

## ASTRO-H 衛星搭載 SXS のデジタル信号処理装置における 波形分類処理の検証

久保田 拓武 (埼玉大学大学院 理工学研究科)

### Abstract

ASTRO-H は、2015 年に打ち上げが予定されている次世代 X 線天文衛星である。この衛星には SXS (Soft X-ray Spectrometer) と呼ばれる軟 X 線分光検出器が搭載される。SXS は X 線マイクロカロリメータであり、入射光子のエネルギーを温度上昇と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 20 倍以上高い、約 10eV というエネルギー分解能を実現する。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、デジタル信号処理装置 PSP (Pulse Shape Processor) へと送られている。PSP では信号処理の際に数百の波形の平均をとった波形 (テンプレート波形) を用いて、最適フィルタ処理を行う。最適フィルタ処理には有限の長さを持つ波形が必要であるが、信号が重畳すると、正しいフィルタ処理ができなくなる。そのため、処理対象となる波形と、前後の信号との時間間隔によって波形をいくつかの種類に分類し、それぞれに適切な長さのフィルタ関数をあらかじめ用意する必要がある。

この分類はグレード付けと呼ばれる。PSP ではこれらを時間間隔ごとに 3 種類に分類して、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 High, Medium, Low の 3 種類、さらに、信号の前後関係で primary, secondary の 2 種類あり、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。間隔が広いものほどサンプル長さが長く、他の信号の影響が少ないため、有用な情報として扱うことができる。

この最適フィルタ処理の準備としてのグレード付けが適切に行われているかを、自作プログラムで確認する。衛星搭載同等器によって処理されたデータをグレードごとに分け、その数の比 (グレード分岐比) を計算し、さらにその分類が、PSP で定義された時間間隔どおり分けられているか検証した。結果、グレード付けについて、衛星搭載同等器で正しく処理されていることが確かめられた。

## 1 ASTRO-H

ASTRO-H (図 1) は日本で 6 番目の X 線天文衛星で、JAXA を中心に国内外の各大学、研究機関が開発している。2015 年度打ち上げ予定である。

ASTRO-H は Soft X-ray Spectrometer (SXS: 図 2)



図 1: ASTRO-H

という軟 X 線分光撮像検出器を搭載しており、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 3) 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。

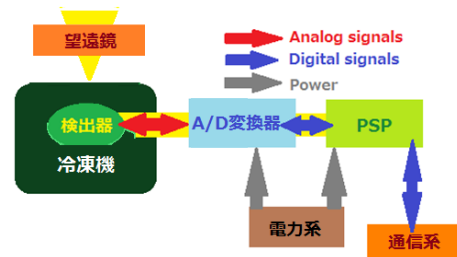


図 2: SXS

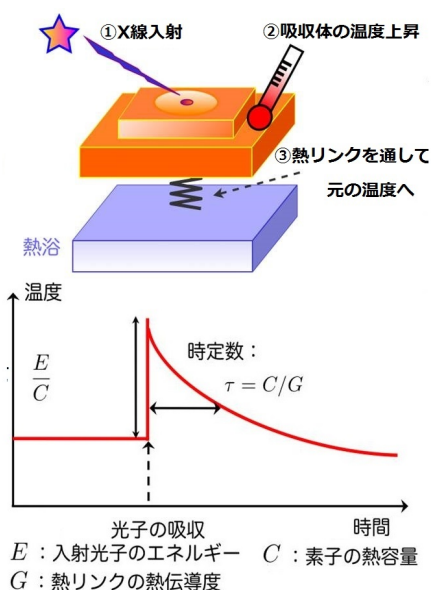


図 3: X 線マイクロカロリメーター

## 2 Soft X-ray Spectrometer

この X 線マイクロカロリメーターは SXS で使われている。X 線マイクロカロリメーター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ある。X 線マイクロカロリメーター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 7 eV という高いエネルギー分解能を実現できる。

また、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が、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で、それをもとに波高値が求まる。これを最適フィルタ処理と呼ぶ。

## 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。PSP は冗長系のため PSP-A と PSP-B という電氣的に同等な二つ

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、しきい値によるパルス検出の 3 つが行われる。CPU 基板では主にセカンドパルス検出、以下で説明するグレード付け、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。

## 4 グレード付け

減衰が終了する前に次の X 線光子が吸収されると波形が重畳してしまう。この場合、一つのテンプレートで解析することはできない。そこで、PSP では長さの異なるテンプレートを 2 つ用意して処理をしている。そのために必要な波形分類処理がグレード付けである。

グレード付けとは、ある時刻にトリガされた波形と、その前後にトリガされた波形の時刻からトリガ間隔を計算し、その間隔でいくつかの種類に分類する処理のことである。分類は High(H)、Medium(M)、Low(L) の 3 つで、前後関係によって前に primary(p)、後に secondary(s) がつく。これらを組み合わせて図 4 のようにグレードがつけられる。図の中央の波がグレード付けの対象で、その前後の灰色の領域両方にトリガがあった場合、右の分類になる。どれにも属さなかった場合は Ls になる。

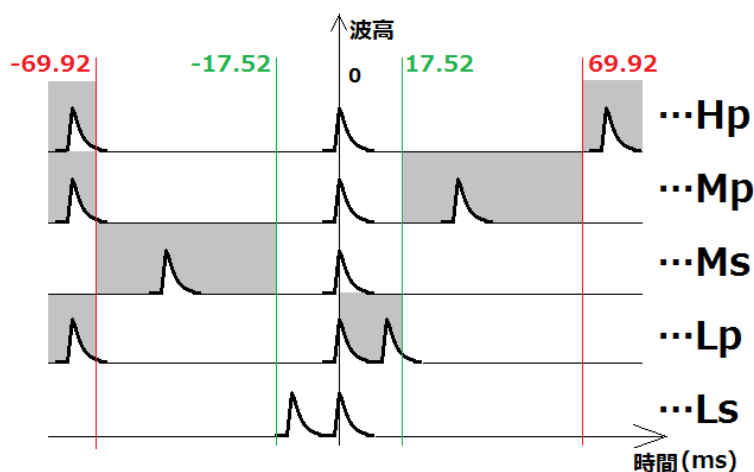


図 4: 各グレードの定義

エネルギー分解能は隣のパルスによる歪みが少ないほど良く、間隔の狭い L よりも M の方が、M よりも間隔が長い H の方がエネルギー分解能は良くなる。また secondary より primary の方が分解能は良くなる。Hp、Mp、Ms イベントはグレード付けの処理の後に最適フィルタ処理による波高値解析が行われる。Lp、Ls イベントはこの処理は行われずにデータの最大値が波高値として扱われる。

本論文ではグレード付けについて、グレード分岐比とグレードの定義の二つから妥当性を調べた。

## 5 解析

解析に使用したデータは 2013 年 8 月に NASA で行われた事前試験のデータの一部である (図 5)。

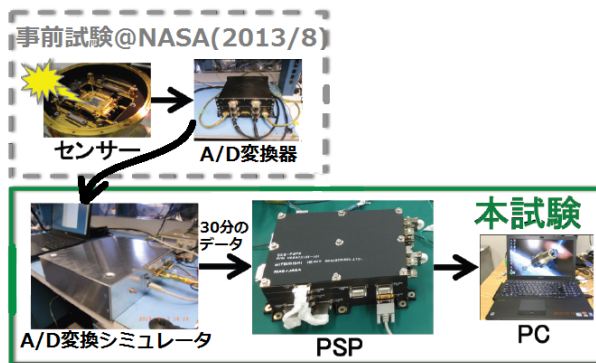


図 5: セットアップ

### 5.1 グレード分岐比

ここではデータのカウンタ数から、Mp に対する Hp のカウンタ比を計算し、理論式によって導いた結果と比較する。

実測値から得たカウンタ比と標準偏差  $\sigma$  は

$$H_p/M_p = 2362/110 \approx 21, \quad \sigma \approx 5$$

一方、カウンtrate  $\nu = 0.6 /s$

$$\text{トリガ間隔 } \Delta t_{HR} = 69.92 \text{ ms} \quad \Delta t_{MR} = 17.52 \text{ ms}$$

$\Delta t_D = 1.2 \text{ ms}$  とすると分岐比は以下の二つの理論式からも得られる。

・ Hp

$$\nu \exp(-2\nu\Delta t_{HR}) + \nu \exp(-\nu\Delta t_{HR}) \times \{1 - \exp(-\nu\Delta t_D)\}$$

・ Mp

$$\nu \exp(-\nu\Delta t_{HR}) \{ \exp(-\nu\Delta t_{MR}) - \exp(-\nu\Delta t_{HR}) \}$$

この比は  $H_p/M_p \approx 0.552/0.0176 \approx 31$  となり、 $2\sigma$  で実測値と一致した。

結果、Hp が最も高い割合を占めており、90 % 以上の割合で存在した。理論式による値は実測値から  $2\sigma$  の範囲にあり、グレード分岐比は正常であることが分かった。

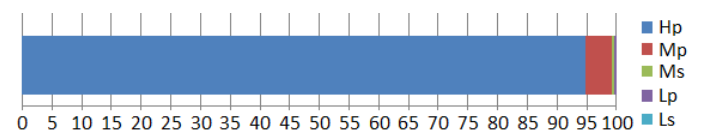


図 6: 分岐比 全ピクセル

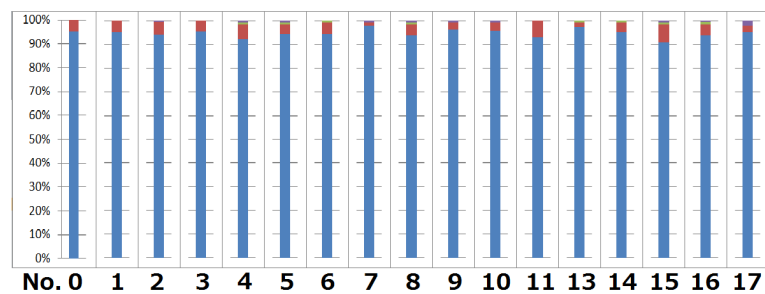


図 7: 分岐比 各ピクセル

### 5.2 グレード付け

Hp と分類された 2454 個の波形が定義通りかを検証する。Hp であるためにはデータの範囲内に波形が一つであればよく、データ内のトリガ回数を数えることによってそれを確認する。

まず図 8,9 のように、derivative からしきい値 (100) 以上を抜き出し、増加した点に 1、それ以外の点に 0 というフラグを付ける。

次に図 10 のように、ある点と、一つ前の点とのフラグを比較する。ある点でのフラグが 1 で、その一つ前の点では 0 という箇所がトリガした点を表すので、その点の数を数えていく。

最後に、その数が Hp のトリガ回数 1 に該当するかどうかを確認する。

結果、全データでトリガ回数 1 であり、Hp においては正常に動作していることが分かった。

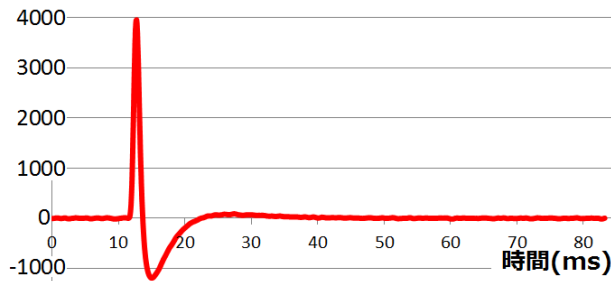


図 8: derivative

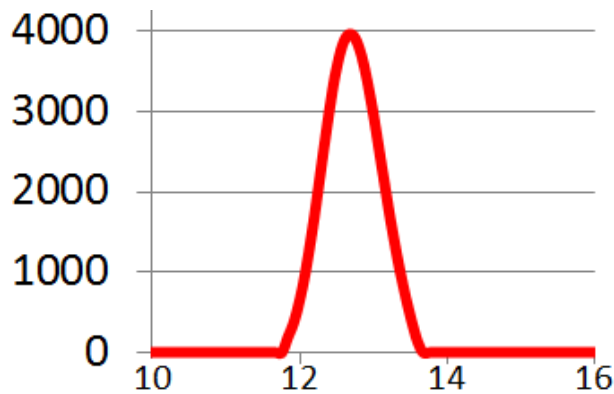


図 9: 抜出した波形

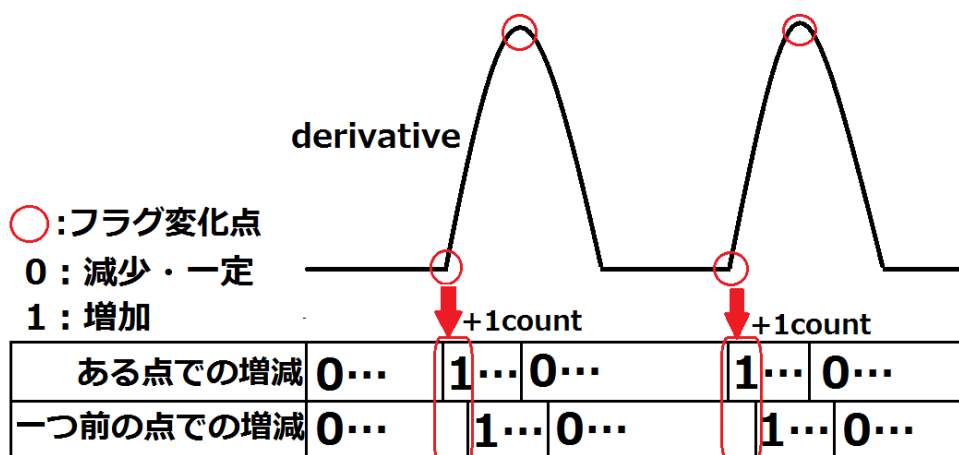


図 10: フラグ比較

## 6 まとめ・課題

ASTRO-H 衛星搭載品と同じ性能の PSP(A 系) で処理されたデータにおいて、入射光子が生成する波の時間間隔による分類(グレード付け)が定義通りに行われているかを自作プログラムを用いて検証した。結果、グレード分岐比、Hp のグレード付けのどちらについても正しく処理されていることがわかった。

残りの Mp, Ms, Lp, Ls についてはまだわかっておらず、今後の課題としてこれらを検証する必要がある。