

修士論文
X線天文衛星「すばる」搭載
広帯域全天モニターのバックグラウンドの
特性

埼玉大学大学院

理學研究科 博士前期課程 2年 物理機能系専攻

06MP104 鈴木 正信

指導教員：田代 信 教授
2008年2月5日

概要

2005年7月10日に、日本で5番目となるX線観測衛星「すざく」が、鹿児島県内之浦宇宙空間観測所(USC)から打ち上げられた。この衛星には、マイクロカロリメータ(XRS)、X線CCDカメラ(XIS)、硬X線検出器(HXD)の3種類の検出器が搭載されている。このうちHXDの外周は、巨大なBGO結晶を20本並べたアクティブシールドを構成している。これを広帯域全天モニターとして活用したものがHXD-WAMである。エネルギー帯域は50keVから5MeVと非常に広くをカバーしていて、有効面積も100keVで800cm²と他の衛星に比べ巨大である。HXD-WAMは太陽フレアやガンマ線バースト、突発天体を対象とする。

HXD-WAMによる天体観測を行う上で重要なWAMのバックグラウンドがある。バックグラウンドを精度よく見積ることで、天体の検出感度を向上させることができ、同時に正しいスペクトルやライトカーブを得られるようになる。HXD-WAMのエネルギー帯域である50~5000keVでの観測を考えた場合、衛星軌道上のバックグラウンドは、ガンマ線によるものや検出器自体の放射化によるものなどがあるが、特に荷電粒子によるものが支配的であり、軌道上での地磁気の構造によって大きく影響を受ける。これらは約90分の「すざく」衛星の軌道周回にともなって10分程度でバックグラウンド環境が大きく変動する。よって、1分以内のGRBならば直前、直後をバックグラウンドとみなせるが、数十分も続く太陽フレアはそうはいかない。本研究では、この軌道の地磁気にに対する位相に注目し、位相によってバックグラウンドレートを整理したうえでその再現性を評価した。具体的には、「すざく」衛星が、約90分で地球を1周し、50日周期で同位相を通過することを利用して、HXD-WAMが太陽フレアを捉えた日から前後50日の同位相の時間帯を抜き出した。HXD-WAMは、日々ゲインが変動しているので補正をしたデータを使って、光度曲線とスペクトルを用いで7つの太陽フレアを評価し、±5%以内の不定性でバックグラウンドの再現性を示すことができた。また、このバックグラウンドを実際に用いて太陽フレアのスペクトルを出した。そのスペクトルからHXD-WAMの強みである広帯域で、さらには高エネルギーまでのスペクトルが取得できることを証明した。

目 次

第 1 章 はじめに	9
1.1 X 線、ガンマ線検出器を用いた宇宙空間での観測	9
1.2 HXD-WAM の観測対象	11
1.2.1 ガンマ線バースト	11
1.2.2 トランジエント天体	13
1.2.3 太陽フレア	14
1.3 本研究の目的	17
第 2 章 観測機器と観測天体	18
2.1 硬X線検出器 (Hard X-Ray Detector; HXD)	18
2.2 広帯域全天モニター機能 (Wideband All-sky Monitor; WAM)	18
2.3 HXD のシステム構成とデータの流れ	20
2.3.1 HXD-AE-ACU	20
2.3.2 HXD-AE-TPU	21
2.3.3 HXD-AE-WPU	21
2.4 HXD-WAM のデータ	21
第 3 章 X 線観測によるバックグラウンド	24
3.1 荷電粒子によるバックグラウンド	24
3.2 ガンマ線によるバックグラウンド	26
3.2.1 遠方天体起源の背景ガンマ線	26
3.2.2 地球の大気と荷電粒子の相互作用により生じるガンマ線	26
3.3 検出器自体の放射化によるバックグラウンド	26
第 4 章 バックグラウンドデータの解析	28
4.1 ゲイン (電流増倍率)	28
4.1.1 HXD-WAM のゲイン	29
4.1.2 ゲイン補正	30
4.2 解析ソフトウェア	31
4.3 解析の方法	32
4.3.1 エネルギー帯域別光度曲線の作成	32
4.3.2 バックグラウンドのスペクトル比を調べる方法	35
4.4 太陽フレアを用いたバックグラウンド解析の結果	38
4.4.1 2005 年 12 月 02 日 (GOES クラス M7.8)	39

4.4.2	2006年04月30日(GOESクラスC5.4)	41
4.4.3	2006年12月05日(GOESクラスX9.0)	43
4.4.4	2006年12月06日(GOESクラスM6.0)	45
4.4.5	2006年12月13日(GOESクラスX3.4)	47
4.4.6	2006年12月14日(GOESクラスX1.5)	49
第5章 考察とまとめ		51
5.1	50日周期のバックグラウンドを使ったスペクトル	52
5.2	全体のまとめ	59
付録A		61
付録B		69

図 目 次

1.1 X 線天文衛星「すざく」の概観(左)と内部構造(右)	「すざく」は直径 2.1 m、全長 6.5 m (軌道上で鏡筒伸展後) の大きさを持ち、太陽パドルを広げると 5.4 m の幅になる。衛星の重量は 1700 kg にもなり、日本の科学衛星としては、これまでにない大型衛星である。	10
1.2 BATSE が観測した GRB の発生場所を銀河座標で示した図。	GRB が等方的に分布していることがわかる。	11
1.3 HXD-WAM で検出されたガンマ線バーストのエネルギー帯域別のライトカーブ	縦軸は光子のカウント数で、横軸がトリガーがかかってからの時間を表している。	12
1.4 ブラックホール連星の典型的なスペクトル		13
1.5 HXD-WAM で検出された地食のライトカーブ	縦軸は光子のカウント数で、横軸が時間を表している。地食ステップと呼ばれる段差になっているところが地食である。左が地食に入ったとき、右が地食から出たときのライトカーブ。(c) 広島大学 深沢研	14
1.6 「ようこう」衛星で観測された太陽の X 線画像	左の写真の明るいところや右の写真のカスプ状になっているのが太陽フレアである。	15
1.7 「ようこう」で観測された太陽フレアの軟 X 線画像(左)	太陽フレアの軟 X 線画像に、硬 X 線画像を重ねた図。磁気ループの足元だけでなく、ループのトップで硬 X 線の放射が見られ、加速された粒子からの放射であろうとされている。(右)	16
1.8 SMM 衛星が捉えた太陽フレアのガンマ線スペクトル	縦軸は光子のカウント数で、横軸がエネルギーを表している。	16
1.9 太陽フレアの発生モデル (Shibata et al.(1995))	V_{Inflow} で磁場のつなぎかえが起こり、上下にプラズマが加速される。加速されたプラズマがループトップをたたき、硬 X 線を形成する。ここで加速された電子がフットポイントへ突入し、制動放射により、硬 X 線を放射する。	16
2.1 HXD の外観		19
2.2 左が横から見たとき、右が上から見たときの HXD-WAM の概略図		19
2.3 他衛星の全天モニター機能と比較した「すざく」衛星 HXD-WAM1 面の有効面積	縦軸は有効面積、横軸がエネルギーを表している。	19
2.4 HXD のシステム構成		20
3.1 検出器のバックグラウンド源		24

3.2 「すざく」軌道上での COR のマップ。青から白になるにつれてシールド能 力が強くなる。	25
3.3 大気ガンマ線生成メカニズムの図	26
3.4 南大西洋地磁気異常帯 (South Atlantic Anomaly, SAA) の図	27
4.1 光電子増倍管の構造 左側から入射した単一の光子が光電陰極に衝突して 1 つの電子に変換される。この電子が最初のダイノードに衝突すると、多数 の電子の放出が起こり、複数のダイノードで電子がなだれのように増幅さ れる。	28
4.2 HXD-WAM のゲイン変動のプロット。横軸が「すざく」衛星を打ち上げた 日からの経過時間で、縦軸は、511keV に相当するチャンネルである。	30
4.3 データプロセスの流れ	31
4.4 左から 2006 年 10 月 17 日 (50 日前)、2007 年 01 月 25 日 (50 日後)、2006 年 12 月 06 日 (太陽フレア) の dp10 の図。黒い等高線が COR	33
4.5 一周回分の WAM 全面のライトカーブ 縦軸は WAM4 面それぞれの光子の カウント数で、横軸が時刻を表している。	34
4.6 2006 年 12 月 6 日の太陽フレア付近のバックグラウンドを引いていないラ イトカーブ。縦軸は左上から、50-100keV、100-200keV、200-300keV、300- 400keV、右上が 400-500keV、500keV-1MeV、1-2MeV、2-5MeV、横軸は時 間を表している。	35
4.7 2006 年 12 月 6 日に HXD-WAM が捉えた太陽フレア (ソース) のスペクトル と前後 50 日のスペクトルの比である。赤でプロットされているのが、50 日 前とソースの比で、緑でプロットされているのが 50 日後とソースの比であ る。青でプロットされているのは、前後 50 日のデータを足したものとソー スの比である。	36
4.8 図 4.7 の青のプロットを直線近似した図である。−3 %～+4 %以内で再現 できると言える。	36
4.9 図 4.8 を元に前後 50 日のデータを足したものとバックグラウンドとしてソー スからバックグラウンドを引いたライトカーブである。上が 50-100keV、 100-200keV、200-300keV、300-400keV の 4 バンドのライトカーブである。 下が 400-500keV、500keV-1MeV、1-2MeV、2-5MeV の 4 バンドのライト カーブである。	37
4.10 2005 年 12 月 02 日に HXD-WAM が捉えた太陽フレア (以後ソースと呼ぶ) のスペクトルと前後 50 日のスペクトルの比である。赤でプロットされてい るのが、50 日前とソースの比で、緑でプロットされているのが 50 日後と ソースの比である。青でプロットされているのは、前後 50 日のデータを足 したものとソースの比である。	39
4.11 図 5.1 の青のプロットを直線近似した図である。−3 %～+3 %以内で再現 できると言える。	39
4.12 前後 50 日のデータを足して図 5.2 の直線近似の補正をしたものをバックグ ラウンドとしてソースからバックグラウンドを引いた光度曲線である。	40

4.13 2006年04月30日にHXD-WAMが捉えた太陽フレアのスペクトルと前後50日のスペクトルの比である。赤でプロットされているのが、50日前とソースの比で、緑でプロットされているのが50日後とソースの比である。青でプロットされているのは、前後50日のデータを足したものとソースの比である。	41
4.14 図5.5の青のプロットを直線近似した図である。 $-5\% \sim +1.5\%$ 以内で再現できると言える。	41
4.15 前後50日のデータを足して図5.6の直線近似の補正をしたものを作成してソースからバックグラウンドを引いた光度曲線である。	42
4.16 2006年12月05日にHXD-WAMが捉えた太陽フレアのスペクトルと前後50日のスペクトルの比である。赤でプロットされているのが、50日前とソースの比で、緑でプロットされているのが50日後とソースの比である。青でプロットされているのは、前後50日のデータを足したものとソースの比である。	43
4.17 図5.9の青のプロットを直線近似した図。 $-5\% \sim +3.5\%$ 以内で再現できると言える。	43
4.18 前後50日のデータを足して図5.10の直線近似の補正をしたものを作成してソースからバックグラウンドを引いた光度曲線である。	44
4.19 2006年12月06日にHXD-WAMが捉えた太陽フレアのスペクトルと前後50日のスペクトルの比である。赤でプロットされているのが、50日前とソースの比で、緑でプロットされているのが50日後とソースの比である。青でプロットされているのは、前後50日のデータを足したものとソースの比である。	45
4.20 図5.13の青のプロットを直線近似した図である。 $-5\% \sim +5\%$ 以内で再現できると言える。	45
4.21 前後50日のデータを足して図5.14の直線近似の補正をしたものを作成してソースからバックグラウンドを引いた光度曲線である。	46
4.22 2006年12月13日にHXD-WAMが捉えた太陽フレアのスペクトルと前後50日のスペクトルの比である。赤でプロットされているのが、50日前とソースの比で、緑でプロットされているのが50日後とソースの比である。青でプロットされているのは、前後50日のデータを足したものとソースの比である。	47
4.23 図5.16の青のプロットを直線近似した図。 $-2\% \sim +2.5\%$ 以内で再現できると言える。	47
4.24 前後50日のデータを足して図5.17の直線近似の補正をしたものを作成してソースからバックグラウンドを引いた光度曲線である。	48
4.25 2006年12月14日にHXD-WAMが捉えた太陽フレアのスペクトルと前後50日のスペクトルの比である。赤でプロットされているのが、50日前とソースの比で、緑でプロットされているのが50日後とソースの比である。青でプロットされているのは、前後50日のデータを足したものとソースの比である。	49

4.26 図 5.20 の青のプロットを直線近似した図である。−4%～+4%以内で再現できると言える。	49
4.27 前後 50 日のデータを足して図 5.20 の直線近似の補正をしたものをバックグラウンドとしてソースからバックグラウンドを引いた光度曲線である。	50
5.1 2005 年 12 月 02 日の太陽フレアのスペクトル。赤が 50 日周期を利用したバックグラウンド、黒が太陽フレア中のスペクトル。緑は黒から赤を引いた差分であり、MeV まで受かっていることがわかる。	52
5.2 §4.4.1 で求めたライトカーブ 400keV までは、はっきりと太陽フレアの成分があるように見える。	52
5.3 2006 年 04 月 30 日の太陽フレアのスペクトル。赤が 50 日周期を利用したバックグラウンド、黒が太陽フレア中のスペクトル。緑は黒から赤を引いた差分であり、400keV 付近まで受かっていることがわかる。	53
5.4 §4.4.2 で求めたライトカーブ 300keV までは、はっきりと太陽フレアの成分があるように見える。	53
5.5 2006 年 12 月 05 日の太陽フレアのスペクトル。赤が 50 日周期を利用したバックグラウンド、黒が太陽フレア中のスペクトル。緑は黒から赤を引いた差分であり、MeV まで受かっていることがわかる。	54
5.6 §4.4.3 で、求めたライトカーブ 数 MeV までは、はっきりと太陽フレアの成分があるように見える。	54
5.7 2006 年 12 月 06 日の太陽フレアのスペクトル。赤が 50 日周期を利用したバックグラウンド、黒が太陽フレア中のスペクトル。緑は黒から赤を引いた差分であり、400keV 付近まで受かっていることがわかる。	55
5.8 §4.4.4 で求めたライトカーブ 1MeV までは、はっきりと太陽フレアの成分があるように見える。	55
5.9 2006 年 12 月 06 日の太陽フレアのスペクトル。赤が 50 日周期を利用したバックグラウンド、黒が太陽フレア中のスペクトル。緑は黒から赤を引いた差分であり、300keV 付近まで受かっていることがわかる。	56
5.10 §4.3.2 で求めたライトカーブ 300keV までは、はっきりと太陽フレアの成分があるように見える。	56
5.11 2006 年 12 月 13 日の太陽フレアのスペクトル。赤が 50 日周期を利用したバックグラウンド、黒が太陽フレア中のスペクトル。緑は黒から赤を引いた差分であり、MeV まで受かっていることがわかる。	57
5.12 §4.4.5 で求めたライトカーブ 2MeV 付近までは、はっきりと太陽フレアの成分があるように見える。	57
5.13 2006 年 12 月 14 日の太陽フレアのスペクトル。赤がソース前後のバックグラウンド、黒が太陽フレア中のスペクトル。緑は黒から赤を引いた差分であり、500keV 付近まで受かっていることがわかる。	58
5.14 §4.4.6 で求めたライトカーブ 300keV までは、はっきりと太陽フレアの成分があるように見える。	58

表 目 次

1.1 3つの機器の特徴 XRSは、打ち上げ後液体ヘリウムが全て気化してしまう不具合が生じ、検出器を目的の温度(60mK)まで冷やすことができなくなつたため、その生涯を閉じた。	10
2.1 HXD-WAM の性能	22
2.2 HXD-WAM の特性、TH:Time Hisory、PH:Pulse Height	22
2.3 モニタ機能搭載の他衛星の性能との比較	23
4.1 7つの太陽フレアのリストとスペクトル比	38
5.1 7つの太陽フレアのリストとスペクトル比	51

第1章 はじめに

1.1 X線、ガンマ線検出器を用いた宇宙空間での観測

近年の宇宙観測により、宇宙は、非常に高エネルギー(X線、ガンマ線)現象に満ちあふれていることがわかつてきた。X線で宇宙を見ると、ブラックホールや超新星爆発など宇宙の激烈な姿が見えてくる。小田稔らが始めたX線宇宙物理は、活動的な宇宙を浮き彫りにすることで、人類が抱いてきた宇宙觀を一新する影響力を持ち続けてい。宇宙からのX線やガンマ線は地球の厚い大気に吸収されるため、地上からは観測することができない。つまり、X線やガンマ線を観測するには、ロケットや気球、人工衛星などを使って大気の外で観測を行う必要がある。そこで、我々はX線・ガンマ線に感度をもつ検出器を作り、人工衛星に搭載し、宇宙空間での観測を行なっている。日本では、1979年の「はくちょう」衛星以来、「てんま」、「ぎんが」、「あすか」と独創的な検出器を搭載した衛星を打ち上げ続けてきた。2005年7月10日には、日本で5番目となるX線観測衛星「すざく」が、鹿児島県内之浦宇宙空間観測所(USC)から打ち上げられた。「すざく」には、マイクロカロリメータ(XRS)、X線CCDカメラ(XIS)、硬X線検出器(HXD)の3種類の検出器が搭載されている(図1.1)。「すざく」は、この3つの検出器を合わせて、0.5~700KeVの3軸にも及ぶ広いエネルギー帯域で宇宙を観測できる。XIS、XRSは表1.1に記すとおり、10keVまでの撮像及び分光を行う装置となっている。一方、10keV以上の硬X線領域を、過去最高の感度で観測できるように設計された装置がHXDとなっている。さらに、HXDでは、その外周結晶を用いて、全天モニターが行える。HXDのこの機能をWideband All-sky Monitor(HXD-WAM)と呼んでいる。本研究はHXD-WAMを用いた研究である。

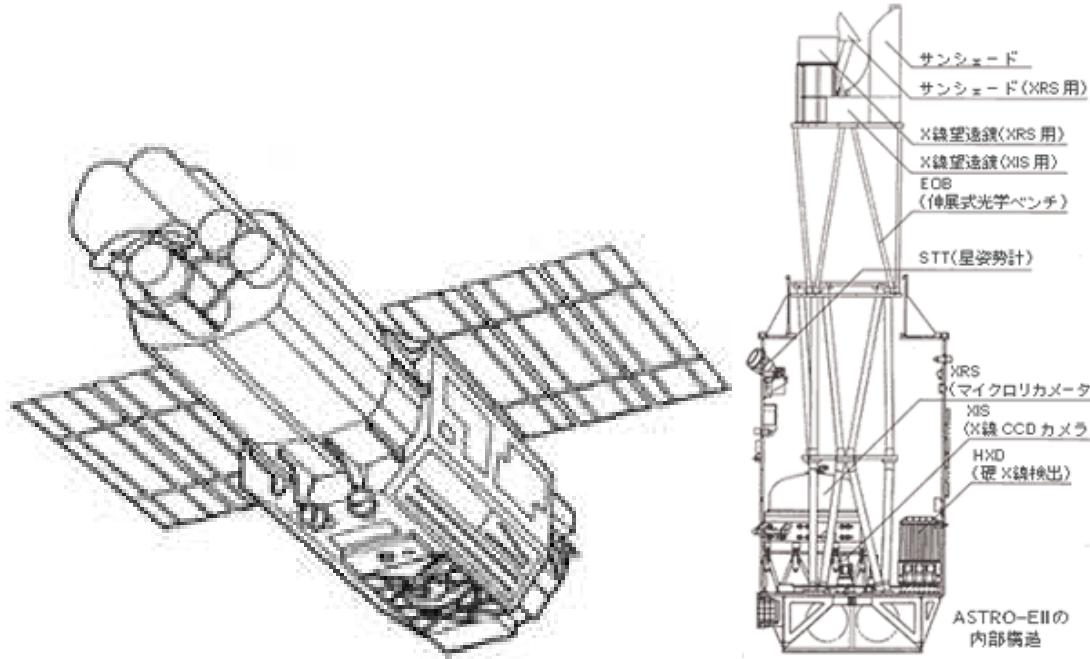


図 1.1: X 線天文衛星「すざく」の概観(左)と内部構造(右)「すざく」は直径 2.1 m、全長 6.5 m (軌道上で鏡筒伸展後) の大きさを持ち、太陽パドルを広げると 5.4 m の幅になる。衛星の重量は 1700 kg にもなり、日本の科学衛星としては、これまでにない大型衛星である。

	XRS	XIS	HXD
エネルギー領域	0.5~12keV	0.4~10keV	10~700keV
センサーの数	1	4	1(16 ユニット)
ピクセル数	32(2 × 18)	1024 × 1024	
ピクセルの大きさ	0.94 × 0.24mm	19 × 19	
センサー当たりの有効面積	190cm ²	1300cm ²	160cm ² (>30keV) 330cm ² (>40keV)
エネルギー分解能力	12eV	130eV	3.5keV(10~49keV)
視野	1.9 × 4.2	19 × 19	0.8deg
撮像能力 Others	2 × 18 ピクセル		0.56° × 0.56° <100keV 4.6° × 4.6° >200keV

表 1.1: 3つの機器の特徴 XRS は、打ち上げ後液体ヘリウムが全て気化してしまう不具合が生じ、検出器を目的の温度 (60mK) まで冷やすことができなくなつたため、その生涯を閉じた。

1.2 HXD-WAM の観測対象

ここでは、特に HXD-WAM により観測できる、ガンマ線バースト、トランジエント天体、太陽フレアについて触れる。

1.2.1 ガンマ線バースト

ガンマ線バースト (Gamm-Ray Burst;GRB) とは宇宙のあるところで突然的に膨大なエネルギーが解き放たれ、バーストのエネルギーの 90 %以上がガンマ線として放射される現象であり、ビッグバンにつぐ規模の大きい爆発現象であると考えられている。この現象の正体は不明であったが、近年の研究によって、数億光年ないし百数十億光年の遠方で発生する巨大な恒星が崩壊するときの超新星爆発と関連していることがわかってきた。その起源は完全には解明されていないが太陽の数十倍以上の質量をもつ巨大な星が、その一生を終えてブラックホールになるときに、ほぼ光速のジェットを放射し、そのジェットが地球の方向を向いていたときにガンマ線バーストとして観測されると考えられている。爆発の後に、急速に減光する「残光」(アフターグロー) なども観測されている。また、BATSE の観測により GRB は等方的に分布して起こることがわかった。(図 1.2)

HXD-WAM によるガンマ線バーストの観測は、すでに数多くなされており数百 keV から MeV 領域において有効な観測が行えることを証明している。(図 1.3)

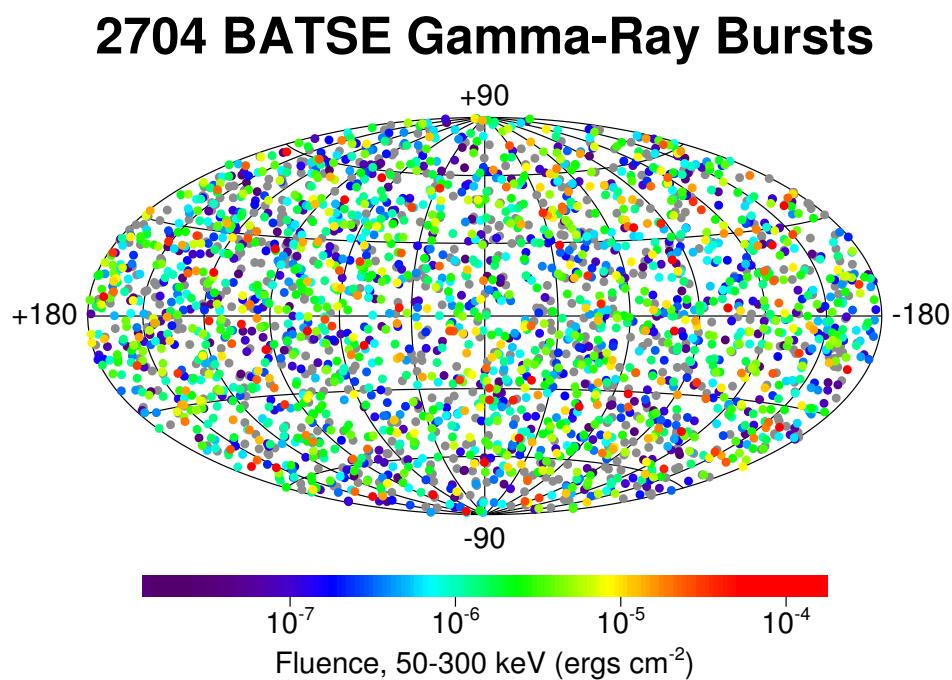


図 1.2: BATSE が観測した GRB の発生場所を銀河座標で示した図。GRB が等方的に分布していることがわかる。

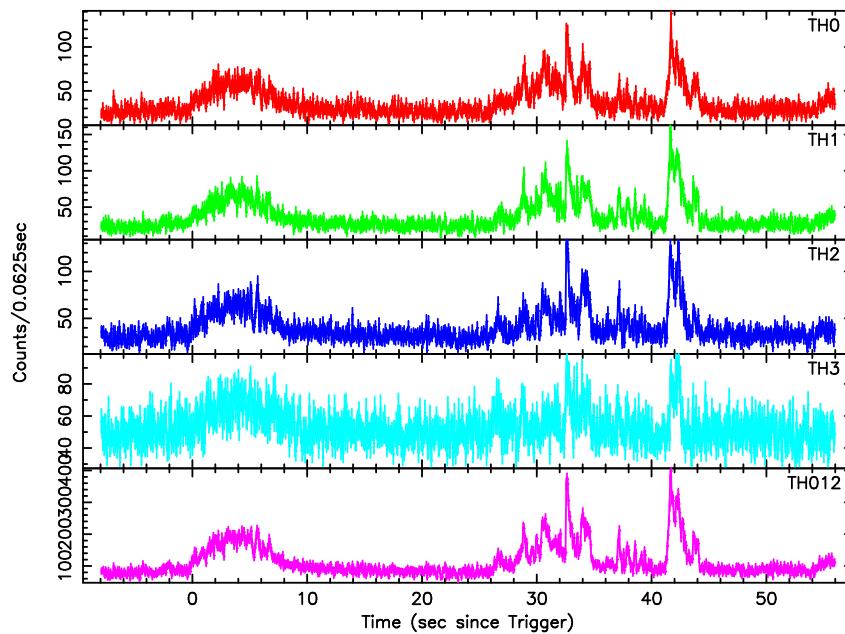


図 1.3: HXD-WAM で検出されたガンマ線バーストのエネルギー帯域別のライトカーブ
縦軸は光子のカウント数で、横軸がトリガーがかかってからの時間を表している。

1.2.2 トランジエント天体

パルサーヤやブラックホール候補星、中性子星連星、活動銀河核など宇宙に存在する多くのX線やガンマ線源は、そのエネルギースペクトルの形やX線強度に複雑な変動を示すものがある。多くのブラックホール連星は、図1.4のように典型的にhard state、soft stateと呼ばれる2つのスペクトル状態が周期的に現れることが知られている。この現象は、最も明るいX線源のひとつであり、Cygnus X-1などにみられる特徴的な現象である。hard stateのX線スペクトルはひとつのpower-lawによってよく表され、急激なX線強度の変化が特徴的である。ブラックホール連星の多くは、通常この状態にあり、X線の起源は逆コンプトン散乱によるという説が有力である。一方、希に見られるsoft stateではX線光度が高い状態であり、質量降着率が増大していることが予想される。この状態の特徴として、スペクトルに急な変動を示すpower-law tailを持つことが知られているが、その起源については今だよく理解されていない。これら2つの状態を観測することは、Cygnus X-1以外にも同様の振舞を見せるブラックホール候補天体や活動銀河核の放射のメカニズムを解き明かす重要な鍵となる。そのために、MeV領域に及ぶ詳細なスペクトルとX線源の長期的なモニターが必要となる。

BATSEに搭載されたLAD検出器は、地食を利用するという方法で、60にも及ぶX線源を同時にモニターし続け、X線天体の変動について興味深い情報を得ることを可能にした。HXD-WAMでも、同様の手法を用いることで数100keV辺りにおいて、他の衛星では実現できない軟ガムマ線モニター観測をすることが期待されている。(図1.5)

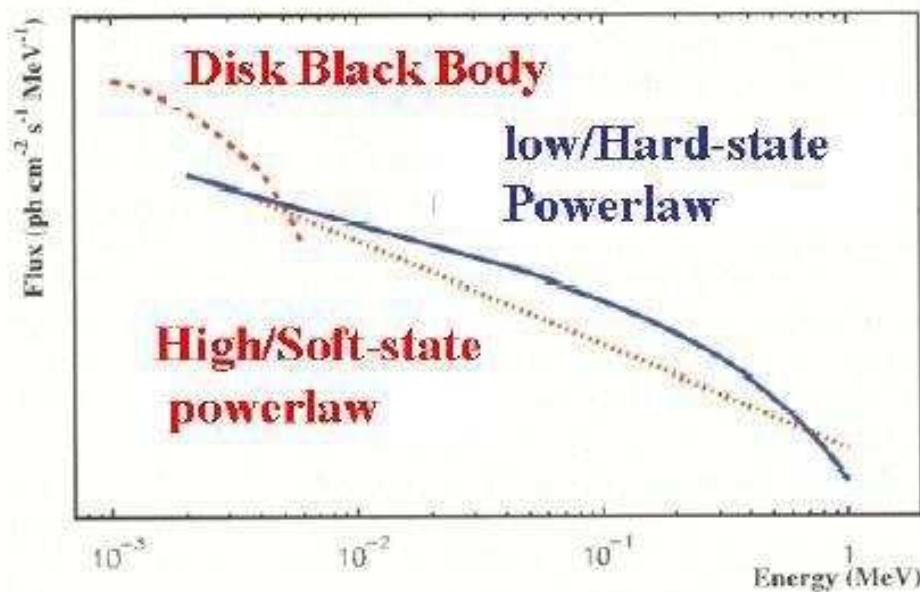


図 1.4: ブラックホール連星の典型的なスペクトル

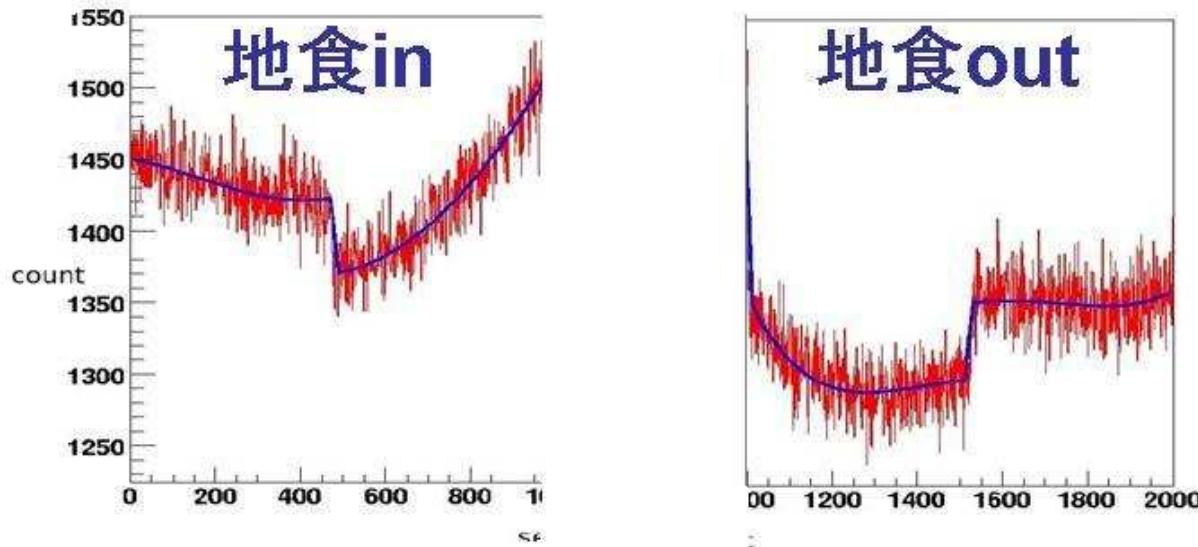


図 1.5: HXD-WAM で検出された地食のライトカーブ 縦軸は光子のカウント数で、横軸が時間を表している。地食ステップと呼ばれる段差になっているところが地食である。左が地食に入ったとき、右が地食から出たときのライトカーブ。 (c) 広島大学 深沢研

1.2.3 太陽フレア

1. 太陽観測の歴史

太陽観測の歴史は古く、例えば太陽黒点（太陽の表面に現れる黒いしみのようなもの）は、古文書などから、紀元前にはすでに観測されていたことがわかっている。当時の観測手段は、肉眼観測等の原始的な手段であったと言われている。その後、17世紀には、ガリレオによる望遠鏡という画期的な観測方法で太陽研究を飛躍的に発展させ、太陽黒点、太陽の自転など数々の重大発見をした。近年では、観測技術の進歩により、地球大気に妨げられることのない、宇宙空間での衛星による太陽観測が X 線からガンマ線の領域で行われ、非常に激しい活動性をもつ姿が鮮明に捉えられている。これまでに、1980 年代の「ひのとり」衛星および SMM(Solar Maximum Mission)衛星、1990 年代以降では、「ようこう」衛星や RHESSI 衛星などが打ち上げられた。その結果、太陽の活動周期が約 11 年周期であることや、太陽フレアの観測など多くの成果を残した。また、2006 年 9 月には、「ようこう」衛星の後継機である「ひので」衛星が内之浦宇宙空間観測所(USC)から打ち上げられ、太陽フレアなどの解明のための観測を行っている。

2. 太陽フレア

典型的な恒星の一つである太陽は、ときおり、巨大な爆発現象を起こすことが知られている（図 1.5）。その爆発では、数分から數十分の間に 10^{29} erg から 10^{33} erg (10^{22-26} J) ものエネルギーが解放される。もっとも大きなフレアに至ると 10^{34} erg にも達するエネルギーが

解放される。これは、広島の原爆 10 兆個にも相当する莫大なエネルギーである。その規模は、X 線強度によって分類がされていて、強い方から X、M、C、B、A の等級がある。太陽フレアの発生メカニズムは長い間謎とされてきたが、1990 年代の「ようこう」衛星によって、その発生メカニズムに対する理解が一気に進んだ。今現在の理解では、フレアでは、黒点付近で磁気チューブが浮上し、磁気リコネクションという機構で、磁場のエネルギーが熱エネルギーや運動エネルギーに変換されると考えられている。解放されたエネルギーによって、可視光～X 線・ガンマ線といった幅広い波長にわたる電磁波が放射される。同時に、フレアに伴ってコロナ中に 1000 万度を超える高温プラズマが生成され、放出される現象がみられる。これは、コロナ質量放出 (Coronal Mass Ejection; CME) と呼ばれ、この時放出された物質の速度は、秒速数百 km～2000 km にも達する。「ようこう」衛星の硬 X 線観測によると、CME による放出と反対方向にも物質が流れしており、図 1.6 のように磁力管を満たした物質と衝突して、硬 X 線が発生している様子が見事に捉えられている。さらに、磁束管中でほとんど衝突することのない高エネルギー電子・陽子は、磁束管中の磁力線に沿って彩層に降り注ぎ、硬 X 線を放射する。こうしてフレアによって放射された硬 X 線のスペクトルが図 1.7 である。図では、加速された電子による制動放射の連続成分に加えて、太陽の大気中にある炭素や酸素から加速された陽子が衝突して出る核ガンマ線が見えている。このように、太陽フレアに伴って、高エネルギーの粒子が発生していることは明白であるが、その加速物理機構はまだなぞのままある。

HXD-WAM は、2005 年 8 月 22 日から観測を開始して以来 150 個以上の太陽フレアを観測し、多くのフレアから 300 keV を超える硬 X 線スペクトルの取得に成功している。これは、太陽フレアの 100 keV 以下で支配的である熱的放射と 100 keV 以上で支配的な非熱的放射の研究に有力な武器となり、粒子加速の解明に役立つと期待されている。

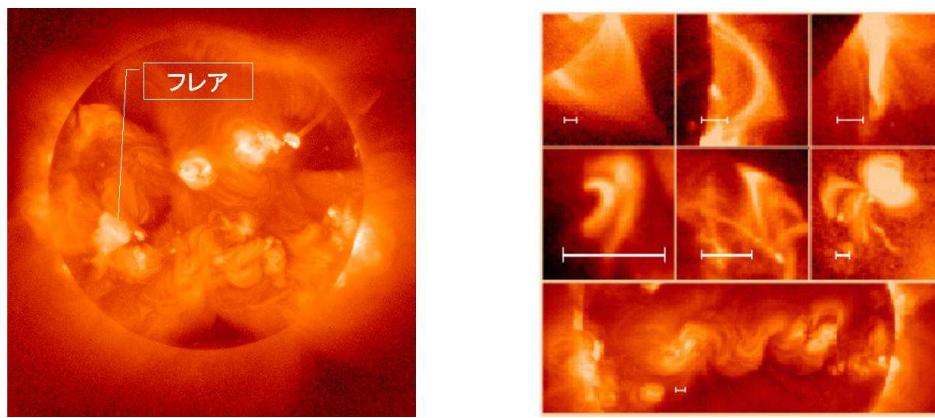


図 1.6: 「ようこう」衛星で観測された太陽の X 線画像。左の写真の明るいところや右の写真のカスプ状になっているのが太陽フレアである。

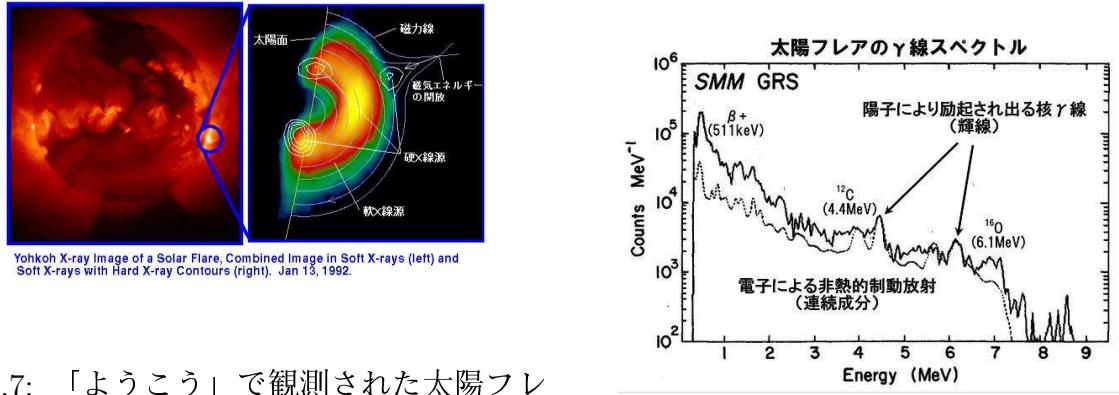


図 1.7: 「ようこう」で観測された太陽フレアの軟X線画像(左). 太陽フレアの軟X線画像に、硬X線画像を重ねた図。磁気ループの足元だけでなく、ループのトップで硬X線の放射が見られ、加速された粒子からの放射であろうとされている。(右)

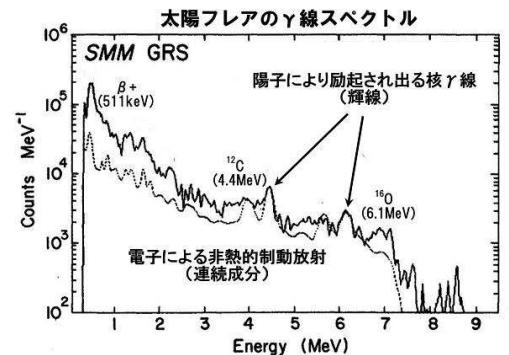


図 1.8: SMM衛星が捉えた太陽フレアのガンマ線スペクトル 縦軸は光子のカウント数で、横軸がエネルギーを表している。

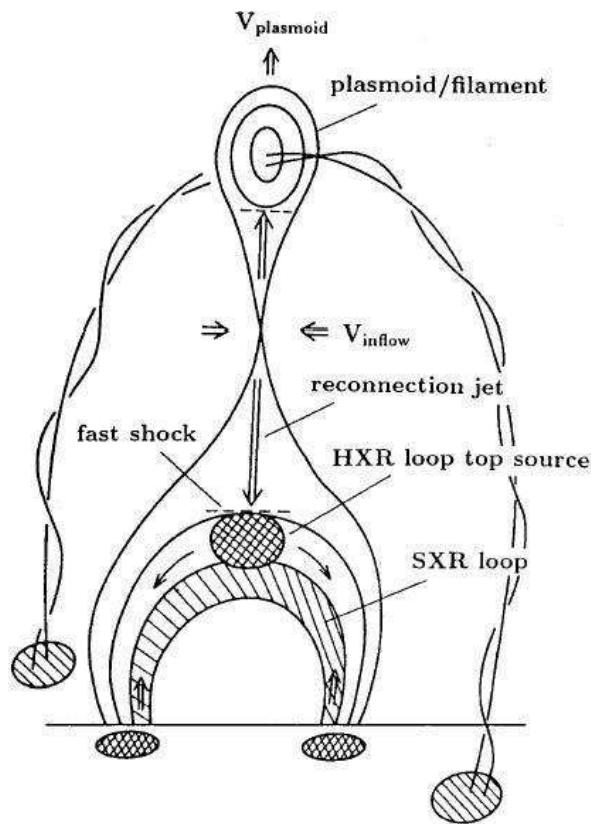


図 1.9: 太陽フレアの発生モデル (Shibata et al.(1995)) V_{Inflow} で磁場のつなぎかえが起こり、上下にプラズマが加速される。加速されたプラズマがループトップをたたき、硬X線を形成する。ここで加速された電子がフットポイントへ突入し、制動放射により、硬X線を放射する。

1.3 本研究の目的

HXD-WAMによる天体観測を行う上で重要な役割を果すものにHXD-WAMのバックグラウンドがある。バックグラウンドを精度よく見積もることで、天体の検出感度を向上させることができ、同時に正しいスペクトルやライトカーブを取得出来るようになる。

HXD-WAMは主検出部のバックグラウンド除去機能の一部を担ってが、HXD-WAM自身のためのバックグラウンド除去機能は持っていない。しかし、非常に大きな有効面積を持つため、入射してくる荷電粒子などがバックグラウンドを多数つくり出す。HXD-WAMのエネルギー帯域である50～5000keVでの観測を考えた場合、衛星軌道上のバックグラウンドは大きく分けて、荷電粒子によるものとガンマ線によるものがある。これらは約90分の軌道周回にともなって10分程度でバックグラウンド環境が大きく変動する。よって、1分以内のGRBならば直前、直後をバックグラウンドとみなせるが、数十分も続く太陽フレアはそうはいかない。本研究では、軌道位相によるバックグラウンドの変化に着目しながら太陽フレアを用いたバックグラウンドの再現性の検証を行う。

第2章 観測機器と観測天体

2.1 硬X線検出器(Hard X-Ray Detector; HXD)

HDXは、10keV～700keVと非常に広いエネルギー帯域をカバーする。光電吸収体としての結晶は、ガドリウム・シリケート(GSO)結晶を用い、その周囲を覆うようにシールド用結晶として、ビスマスジヤーマネイト(BGO)結晶を用いている。このシールド用結晶が光った時の信号は、バックグラウンドであると判断することで、見ている天体からのX線と視野外からのX線やコンプトン散乱したX線、さらには、宇宙線などの荷電粒子(バックグラウンド)を区別することができる。このような方法を反同時計数法といい、今のBGO結晶のようなシールド結晶は、鉛などの単なる遮断物による受動的なシールドに対して、アクティブシールドと呼ぶ。さらに、HXDの主検出部では、BGOで作った深いシールドの井戸の底にGSOを配置し、1つの光電子増倍管PMTで読み出している。波形弁別法という方法を用いて、この2種類の結晶からの信号を区別している。このような検出器をフォスウィッチカウンタという。また、HXDには、GSOの他にPIN型シリコン検出器という半導体検出器がのっている。これは、GSOだけでは低いエネルギーのX線(10keV～40keV)に対するエネルギー分解能が悪く、信号の検出がしにくいため、PIN半導体をGSOの前に置くことでより幅広いエネルギーのX線を観測することができるようになっている。さらに、天体によるバックグラウンドを減らすために、井戸の中にファインコリメータ(FC)という視準器を使って、視野を0.5°四方に絞り、目標の天体以外の方向ができるだけ見えないようにする工夫をしている。このような井戸型の検出器を4×4の16本並べ、さらに、その周囲に20本のシールド結晶(図2.2参照)を並べて、ユニット間でもお互いに反同時計測を行うことで、さらなる低バックグラウンド化をはかっている。このような構造を複眼構造と言い、これにより有効面積を増やしつつ、不感時間を増やさないことで、徹底したバックグラウンドの除去がされ、このX線領域において、世界最高の感度を達成している。

2.2 広帯域全天モニター機能 (Wideband All-sky Monitor; WAM)

HDXのシールドカウンタは、38cm、4kgもの巨大なシンチレータである。HXDでは、これを20本並べた4面の構成をとり、あらゆる方向からくる天体の放射を受けることができる。そのため、HXDのシールドカウンタは、全天モニターとして使用することができる。我々は、シールドカウンタの全天モニター機能を総称してHXD-WAMと呼んでいる。HXD-WAMは、過去のNaI/CsIシンチレータの検出器(CGRO衛星BATSEなど)や、い

ま稼働中のSwift衛星BAT、2008年打ち上げ予定のGLAST衛星GRM(BGO結晶)に比べ、500keV～5MeVでたいへん大きな有効面積を誇っている。WAMのエネルギー帯域は50keV～5MeVと広く、100keVでも有効面積が 800cm^2 と他の衛星に比べ巨大であることが特徴である。全天モニターの観測対象となる天体は、太陽フレアや明るいX線源、ガンマ線バーストなど、突発的に明るくなる天体である。



図 2.1: HXD の外観

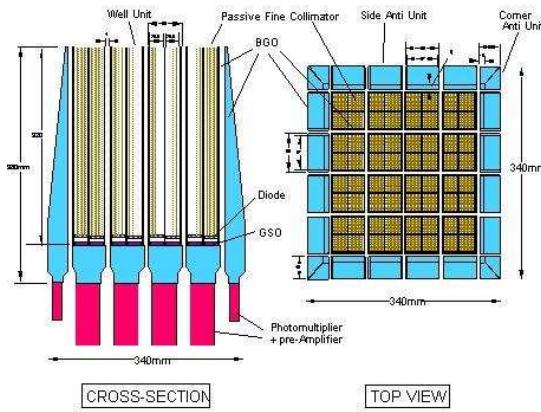


図 2.2: 左が横から見たとき、右が上から見たときの HXD-WAM の概略図

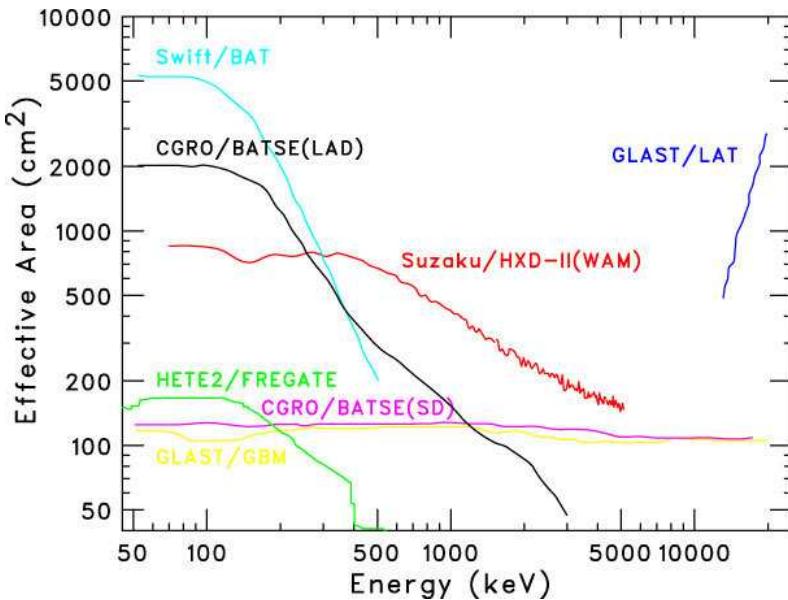


図 2.3: 他衛星の全天モニター機能と比較した「すざく」衛星 HXD-WAM1 面の有効面積
縦軸は有効面積、横軸がエネルギーを表している。

2.3 HXD のシステム構成とデータの流れ

HXD は、主検出部である井戸型フォスイッチカウンタ (WEL)、HXD-WAM これらを納める筐体およびバイアス電圧を発生する高圧電源を合わせた HXD-S(Sensor) のほか、HXD-AE(Analog Electronics)、HXD-DE(Digital Electronics)、HXD-PSU(Power Supply Unit) および、HXD-PIM(Peripheral Interface Module) の5つの部分から構成される。HXD のシステム構成を図 2.4 に示す。

HXD-S の Anti で検出したフォトンのアナログ信号パルスは、まず HXD-AE に送られる。HXD の信号処理回路 (HXD-AE) は、常時電源部 (ACU) と、井戸型フォスイッチカウンタ専用部 (WPU) と HXD-WAM 専用部 (TPU) の三つのパートに分割されている。HXD-WAM の信号は TPU で処理され、また ACU では温度、電圧などハウスキーピング情報が生成され、HXD-DE に送られる。HXD-DE には CPU が搭載されており、AE から受け取ったデータをソフトウェア処理し、衛星全体のデータストレージである DP で送信する。また、地上から送られた HXD 宛のコマンドも一部のハードウェア制御コマンドを除き、DE でいったん受信され、デコードされる。これらはコマンドの識別によって、必要に応じて HXD-AE に転送される。

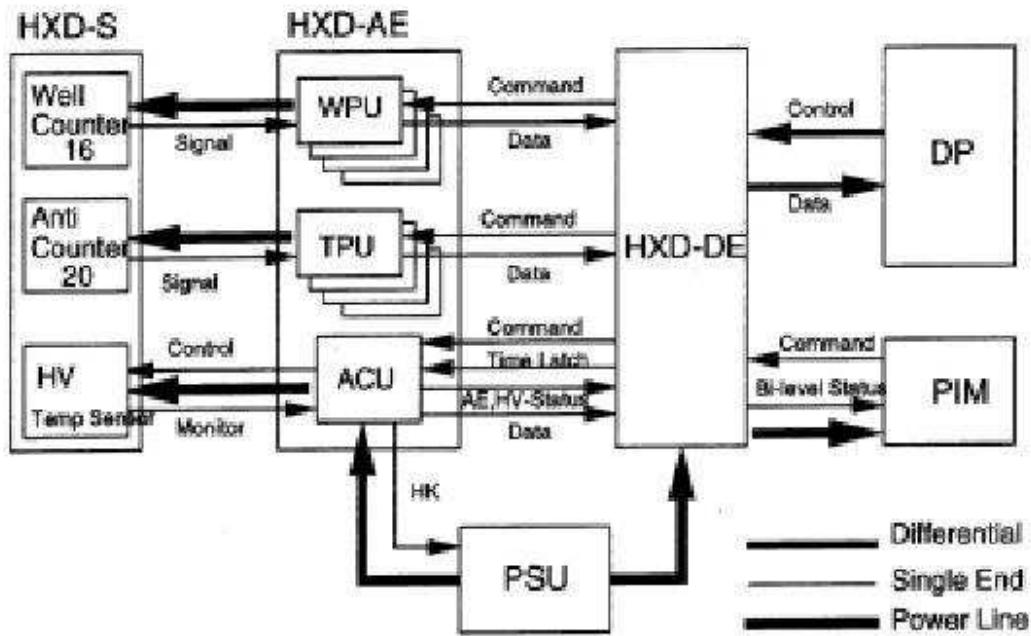


図 2.4: HXD のシステム構成

2.3.1 HXD-AE-ACU

ACU は、HXD-AE 全体をコントロールするためのモジュールである。ACU は HXD-PSU からの電源をリレーを介さずに直接受けるので、PSU が ON になると同時に ACU

に電源が供給され、ACU全体が動作を開始する。ACUは、HxD-PSUから供給された電源を HxD-S、WPU、TPU に分配し、光電子増倍管と PIN の高圧電源のコントロールを行う。

2.3.2 HxD-AE-TPU

TPU(Transient Detector Processing Unit)は、全体で4つのモジュールからなり、HxD-WAM部分を担当する。1つのモジュールではコーナーの BGO を含めた5つの BGO の信号を処理する。主な役割は HxD-WAMからのヒットパターン信号を WPU に常時通知すること、1面の信号を足し合わせることによるガンマ線バーストやトランジエント天体のスペクトル観測を行うこと、RBM(Radiation Belt Monitor)として軌道上での荷電粒子帯の検知に用いて、ACU に送ることができる。

2.3.3 HxD-AE-WPU

WPU(Well-type Detector Processing Unit)も、16本のユニットからの信号を4つの同等なモジュールで4ユニットずつ並列処理する。1つのモジュールは、それぞれ4つの GSO と 4 つの PIN の信号に対して増幅、整形、A/D 変換する。同時にイベント発生時刻やイベントを区別する波形弁別情報、トリガーパターン、反同時計数を使ったヒットパターン情報および、各種フラグ情報を生成する。

2.4 HxD-WAM のデータ

HxD-WAM の信号処理部では、センサー部の高圧電源やプリアンプへの電源供給と、センサーからの信号を処理し AD 変換する事の二つの機能がある。全天モニター装置 HxD-WAM としての信号処理として、HxD-WAMからの信号を積算し、ヒストグラム化して、エネルギースペクトルを作成している。HxD-WAM で生成されるヒストグラムは、表 2.2 の 2 種類がある。また同時に検出部は、ヒットパターンとして井戸型フォスイッチカウンタ信号処理部 (WPU) に、反同時計数用の信号として渡される。この反同時計数に使用できるエネルギー下限は、およそ 50keV である。

ヒストグラムは、50 keV から 2 MeV までのエネルギー領域を、64 ch ADC をもちいてエネルギースペクトルを取得しており、地上にダウンリンクできるデータ容量の関係で、54ch にビンまとめされている。さらに、ADC のオーバーフロービットを積極的に利用し、合計 5 MeV までの領域を 55ch のヒストグラムにしている。このヒストグラムは、HxD-WAM 4 面に対し独立に、 $\frac{1}{2}$ 秒毎に生成している。

ガンマ線バーストなど、突発的に明るくなる天体に対しては、一秒の時間分解能では科学的な目的に使えない場合がある。そこで、HxD-WAM では、エネルギーのビン数は 4 band に落としているが、時間分解能を 1/64 秒にあげたヒストグラムも生成している。ただし、この高時間分解能データを常時取得し、すべて地上にダウンリンクすることは通信帯域の制限から難しいので、軌道上で、このライトカーブをモニターし、ポアソン分布

に対し、有意な変動がみられた時間帯だけをメモリー上に保存し、地上に降ろしている。この判定は、「ぎんが」衛星の γ 線バースト判定回路を踏襲し、HXD-WAM の信号処理部(ハードウェア)と、衛星搭載のCPU処理部(ソフトウェア)とで行なっている。

検出器	BGO 結晶
エネルギー帯域	50-5000keV
エネルギー分解能	30 %@ 662keV
有効面積	800cm ² @ 100keV、400cm ² @ 1MeV
時間分解能	31.25ms

表 2.1: HXD-WAM の性能

	エネルギーチャンネル	時間分解能	カバーする時間	目的
BST モード	4ch	1/64s (TH)	64sec(8sec before 112sec after)	GRB
	55ch	1s(PH)		
TRN データ	55ch	1s(PH)	every 1sec	monitor for background and transient phenomena

表 2.2: HXD-WAM の特性、 TH:Time Hisory、 PH:Pulse Height

	BATSE	HETE-2	INTEGRAL SPI/ACS	Swift BAT	HXD-WAM	GLAST LAT/GBM
検出器	NaI	NaI、CCD 比例計数管	Ge/BGO	CdZnTe	BGO	Tower/NaI、BGO
エネルギー帯域	25keV - 10MeV	1.0 - 500keV	18keV - 8MeV/ 100keV - 数MeV	15 - 150keV	50keV - 5MeV	20keV - 300GeV/ 10keV - 25MeV
検出面積	2000cm ²	120cm ²	500cm ² /3000cm ²	5200cm ²	800cm ²	8000cm ² /126cm ²
角度分解能	25°	20'	2.5° /—	4'°	3°	0.15° /15°
視野	全天	1.5 - 2.0str	0.28str/全天			
観測期間	1991 - 2000	2000 -	2002 -	2004 -	2005 -	2008 -

表 2.3: モニタ機能搭載の他衛星の性能との比較

第3章 X線観測によるバックグラウンド

§1.3で述べたように、WAMのエネルギー帯域である50~5000keVでの観測を考えた場合、衛星軌道上でのバックグラウンドは大きく分けて、荷電粒子によるものとガンマ線によるものがある。

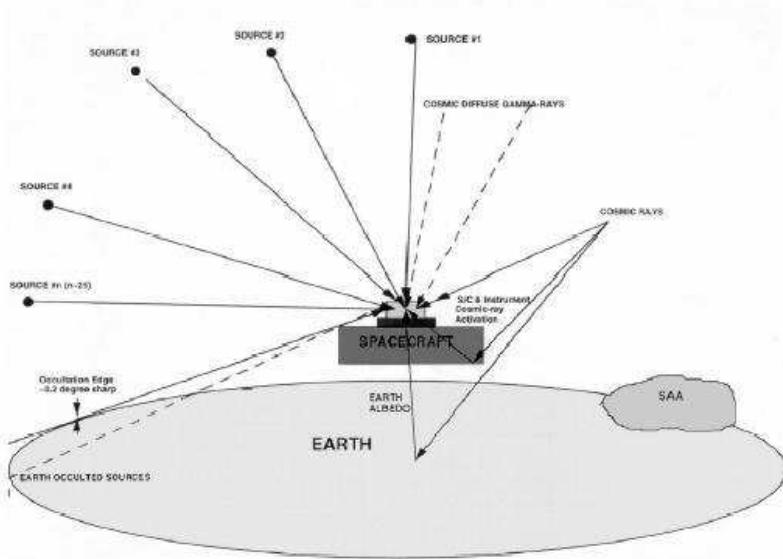


図 3.1: 検出器のバックグラウンド源

3.1 荷電粒子によるバックグラウンド

衛星上での荷電粒子の強度は、その地球上の位置での地球磁気圏を貫くために必要とされるエネルギーによって変化する。この地球磁場による荷電粒子のシールド能力のことを charged particle Cut Off Rigidity(COR) と呼び、下で述べるように遮蔽能力を GV の単位で表す。COR は、地球上の位置によって 4GV-14GV と大きく異なる(図 3.2)。COR の高い場所では、荷電粒子は地球磁場によって多くが止められるためバックグラウンドは小さくなり、反対に COR 低い場所では荷電粒子が地球磁場を貫いて降り注ぐため、バックグラウンドは増加する。ここで、「すぐ」衛星が地磁気の影響をどの程度受けるのかを算出する。地磁気によって荷電粒子の軌道が曲げられ、半径 r の円軌道を通るとき、荷電粒子に運動は、

$$\dot{p} = m \frac{v^2}{r} \quad (3.1)$$

で表される。 p は運動量、 m は荷電粒子の質量をそれぞれ表す。また、磁場 B 内部の荷電粒子が行う運動は、粒子の速度 v 、荷電粒子の持つ電荷 q を用いて

$$\dot{p} = qvB \quad (3.2)$$

となる。よって、両式から

$$r = \frac{p}{qB} \quad (3.3)$$

が成立する。さらに、光速 c をかけると、

$$r = \frac{pc}{qcB} = \frac{R}{cB} \quad (3.4)$$

と表される。この式の

$$R = \frac{pc}{q} \quad (3.5)$$

となる。これを rigidity と呼び、電圧の単位をもち、[GV] 単位で表す。地表付近の地磁気は約 0.4[gauss](= 10^{-4} T)、「さざく」衛星は、高度 550km 上空の地表付近を飛翔しているので、COR のあたいは、(3.4) 式より、

$$R = cBr = 3 \times 10^8 \times 550 \times 10^3 \times 4 \times 10^{-5} \sim 6.6\text{GV}$$

となる。COR は、運動量で表すと約 $10\text{GeV}/c$ 程度までの宇宙線が地磁気の影響を受けることになる。

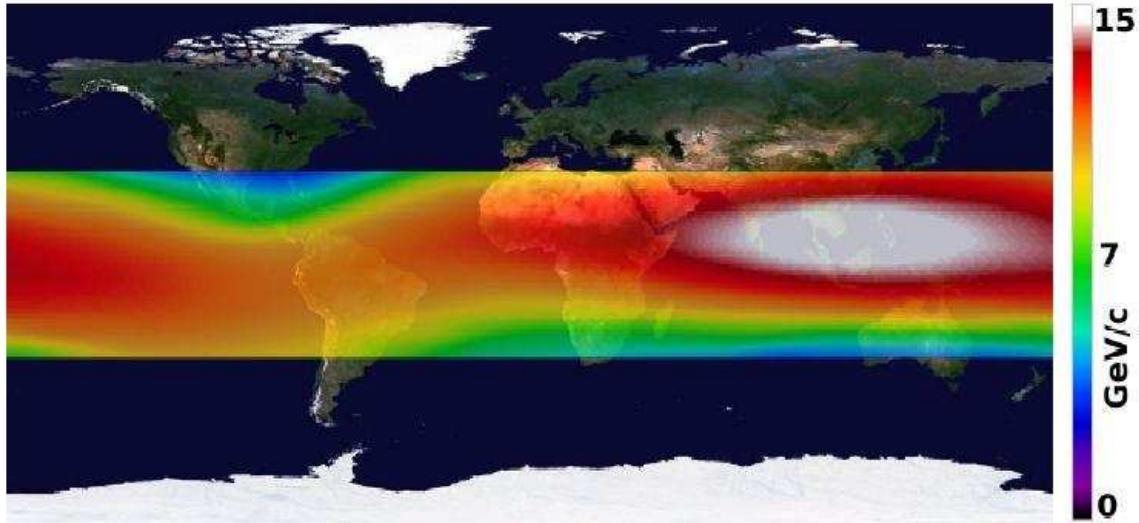


図 3.2: 「さざく」軌道上での COR のマップ。青から白になるにつれてシールド能力が強くなる。

3.2 ガンマ線によるバックグラウンド

3.2.1 遠方天体起源の背景ガンマ線

宇宙ガンマ線バックグラウンドの一次成分と言われ、遠方宇宙の天体を起源にする成分である。主に遠方に多数ある活動銀河核によるものであると考えられている。ほぼ、等方的で時間変動もなく、特に 50keV 以下のエネルギーで支配的である。

3.2.2 地球の大気と荷電粒子の相互作用により生じるガンマ線

二次成分と呼ばれるもので、地球磁場にトラップされた陽子が地球の大気との相互作用によってガンマ線を放射することに由来する。地球上の位置や日照時間によって変化する。

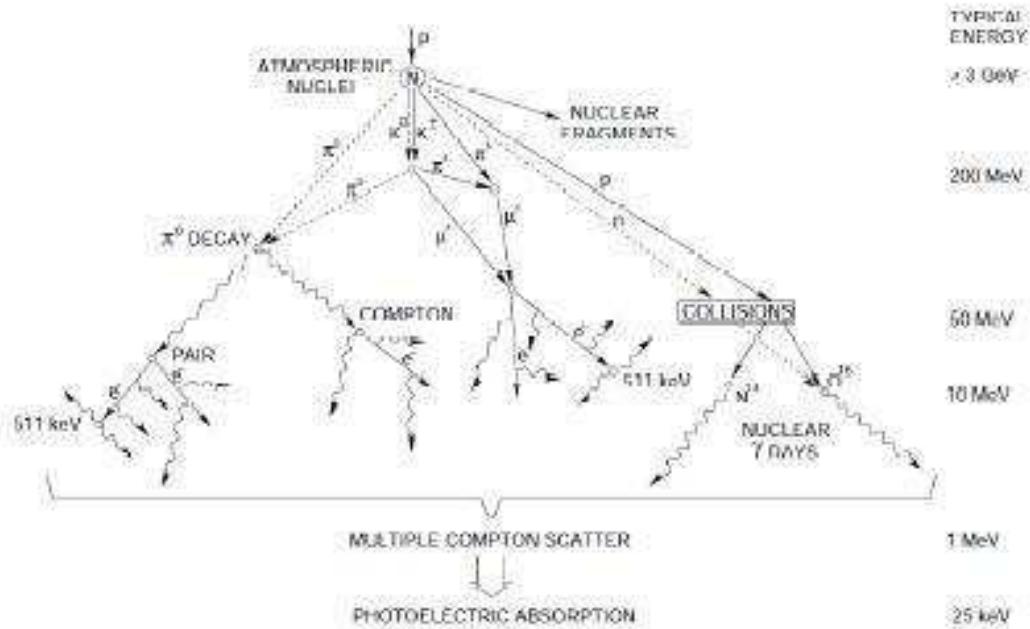


図 3.3: 大気ガンマ線生成メカニズムの図

3.3 検出器自体の放射化によるバックグラウンド

検出器(シンチレータ)の放射化は軌道上のバックグラウンドの中で荷電粒子と並ぶ支配的な成分である。ここでの放射化とは、陽子などの宇宙線が検出器を構成する物質と核反応を起こし、放射性同位体が生成されることであり、この放射性同位体が崩壊する時に放射するガンマ線や α 線が検出器のバックグラウンドとなる。特に、WAM は、表面積が大きく、大量の陽子を浴びるため、検出器の放射化は大きなバックグラウンド源となる。

特にこの影響が顕著に表れるのは地球上に存在する地磁気異常帯を通過したときである。この異常帯は南大西洋地磁気異常帯 (South Atlantic Anomaly, SAA) と呼ばれ、地磁気が弱いため大量の放射線が降り注ぐ。SAA で強くなる荷電粒子はX線検出器にとって強い影響を与える。WAMの場合、SAA で光電子増倍管が壊れないように SAA に入る場合には高圧電源を切って入るようにしている。しかし、通過によるシンチレータの放射化は避けられないため、生成核種の寿命によって SAA 通過後にはバックグラウンドのカウントは増大する。

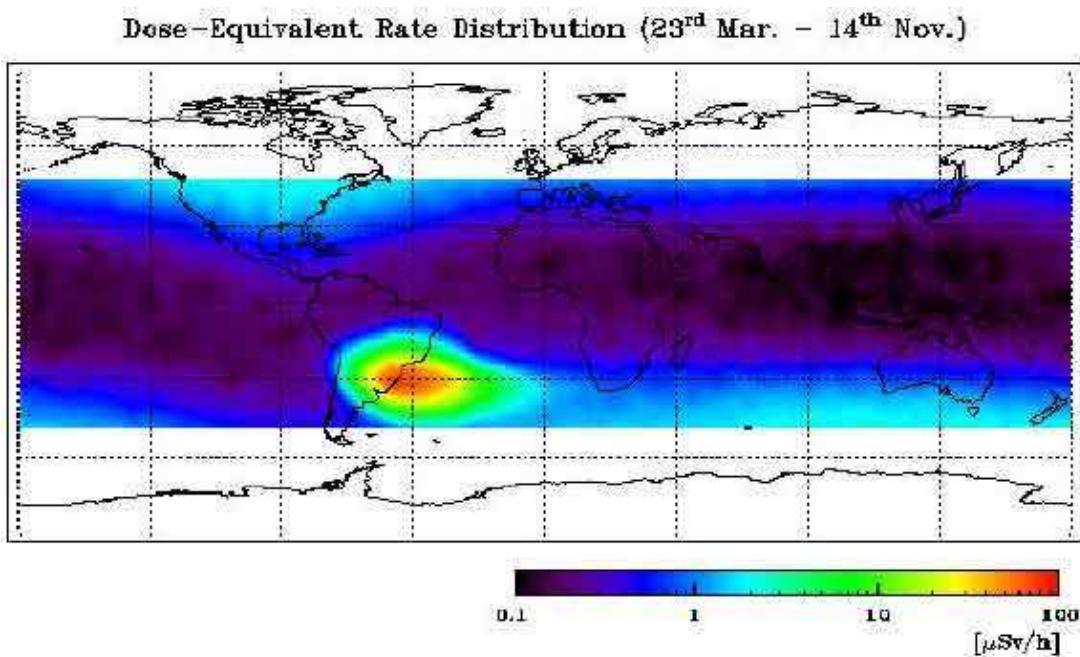


図 3.4: 南大西洋地磁気異常帯 (South Atlantic Anomaly, SAA) の図

第4章 バックグラウンドデータの解析

第3章で述べたように HXD-WAM のような非撮像型の検出器で天体観測を行うときには重要なのがバックグラウンドの推定である。バックグラウンドを精度よく見積もることで、天体の検出感度を向上させ、同時に正しいスペクトルやライトカーブを取得出来るようになる。この章では、2006年12月06日に HXD-WAM が検出した太陽フレアイベントを例にとり HXD-WAM のバックグラウンドの再現性の検証について方法をまとめ、解析をする際に必要な検出器のゲインの長期変化についても述べる。

4.1 ゲイン（電流増倍率）

光電子増倍管 (Photomultiplier ; PMT) は微弱な信号を増幅させるための真空管である。PMT の入射窓はガラスで出来ていて、光子は簡単に通過することができる。その後、光電面に光子が入ってくると、光電効果によって、光電面からの電子が放出され、飛び出した電子は、強い電場によって加速されて一段目のダイノードに衝突する。ダイノードに衝突した電子は、加速で得たエネルギーを使ってダイノード内の電子を次々と飛び出させる。この飛び出した電子を2次電子といい、ここで、電子の数が増幅されている。2次電子はまた電場によって加速され、次の段のダイノードに衝突し、新たな2次電子群を発生させる。これをどんどん繰り返し、始めは1個だった電子は最終段のダイノードに達するとき1億個程度にまで増える。ここまで到達した電子は、電流として外部に読み出される。(図4.1)

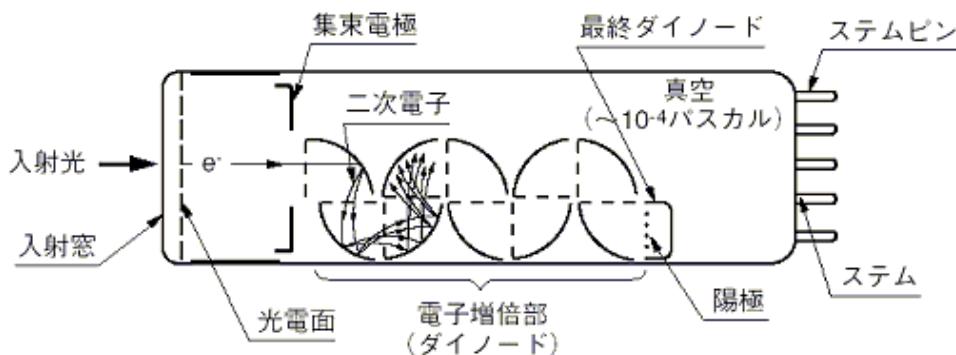


図 4.1: 光電子増倍管の構造 左側から入射した単一の光子が光電陰極に衝突して1つの電子に変換される。この電子が最初のダイノードに衝突すると、多数の電子の放出が起こり、複数のダイノードで電子がなだれのように増幅される。

PMT のゲインと、陽極からの出力電流(陽極電流)と陰極からの光電子流(陰極電流)との比で決まり、理想的には n 段のダイノードの平均二次電子放出率 δ は、 $\delta = A \cdot E^\alpha$ で与えられる。ここで、 A は定数、 E はダイノード間電圧、 α はダイノードの形・材質によって決まり 0.7~0.8 の値をとる。 n 段のダイノードを持つ PMT の陽極-陰極間に V の電圧を加えた場合、PMT 全体のゲイン μ は次のようになる。

$$\mu = \delta^n = \left\{ A \cdot \left(\frac{V}{n+1} \right)^\alpha \right\}^n = \frac{A^n}{(n+1)^{\alpha n}} \cdot V^{\alpha n} = KV^{\alpha n} \quad (4.1)$$

一般的に PMT は 9~12 段なので、陽極感度は加えた電圧の 6~10 乗に比例する。

衛星軌道上での PMT のゲインを考えた場合、エネルギーの高い荷電粒子やフォトンが多量に入射してくる。高圧電源の入った PMT に ~100MeV の陽子や宇宙線が入射すると、シンチレータはそのエネルギーに比例したシンチレーション光を発するので、莫大な数の電子が光電面で作られ、さらにダイノードで 10^5 倍と增幅されるため、多量の電子を浴びることによって最終ダイノードの感度が落ち、PMT は徐々に劣化していく。

4.1.1 HXD-WAM のゲイン

HXD-WAM の PMT のゲインの較正に有効なのが、検出器バックグラウンド中にみられる 511keV の電子・陽電子対消滅線である。日々の対消滅線の変化を追うことでゲイン変動を求める(図 4.2)。地上 PMT 劣化実験(遠藤(2006))では、軌道上の環境を模擬し、PMT の劣化の様子を調べた。地上における PMT のゲイン変動の原因は 2 つ考えられる。1 つは、長期劣化によるものと高圧運用によるものである。ここで、PMT は 1 つ 1 つ個性がある装置なので、予めどのようなゲインが変動するかが予測できない。そこで、遠藤(2006)は長期劣化成分は 4 次関数を用いた。高圧運用の成分は指數関数を用いた。実験で得られた PMT のピークチャンネルの履歴を追い、温度一定の下で、長期劣化と高圧運用による短期ドリフトを考慮し、モデル化している。

$$f(t) = [t \text{ の } 4 \text{ 次式}] \cdot \{1 + \exp(-t_{\text{saa}}/\tau_{\text{HV}})\} \quad (4.2)$$

ここで、 t は時間、 a は定数、 t_{saa} は高圧 OFF からの経過時間、 τ_{HV} は高圧 ON-OFF に依存する時定数である。

・軌道上でのゲイン測定運用について

HXD-WAM は、HXD の主検出部を取り囲む 1 面ごとにデータを取得している。そのため、5 本のユニットを足し合わせたデータは取得できるが、HXD-WAM 1 本 1 本のデータは個別に取得できない。そこで、HXD では SAA 通過後毎日 2 分程度ずつ、4 つの面それぞれに対し、1 本ごとにデータが取れるように、5 本あるうちの 4 本のデータを取り込まないようにコマンドで命令を与え、較正データを取得している。SAA 付近では、HXD-WAM に入射する荷電粒子のレートは、5MeV 以下で 1 秒当たり数千個程度、100MeV でも 1 秒当たり数百個程度となるため、ゲイン変動を追うだけなら 2 分程度の積分時間でも十分なスペクトルが得られる。こうして得られた 20 本のデータは、ユニット個別のデータであるため、個別にゲイン変動を追うデータとして使える。

4.1.2 ゲイン補正

図4.2は、軌道上のゲイン運用によって測られたゲインの変化を HXD-WAM の運用開始から2年近くにわたってプロットしたものである。図4.2より511keVのピークチャンネルが日々下降していることがわかる。一年で約20%程度低下する。今回の解析では、HXD-WAM が太陽フレアを捉えた日から前後50日のデータをつかうので、リニアで近似することでゲインを補正した。つまり、前後50日のスペクトルを足して2で割ることにより、太陽フレアを捉えた日のゲインとした。

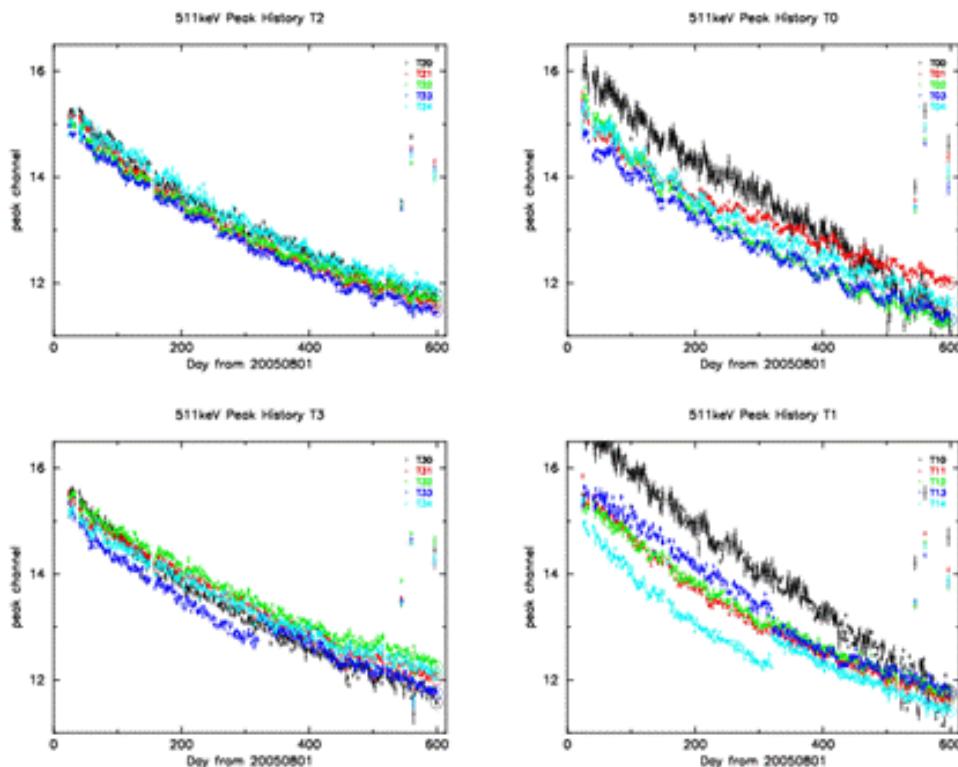


図 4.2: HXD-WAM のゲイン変動のプロット。横軸が「すぐ」衛星を打ち上げた日からの経過時間で、縦軸は、511keV に相当するチャンネルである。

4.2 解析ソフトウェア

「すざく」衛星で得られた天体からのデータは、地上局に送信された後、Row Packet Telemetry(RPT)というデータフォーマットで蓄積される。地上局では蓄積と同時にこのデータをそのまま読み込み、衛星の状態チェックなどを行う。このことをQLといい、そのために用いられるのがhxndlというソフトである。RPTデータを観測データ解析のためにFlexible Image Transport System(FITS)形式と呼ばれるより一般的なファイルフォーマットに変換するソフトをmkhxdlstfitsといい、これにより作成された衛星データをFirst FITS File(FFF)と呼ぶ。

次に、FFFに対し各種補正や時刻付けを行い、よりユーザーに使いやすいデータを作成するツールがhx2ndfitsであり、これはいくつかのソフトウェアを呼び出すスクリプトとして構成される。すなわち、HXD-WAMの場合、データの時刻付けを行うhxwamtime、ゲインの変動履歴を作成するhxdkwamgainhist、Eventの種別などでデータの品質を決めるhxwamgrade、HXD-WAMの検出器やPMTのPI補正を行うhxwampiなどで構成されている。こうしたソフトを使い作成される FITS ファイルを Second FITS File(SFF)と呼ぶ。FFFとSFFは同じフォーマットである。一般に公開されるファイルはSFFである。このSFFを一般の解析用ツール群(ftools)で解析を行い、天体のライトカーブやスペクトルを得る。これらのデータプロセスの流れを図4.3に示す。

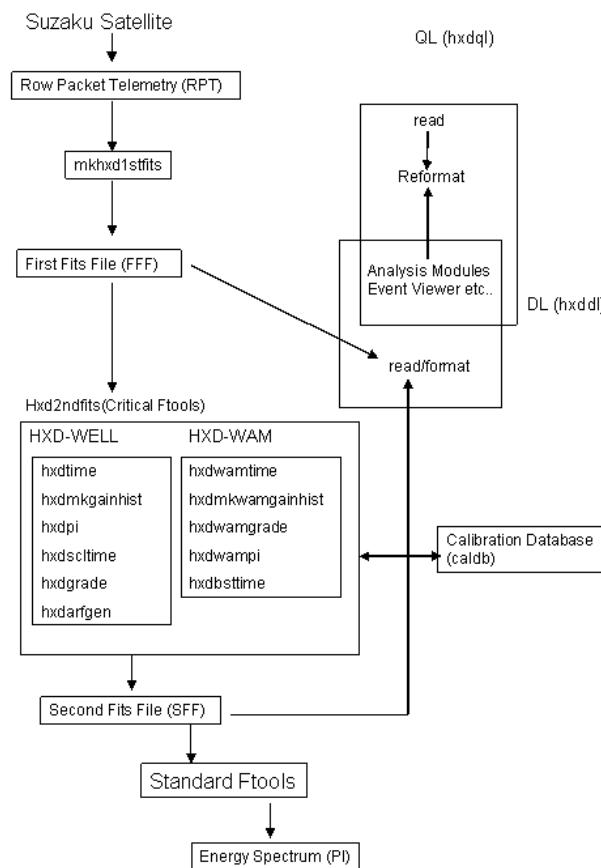


図 4.3: データプロセスの流れ

HEAsoft

HEAsoft は NASA の Goddard Space Flight Center(GSFC) が配布している衛星データ解析用ソフトウェア群である。HEAsoft は、X線衛星ミッションのスペクトル解析やタイミング解析、イメージング解析を行うための XANADU、FITS 形式のファイルを扱うための一般的及び各衛星固有のデータ解析ツール群の FTOOLS、FITS 形式ファイルを読み書きするためのライブラリである FITSIO、FITS ファイルビューアの fv などからなる。

4.3 解析の方法

7つの太陽フレアを用いて HXD-WAM のバックグラウンドの再現性について解析を行った。2006年12月06日に HXD-WAM が捉えた太陽フレア(GOES クラス X6.5)を例にとり、解析の方法を述べる。まずは、太陽フレアを捉えた時間帯のライトカーブを8つのエネルギー帯域別に作成する。次に、50日前後のデータと太陽フレアを捉えた日のデータのスペクトル比を出してフィッティングをし、再現性を調べる。最後に、フィッティングした結果を元にソースから 50日前後のバックグラウンドを引いたライトカーブを求める。

4.3.1 エネルギー帯域別光度曲線の作成

50-100keV、100-200keV、200-300keV、300-400keV、400-500keV、500keV-1MeV、1-2MeV、2-5MeV の 8 バンドのライトカーブを作成する。

1. HXD-WAM が太陽フレアを捉えた日のディレクトリに 50 日前後の uff ファイル(フォトンイベントに時刻付けがされたデータ)を置く。

```
ae20061017_1955_1959_hxd_wam.uff.gz ← 50 日前のデータが入っている uff ファイル  
ae20061206_1909_1915_hxd_wam.uff.gz ← 太陽フレアを捉えた日のデータが入って  
いる uff ファイル  
ae20070125_1821_1827_hxd_wam.uff.gz ← 50 日後のデータが入っている uff ファイル
```

2. 太陽フレアを捉えた日と 50 日前後の同位相を探すために dp10 ファイル(各時刻の衛星の位置や望遠鏡の視野と地球との位置関係などを計算し、グラフィック表示したもの)を見比べて、太陽フレアと 50 日前後の COR (§3.1) が一致する時間を探し、それぞれの時間帯を決定する。(図 4.4)

2006 年 12 月 06 日 (UT)19:15:36 ←	HXD-WAM が太陽フレアを捉えた時間
2006 年 10 月 17 日 (UT)19:58:00 ←	HXD-WAM が太陽フレアを捉えた時間から 50 日 前の COR が一致する日時
2007 年 01 月 25 日 (UT)18:24:00 ←	HXD-WAM が太陽フレアを捉えた時間から 50 日 後の COR が一致する日時

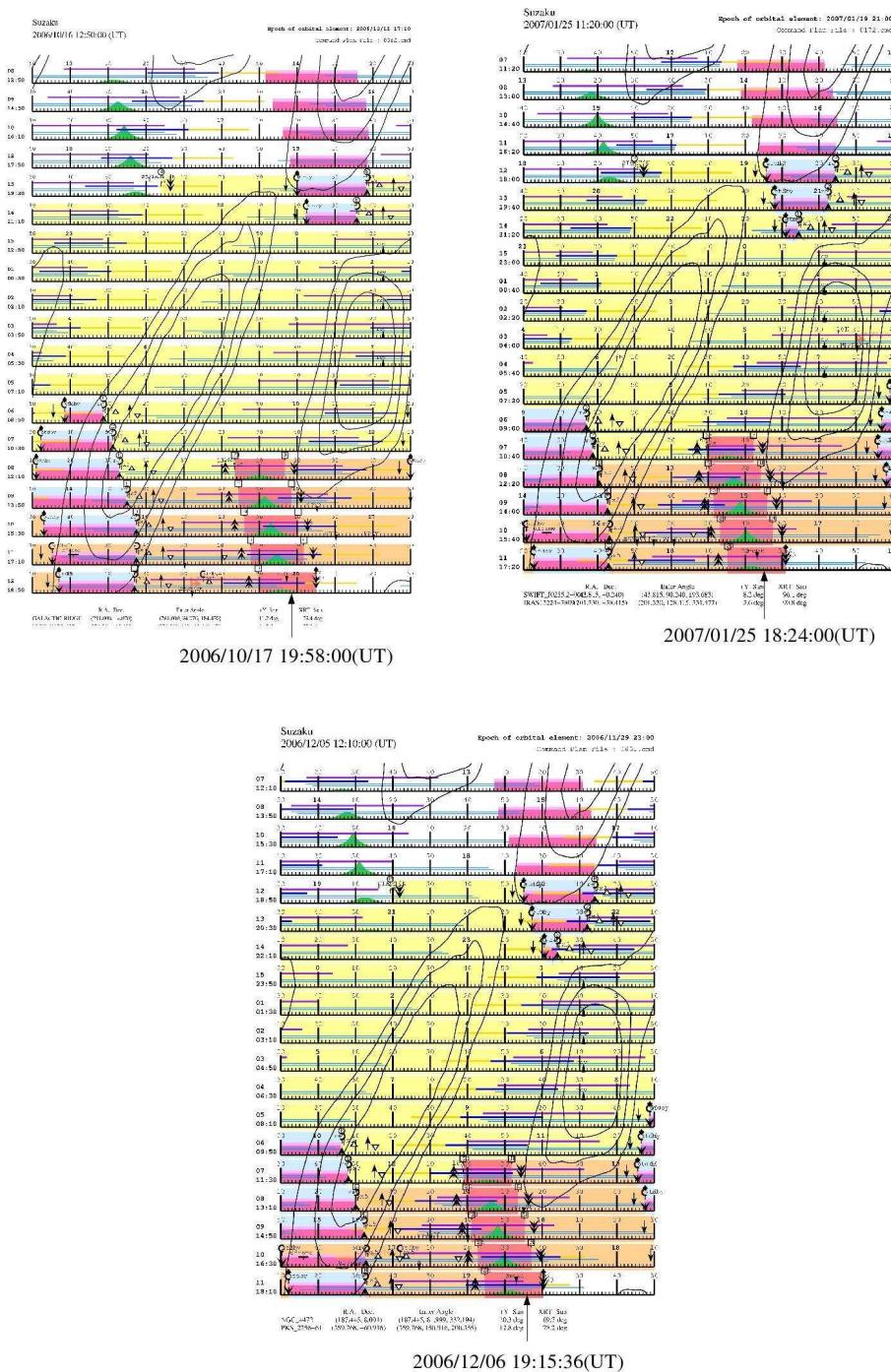


図 4.4: 左から 2006 年 10 月 17 日 (50 日前)、2007 年 01 月 25 日 (50 日後)、2006 年 12 月 06 日 (太陽フレア) の dp10 の図。黒い等高線が COR

3. HXD-WAM が太陽フレアを捉えた日のディレクトリにある太陽フレアを捉えた時間帯のライトカーブを見て、切り出す時間帯を決める。このライトカーブは、「すざく」衛星が地球を一周(90分)して得たデータである(図4.5)。

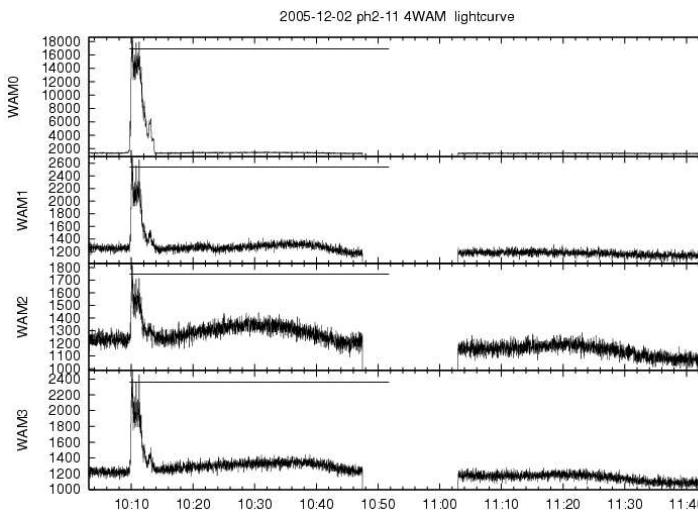


図 4.5: 一周回分の WAM 全面のライトカーブ 縦軸は WAM4 面それぞれの光子のカウント数で、横軸が時刻を表している。

4. 太陽フレアを捉えた時間帯付近を拡大したライトカーブを作成する手順をここで述べる。1で示した uff ファイルは、1日分のデータが入っていてデータ量が多いので、2で決めた時間帯だけの uff ファイルを作成する。ftools に入っている fselect というコマンドを使う。ftools で用意されているコマンドの使い方は fhelp コマンドで調べることができる。

`ae20061017_hxd_wam.uff.gz ← 2 で決めた時間帯で作成した 50 日前のデータが入っている uff ファイル`

`ae20061206_hxd_wam.uff.gz ← 2 で決めた時間帯で作成した太陽フレアを捉えた日のデータが入っている uff ファイル`

`ae20070125_hxd_wam.uff.gz ← 2 で決めた時間帯で作成した 50 日後のデータが入っている uff ファイル`

5. hxdmkwamlc というコマンドでライトカーブを作成するための FITS 形式のファイルを作成し Ftools の lcurve というコマンドで FITS ファイルを読み込ませて、8 バンドのライトカーブを作成する。(図4.6)

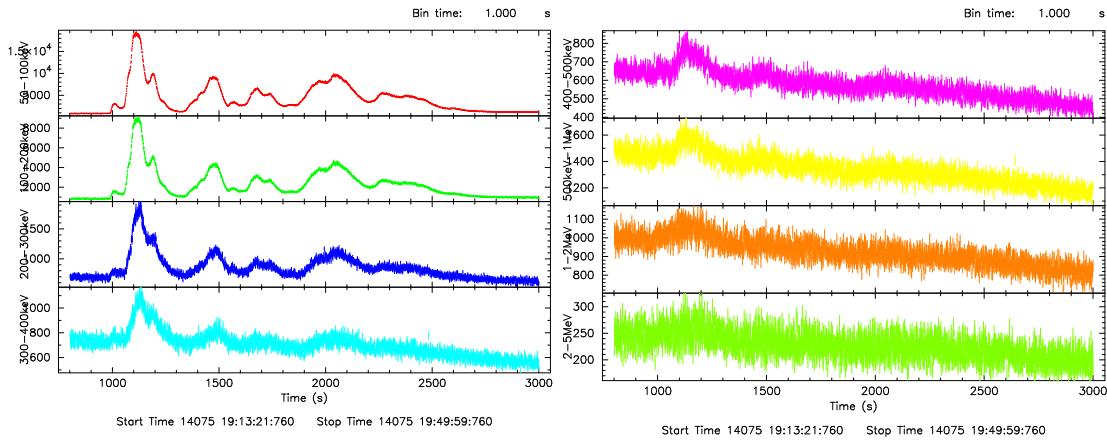


図 4.6: 2006年12月6日の太陽フレア付近のバックグラウンドを引いていないライトカーブ。縦軸は左上から、50-100keV、100-200keV、200-300keV、300-400keV、右上が400-500keV、500keV-1MeV、1-2MeV、2-5MeV、横軸は時間を表している。

4.3.2 バックグラウンドのスペクトル比を調べる方法

1. 2006年12月6日のHXD-WAMが太陽フレアを捉えた時間帯の近くを選び、かつCORが一致する50日前後の時間帯を選ぶ。この時選ぶ時間帯は、太陽フレアの時間と同じくらいにする。ここでは、継続時間を2200秒とした。
2. mkwamspecコマンドで選んだ時間帯のphaデータをそれぞれ作成する。ここで、50日前後のphaデータを足したphaデータをFtoolsのmathphaを使い作成する。
3. phaデータをFtoolsのxspecを使ってそれぞれスペクトルを作成し、qdpファイルで保存する。50日前、50日後、50日前+50日後のqdpファイルをそれぞれ太陽フレアを捉えた日のqdpファイルで割り、テキストファイルにして、gnuplotを使ってプロットする。(図4.7)
4. gnuplot上で足して2で割った青のプロットを直線近似でフィッティングする。フィッティングした直線近似が1になるようにバックグラウンドを上下させる。この太陽フレアのバックグラウンドは-3%~4%の不定性で再現できた。(図4.8)
5. これで、50日前+50日後/2のバックグラウンドどれだけ上下すればいいかがわかるので、そのことを考慮したバックグラウンドを太陽フレアを捉えた日のライトカーブから引いた8バンドのライトカーブが作成できる。図4.4と比べると縦軸のカウント数が減ったことがわかる。この減った分がバックグラウンドである。(図4.9)

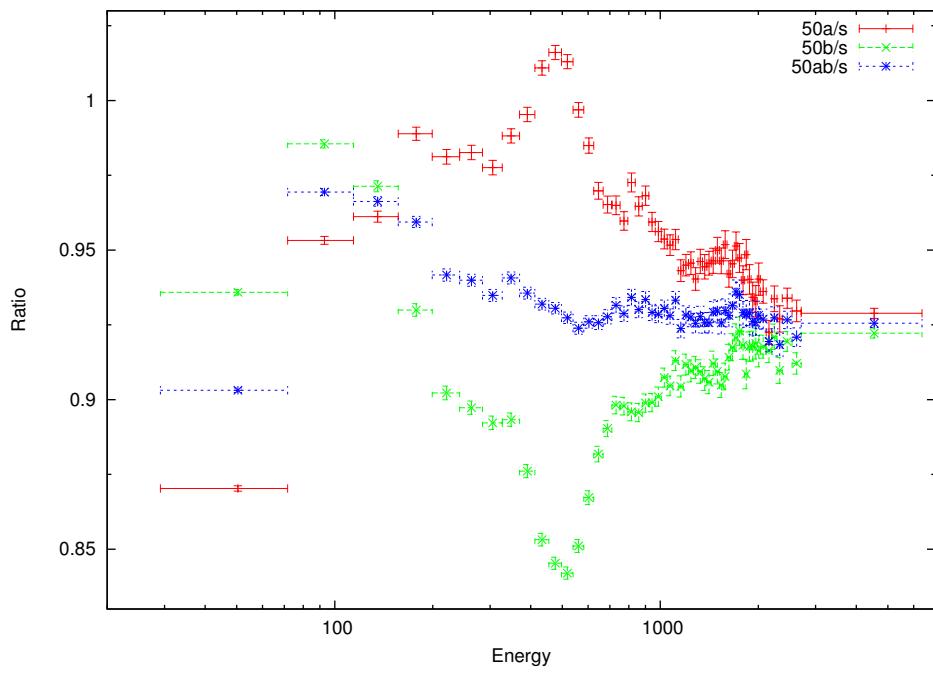


図 4.7: 2006 年 12 月 6 日に HXD-WAM が捉えた太陽フレア(ソース)のスペクトルと前後 50 日のスペクトルの比である。赤でプロットされているのが、50 日前とソースの比で、緑でプロットされているのが 50 日後とソースの比である。青でプロットされているのは、前後 50 日のデータを足したものとソースの比である。

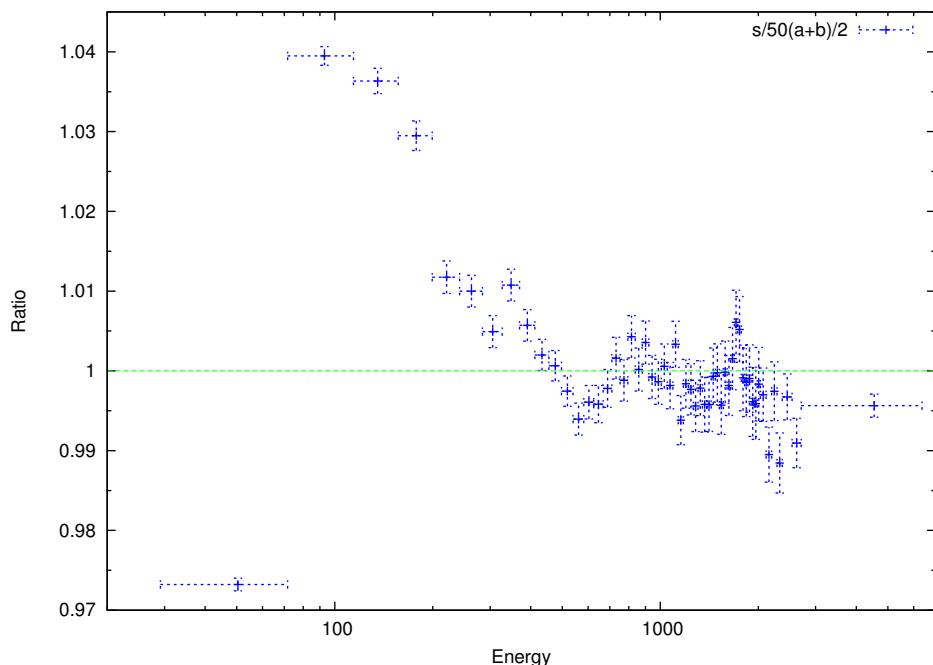


図 4.8: 図 4.7 の青のプロットを直線近似した図である。−3 %～+4 %以内で再現できると言える。

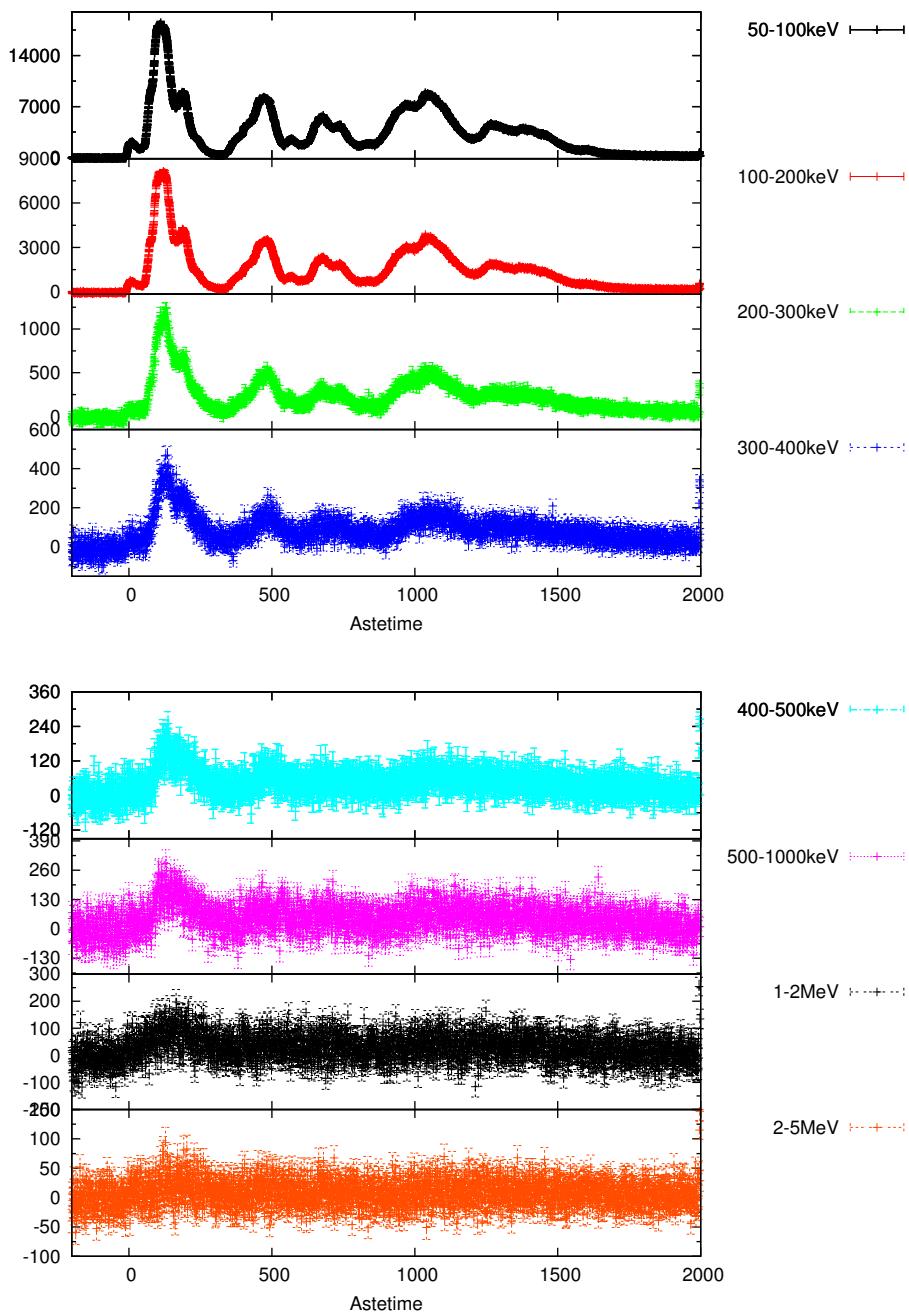


図 4.9: 図 4.8 を元に前後 50 日のデータを足したものとバックグラウンドとしてソースからバックグラウンドを引いたライトカーブである。上が 50-100keV、100-200keV、200-300keV、300-400keV の 4 バンドのライトカーブである。下が 400-500keV、500keV-1MeV、1-2MeV、2-5MeV の 4 バンドのライトカーブである。

4.4 太陽フレアを用いたバックグラウンド解析の結果

§4.3 で説明した太陽フレア以外の 6 つの太陽フレアについても同じ方法でバックグラウンドの解析を行い、スペクトル比とそこから求めた 50 日周期のバックグラウンドを引いた太陽フレアのライトカーブを求めた。その結果、これらのイベントについては、 $\pm 5\%$ 以内の不定性になるということがわかった。また、表 4.1 に今回用いた太陽フレアをまとめ、§4.4.1～§4.4.6 にスペクトル比とライトカーブをそれぞれ載せた。2006 年 04 月 30 日のイベントは、GOES クラスは小さいがきれいなライトカーブが取得できていて興味深いイベントである。2006 年 12 月 06 日 19 時 15 分 36 秒 (UT) のイベントは、§4.3 で例に挙げた太陽フレアである。

日付	時刻 (UT)	GOES クラス	$\delta N/N$ バックグラウンドの再現精度	$S/\delta N$
2005 年 12 月 02 日	10 時 09 分 45 秒	M7.8	-3 %～3 %	475
2006 年 04 月 30 日	01 時 53 分 13 秒	C5.4	-5 %～1.5 %	200
2006 年 12 月 05 日	10 時 26 分 27 秒	X9.0	-5 %～3.5 %	950
2006 年 12 月 06 日	08 時 16 分 20 秒	M6.0	-5 %～5 %	50
2006 年 12 月 06 日	19 時 15 分 36 秒	X6.5	-3 %～4 %	250
2006 年 12 月 13 日	02 時 22 分 23 秒	X3.4	-2 %～2.5 %	20
2006 年 12 月 14 日	22 時 20 分 38 秒	X1.5	-4 %～4 %	50

表 4.1: 7 つの太陽フレアのリストとスペクトル比

4.4.1 2005年12月02日(GOESクラスM7.8)

2005年12月02日10時09分45秒(UT)にHXD-WAMが捉えたGOESクラスM7.8の太陽フレアである。2005年10月13日を50日前のバックグラウンドとして、2006年01月21日を50日後のバックグラウンドとして用いた。この太陽フレアのバックグラウンドとして用いた継続時間は、1000秒である。バックグラウンドの不定性は、 $-3\% \sim +3\%$ という結果を得た。

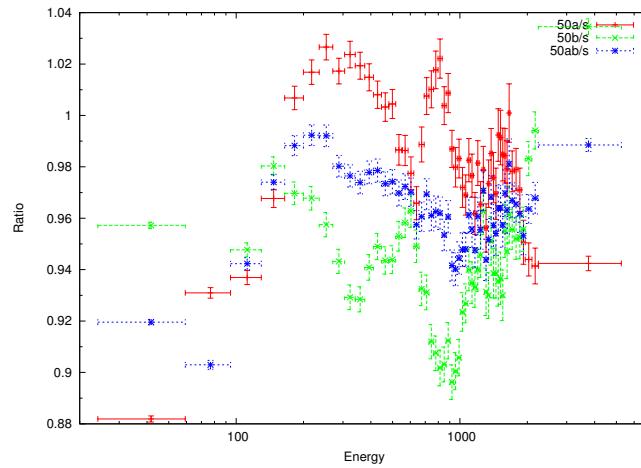


図 4.10: 2005年12月02日に HXD-WAM が捉えた太陽フレア(以後ソースと呼ぶ)のスペクトルと前後50日のスペクトルの比である。赤でプロットされているのが、50日前とソースの比で、緑でプロットされているのが50日後とソースの比である。青でプロットされているのは、前後50日のデータを足したものとソースの比である。

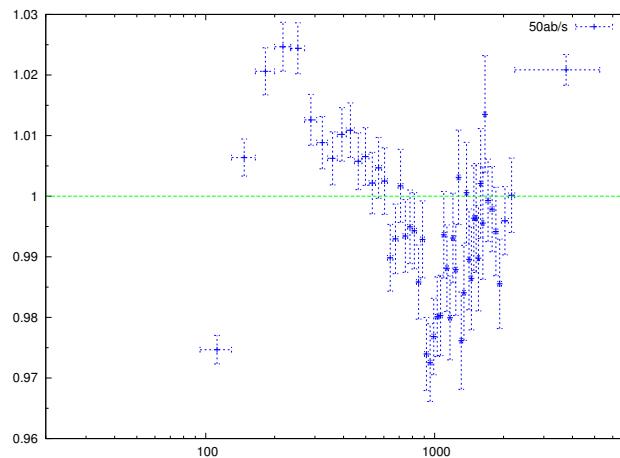


図 4.11: 図 5.1 の青のプロットを直線近似した図である。 $-3\% \sim +3\%$ 以内で再現できると言える。

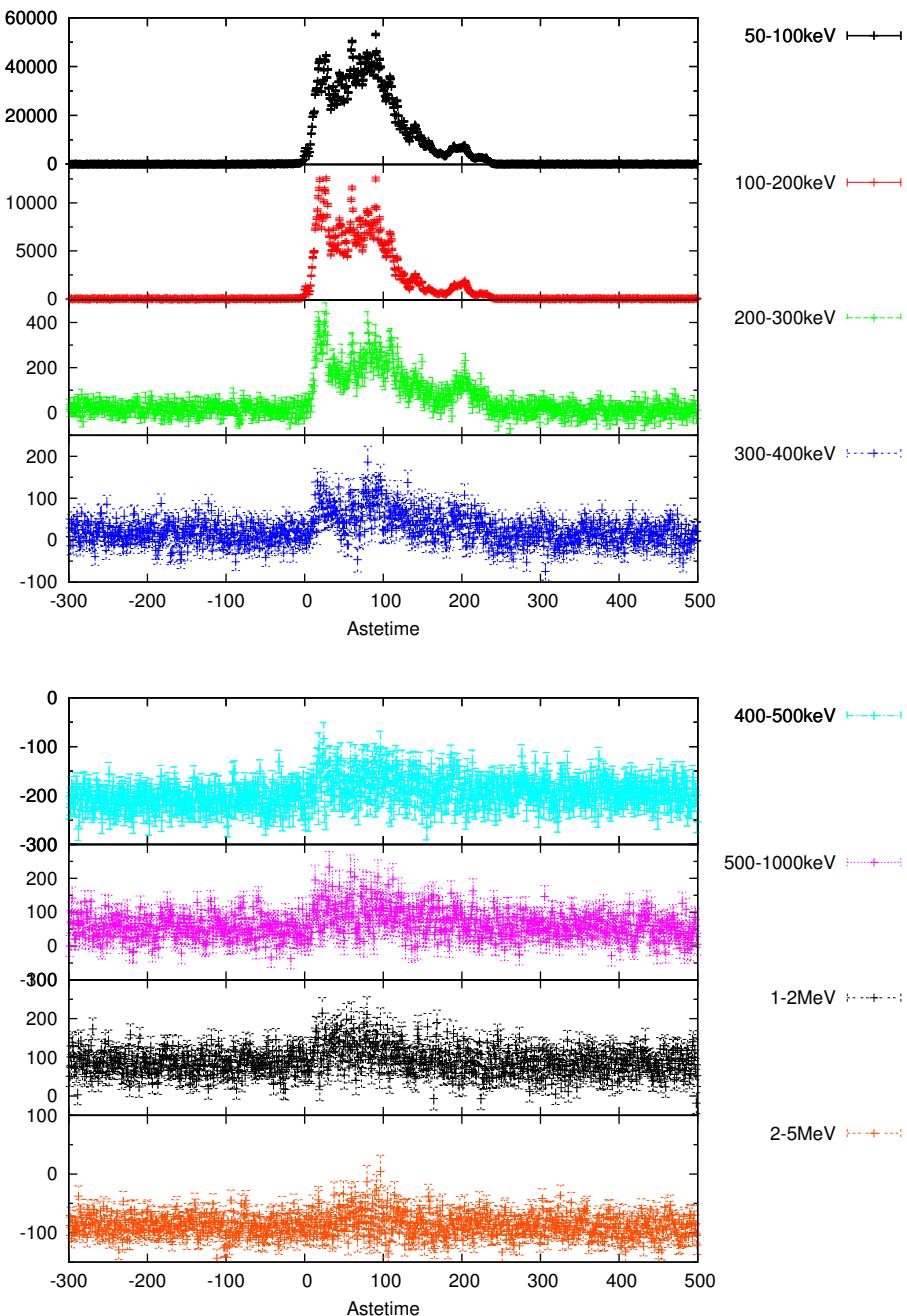


図 4.12: 前後 50 日のデータを足して図 5.2 の直線近似の補正をしたものとバックグラウンドとしてソースからバックグラウンドを引いた光度曲線である。

4.4.2 2006年04月30日(GOESクラスC5.4)

2006年04月30日01時53分13秒(UT)にHXD-WAMが捉えたGOESクラスC5.4の太陽フレアである。2006年03月09日を50日前のバックグラウンドとして、2006年06月15日を50日後のバックグラウンドとして用いた。この太陽フレアのバックグラウンドとして用いた継続時間は、420秒である。バックグラウンドの不定性は、 $-5\% \sim +1.5\%$ という結果を得た。

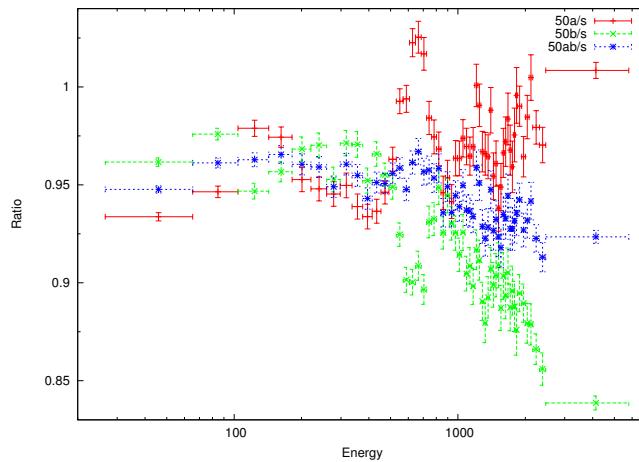


図 4.13: 2006年04月30日に HXD-WAM が捉えた太陽フレアのスペクトルと前後50日のスペクトルの比である。赤でプロットされているのが、50日前とソースの比で、緑でプロットされているのが50日後とソースの比である。青でプロットされているのは、前後50日のデータを足したものとソースの比である。

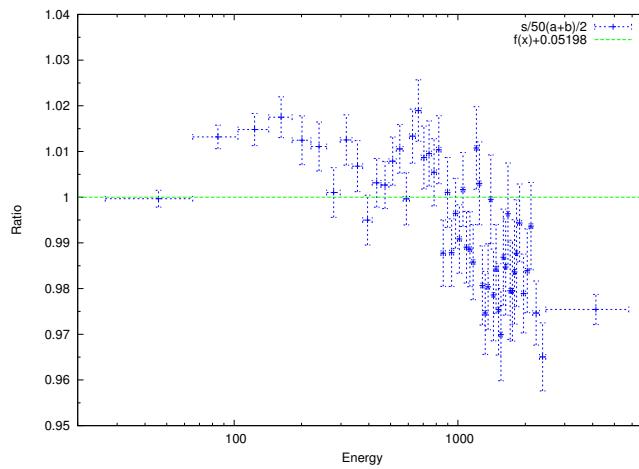


図 4.14: 図 5.5 の青のプロットを直線近似した図である。 $-5\% \sim +1.5\%$ 以内で再現できると言える。

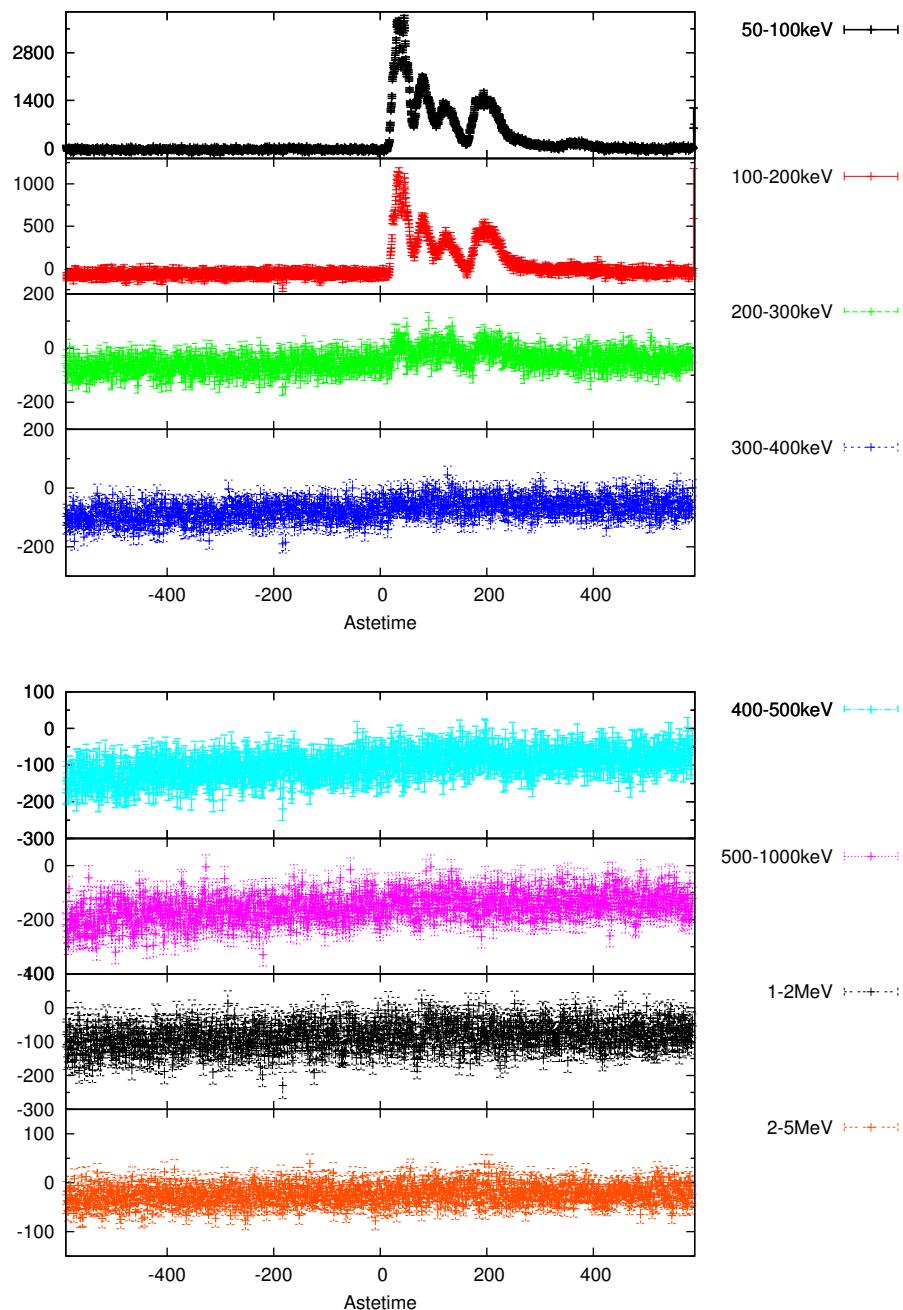


図 4.15: 前後 50 日のデータを足して図 5.6 の直線近似の補正をしたものとバックグラウンドとしてソースからバックグラウンドを引いた光度曲線である。

4.4.3 2006年12月05日(GOESクラスX9.0)

2006年12月05日10時26分27秒(UT)にHXD-WAMが捉えたGOESクラスX9.0の太陽フレアである。2006年10月14日を50日前のバックグラウンドとして、2007年01月23日を50日後のバックグラウンドとして用いた。この太陽フレアのバックグラウンドとして用いた継続時間は、1000秒である。バックグラウンドの不定性は、 $-5\% \sim +3.5\%$ という結果を得た。

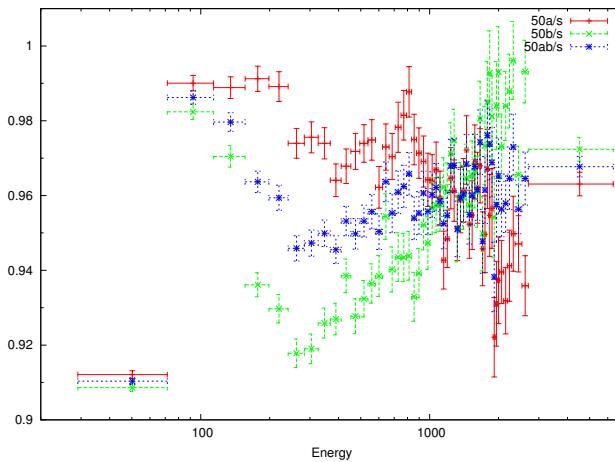


図 4.16: 2006年12月05日に HXD-WAM が捉えた太陽フレアのスペクトルと前後50日のスペクトルの比である。赤でプロットされているのが、50日前とソースの比で、緑でプロットされているのが50日後とソースの比である。青でプロットされているのは、前後50日のデータを足したものとソースの比である。

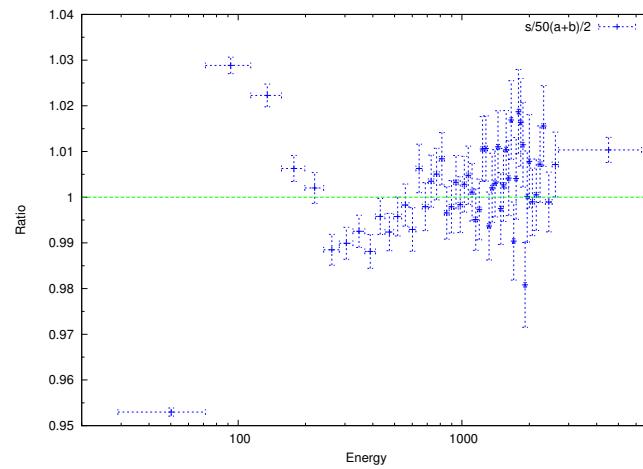


図 4.17: 図 5.9 の青のプロットを直線近似した図。 $-5\% \sim +3.5\%$ 以内で再現できると言える。

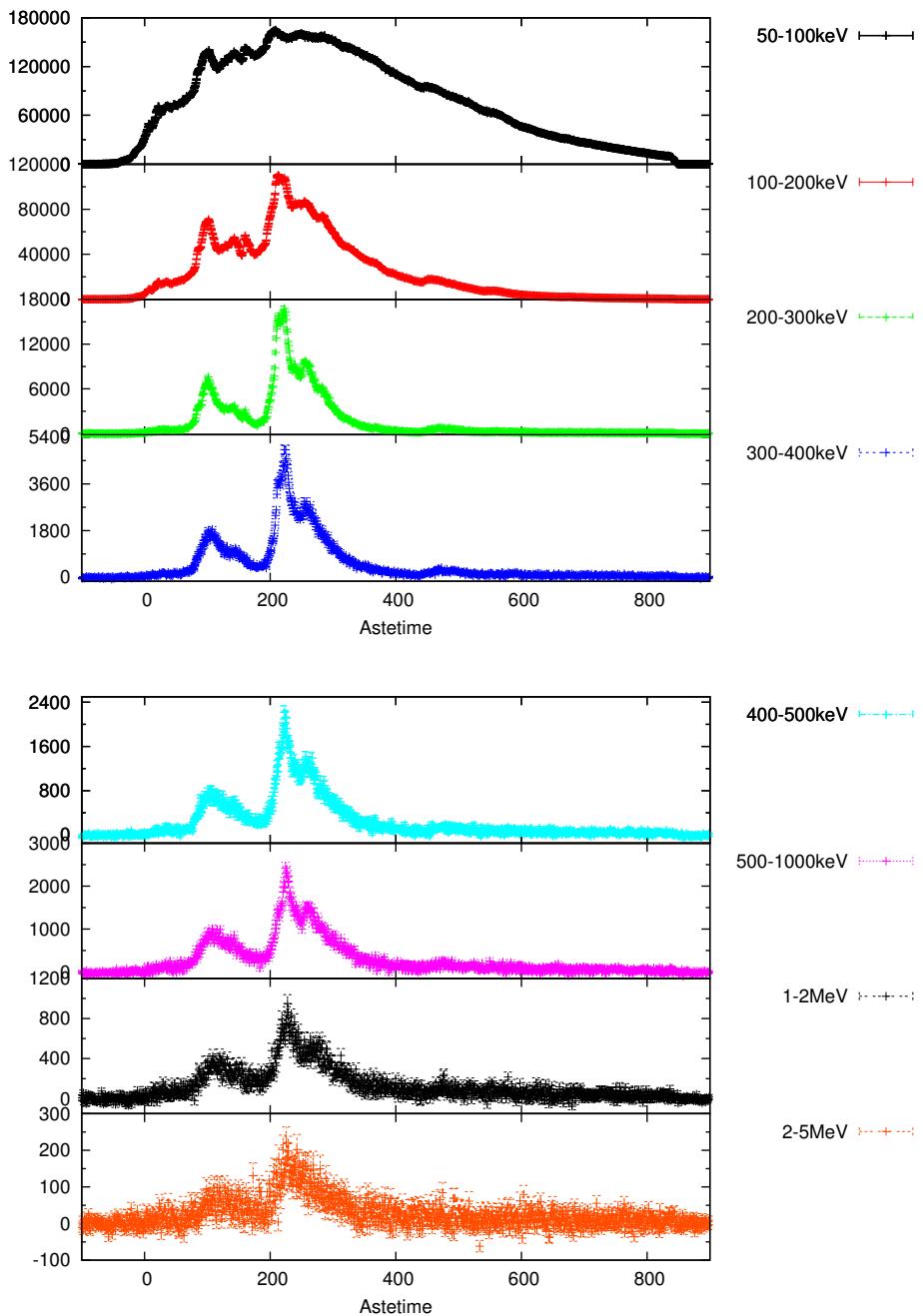


図 4.18: 前後 50 日のデータを足して図 5.10 の直線近似の補正をしたものとバックグラウンドとしてソースからバックグラウンドを引いた光度曲線である。

4.4.4 2006年12月06日(GOESクラスM6.0)

2006年12月06日08時16分20秒(UT)にHXD-WAMが捉えたGOESクラスM6.0の太陽フレアである。2006年10月16日を50日前のバックグラウンドとして、2007年01月24日を50日後のバックグラウンドとして用いた。この太陽フレアのバックグラウンドとして用いた継続時間は、3000秒である。バックグラウンドの不定性は、 $-5\% \sim +5\%$ という結果を得た。

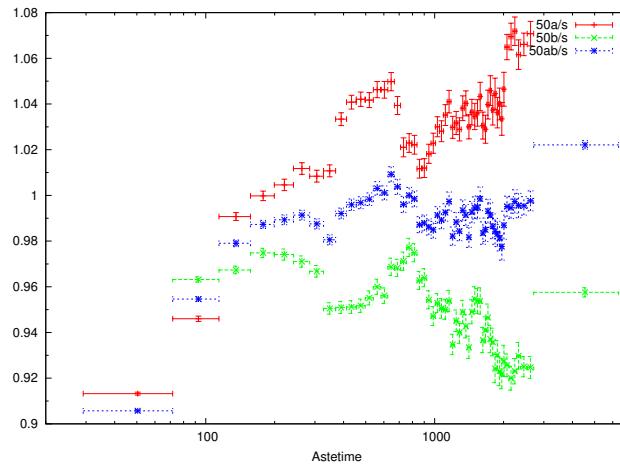


図 4.19: 2006年12月06日に HXD-WAM が捉えた太陽フレアのスペクトルと前後50日のスペクトルの比である。赤でプロットされているのが、50日前とソースの比で、緑でプロットされているのが50日後とソースの比である。青でプロットされているのは、前後50日のデータを足したものとソースの比である。

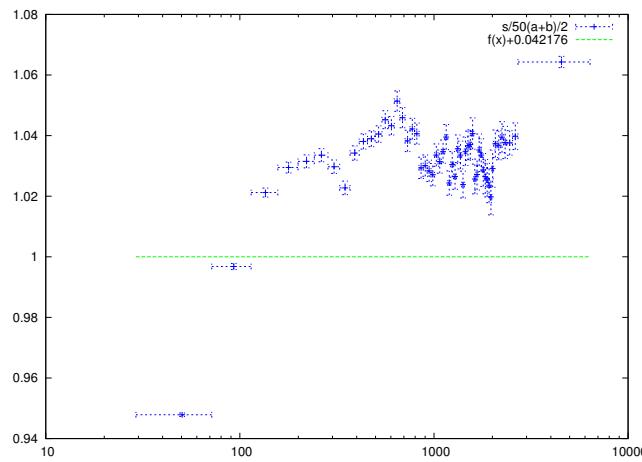


図 4.20: 図 5.13 の青のプロットを直線近似した図である。 $-5\% \sim +5\%$ 以内で再現できると言える。

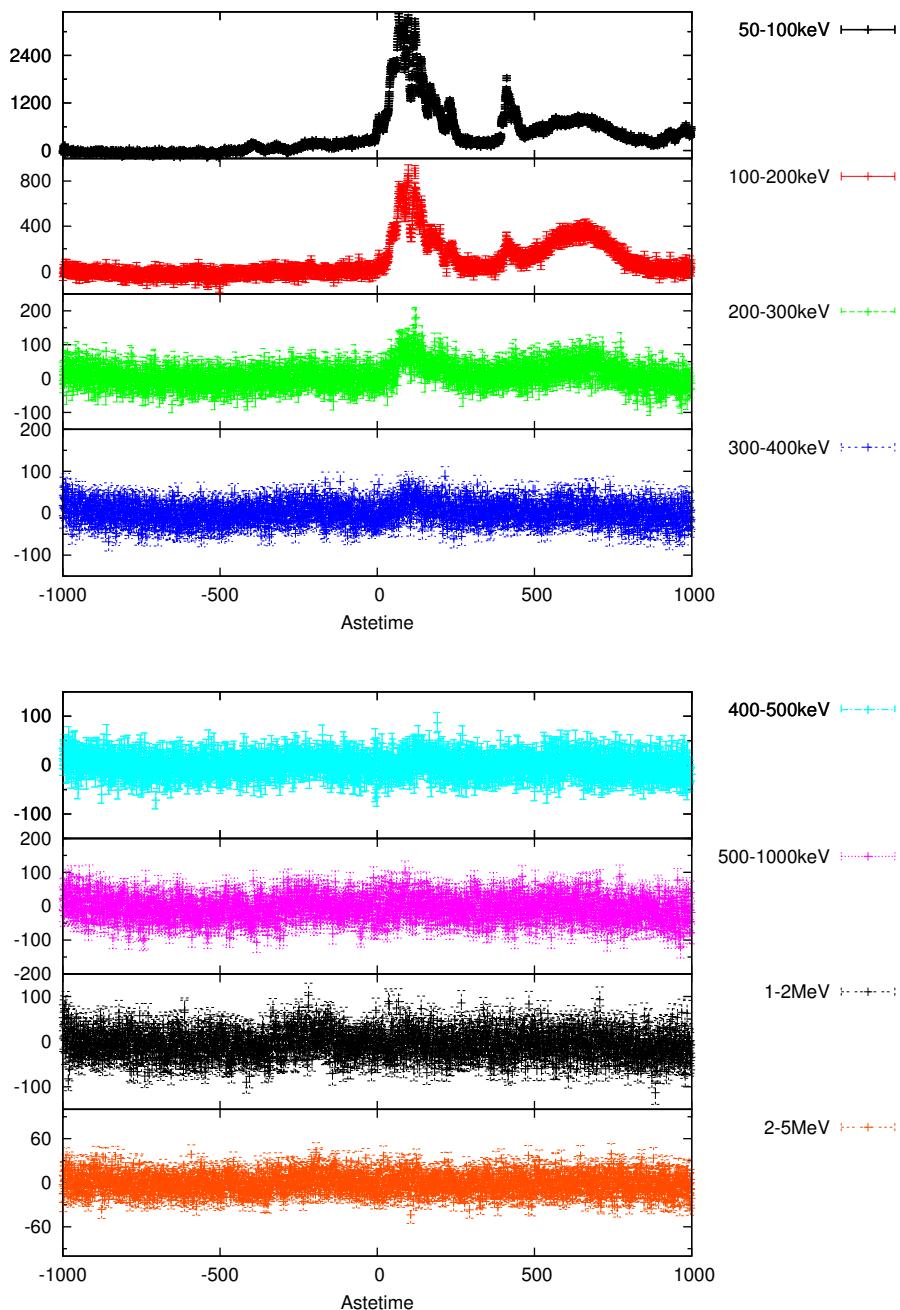


図 4.21: 前後 50 日のデータを足して図 5.14 の直線近似の補正をしたものとバックグラウンドとしてソースからバックグラウンドを引いた光度曲線である。

4.4.5 2006年12月13日(GOESクラスX3.4)

2006年12月13日02時22分23秒(UT)にHXD-WAMが捉えたGOESクラスX3.4の太陽フレアである。2006年10月24日を50日前のバックグラウンドとして、2007年02月01日を50日後のバックグラウンドとして用いた。この太陽フレアのバックグラウンドとして用いたdurationは、3000秒である。バックグラウンドの不定性は、 $-2.5\% \sim +2.5\%$ という結果を得た。

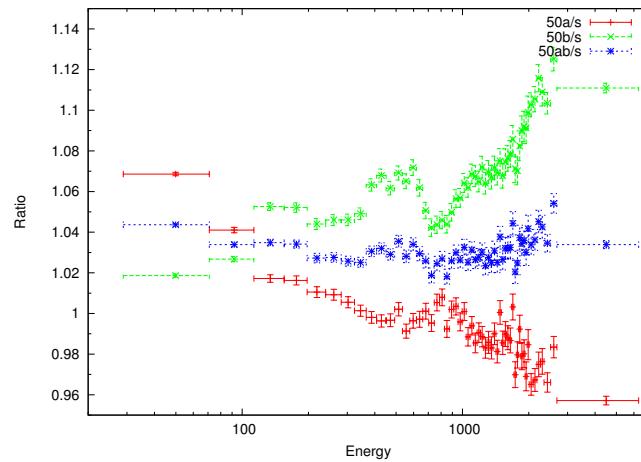


図 4.22: 2006年12月13日にHXD-WAMが捉えた太陽フレアのスペクトルと前後50日のスペクトルの比である。赤でプロットされているのが、50日前とソースの比で、緑でプロットされているのが50日後とソースの比である。青でプロットされているのは、前後50日のデータを足したものとソースの比である。

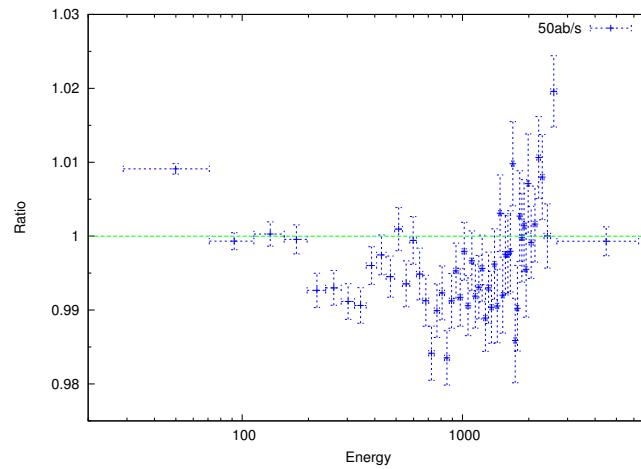


図 4.23: 図 5.16 の青のプロットを直線近似した図。 $-2\% \sim +2.5\%$ 以内で再現できると言える。

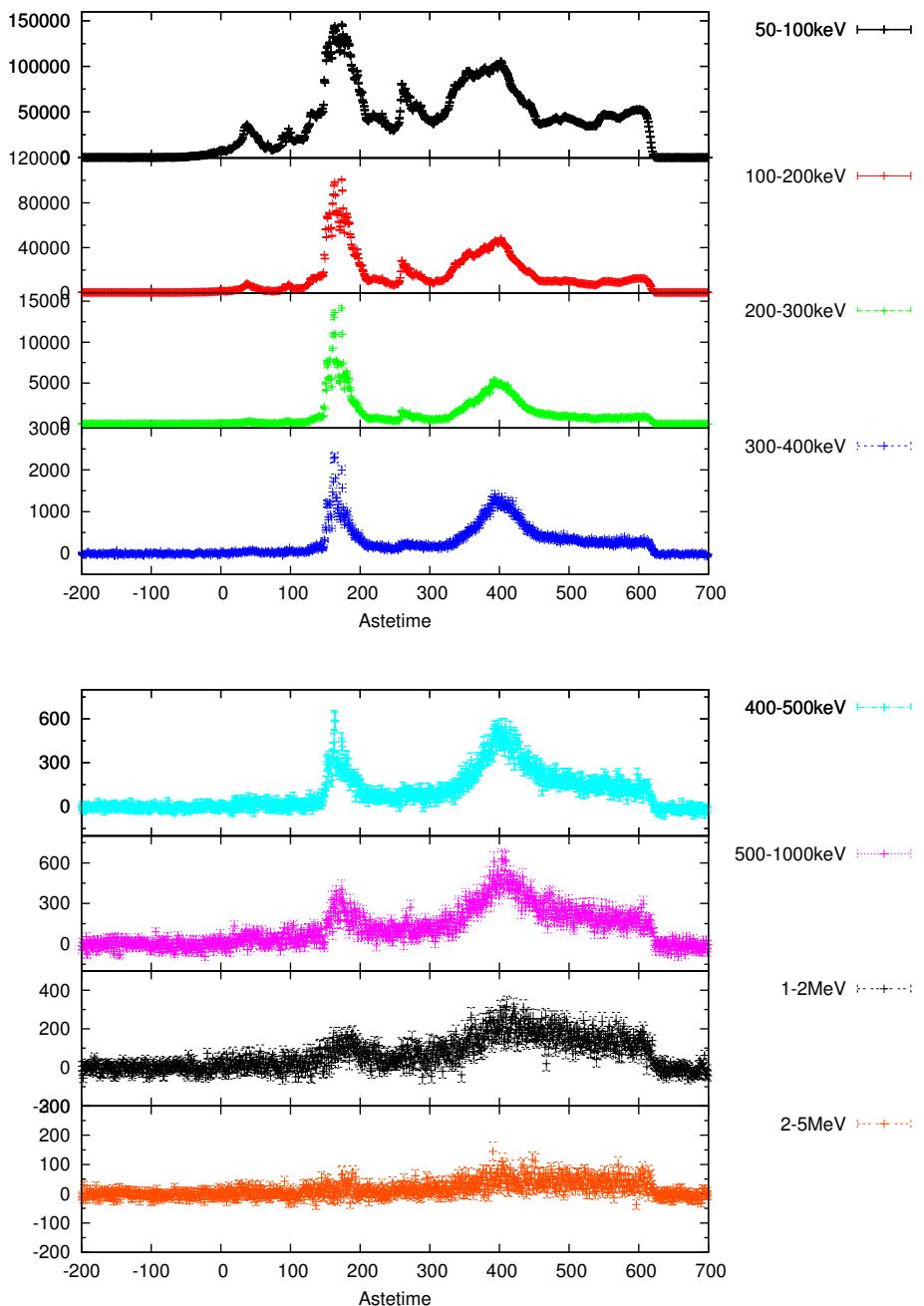


図 4.24: 前後 50 日のデータを足して図 5.17 の直線近似の補正をしたものとバックグラウンドとしてソースからバックグラウンドを引いた光度曲線である。

4.4.6 2006年12月14日(GOESクラスX1.5)

2006年12月14日22時20分38秒(UT)にHXD-WAMが捉えたGOESクラスX1.5の太陽フレアである。2006年10月25日を50日前のバックグラウンドとして、2007年02月02日を50日後のバックグラウンドとして用いた。この太陽フレアのバックグラウンドとして用いた継続時間は、2200秒である。バックグラウンドの不定性は、 $-4\% \sim +4\%$ という結果を得た。

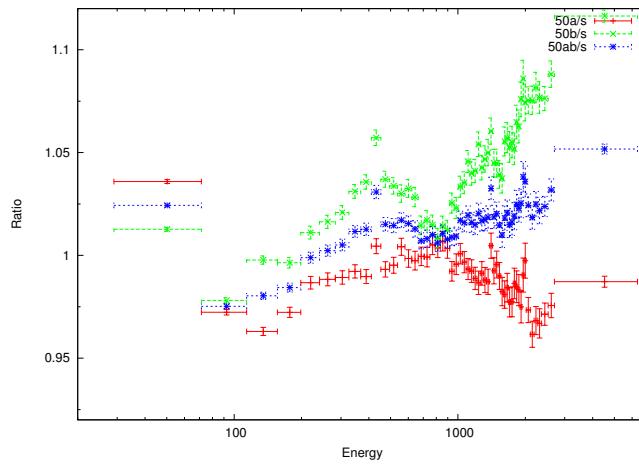


図 4.25: 2006年12月14日にHXD-WAMが捉えた太陽フレアのスペクトルと前後50日のスペクトルの比である。赤でプロットされているのが、50日前とソースの比で、緑でプロットされているのが50日後とソースの比である。青でプロットされているのは、前後50日のデータを足したものとソースの比である。

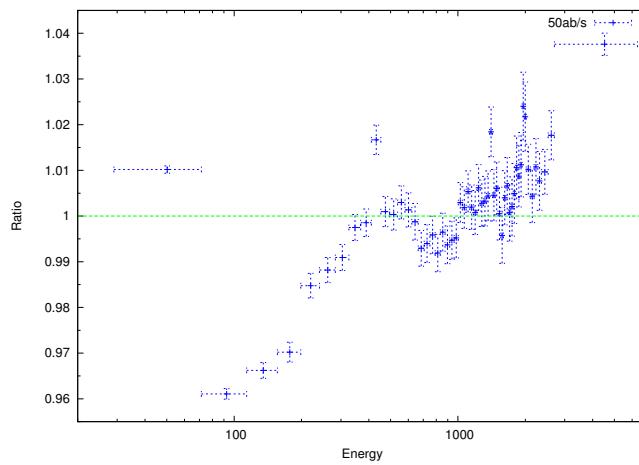


図 4.26: 図5.20の青のプロットを直線近似した図である。 $-4\% \sim +4\%$ 以内で再現できると言える。

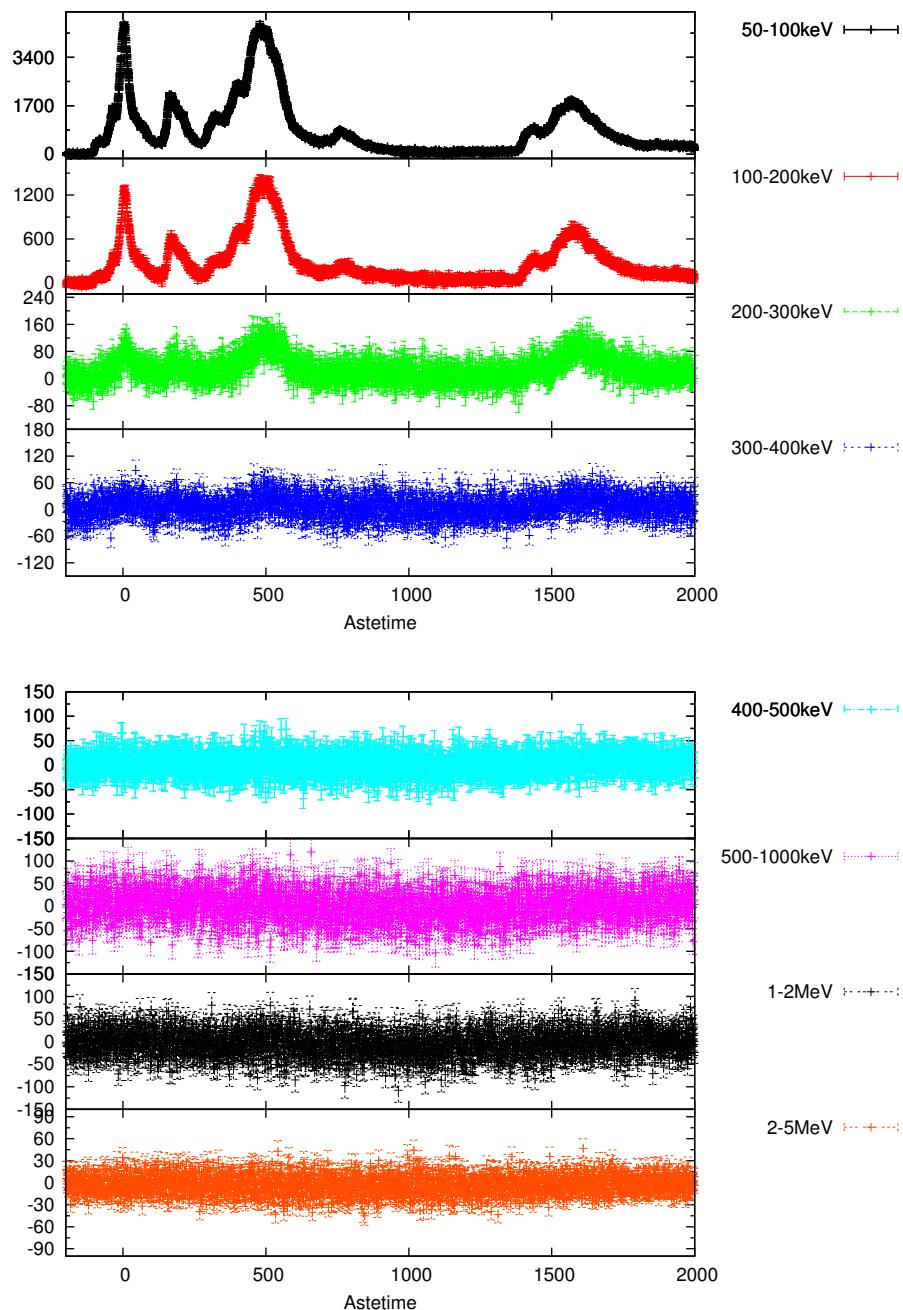


図 4.27: 前後 50 日のデータを足して図 5.20 の直線近似の補正をしたものとバックグラウンドとしてソースからバックグラウンドを引いた光度曲線である。

第5章 考察とまとめ

50日周期(50日前+50日後)のバックグラウンドを用いて太陽フレアのスペクトルをプロットした。また、第4章で行ったバックグラウンド解析(表5.1)をもとに直線近似して補正した50日周期のバックグラウンドをソースから引いたライトカーブと比較して、再現性の持てるエネルギー帯域を各イベントごとに評価した。次のページからその結果を示す。上のスペクトルが、直線近似をせずに単純に50日前後のデータを足したものとバックグラウンド(式5.1)としたスペクトルで、下の2つが直線近似をした値を考慮した50日前後のデータを足したものとバックグラウンド(式5.2)としてソースから引いたライトカーブである。全体的に±5%以内であればバックグラウンドとして使えることを示唆する結果となった。また、HXD-WAMの強みでもある広帯域のエネルギーが観測されることや高エネルギーまで検出できることがわかる。ここで、バックグラウンドの式と確認のために本論文で用いた太陽フレアのリストをもう一度以下に示す。

- ・スペクトルで使用しているバックグラウンド(BGD1)

$$\text{BGD1} = (\text{50日前のデータ} + \text{50日後のデータ}) \div 2 \quad (5.1)$$

- ・ライトカーブで使用しているバックグラウンド(BGD2)

$$\text{BGD2} = \{(50\text{日前のデータ} + 50\text{日後のデータ}) \div 2\} \times (1 \pm \text{平均的なずれ}) \quad (5.2)$$

日付	時刻(UT)	GOES クラス	スペクトル比
2005年12月02日	10時09分45秒	M7.8	-3%~3%
2006年04月30日	01時53分13秒	C5.4	-5%~1.5%
2006年12月05日	10時26分27秒	X9.0	-5%~3.5%
2006年12月06日	08時16分20秒	M6.0	-5%~5%
2006年12月06日	19時15分36秒	X6.5	-3%~4%
2006年12月13日	02時22分23秒	X3.4	-2%~2.5%
2006年12月14日	22時20分38秒	X1.5	-4%~4%

表5.1: 7つの太陽フレアのリストとスペクトル比

5.1 50日周期のバックグラウンドを使ったスペクトル

2005年12月02日 10時09分45秒(UT)

この太陽フレアでは、スペクトルを見ると太陽フレアの成分が400~600keV付近で消えてしまい、700keV付近では残っているように見える。また、ライトカーブを見ると400keV付近までは成分が残っているが、400keV以上の高エネルギー側では引き過ぎているエネルギー帯域があることがわかる。

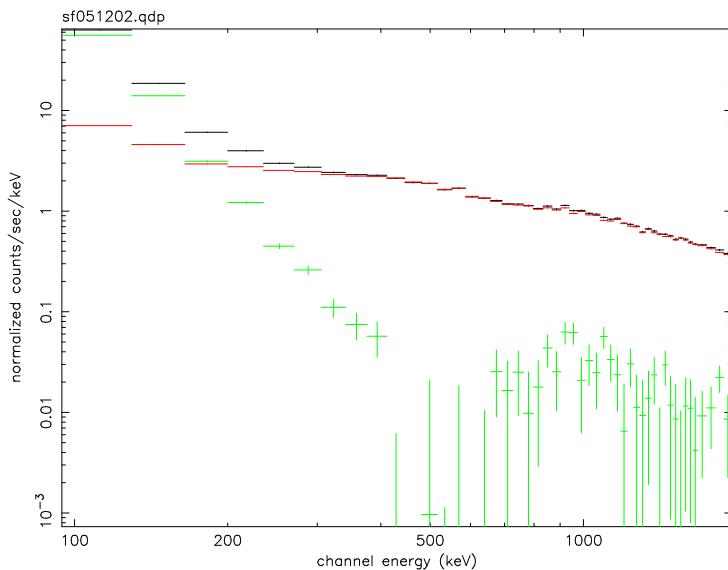


図 5.1: 2005年12月02日の太陽フレアのスペクトル。赤が50日周期を利用したバックグラウンド、黒が太陽フレア中のスペクトル。緑は黒から赤を引いた差分であり、MeVまで受かっていることがわかる。

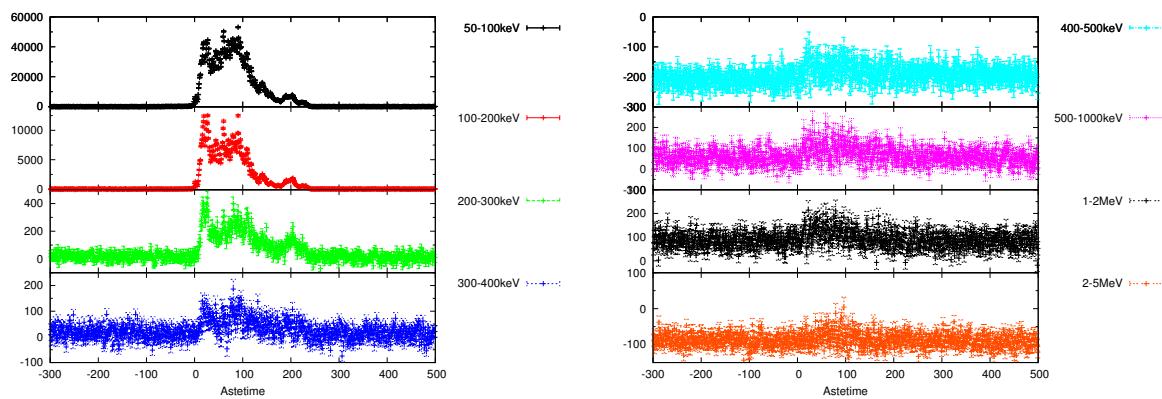


図 5.2: §4.4.1で求めたライトカーブ 400keVまでは、はっきりと太陽フレアの成分があるように見える。

2006年04月30日 01時53分13秒(UT)

この太陽フレアでは、スペクトルを見ると太陽フレアの成分が400keV付近までしか見えていない。また、ライトカーブを見ると400keV付近までは成分が残っているが、400keV以上の高エネルギー側では引き過ぎているエネルギー帯域があることがわかる。

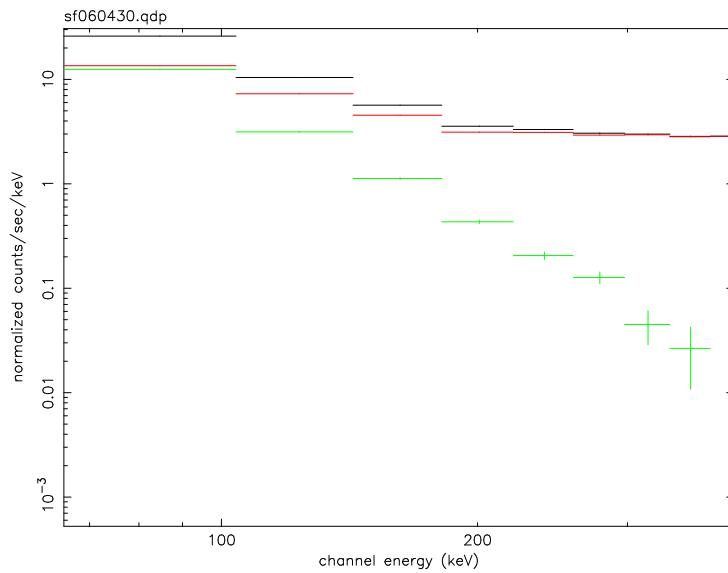


図 5.3: 2006年04月30日の太陽フレアのスペクトル。赤が50日周期を利用したバックグラウンド、黒が太陽フレア中のスペクトル。緑は黒から赤を引いた差分であり、400keV付近まで受かっていることがわかる。

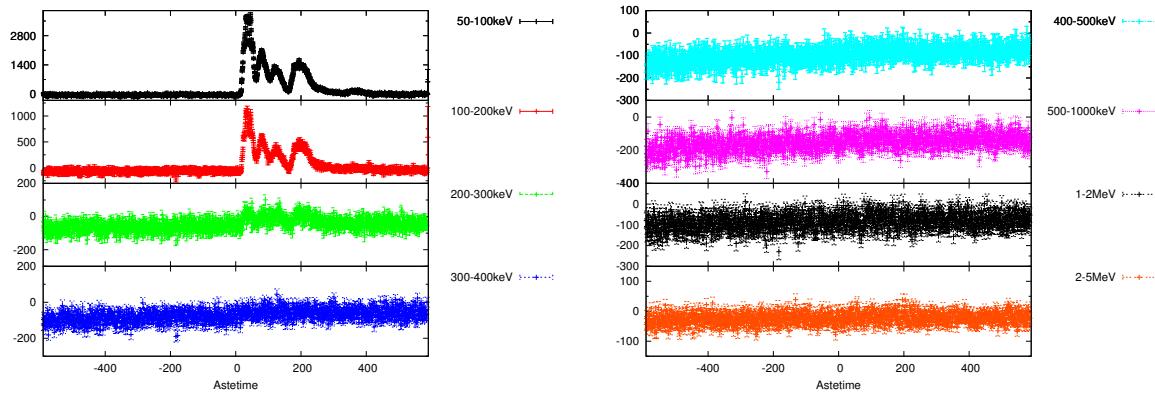


図 5.4: §4.4.2で求めたライトカーブ 300keVまでは、はっきりと太陽フレアの成分があるよう見える。

2006年12月05日 10時26分27秒(UT)

この太陽フレアでは、スペクトルを見ると太陽フレアの成分が2MeV付近までは残っているように見える。また、ライトカーブを見ると2~5MeV付近までは成分があることがわかる。

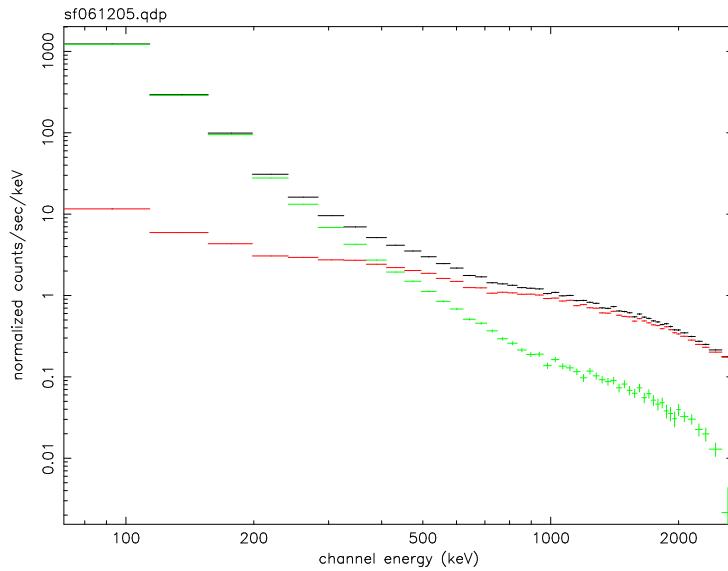


図 5.5: 2006年12月05日の太陽フレアのスペクトル。赤が50日周期を利用したバックグラウンド、黒が太陽フレア中のスペクトル。緑は黒から赤を引いた差分であり、MeVまで受かっていることがわかる。

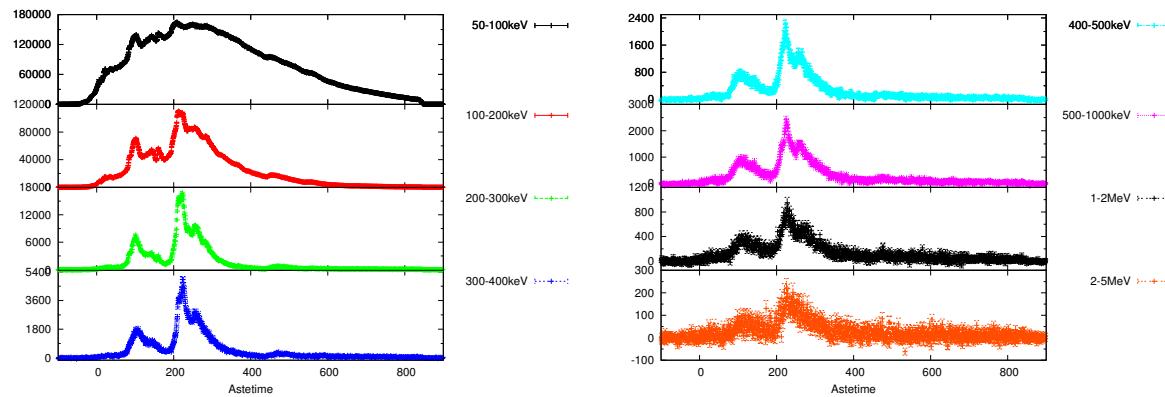


図 5.6: §4.4.3で、求めたライトカーブ 数MeVまでは、はっきりと太陽フレアの成分があるように見える。

2006年12月06日 08時16分20秒(UT)

この太陽フレアでは、スペクトルを見ると太陽フレアの成分が300keV付近までは残っているように見える。また、ライトカーブを見ても300keV付近までは成分が残っているが、400keV以上の高エネルギー側ではカウント数がほぼ0であることがわかる。

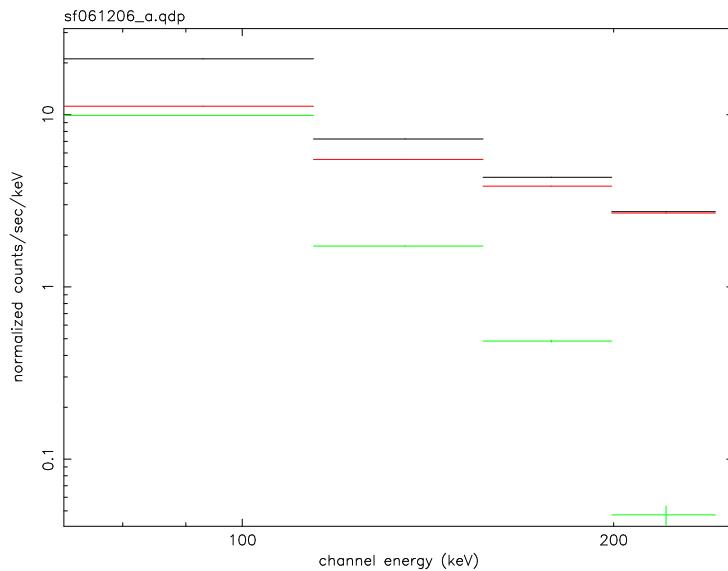


図 5.7: 2006年12月06日の太陽フレアのスペクトル。赤が50日周期を利用したバックグラウンド、黒が太陽フレア中のスペクトル。緑は黒から赤を引いた差分であり、400keV付近まで受かっていることがわかる。

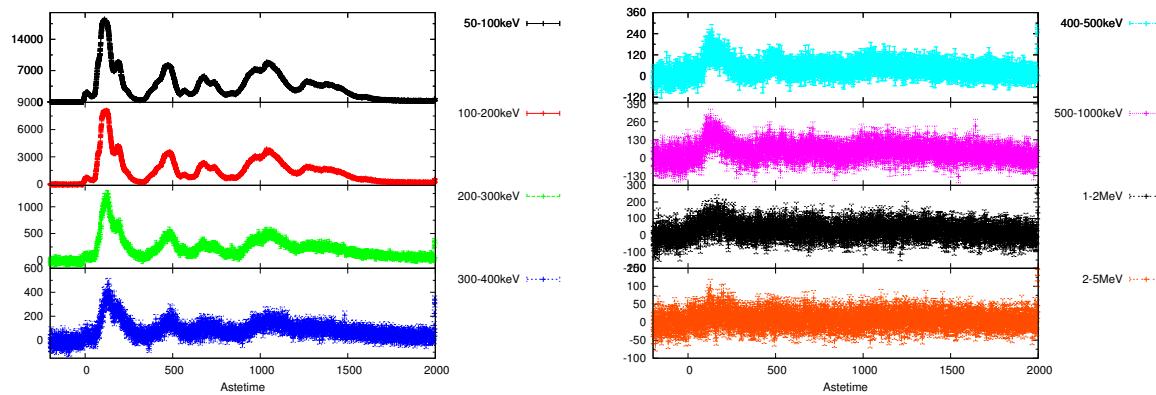


図 5.8: §4.4.4 で求めたライトカーブ 1MeVまでは、はっきりと太陽フレアの成分があるよう見える。

2006年12月06日 19時15分36秒(UT)

この太陽フレアでは、スペクトルを見ると太陽フレアの成分が400keV付近までは残っているように見える。また、ライトカーブを見ると400keV付近までは成分が残っているが、400keV以上の高エネルギー側では最初の100秒間ぐらいは成分がありそうなことがわかる。

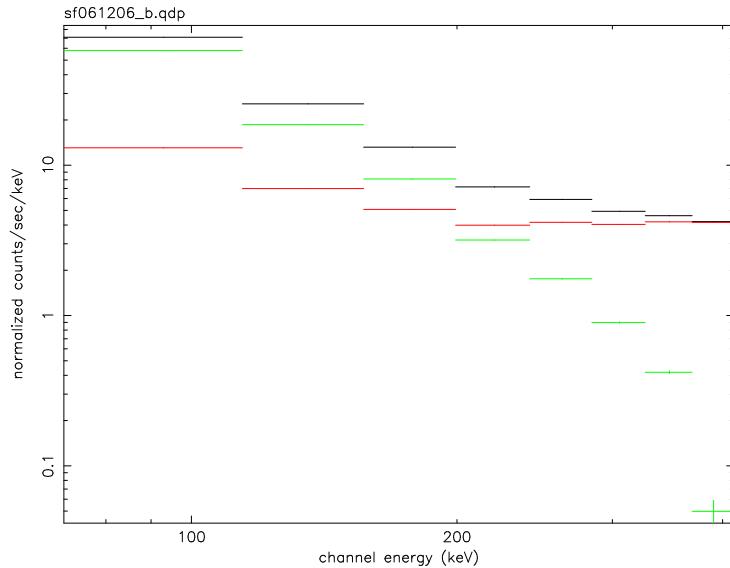


図 5.9: 2006年12月06日の太陽フレアのスペクトル。赤が50日周期を利用したバックグラウンド、黒が太陽フレア中のスペクトル。緑は黒から赤を引いた差分であり、300keV付近まで受かっていることがわかる。

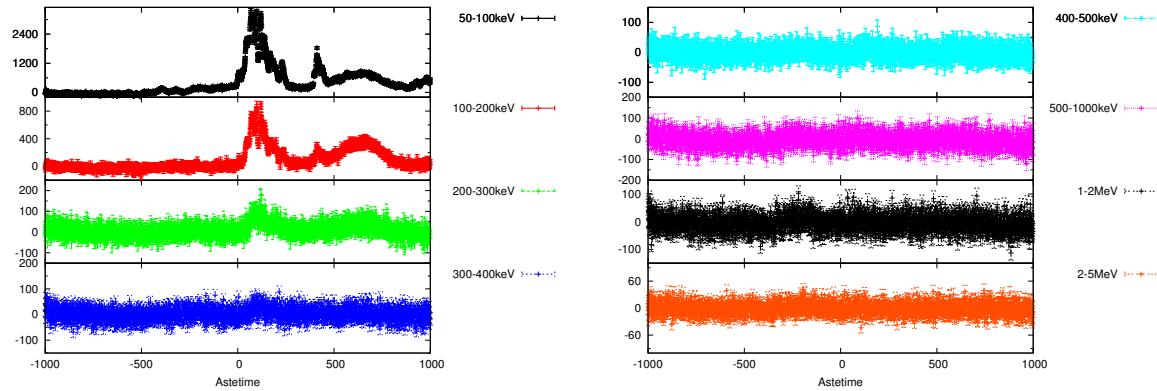


図 5.10: §4.3.2で求めたライトカーブ 300keVまでは、はっきりと太陽フレアの成分があるように見える。

2006年12月13日 02時22分23秒(UT)

この太陽フレアでは、スペクトルを見ると太陽フレアの成分が2MeV付近までは残っているように見える。また、ライトカーブを見ても2MeV付近までは成分が残っていることがわかる。2~5MeVでも少し成分があるよう見える。

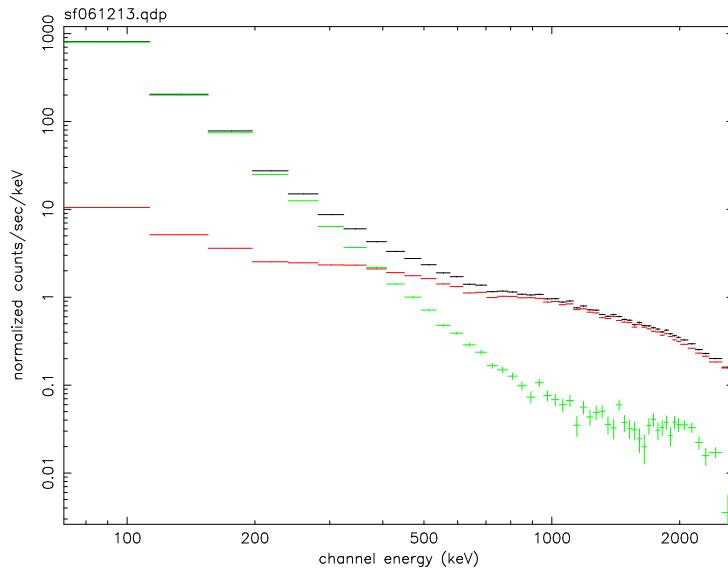


図 5.11: 2006 年 12 月 13 日の太陽フレアのスペクトル。赤が 50 日周期を利用したバックグラウンド、黒が太陽フレア中のスペクトル。緑は黒から赤を引いた差分であり、MeV まで受かっていることがわかる。

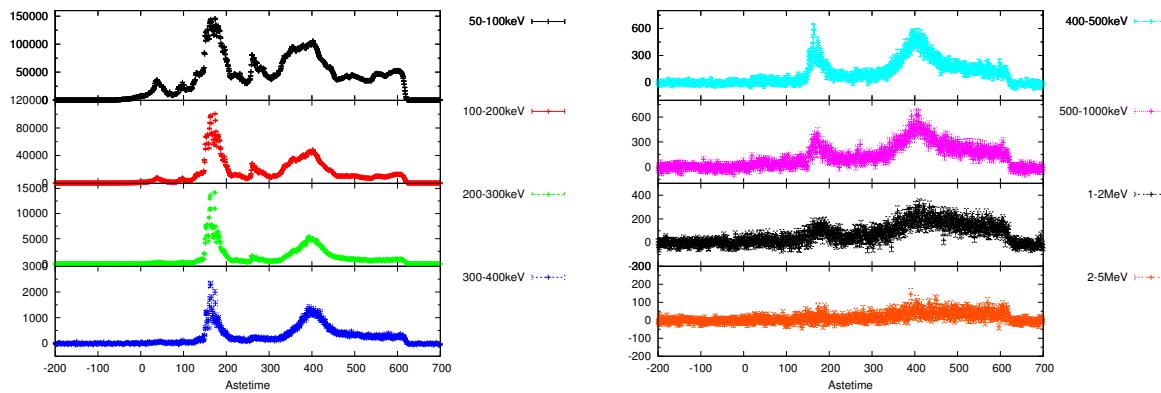


図 5.12: §4.4.5 で求めたライトカーブ 2MeV 付近までは、はっきりと太陽フレアの成分があるよう見える。

2006年12月14日 22時20分38秒(UT)

この太陽フレアでは、スペクトルを見ると太陽フレアの成分が500keV付近までは残っているように見える。また、ライトカーブを見ると300keV付近までは成分が残っているが、300keV以上の高エネルギー側ではカウント数がほぼ0であることがわかる。

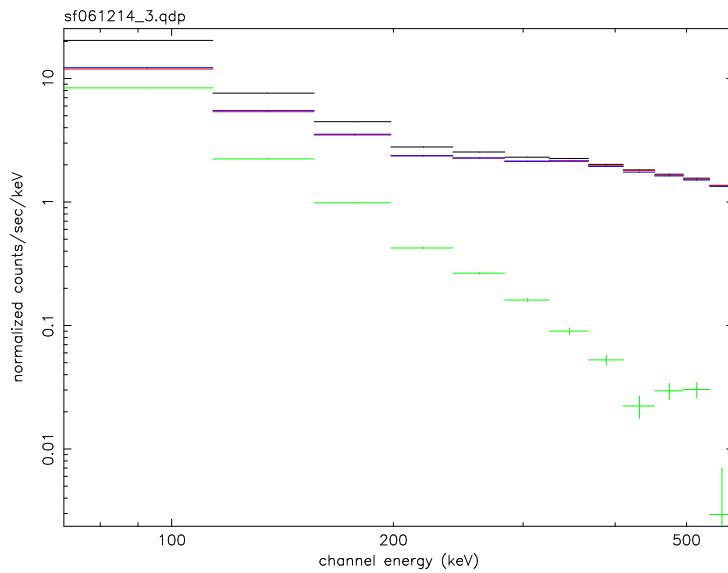


図 5.13: 2006年12月14日の太陽フレアのスペクトル。赤がソース前後のバックグラウンド、黒が太陽フレア中のスペクトル。緑は黒から赤を引いた差分であり、500keV付近まで受かっていることがわかる。

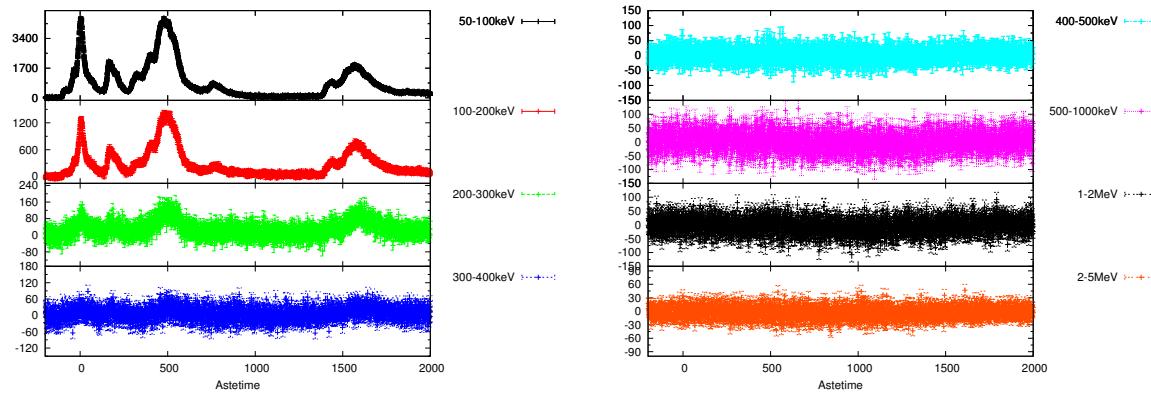


図 5.14: §4.4.6で求めたライトカーブ 300keVまでは、はっきりと太陽フレアの成分があるように見える。

5.2 全体のまとめ

本論文では、7つの太陽フレアについて「すざく」衛星の軌道周回を用いて、バックグラウンドの再現性を調べた。その結果、これらのイベントについては、 $\pm 5\%$ 以内の不定性になるということがわかった。しかし、50日前後を平均したスペクトル比を見ると、全体的に低エネルギー側が上下にバタつく傾向が見られた。また、50日前と50日後のスペクトル比が逆位相のようなプロットになっていることがわかる。これは、ゲインが50日前と50日後で違うことが原因であると考えられる。今回の解析では、50日前後のゲインが直線であると近似して、傾きの平均を太陽フレア当日のゲインとしたため、なまされたゲインの値を用いたということになる。もう少し厳密にするには、50日前後のゲインの値から計算して、太陽フレアを捉えた日のゲインに調整する必要があるかも知れない。そこが、今後検証すべき課題であるだろう。

§5.1では、50日前後を足したデータをバックグラウンドとして用いたスペクトルを実際にプロットしてみた。補正したライトカーブと比較すると見えているエネルギー帯域にあまり差がないことからも50日前後をバックグラウンドとして用いることが可能であることを示唆している。また、§1.2.3でも述べたような100keV以下で支配的になる熱的成分や100 keV以上で支配的になる非熱的な成分があるエネルギー帯域までHXD-WAMでは観測されていることがわかる。その上、Xクラスの太陽フレアでは、MeV以上まで受かっているイベントもあり、2.2MeVの核ガンマ線などが見えていることを示唆している。このことからも、HXD-WAMでできるサイエンスは数多くあることがわかる。2010年頃には、太陽が活動期を迎えるますます多くのXクラスの太陽フレアが観測されるだろう。HXD-WAMでは、§5.1のような太陽フレアが多数検出できるので、その強みを生かし、粒子加速メカニズムの解明や太陽に限らず、今後GRBなど様々な天体の新たな発見ができるることを期待したい。

参考文献

- [1] 宇宙科学研究本部. 科学衛星 Astro-E2 実験計画書, 宇宙航空研究開発機構 (JAXA), 2005.
- [2] G.F.NOLL. 第3版 放射線計測ハンドブック, 2001.
- [3] 高橋 拓也. X線天文衛星「すばる」搭載広帯域全天モニタ(WAM)のバックグラウンド解析, 修士論文, 広島大学, 2006.
- [4] 川添 哲志. Astro-E2衛星搭載硬X線全天モニタ装置のバックグラウンドの推定, 修士論文, 広島大学, 2003.
- [5] 遠藤 康彦. 「すばる」衛星搭載硬X線検出器 HXD のゲイン変動評価, 修士論文, 埼玉大学, 2006.
- [6] 村島(村上) 未生. 宇宙硬X線・ γ 線検出器の放射化バックグラウンド特性, 修士論文, 東京大学, 2003.
- [7] 篠島 敬. 「ようこう」衛星で観測された硬X線太陽フレアにおける非熱的成分の定量解析, 修士論文, 東京大学, 2005.
- [8] 三谷 夏子. RHESSI衛星による太陽フレアの硬X線撮像スペクトル解析, 修士論文, 東京大学, 2005.

付 錄 A

第4章で説明した手順に沿ったコマンドを載せる。

短くしたuffファイルから8バンドのライトカーブを作る方法(ソース、50前、50後)

```

hxdmkwamlc input_name=ae20061204_hxd_wam.uff.gz outroot=s
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=2 max_channel=3
hxdmkwamlc input_name=ae20061204_hxd_wam.uff.gz outroot=s
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=3 max_channel=6
hxdmkwamlc input_name=ae20061204_hxd_wam.uff.gz outroot=s
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=6 max_channel=9
hxdmkwamlc input_name=ae20061204_hxd_wam.uff.gz outroot=s
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=9 max_channel=12
hxdmkwamlc input_name=ae20061204_hxd_wam.uff.gz outroot=s
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=12 max_channel=15
hxdmkwamlc input_name=ae20061204_hxd_wam.uff.gz outroot=s
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=15 max_channel=30
hxdmkwamlc input_name=ae20061204_hxd_wam.uff.gz outroot=s
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=30 max_channel=50
hxdmkwamlc input_name=ae20061204_hxd_wam.uff.gz outroot=s
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=50 max_channel=53

hxdmkwamlc input_name=ae20061014_hxd_wam.uff.gz outroot=50b
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=2 max_channel=3
hxdmkwamlc input_name=ae20061014_hxd_wam.uff.gz outroot=50b
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=3 max_channel=6
hxdmkwamlc input_name=ae20061014_hxd_wam.uff.gz outroot=50b
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=6 max_channel=9
hxdmkwamlc input_name=ae20061014_hxd_wam.uff.gz outroot=50b
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=9 max_channel=12
hxdmkwamlc input_name=ae20061014_hxd_wam.uff.gz outroot=50b
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=12 max_channel=15
hxdmkwamlc input_name=ae20061014_hxd_wam.uff.gz outroot=50b
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=15 max_channel=30
hxdmkwamlc input_name=ae20061014_hxd_wam.uff.gz outroot=50b

```

```

leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=30 max_channel=50
hxdmkwamlc input_name=ae20061014_hxd_wam.uff.gz outroot=50b
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=50 max_channel=53

hxdmkwamlc input_name=ae20070123_hxd_wam.uff.gz outroot=50a
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=2 max_channel=3
hxdmkwamlc input_name=ae20070123_hxd_wam.uff.gz outroot=50a
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=3 max_channel=6
hxdmkwamlc input_name=ae20070123_hxd_wam.uff.gz outroot=50a
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=6 max_channel=9
hxdmkwamlc input_name=ae20070123_hxd_wam.uff.gz outroot=50a
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=9 max_channel=12
hxdmkwamlc input_name=ae20070123_hxd_wam.uff.gz outroot=50a
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=12 max_channel=15
hxdmkwamlc input_name=ae20070123_hxd_wam.uff.gz outroot=50a
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=15 max_channel=30
hxdmkwamlc input_name=ae20070123_hxd_wam.uff.gz outroot=50a
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=30 max_channel=50
hxdmkwamlc input_name=ae20070123_hxd_wam.uff.gz outroot=50a
leapsec_name=lea@sec.fits \ dt_cor=yes min_channel=50 max_channel=53

```

ここで、`input_name` は `fselect` で作成した `uff` ファイルを使用する。

つづいて `lcurve` で表示 -> `qdp` で保存する方法

```

s_wam0_ph2_3.lc
s_wam0_ph3_6.lc
s_wam0_ph6_9.lc
s_wam0_ph9_12.lc

```

```

s_wam0_ph12_15.lc
s_wam0_ph15_30.lc
s_wam0_ph30_50.lc
s_wam0_ph50_53.lc

```

```

50a_wam0_ph2_3.lc
50a_wam0_ph3_6.lc
50a_wam0_ph6_9.lc
50a_wam0_ph9_12.lc

```

```
50a_wam0_ph12_15.lc
```

50a_wam0_ph15_30.lc

50a_wam0_ph30_50.lc

50a_wam0_ph50_53.lc

50b_wam0_ph2_3.lc

50b_wam0_ph3_6.lc

50b_wam0_ph6_9.lc

50b_wam0_ph9_12.lc

50b_wam0_ph12_15.lc

50b_wam0_ph15_30.lc

50b_wam0_ph30_50.lc

50b_wam0_ph50_53.lc

wd s_1

wh s_1

wd s_2

wh s_2

wd 50a_1

wh 50a_1

wd 50a_2

wh 50a_2

wd 50b_1

wh 50b_1

wd 50b_2

wh 50b_2

できたqdpをいじって、ファイルの中味を(時間、1~4band or 5~8band)に整形

./trn/autotrg/kujira.pl s_1.qdp > s_1_x_qdp

./trn/autotrg/kujira.pl s_2.qdp > s_2_x_qdp

./trn/autotrg/kujira.pl 50a_1.qdp > 50a_1_x_qdp

./trn/autotrg/kujira.pl 50a_2.qdp > 50a_2_x_qdp

./trn/autotrg/kujira.pl 50b_1.qdp > 50b_1_x_qdp

./trn/autotrg/kujira.pl 50b_2.qdp > 50b_2_x_qdp

./trn/autotrg/macco.pl s_1_x_qdp > s_1.txt

./trn/autotrg/macco.pl s_2_x_qdp > s_2.txt

./trn/autotrg/macco.pl 50a_1_x_qdp > 50a_1.txt

./trn/autotrg/macco.pl 50a_2_x_qdp > 50a_2.txt

./trn/autotrg/macco.pl 50b_1_x_qdp > 50b_1.txt

```
./trn/autotrg/macco.pl 50b_2_x_qdp > 50b_2.txt
```

ここで一旦ライトカーブは置いといて、これから再現性を調べる。

xspec で mkwamspec で作成したソースの時間帯を除いた時間帯の .pha ファイルからスペクトルを出し qdp ファイルで保存する。

(pha は四つ。ここでは s_1000sec.pha, 50a_1000sec.pha, 50b_1000sec.pha, 50ab_1000sec.pha)

50ab_1000sec.pha は、mathpha で作成する。

```
xspec11
data 1 50ab_1000sec.pha
resp 1 side0_theta69.381_phi90.25_061205.rsp
setplot e
pl ld
ip
wd 50ab_1000sec
wh 50ab_1000sec
q
exit
```

できた qdp ファイルを使って BGD とソースの割り算 (50a/s, 50b/s, 50ab/s) をする。

```
./saba.pl 50a_1000sec.qdp s_1000sec.qdp > 50as_1000sec.txt
./saba.pl 50b_1000sec.qdp s_1000sec.qdp > 50bs_1000sec.txt
./saba.pl 50ab_1000sec.qdp s_1000sec.qdp > 50abs_1000sec.txt
```

```
./ratio_ch.pl 50as_1000sec.txt > 50as_ratio_1000sec.txt
./ratio_ch.pl 50bs_1000sec.txt > 50bs_ratio_1000sec.txt
./ratio_ch.pl 50abs_1000sec.txt > 50abs_ratio_1000sec.txt
```

gnuplot 上でできた .txt を表示し、これから再現性を見積もる。

つづいて 50 日前後 ÷ 2 をソースで割ったもの (ここでは 50abs_ratio_1000sec.txt) を直線近似する。

gnuplot 上で

a=0.95

f(x)=a

```
fit f(x) "50abs_ratio_1000sec.txt" using 1:3:4 via a
plot "50abs_ratio_1000sec.txt" u 1:3:2:4 title "s/50(a+b)/2" with
xyerrorbars ,f(x)
```

と打つと結果が以下のようにでて来ます。

a	= 0.957383	± 0.001091	(0.114 %)
---	------------	------------	-----------

これでバックグラウンド $50(a+b)/2$ をどれだけ上げ下げすれば良いか分かる。
(ここではバックグラウンド $50(a+b)/2$ を 4.2617 % 引き上げたものが bestBGD)

最後にソースから bestBGD を引いた 8 バンドのライトカーブを作成する。

```
./saba.pl 50a_1.txt 50b_1.txt > 50ab_1.txt
./saba.pl 50a_2.txt 50b_2.txt > 50ab_2.txt
./fugusasi_2.pl 50ab_1.txt > 50ab_pula2_1.txt
./fugusasi_2.pl 50ab_2.txt > 50ab_pula2_2.txt
./const_time.pl 50ab_pula2_1.txt > 50ab_pula2_c_1.txt
./const_time.pl 50ab_pula2_2.txt > 50ab_pula2_c_2.txt
./saba.pl 50ab_pula2_c_1.txt s_1.txt > sab_1.txt
./saba.pl 50ab_pula2_c_2.txt s_2.txt > sab_2.txt
./uni.pl sab_1.txt > s-ab_1.txt
./uni.pl sab_2.txt > s-ab_2.txt
./buri.pl s-ab_1.txt > s-50ab_1-4band_c_nt.txt
./buri.pl s-ab_2.txt > s-50ab_5-8band_c_nt.txt
./saba.pl s-50ab_1-4band_c_nt.txt s-50ab_5-8band_c_nt.txt >
s-50ab_1-8band_c_nt.txt
./saba.pl time.txt s-50ab_1-8band_c_nt.txt > s-50ab_1-8band_c.txt
```

```
gnuplot
set xlabel "Astetime"
set pointsize 1
set yrange [0.9:1.01]
set logscale x
set mytics 2
set xrange [20:7000]
plot "50as_ratio_1000sec.txt" u 1:3:2:4 title "50a/s" with xyerrorbars,
"50bs_ratio_1000sec.txt" u 1:3:2:4 title "50b/s" with xyerrorbars,
"50abs_ratio_1000sec.txt" u 1:3:2:4 title "50ab/s" with xyerrorbars
set term postscript eps enhanced color
set output "061205_50gbd_ratio.eps"
```

```
replot

a=0.95
f(x)=a
fit f(x) "061205_ratio_sab.dat" using 1:3:4 via a
a          = 0.957383      ± 0.001091      (0.114 %)

set logscale x
plot "50abs_ratio_1000sec.txt" u 1:3:2:4 title "s/50(a+b)/2" lt 3 with
xyerrorbars ,f(x)

plot "50abs_ratio_1000sec.txt" u 1:(\$3+0.042617):2:4 title "s/50(a+b)/2"
lt 3 with xyerrorbars ,f(x)+0.042617

set term postscript eps enhanced color
set output "061205_ratio_afit.eps"
replot

set term postscript eps enhanced color
set output "061205_8band_lc.eps"
set multiplot
set xlabel "Astetime"
set lmargin 10
set rmargin 20
set bmargin 3
set tmargin 0
set size 1,0.3
set origin 0.0,0.0
set pointsize 1.0
set ytics 1800
set mytics 2
set yrang [-150:5500]
set xrange [-100:900]
set key outside
plot "s-50ab_1-8band_c.txt" u 1:8:9 title "300-400keV" lt 3 with yerrorbars
set bmargin 0
set tmargin 0
set size 1,0.2
set origin 0.0,0.3
set ytics 6000
set mytics 2
```

```
set yrange [-150:18000]
set xlabel
set format x ""
plot "s-50ab_1-8band_c.txt" u 1:6:7 title "200-300keV" lt 2 with yerrorbars
set size 1,0.2
set origin 0.0,0.5
set ytics 40000
set mytics 2
set yrange [-150:120000]
plot "s-50ab_1-8band_c.txt" u 1:4:5 title "100-200keV" lt 1 with yerrorbars
set tmargin 3
set size 1,0.3
set origin 0.0,0.7
set ytics 60000
set mytics 2
set yrange [-150:180000]
plot "s-50ab_1-8band_c.txt" u 1:2:3 title "50-100keV" lt -1 with yerrorbars
set nomultiplot
replot

set term postscript eps enhanced color
set output "061205_8band_lc_2.eps"
set multiplot
set xlabel "Astetime"
set lmargin 10
set rmargin 20
set bmargin 3
set tmargin 0
set size 1,0.3
set origin 0.0,0.0
set pointsize 1.0
set ytics 100
set mytics 2
set yrange [-100:300]
set xrange [-100:900]
set key outside
plot "s-50ab_1-8band_c.txt" u 1:16:17 title "2-5MeV" lt 8 with yerrorbars
set bmargin 0
set tmargin 0
set size 1,0.2
set origin 0.0,0.3
```

```
set ytics 400
set mytics 2
set yrange [-150:1200]
set xlabel
set format x ""
plot "s-50ab_1-8band_c.txt" u 1:14:15 title "1-2MeV" lt 7 with yerrorbars
set size 1,0.2
set origin 0.0,0.5
set ytics 1000
set mytics 2
set yrange [-150:3000]
plot "s-50ab_1-8band_c.txt" u 1:12:13 title "500-1000keV" lt 4 with yerrorbars
set tmargin 3
set size 1,0.3
set origin 0.0,0.7
set ytics 800
set mytics 2
set yrange [-150:2500]
plot "s-50ab_1-8band_c.txt" u 1:10:11 title "400-500keV" lt 5 with yerrorbars
set nomultiplot
replot
```

付 錄B

付録 A で使用した perl スクリプトを以下に載せるので参考されたい。

```
#!/usr/bin/perl

#####
# kujira.pl      #
# lcurve で作成した qdp を時間と 1~4band 計 9 列に整形 (その 1)      #
# Ver 0.1 :2007-11-14      #
#####

open (OUT, ">test.txt");
while (<>){
    s/-//;

    print OUT;
}
close OUT;

open (IN, "test.txt");

@a = <IN>;

$i = 0;
while ($i < 14700){

    $mi = $a[$i];
    chomp $mi;
    $so = $a[$i+1];
    chomp $so;
    $ni = $a[$i+2];
    @misoni = ($mi,$so,$ni);

    # if(@misoni=~/(\\S+)(\\s+)(\\S+)(\\s+)(\\S+)(\\s+)(\\S+)(\\s+)(\\S+)(\\s+)(\\s+)
}
```

```
(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)
(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)/){

#      @gyokai= ($5 , $7 , $9 , $11 , $13 , $15 , $17 , $19);
#      print "@gyokai\n";

print  "@misoni\n" ;

#  }

$i += 3;

}

close IN;

#! /usr/bin/perl

#####
# macco.pl    #
# lcurve で作成した qdp を時間と 1~4band 計 9 列に整形 (その 2)      #
# Ver 0.1 :2007-11-14      #
#####

$input_file = $ARGV[0];

open(IN, "$input_file");

while (<IN>){

  if(/(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)
(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)/{

    @gyokai= ($5 , $7 , $9 , $11 , $13 , $15 , $17 , $19);
    print "@gyokai\n";
  }
}

close IN;

#! /usr/bin/perl

#####
```

```
# saba.pl      #
# 二つのファイルを一つにする      #
# Ver 0.1      #
#####
#
$input_file = $ARGV[0];
$input_file2 = $ARGV[1];

$count = 0;

while ($count <4900){          #ファイルの行数

open(IN, "$input_file");

@data = <IN>;
chomp @data;
@data50 = (@data[$count]);

open(IN2, "$input_file2");

@data2 = <IN2>;
@data2s = (@data2[$count]);

@data3 = (@data50,@data2s);
print "@data3";
++$count;
}

close IN;
close IN2;

#! /usr/bin/perl

#####
#
# ratio_ch.pl      #
# ファイル内が8列のとき      #
# 1列,2列、3/7,4/8 を抜き出す      #
```

```

# 2007/12/4 Ver1.0      #
#####
$input_file = $ARGV[0];

open(IN, "$input_file");

while (<IN>){
    if(/(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)
(\s+)(\s+)(\s+)/){

        @sakana =( $1 , $3, $5/$13 , $5/$13*(sqrt(($7/$5)**2+($15/$13)**2)) );

        #抜き出された3,4列は割り算の誤差伝播を反映している

        print "@sakana\n";
    }
}
close IN;

#! /usr/bin/perl

#####
# fugusasi.pl      #
# ファイル内が22列のとき      #
# 1列,(2列+13列)/2,(3列+14列)/2 ~ (9列+20列)/2 を抜き出す  #
# Ver 0.2 :2007-11-21      #
#####

$input_file = $ARGV[0];

open(IN, "$input_file");

while (<IN>){
    if(/(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)
(\s+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)
(\s+)(\s+)(\S+)/){

        @sakana =( $1,($3+$25)/2 , (sqrt(($5)**2+($27)**2))/2, ($7+$29)/2
, (sqrt(($9)**2+($31)**2))/2, ($11+$33)/2 , (sqrt(($13)**2+($35)**2))/2
,
```

```
,($15+$37)/2 ,($sqrt(($17)**2+($39)**2))/2 );  
  
#抜き出された3,5,7,9列は足し算の誤差伝播を反映している  
  
    print "@sakana\n";  
}  
}  
close IN;  
  
#! /usr/bin/perl  
  
#####
# const_time.pl      #  
# ファイル内が9列のとき 1.2-9列*0.9784 を抜き出す      #  
#####  
  
$input_file = $ARGV[0];  
  
open(IN, "$input_file");  
  
while (<IN>){  
    if(/(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\s+)(\s+)(\s+)(\s+)(\s+)(\s+)/){  
        @gyokai= ($1, $3*(1.053708) , $5*(1.053708) , $7*(1.053708)  
,$9*(1.053708) , $11*(1.053708) , $13*(1.053708) , $15*(1.053708)  
,$17*(1.053708) );  
        print "@gyokai\n";  
    }  
}  
close IN;  
  
#! /usr/bin/perl  
  
#####
# uni.pl      #  
# ファイル内が18列のとき      #  
# 1列,(11列-2列,12-3,13-4,14-5,15-6,16-7,17-8,18-9)を抜き出す#  
# 2007/11/30 Ver1.0      #  
#####  
  
$input_file = $ARGV[0];
```

```
open(IN, "$input_file");

while (<IN>){
    if(/(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)
    (\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)
    (\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)/){

        @sakana =( $1 , $21-$3 , sqrt(($23)**2+($5)**2) , $25-$7
        ,sqrt(($27)**2+($9)**2) , $29-$11 , sqrt(($31)**2+($13)**2)
        , $33-$15 , sqrt(($35)**2+($17)**2) );

        #抜き出された 3,5,7,9 列は引き算の誤差伝播を反映している

        print "@sakana\n";
    }
}

close IN;

#! /usr/bin/perl

#####
# buri.pl #
# ファイル内が9列のとき 2-9列を抜き出す #
#####

$input_file = $ARGV[0];

open(IN, "$input_file");

while (<IN>){
    if(/(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)
    (\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)(\S+)(\s+)/){

        @gyokai= ($3 , $5 , $7 , $9 , $11 , $13 , $15 , $17);
        print "@gyokai\n";
    }
}

close IN;
```

謝辞

研究及び修士論文執筆にあたり、田代信教授にはお忙しい中、学会の概要や論文の添削、発表練習などいろいろと御指導していただき、感謝の気持ちでいっぱいです。また、寺田幸功准教授には学部4年生の頃から研究や実験などを御指導して頂き本当に感謝しています。ありがとうございました。太陽チームである遠藤さん、守上君にも、解析の手伝いやアドバイスをしていただきありがとうございました。また、多くの議論ができたことを嬉しく思います。そして、HXD-WAMチームの皆様や田代研の皆様にも本論文だけでなく、様々なところで多くのアドバイスをしていただき感謝しています。

最後になりましたが、X線天文学関係者様、「すぐ」衛星関係者様には、このようなすばらしい環境ですばらしい方々に囲まれながら、世界最先端の研究に携われたことを嬉しく思い、感謝しています。今後もますますのご活躍を影ながら応援させていただきます。

本当にありがとうございました。