- No-Burst 1/8Window Mode
- Burst0.1s 1/8Window Mode

Normal Modeとの違い

- Burst Mode: ダミー露光を行うことで実効的な露光時間を短縮
- Window Mode: 電荷転送時に目的の視野領域だけ選択的に読み取る

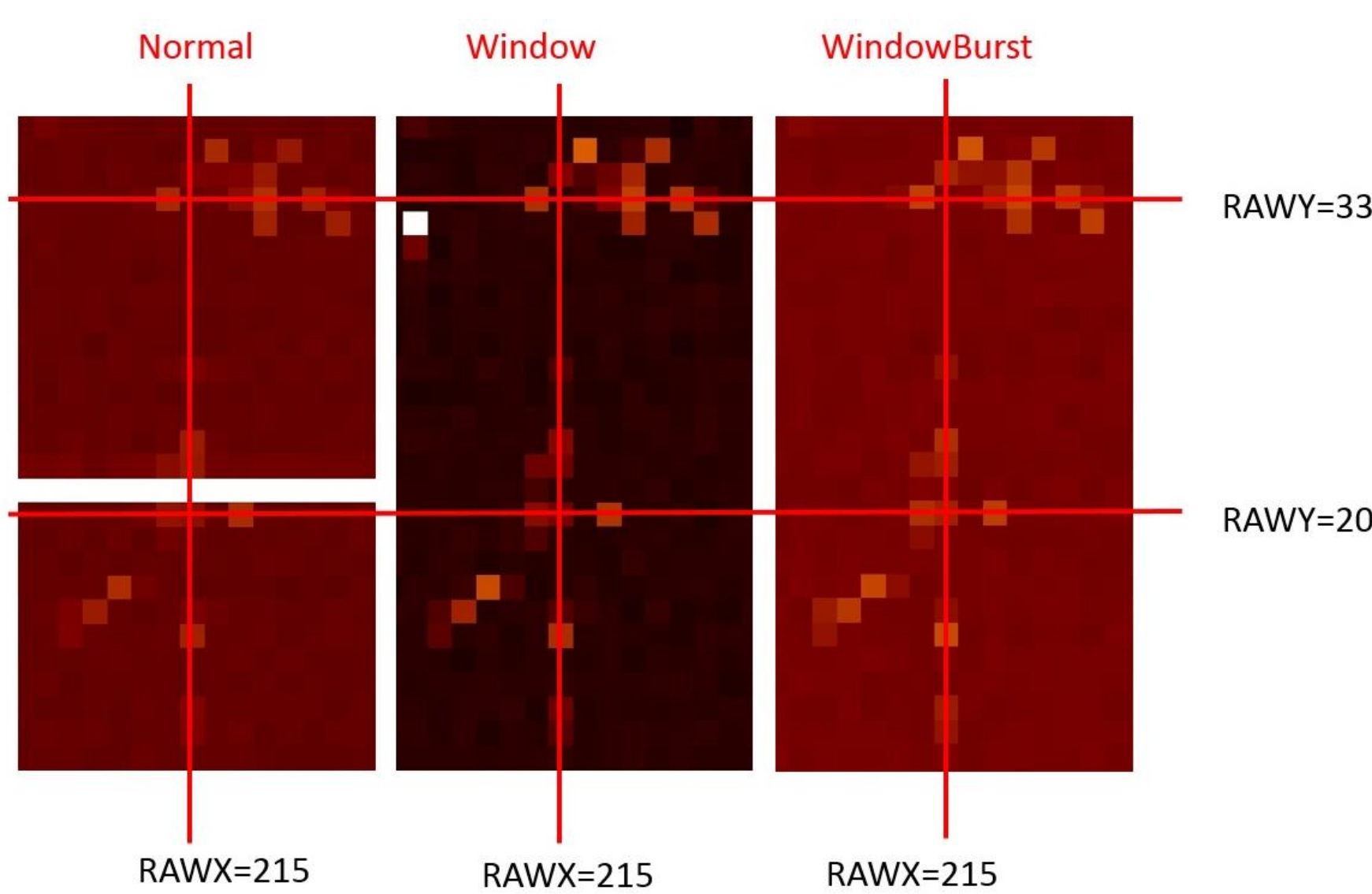


図6: Window Modeでのピクセルチェック

Window Modeで意図した領域を読み取れているか調べるために、LEDを照射して現れるパターンを調べた。ピクセル単位でずれがないことを確認した。

図7: 特殊モード試験で得られたスペクトル

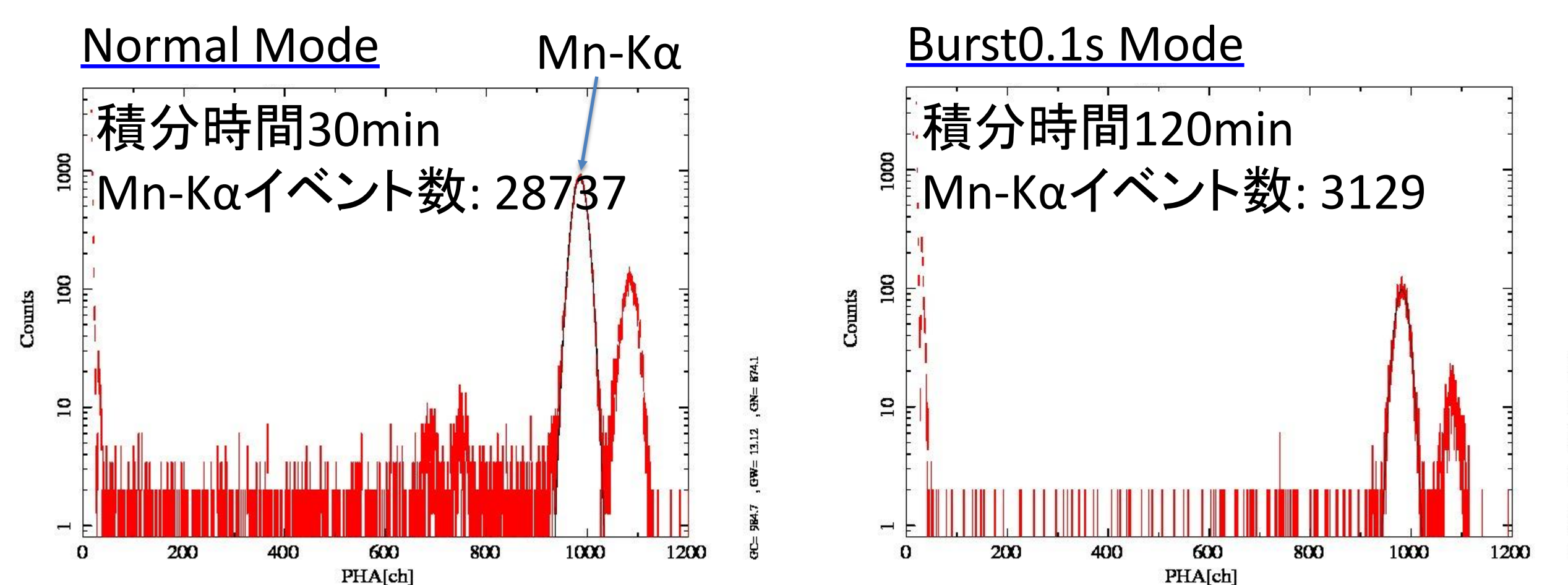


図8: Normal Modeに対する各ModeのGain比

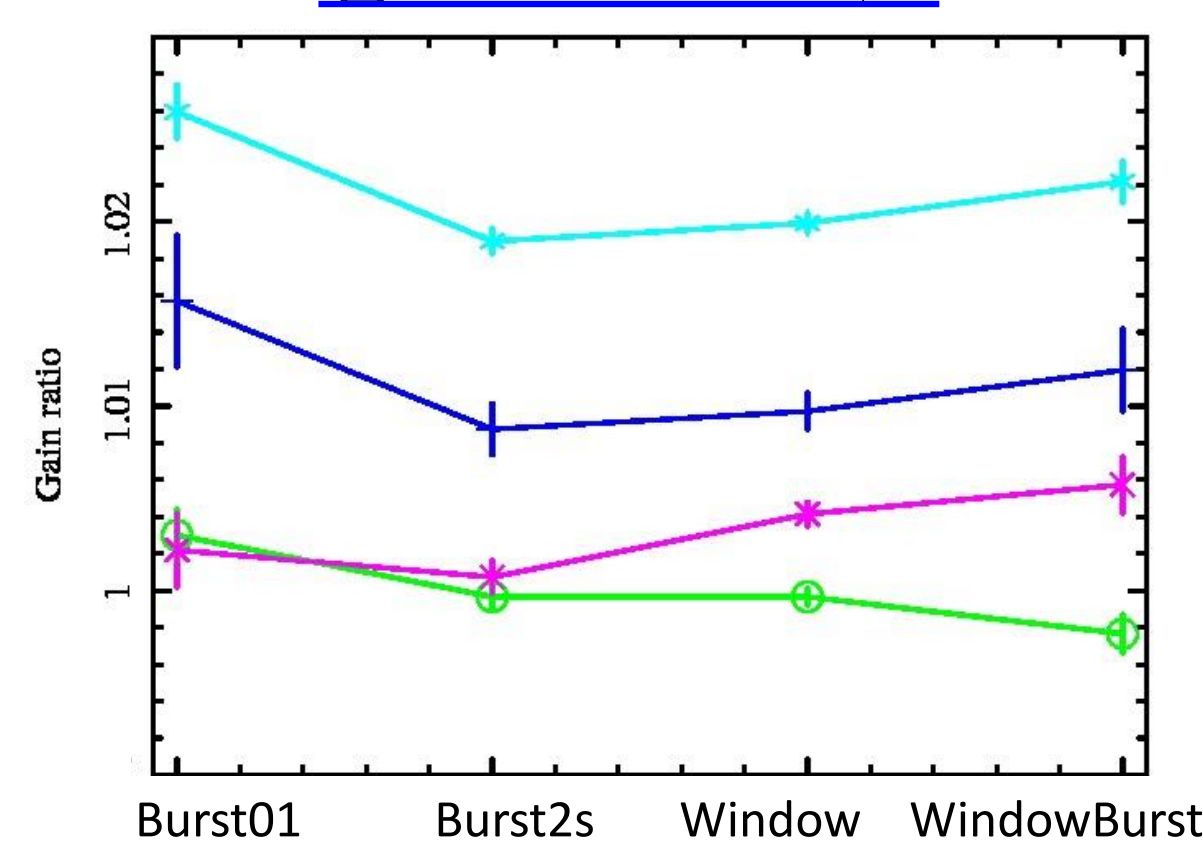


図7に特殊モード試験時に得られたスペクトルを示した。実効的な露光時間から期待されるイベントレートの比は1:0.025である。実際この例で比を求めると1:0.027で1割ほど期待値よりBurst0.1sでイベントが多い。図8は各ModeのGainとNormal ModeのGainとで比をとったものである。Modeの切り替えでGainが異なってしまうのは実際の運用には適さない。今回の試験では~3%程度のばらつきが確認された。目標は1%未満なので、細かい較正が必要。

まとめ

衛星搭載用X線CCD素子の性能を評価するにあたり、軟X線応答と特殊観測モードの動作についてそれぞれ実験を行った。プロトタイプ素子で問題になっていた低エネルギー側のテール強度がEM素子で軽減されていることは、KEK-PFにおける実験では明らかになった。FM素子に対するスクリーニング試験でも同様の結果が得られたが、実験装置のC-K輝線の混入を評価するという課題が残っている。現在公開中の応答関数ではテール強度を低く見積もっているため、応答関数をアップデートする必要がある。特殊観測モードの実験では5つの観測モードで55Feを当てて解析を行った。LED照射パターンからWindow Modeで取得したイメージにピクセルずれがないことを確認し、モードごとのGainの変動も~3%程度であることがわかった。今後は細かい較正を行っていく。

参考文献

- [1]: K. Hayashida et al., Proc. of SPIE, Vol.8443(2012), 844323-1-9
- [2]: 菅裕哲 大阪大学 修士論文(2012)
- [3]: Ueda et al. 2013, NIMA DOI 10.1016/j.nima.2012.11.1f7
- [4]: ASTRO-H response files for spectral simulation
<http://astro-h.isas.jaxa.jp/researchers/sim/response.html>