

ASTRO-H 衛星搭載 SXS 用波形データ処理の機上での機能検証

加藤 優花 (埼玉大学大学院 理工学研究科)

Abstract

X 線天文衛星 ASTRO-H は、2015 年度に打ち上げが予定されている。この衛星には、軟 X 線分光検出器 (Soft X-ray Spectrometer, SXS) が搭載される。SXS は、X 線望遠鏡の焦点面における入射 X 線の光子エネルギーを熱エネルギーに変換して計測する X 線マイクロカロリメータと呼ばれる X 線検出器である。受光素子を 50 mK という極低温下で動作させることで、0.3–12.0 keV の入射 X 線に対して 7 eV(FWHM) という高エネルギー分解能を実現する。SXS はすでに ASTRO-H 衛星に搭載され、現在、衛星上での機能・性能試験が行われている。SXS の一連の信号処理部のうちデジタルデータを扱う部分を Pulse Shape Processor(PSP) という。PSP は、増幅と A/D 変換を施された波形データを受け取り、X 線イベントの検出と光子のエネルギー測定を行う。具体的には、光子を吸収したことによる温度変化のプロファイルに対して、ノイズのフーリエスペクトルも考慮したテンプレート波形を用いた最適フィルタ処理を行うことで、入射光子による温度上昇、すなわち入射エネルギーを精度よく求めることができる。しかし、PSP で評価する波形の中に複数のイベントが重畳していると、正確なエネルギー計測ができなくなる。そのため、入射イベントは前後の時間間隔によってイベントを分類するグレード付けという処理を行う。SXS では、時間間隔ごとに 3 種類にあらかじめ分類し、長い方の 2 種類に分類された信号にのみ、最適フィルタ処理を行う。間隔が広い順に、H, M, L の 3 種類、信号の前後関係で p, s の 2 種類がある。これらを組み合わせた Hp, Mp, Ms, Lp, Ls の計 5 種類のグレード付けを行うことになる。ランダムな信号入力の場合、各グレードの発生する割合は、カウントレートの関数となる。今回の発表では、衛星に搭載され、他の機器も動作している状態で測定することで、PSP の機能・性能評価をするとともに、周期的な信号による干渉も評価し、ピクセルごとのグレード分岐比の実測値と理論値とのずれを確認することができた。

1 Introduction

ASTRO-H は [1]、2015 年度に打ち上げが予定されている JAXA を中心に国内外の大学、研究機関が開発している、日本で 6 番目の X 線天文衛星である。この ASTRO-H には、Soft X-ray Spectrometer(SXS) という軟 X 線分光検出器が搭載されており、打ち上げが成功すれば X 線マイクロカロリメータでの観測は世界初となる。

SXS は [2]、入射 X 線の光子エネルギーを熱エネルギーに変換して計測する X 線検出器であり、X 線マイクロカロリメータと呼ばれる。比熱を下げ温度変化を大きくするためや、熱雑音を減らし温度変化の測定精度を高めるため、受光素子を 50mK という極低温下で動作させる。よって、0.3–12.0 keV の入射 X 線に対して 7 eV(FWHM) という高エネルギー分解能を実現する。

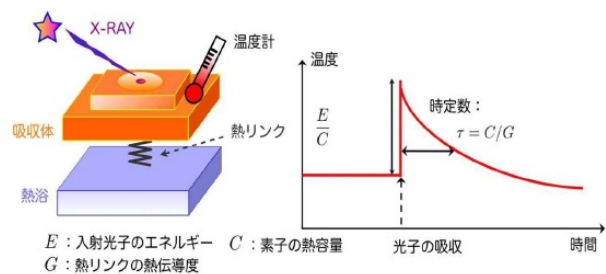


図 1: 左:X 線カロリメータの模式図 右:X 線マイクロカロリメータの温度上昇と時間の関係

X 線光子が検出器に吸収されて生まれる波形は、ピークを超えた後は指数関数的に減衰する。しかし、その時定数は検出器の熱容量と熱リンクの熱伝導度に依存するため、複数の波形の平均をテンプレートとして使用することにより波高値が求まる。これを

最適フィルタ処理と呼ぶ。

SXS では、この最適フィルタ処理をデジタル波形処理装置 Pluse Shape Processor(PSP)[3] によって行っている。PSP は、図 2 のように PSP-A と PSP-B という機能的に同等な 2 つのユニットによって実現されている。それぞれに、MIO ボード 1 枚、SpaceCard2 枚、電源ボードが 1 枚の 3 種類の機能をもつ 4 枚の基板が搭載されている。

波形処理は、MIO ボードと SpaceCard で分担している。前者では、デジタル信号の受信、データのチェック、データの時間微分 (derivative) の計算、しきい値によるパルスの検出が行われる。他方、SpaceCard では、セカンドパルス検出、グレード付け、最適フィルタ処理で用いられるテンプレート波形の計算、これによりできたテンプレート波形を用いた最適フィルタ処理による波高値解析を行っている。

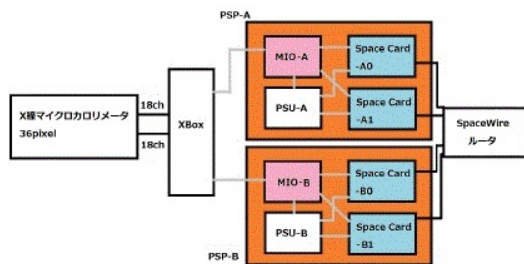


図 2: SXS 波形処理部分

2 グレード付け

PSP で評価する波形の中に複数のイベントが重畳していると、正確なエネルギー計測ができなくなり解析することができない。そのため、入射イベントはセカンドパルス検出後、前後の時間間隔によってイベントを分類する処理をグレード付けと呼ぶ。

このグレード付けとは、ある時刻にトリガされた波形と、その前後の波形の時刻からトリガの間隔を計算し、時間間隔ごとに 3 種類に分類することである。間隔が広い順に、High(H), Medium(M), Low(L) の 3 種類、信号の前後関係で primary(p), secondary(s) の 2 種類がある。図 3 のように、これらを組み合わせた Hp, Mp, Ms, Lp, Ls の計 5 種類が存在する。

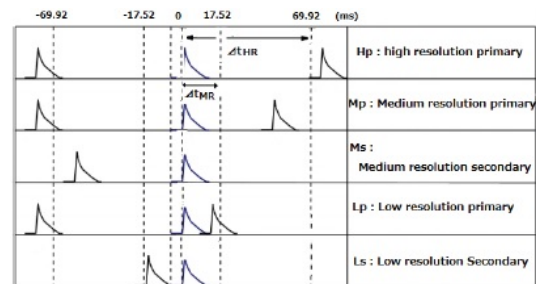


図 3: グレード付けの定義

先行研究である [4] では、衛星搭載品 (Flight model:FM) と性能検証品 (Engineering model:EM) を合わせて使用したデータの解析結果が報告されている。本稿では、イベントの time interval によるグレード付けが、全て FM 品かつ衛星搭載条件下で正しく行われているかを、ランダム事象に対して得られたグレード分岐比を予想と比較することで評価した。

3 Results

本稿では、2015 年 6 月 15 日から 2015 年 7 月 10 日の間、筑波宇宙センターで行われた SXS 熱真空試験での実験データを利用する。その中でも、イベントのランダム性が保たれているデータとして、6 月 26 日から 6 月 27 日までに行った ^{55}Fe 線源を 39 時間照射した実験データを選んで解析した。

3.1 ライトカーブ

解析に使用するデータの時間帯を選ぶために、データの全イベント、全 36pixel に対してのライトカーブの確認をする。例として、Hp イベントの全 36pixel のライトカーブを図 4 に示す。

この結果、UT で 00:00-06:00 の間の時間帯のイベント数のふるまいは好ましくないため、この時間帯を除いたデータについて解析を進めた。カウントレートが低くなってしまっている理由としては、断熱消磁冷凍機 (Adiabatic Demagnetization Refrigerater:ADR) のリサイクルが行われていたことと、MXS が明るすぎてグレード付けが正確に行われなかったことであると思われる。

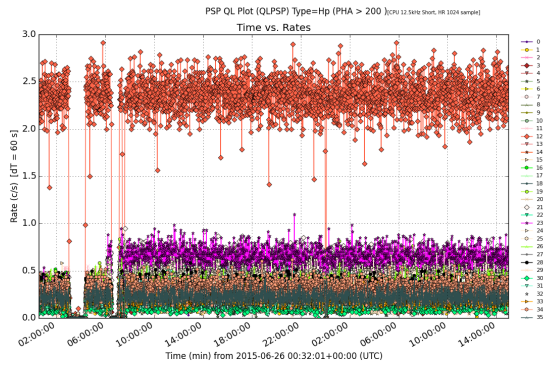


図 4: Hp イベントのライトカーブ

3.2 time interval histogram

あるイベントから見て、前のイベントとの時間間隔を表すのが time interval である。イベントの発生がポアソン分布に従うならばその time interval は指数関数的になるはずである。しかし、周期的なノイズが混入するなどそのような場合、イベントのランダム性は崩れ time interval の分布も変わることが予想される。そこで、データにノイズの影響がなく、本当にグレード分岐比の予想にポアソン分布を仮定していいのかわかると time interval の histogram から確認した。pixel12 はキャリブレーションピクセル、その他のピクセルの例として pixel0 を図 5,6 に示す。

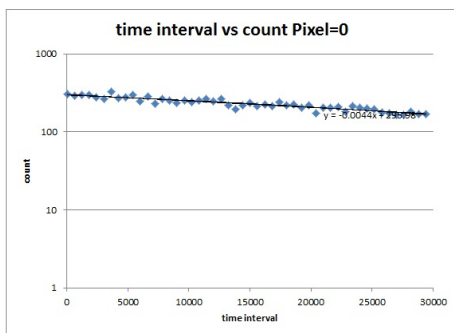


図 5: pixel0 における time interval histogram

$C_0 e^{-C_1 x}$ という指数関数でフィッティングを行った結果、ほぼ一直線上にのることがわかったので、今回のデータでは周期的ノイズの混入はなくイベントはランダムに到来していることが確認できた。

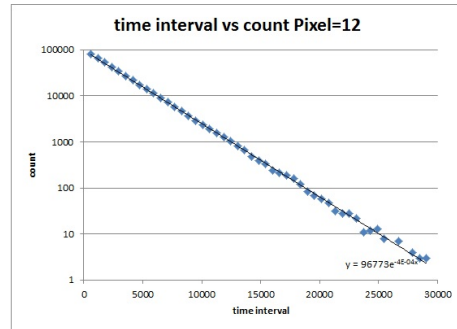


図 6: pixel12 における time interval histogram

3.3 deriv_max histogram

pixel に入射したイベントの derivative (§1) の最大値 (deriv_max) の histogram である。deriv_max はイベントのエネルギーを反映しているため、この histogram からグレード分岐比を見る光子イベントを選別した。図 7,8 に pixel0,12 から得られた histogram を代表例として示す。

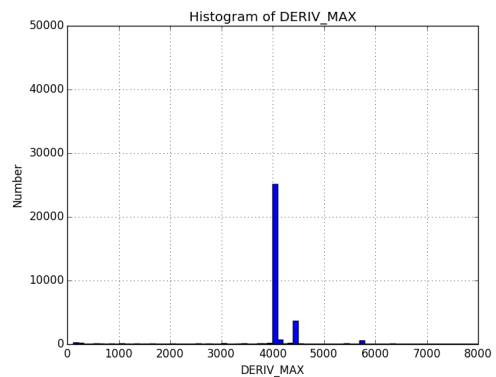


図 7: pixel0 における deriv_max histogram

この結果、 $3500 < \text{deriv_max} < 4500$ で調べることにした。

3.4 グレード分岐比

データから求まるグレード分岐比と理論値が合っているかを pixel ごとに確認する。図 9,10 に pixel0,12 を示す。また、分岐比のずれを比較するために、データ点の標準偏差 (σ) を求め、グレード分岐比の実測値、理論値、 1σ の値、理論値とのずれを表 1,2 に示す。

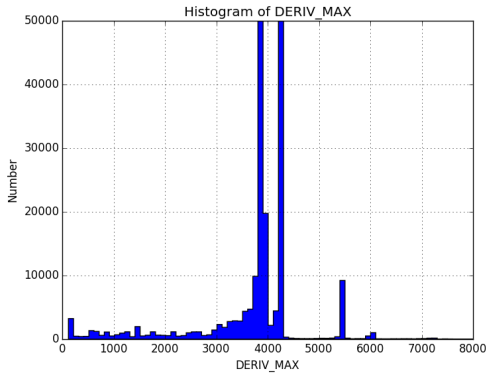


図 8: pixel12 における deriv_max histogram

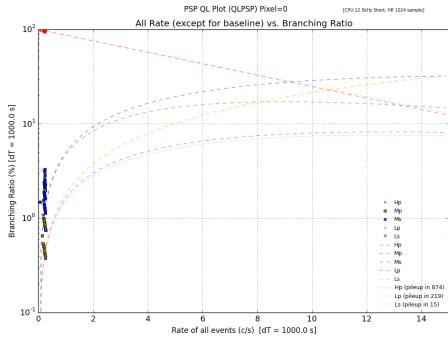


図 9: pixel0 における deriv_max histogram

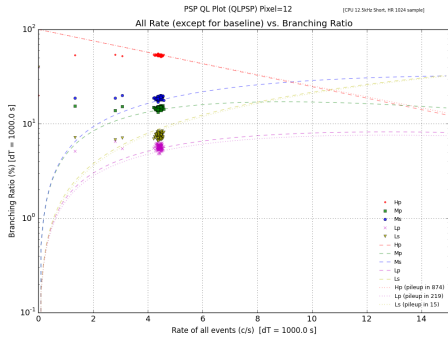


図 10: pixel12 における deriv_max histogram

図 9,10, 表 1,2 より、 $3500 < \text{deriv_max} < 4500$ の範囲において、理論値とのずれは 1σ 以内で、グレード分岐比は理論値に従うことがわかった。また、これは例示したものの以外のピクセルでも確認することができた。

	実測値 (%)	理論値 (%)	1σ の値 (%)	理論値とのずれ (σ)
Hp	96.68	96.88	1.61	0.12
Mp	1.24	1.15	0.72	0.11
Ms	1.23	1.16	0.74	0.08
Lp	0.44	0.36	0.45	0.18
Ls	0.39	0.40	0.38	0.00

表 1: pixel0 におけるグレード分岐比の実測値と理論値とのずれ

	実測値 (%)	理論値 (%)	1σ の値 (%)	理論値とのずれ (σ)
Hp	53.05	54.58	3.18	0.47
Mp	14.55	13.90	1.42	0.45
Ms	18.61	17.44	1.81	0.64
Lp	5.97	5.01	3.19	0.30
Ls	7.79	8.67	3.02	0.29

表 2: pixel12 におけるグレード分岐比の実測値と理論値とのずれ

4 まとめ

今回の発表では、衛星に搭載され、他の機器も動作している状態で測定することで、PSP の機能・性能評価をするために、熱真空試験においてのデータを用いて解析をした。その結果、 $3500 < \text{deriv_max} < 4500$ の範囲においてのグレード分岐比は、理論値とのずれは 1σ 以内であったので、理論値に従うことが確認できた。

Reference

- [1] Takahashi, T., Mitsuda, K., Kelley, R., et al. 2010, 7732, 77320Z
- [2] Mitsuda, K., Kelley, R. L., Boyce, K. R., et al. 2010, 7732, 773211
- [3] Seta, H., Tashiro, M. S., Ishisaki, Y., et al. 2012, 8443, 84435D
- [4] Takeda, S., Tashiro, M. S., Ishisaki, Y., et al. 2014, 9144, 91445B