

ASTRO-H 衛星搭載 SXS のデジタル信号処理装置における MXS 照射試験による時刻付け精度の検証

久保田 拓武 (埼玉大学大学院 理工学研究科)

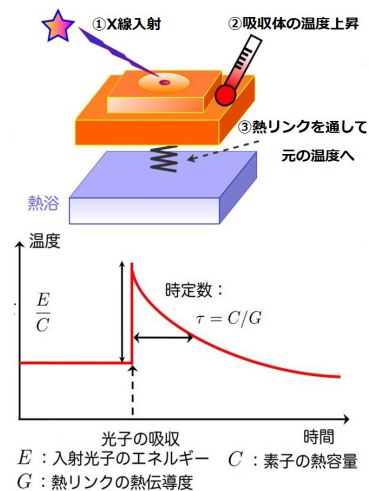
Abstract

ASTRO-H は、今年度に打ち上げが予定されている X 線天文衛星である。この衛星には Soft X-ray Spectrometer (SXS) と呼ばれる、X 線マイクロカロリメータ検出器が搭載される。この検出器は、入射した光子のエネルギーを吸収体の温度上昇に変換して検出することによって、これまでの標準的な X 線 CCD のおよそ 20 倍以上高い、7eV (FWHM) 以下のエネルギー分解能を実現する。この温度上昇として検出された信号は、アナログ/デジタル変換された後に、デジタル信号処理装置である Pulse Shape Processor (PSP) へと送られている。PSP では入射 X 線のエネルギーや到来時刻などの解析の際に、平均波形との相関をとる最適フィルタ処理を行うことでこれらを決定している。この処理により、波形のサンプリングレートの 1/16 の精度で、到来時刻 (波形の立ち上がり時刻) を決定することができる。しかし、X 線入射ピクセルの位置や時刻配信による遅延によって、時刻決定精度に偏りが生じる可能性がある。

本講演では、この PSP の時刻決定精度について試験で得られたデータをもとに確認した結果を報告する。我々は、つくば宇宙センターで行われた、一定周期で特性 X 線を照射させる衛星搭載装置 (MXS) を用いた試験で得られたデータを取得した。これらを周期で folding し、立ち上がりの時間を測った。この検証の結果、照射周期および GPS 時刻に対する位相が、正確に再現できることを報告する。

1 ASTRO-H

ASTRO-H は JAXA を中心に国内外の各大学、研究機関が開発している、2015 年度打ち上げ予定の日本で 6 番目の X 線天文衛星である。ASTRO-H は軟 X 線分光撮像検出器である Soft X-ray Spectrometer (SXS) を搭載しており、打ち上げが成功すれば世界初となる X 線マイクロカロリメータ (図 1) での観測等、エネルギー分解能を大きく向上させた衛星である。



2 Soft X-ray Spectrometer

X 線マイクロカロリメータは入射光子のエネルギーを吸収体の温度変化として検出する検出器で、SXS には全 36 ピクセルが存在する。X 線マイクロカロリメータのキャリアであるフォノン生成温度が数 mK と非常に低く、同じエネルギーでもキャリア数が多くなるため統計ゆらぎが抑えられ、SXS では約 5eV のエネルギー分解能を実現できる。また、X 線光子

図 1: X 線マイクロカロリメータ

の吸収によって生まれる波形は、検出器の熱容量と熱リンクの熱伝導度に依存する時定数で減衰するため、複数の波形の平均をテンプレートとして使用し、最適フィルタ処理によって波高値を計算する。

3 Pulse Shape Processor

SXS にはデジタル信号処理装置 Pulse Shape Processor(PSP) が搭載されており、X 線マイクロカロリメーターからの信号を処理している (図 2)。PSP は冗長系のため PSP-A と PSP-B という電的に同等な二つが存在し、それぞれに FPGA 基板 1 つ、CPU 基板 2 つが載っている。FPGA 基板では主にデジタル信号の受信、データの時間微分 (derivative) の計算、パルス検出の 3 つが行われる。CPU 基板では主に、瞬間的に複数個入射したパルスについての検出、トリガ時間間隔による分類であるグレード付け、最適フィルタ処理による波高値解析、解析に必要なテンプレート波形の作成などを行っている。

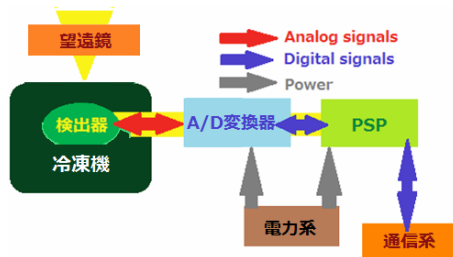


図 2: SXS の信号処理系周辺図

3.1 グレード付け

PSP では X 線光子検出の際、その光子と、前後の光子との入射時間間隔によってイベントを分類している。これをグレード付け (図 3) と呼ぶ。間隔が長いものから順に High(前後 69.92ms 以上), Medium(17.52ms 以上 69.92ms 未満), Low(17.52ms 未満) の 3 種類、イベントの前後関係で primary, secondary の 2 種類があり、これらの頭文字を使い計 5 種類の分類 (Hp, Mp, Ms, Lp, Ls) が存在する。長いものほど前後の影響が少なく、最適フィルタ処理でエネルギーや光子の到来時刻を正確に処理できる。

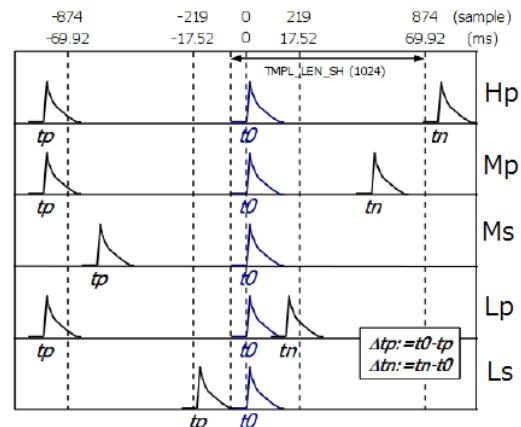


図 3: グレードの定義

4 MXS 照射試験

3 章で述べた PSP の処理のひとつ、イベント検出における波形の時刻付け機能について検証する。つくば宇宙センターにて行われた 3 つの実験において、X 線光子を照射した実験のデータを取得し、PSP における時刻付け機能が要求 (表 1) を満たすかを確認する。

表 1: PSP の時刻付け要求

絶対時刻精度	< 1 ms
相対時刻精度	< 80 us

4.1 セットアップ

この試験では、X 線発生装置から周期的に Cu 線源による X 線光子を照射し PSP に検出させた。それぞれの MXS 照射データについては以下のとおりである。

● SXS 総合試験

日時: 2015/5/19 08:10:36 – 10:38:11 UT
照射周期: 78.125 ms
duty cycle 20% (パルス幅 15.875 ms)

● function-D

日時: 2015/5/22 06:58:33 – 11:40:26 UT
照射周期: 78.125 ms
duty cycle 20% (パルス幅 15.875 ms)

●熱真空試験

日時：2015/6/26 00:32:01 – 2015/6/28 00:02:17 UT

照射周期：62.5 ms

duty cycle 8% (パルス幅 5 ms)

4.2 解析方法

実験の手順は次の 3 つである。

1. 得られたデータからピクセルごとにスペクトルを作り、ピーク付近のエネルギーでフィルターをかける。また、解析を行うのに十分な数を試験ごとに掛け、それ以上の検出があったピクセルに絞って進めていく。
2. 1 で処理したデータについてライトカーブを周期で畳み込み、装置によるパルス周期とデータのベストな周期とのずれについて調べる。
3. 周期で畳み込んだライトカーブをピクセルごとに作り、立ち上がり周辺をガウシアンでフィッティングすることでその時間を評価する。また、グレードごとに分けた畳み込みライトカーブも作り、グレードによって起こる立ち上がりの波形について確かめる。

4.3 結果

集録では参考として、SXS 総合試験におけるピクセル No.3 のデータについてのみ記載する。DERIV MAX はエネルギーを表すため、ヒストグラムを作ってピークの帯域を確認する。

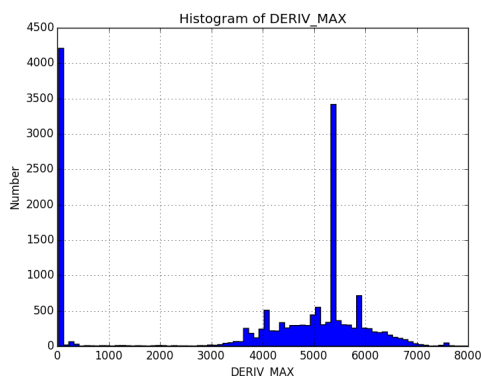


図 4: エネルギースペクトル

特定のピクセルで図 3 のような強いピークがあるヒストグラムが得られた。そのため、今後は DERIV MAX について、ピーク付近の 5000-5500 でフィルターをかけることにする。また、ピークにおけるカウント数が 100 を超えたピクセルは SXS 総合試験と function-D では No.1 3 5 6 27 29 30 31 32 であったため、この試験では今後は 9 つのピクセルについて調べることにする。

4.3.1 絶対時刻精度

次に周期について検証する。 χ^2 検定による周期探査を行い確かめる。

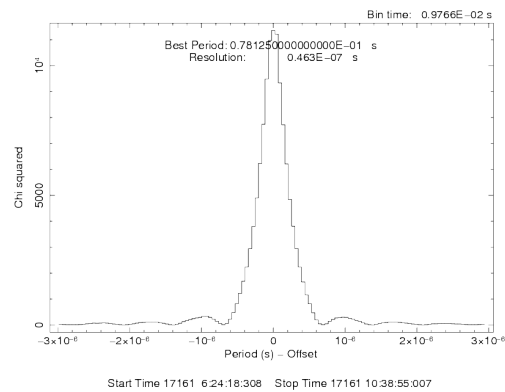


図 5: 周期探査結果

図 4 の縦軸は χ^2 、横軸はベストな周期 (s) を原点として表している。周期探査の結果、9 つの各ピクセルで図 4 と同様のグラフが得られた。これより、パルスの Best Period は 78.125 ms であり、装置の照射周期からのずれが要求である 1 ms 以内を満たすことが確かめられた。

4.3.2 相対時刻精度

探査で周期の一致が確かめられたので、次は周期で畳み込んだライトカーブをピクセルごとに作成し、ガウシアンによる fitting を行う。

図 5 と 6 はその結果である。ガウシアン of the peak (GC) が phase で 0.9625000、半値幅 (GW) が 0.0017243 であった。ここで立ち上がり時刻 = GC - GW とすると、その時刻は 0.9607757 となった。

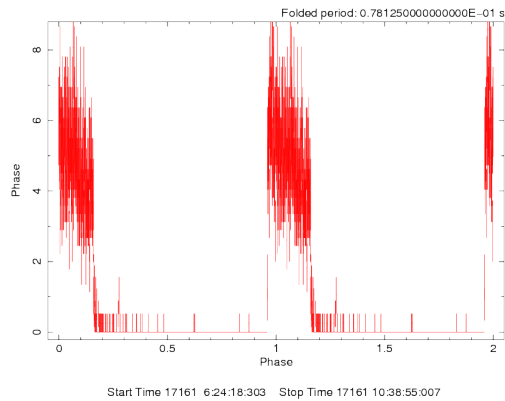


図 6: 畳み込みライトカーブ : pixel 3

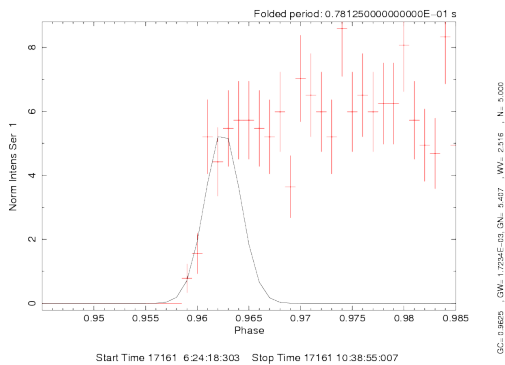


図 7: fitting 結果

表 2: 各ピクセルでの立ち上がり時刻 (単位:phase)

pixel	立ち上がり	平均(※)との差
3	0.9607757	-2.36534×10^{-4}
5	0.9604869	-5.025334×10^{-4}
6	0.9610984	8.61663×10^{-5}
27	0.9610699	5.76662×10^{-5}
29	0.9610084	-3.83375×10^{-6}
30	0.9611529	1.40666×10^{-4}
31	0.9605071	-5.05134×10^{-4}
32	0.9617769	9.86336×10^{-4}
9つの平均(※)	0.9610122	0

表 2 はピクセルごとの立ち上がり時刻と、時刻平均からのずれを表す。No.1 は統計が悪くフィッティングできなかつたため除いてある。周期は 78.125 ms なので、残差はどれも PSP の requirement である 80 us 以内を満たす結果となった。

4.3.3 グレード付けの影響

今回はピクセルごとに分けて、グレードごとに分けて folding を行いグレードごとの立ち上がり方の違いを確かめる。

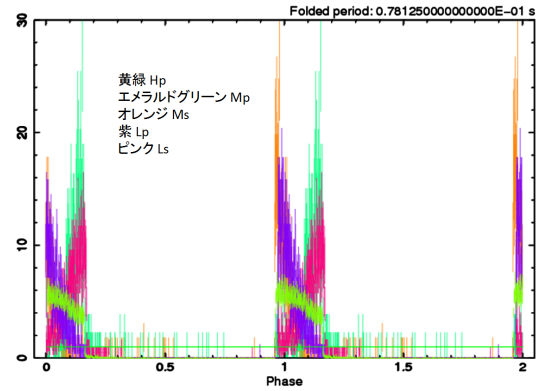


図 8: グレードごとの畳み込み

folding の結果が図 8 である。Medium について、周期 78.125ms の SXS 総合試験と function-D において、Mp は立ち上がり、Ms は立ち下がり、緩やかな形になった。これは Medium の定義の最大値 69.92ms 付近でのみ、前後のパルスの端点で対を成すことができるため、このような形になったと考えられる。一方熱真空試験では、周期が 62.5ms と他の 2 つよりも短くなるため、Medium は前後のパルスのどこでも対を成すことができ、結果 Hp と同様の鋭い立ち上がり/立ち下がりを作る。Low は一つのパルス内でのみ対を形成するため、周期によって波形は変化しなかった。

5 まとめ

SXS 総合試験、function-D、熱真空試験において X 線光子を周期的に入射させたデータを用いて PSP の時刻付け精度の検証を行った。結果、PSP の絶対時刻要求 1 ms、相対時刻要求 80 us のどちらも満たす結果となった。また、グレードごとに分けて畳み込み波形を確認した結果、グレードの時間間隔の定義を反映する形であることが確かめられた。