

X線観測衛星『すざく』搭載XIS検出器の バックグラウンドの研究

中本 創

広島大学理学部物理科学科

1479048F

高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

主査:水野 恒史 副査:山本 一博

2006年2月10日

概要

X線で輝く天体は、1962年にRiccardo Giacconiらが打ち上げたX線観測用ロケットによって初めて発見され、それ以降、1970年に打ち上げられた世界初のX線天文衛星*Uhuru*をはじめ多くのX線観測用衛星が打ち上げられてきた。わが国においても、1979年に打ち上げられた『はくちょう』をはじめ、『てんま』、『ぎんが』、『あすか』といったX線観測用衛星が打ち上げられ、大きな成果をもたらしてきた。そして2005年7月に打ち上げられたのが、わが国の5番目のX線観測用衛星『すざく』である。この『すざく』衛星により、0.2～600 keVという今までになかった広いエネルギー帯での観測が可能になった。

X線観測用衛星に搭載される装置の一つに、X線CCDがある。X線CCDはシリコンを用いた半導体検出器とほぼ仕組みが同じものであり、エネルギー分解能、撮像能力の双方が優れている。このX線CCDを初めて搭載したのは、日本の前身のX線観測用衛星『あすか』である。それ以来、X線観測衛星に搭載される標準装置となり、現在飛行中の『すざく』にも計4台のX線CCDが搭載されている。

しかし、観測の際には、目標とする天体以外からの信号が存在する。その主な原因は、宇宙背景X線放射及び宇宙線と呼ばれる荷電粒子(プロトン)である。この信号をバックグラウンドとよぶ。バックグラウンドが存在すると、遠くの暗い天体や広がった天体などの微弱なX線信号を出す天体の観測の際に正確な情報を得ることができない。そのため、高感度の観測にはバックグラウンドの正確なモデル化と差し引きが必要となる。

本研究の目的は、XISの観測データから差し引くためのバックグラウンドを正確にモデル化することである。そのため、バックグラウンドの特性を調べることを行った。宇宙線起源のバックグラウンドは宇宙線強度に依存する。そこで、バックグラウンドと宇宙線強度との相関を調べ、予測方法として確立するとともに観測値と比較することで再現性の評価を行った。また、バックグラウンドの経過年数による変化や検出器上の位置依存性も調べた。

目次

第1章	X線観測衛星『すざく』	3
1.1	『すざく』衛星の概要	3
1.1.1	軟X線反射望遠鏡 X-ray Telescope(XRT)	4
1.1.2	X線マイクロカロリメータ X-Ray Spectrometer (XRS)	5
1.1.3	硬X線検出器 Hard X-ray Detector(HXD)	5
1.1.4	X線 CCD X-ray Imaging Spectrometers (XIS)	6
第2章	X線観測衛星『すざく』搭載のX線 CCD	7
2.1	X線 CCD の特性	7
2.1.1	X線 CCD の検出のしくみ	7
2.1.2	X線 CCD の電荷転送方法	7
2.1.3	表面照射型 CCD と背面照射型 CCD	8
2.2	『すざく』搭載のX線 CCD XIS	9
2.2.1	SUZAKU-XIS 装置	9
2.2.2	XIS の駆動モード	9
2.2.3	XIS のデータの処理	11
2.2.4	XIS の基本性能	14
2.2.5	XIS の応答関数	15
第3章	X線観測におけるバックグラウンド	17
3.1	観測に及ぼすバックグラウンドの影響	17
3.2	宇宙背景 X線放射 (CXB)	17
3.3	非 X線バックグラウンド (NXB)	18
3.3.1	South Atlantic Anomaly (SAA) とその影響	18
3.3.2	Cut Off Rigidity (COR) とその影響	19
3.4	本研究との関係	20
第4章	XIS の非 X線バックグラウンドの特性	21
4.1	データセレクション	21
4.1.1	SAA の影響するデータ除去	22
4.1.2	光洩れの除去	22
4.2	全地没データの解析	23
4.2.1	ブランクスカイと地没データ	23
4.2.2	ライン成分と連続成分	26
4.3	時間によるバックグラウンドの変化	27
4.4	COR 及び HXD-PIN による粒子モニタとの相関	28
4.4.1	COR に対する依存性	29
4.4.2	HXD-PIN による粒子モニタとバックグラウンドの関係	29

4.5	検出器上の位置の依存性	35
4.5.1	特定のデータの除去	36
4.5.2	中心座標からの距離依存性	36
4.5.3	検出器座標 (detx, dety) の依存性	39
第5章	再現性の評価	44
5.1	バックグラウンド予測パラメータの確立	44
5.2	再現性の評価	44
5.3	これからの課題	48
第6章	まとめ	51
付録A	解析に用いたデータ集	53

第1章 X線観測衛星『すざく』

1.1 『すざく』衛星の概要

X線観測衛星『すざく』(図1.1)は2005年7月10日に打ち上げられた日本で5番目のX線観測用の衛星である。この衛星は地球から高度550 kmの軌道を保っており、北緯 31° ～南緯 31° の範囲を飛行する。また、観測のために4種の装置(XRT、XRS、HXD およびXIS)が搭載されている。

この衛星の最大の特徴は、多波長での観測、すなわち、広いエネルギーバンドにおける観測が可能であることで、そのエネルギーバンドは $0.2 \sim 600$ keVにも及ぶ。これにより、ブラックホール連星、超新星残骸、活動銀河核、銀河群、銀河団などの熱的高温プラズマ(主に 10 keV以下の放射)と非熱的放射(10 keV以上で卓越)の共存する系の観測で力を発揮すると期待されており、実際に成果をあげつつある。

さらなる特徴として、バックグラウンドが極めて低いという点が挙げられる。これは、高度550 kmの低周回軌道を保っているため、宇宙からの荷電粒子を地磁気によってガードできるからである。そのため、外国の衛星である *Chandra* や *XMM – Newton* に比べ、広がった微弱な天体に対して感度が高い。ただし、そのために観測する天体と衛星との間に地球が入ってしまつて天体が見えなくなる「地没」の状態になりやすいという点もある。



図 1.1: 『すざく』衛星のイメージ図 [1]

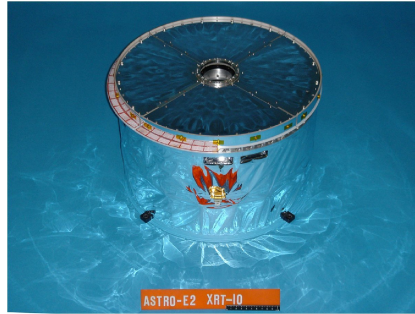


図 1.2: 衛星『すざく』の X 線望遠鏡 XRT [1]

1.1.1 軟 X 線反射望遠鏡 X-ray Telescope(XRT)

XRT(図 1.2) は X 線観測用の望遠鏡であり、『すざく』には計 5 台の XRT が搭載されている。X 線は透過力が強いために光学望遠鏡のような反射望遠鏡は用いることができない。そこで重金属をリング状に並べ、鏡面すれすれに入射した X 線を全反射させることで像を結ばせて撮影する。この望遠鏡の性能を表すパラメータとして、有効面積と角度分解能がある。

有効面積は

$$(\text{有効面積}) = (\text{光が入る面積}) \times (\text{検出器上に像を結ぶ確率}) \quad (1.1)$$

で表される。ただし、X 線の像を結ぶ確率はその X 線が持つエネルギーに依存するため、X 線のエネルギーごとに有効面積も異なる。7 keV における有効面積は、一台あたり約 250 cm² で、同エネルギーに対する有効面積が 100 cm² であった『すざく』の前身である日本の X 線観測衛星『あすか』の反射望遠鏡よりも大幅に性能が上がっている。

角度分解能は、焦点面全体に集められる X 線量の半分が含まれる円の直径 (half Power Diameter:HPD) を指標として用いることが多い。バックグラウンドは検出器上にほぼ一様に分布するため、HPD が小さいほどバックグラウンドも低くなる。『すざく』の HPD の値は ~ 1'7 であり、HPD ~ 3'0 である『あすか』の反射望遠鏡の約 2 倍の性能をもつ。

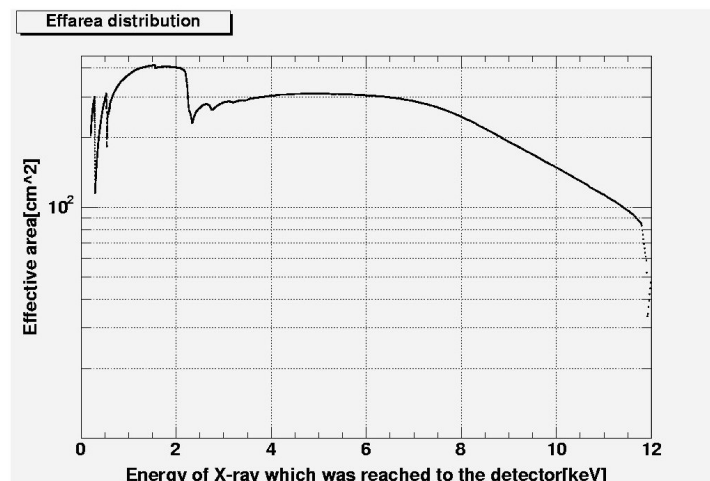


図 1.3: 一台の XRT の有効面積

『すざく』の5台の望遠鏡のうち、4台は焦点にX線 CCD(XIS) を置く XRT-I と呼ばれる口径 40cm、焦点距離 4.75m のもので、残りの一台が口径 40cm、焦点距離 4.5m で焦点に X 線マイクロカロリメータ (XRS) が置かれている XRT-S となっている。『あすか』の反射望遠鏡と比較して、口径はほとんど変わらずに焦点距離が約 1.3 倍になっているが、そのことで平均の入射角が小さくなり、高エネルギー側の反射率が高いという特徴をもつ。鏡面に用いられる物質は XRT-I では金であるが、XRT-S ではさらに反射率の高いプラチナが用いられている。これは、6 ~ 7 keV 付近の有効面積を大きくするためである。焦点に XIS0 が置かれている一台の XRT の有効面積を図 1.3 に示す。

1.1.2 X 線マイクロカロリメータ X-Ray Spectrometer (XRS)

XRS(図 1.4) は X 線源のエネルギーを精密に測定するための X 線分光計であり、衛星に搭載されたのは世界初である。この装置の最大の特徴は、エネルギーを極めて高い精度で測定できる点である。例えば、6 keV におけるエネルギー分解能は約 7 eV であり、これは 2.2 以降に述べる X 線 CCD の実に約 20 倍にもなる。

この装置は、素子の温度を 0.06 K にまで下げ、X 線入射に伴うわずかな温度上昇を測定することでエネルギーを計測する。そこで、観測の際には装置の冷却を行う必要がある。冷却には、断熱消磁冷凍庫、液体ヘリウム、固体ネオンの 3 種を用いる。

だが、2005 年 8 月 8 日にヘリウムタンク内の温度が上昇し、装置を冷却するために用いていた液体ヘリウムが全て気化してしまったため、この装置での観測は行えなくなってしまった。その温度上昇の原因はわずかな排気不良に伴った検出器内部の真空度の悪化によるものであった。(詳細は [2] 参照)

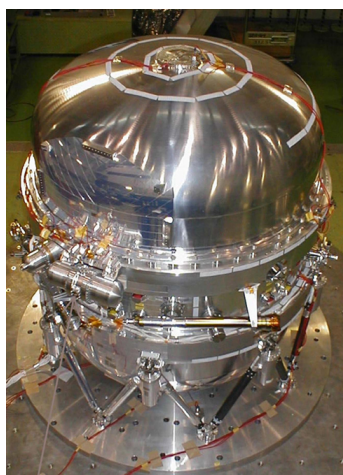


図 1.4: 『すざく』の X 線マイクロカロリメータ XRS [3]

1.1.3 硬 X 線検出器 Hard X-ray Detector(HXD)

HXD(図 1.5) はエネルギーが 10 keV 以上のエネルギーの高い硬 X 線を検出するための装置である。気球実験を通じ開発がなされ、実際に衛星に搭載されたものとしてはこれが

世界初である。観測可能なエネルギー帯は 10 ~ 600 keV で、徹底した低バックグラウンドのため、300 keV までの X 線に対する感度は世界最高のものである。

HXD のセンサの部分は、4 × 4 の行列状に配置された 16 台の Well 検出器とそのまわりを取り囲む 20 台の Anti 検出器とから成る。

Well 検出器は、主検出部分に GSO(Gd_2SiO_5)、シールド部分に BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) という二種類のシンチレータが用いられている井戸型の検出器であり、BGO は、アクティブシールドとしてはたらき、さらに GSO の視野を絞る役割を持っている。さらに、低エネルギー側の観測を行うべく、GSO の前面には PIN 型シリコン検出器 (PIN) がおかれている。PIN 型検出器で 10 ~ 60 keV のエネルギー領域の観測を行い、GSO で 40 ~ 600 keV の高エネルギー領域の観測を行う。

一方 Anti 検出器は BGO の結晶シンチレータでできており、Well 検出器のシールドの役目ならびにガンマ線バーストのモニターなどの役目も果たしている。

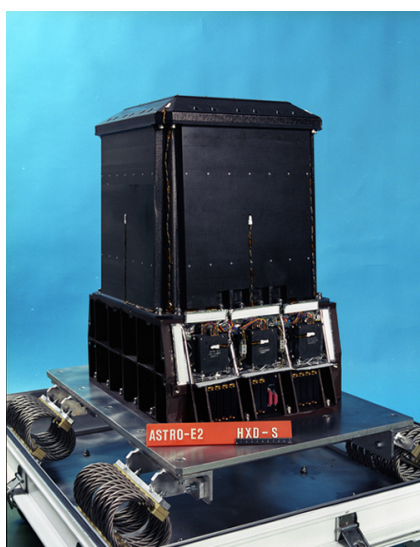


図 1.5: 『すざく』の硬 X 線検出器 HXD [1]

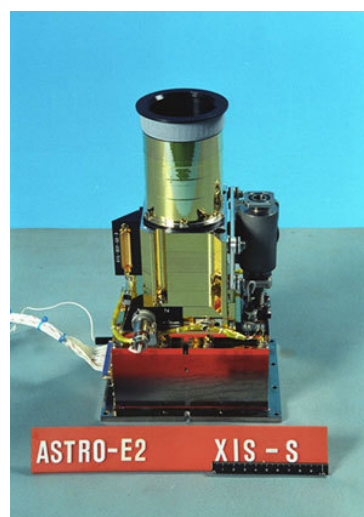


図 1.6: 『すざく』の X 線 CCD XIS [1]

1.1.4 X 線 CCD X-ray Imaging Spectrometers (XIS)

図 1.6 は『すざく』に搭載されている X 線 CCD のうちの 1 台である。『すざく』衛星には計 4 台の X 線 CCD カメラである XIS が搭載されており、XRT と合わせて 0.2 ~ 12 keV のエネルギー領域での撮像及び分光が可能となっている。その詳細については、2 章で述べることにする。

第2章 X線観測衛星『すざく』搭載のX線 CCD

2.1 X線 CCD の特性

X線 CCD とは、CCD カメラの X 線版で、X 線光子を個々に直接検出する装置である。X 線光子の到来した位置及びエネルギーを高い精度で測定でき、『あすか』衛星で初めて搭載された。その後、*Chandra*、*XMM-Newton* に用いられ、いわば X 線観測衛星の標準装備となっている。以下、一般的な X 線 CCD の特徴について述べる。

2.1.1 X線 CCD の検出のしくみ

X 線 CCD 検出部はシリコン (Si) でできており、このシリコンに電極を配置することで、空乏層ができる。この空乏層に X 線が入射すると、シリコンと反応して光電吸収がおこる。光電吸収が起こった際には、入射した X 線のエネルギーに対応したエネルギーを持つ電子が生成され、他の Si 原子の最外殻電子を励起することで、電子雲が生じる。シリコンの平均電離エネルギーは 3.65 eV のため、入射 X 線の持つエネルギーを E_{in} としたときに、生じる電子の個数は $\frac{E_{in}}{3.65 \text{ eV}}$ である。この生じた電子雲は電極へと集められて読み出される。

この一連の課程で、電子の総数から入射 X 線のエネルギーを、CCD 素子の位置から X 線の入射位置を検出する。

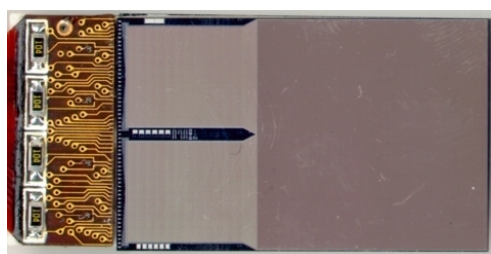


図 2.1: フレーム転送方式の XIS [3]

2.1.2 X線 CCD の電荷転送方法

CCD における電荷転送の方法として、大きく 2 つの方法が挙げられる。

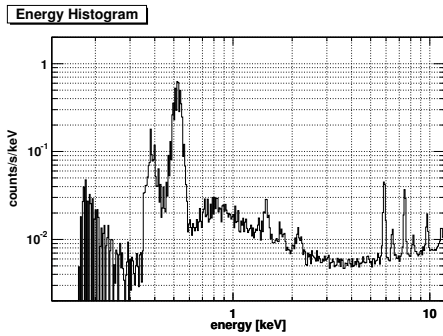


図 2.2: FI CCD の夜地球スペクトル

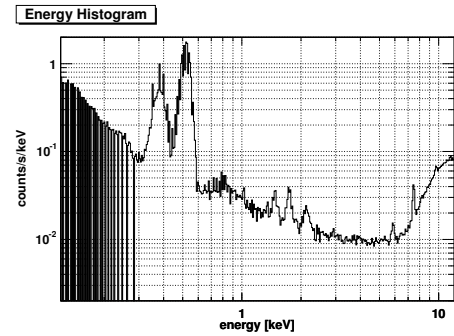


図 2.3: BI CCD の夜地球スペクトル

1. インターライン転送方式

この方式は可視光などに対してよく用いられる方式である。この方式の特徴として、受光部分と転送部分とが同一画素内に交互並行に配列されており、全 CCD 画素が同時に隣り合う転送部に読み出されるとい点が挙げられる。この方式の利点は動作が簡単なことであるが、転送列を遮光してやる必要があるため、有効な受光面積を大きくとることができないという欠点を持つ。そのため、透過力が強い X 線に対しては遮光も難しいのでこの方式は X 線 CCD に対しては不向きである。

2. フレーム転送方式

もう一つの方式は、フレーム転送方式と呼ばれるもので、光を受ける撮像領域と、出力への転送のために電荷を一時蓄えておく領域とが完全に分離されているものである。(図 2.1) この方式は、受光面で検出した画像を蓄積部に高速で転送し、そののち蓄積部を順に読みだしていくというものである。利点は撮像領域全体を使うことができ、さらに電極の構造が簡単になる点である。一方、電極は可視光に対して透明なポリシリコンが用いられるが、軟 X 線に対してはこれは透明ではないため、X 線が吸収されてしまう。また、明るい点源に対しては電荷転送中の入射光による影響を考慮する必要がある。『すざく』XIS をはじめとした X 線 CCD にはこの方式が用いられている。

2.1.3 表面照射型 CCD と背面照射型 CCD

X 線 CCD は電極のある面 (以下、表面と呼ぶ) から X 線を入射する表面照射型 CCD (Frontside Illuminated : FI) が一般的なものであるが、電極のない背面から X 線を入射するものもある。これが背面照射型 CCD (Backside Illuminated : BI) である。

FI 型 CCD は、低エネルギーの X 線が電極で吸収されるという欠点があったが、BI 型では X 線が電極を通らないために吸収は最小限に抑えることができ、低エネルギー X 線に対しての感度が高い。ただし、BI 型 CCD では受光面まで完全に空乏層化していなければかえって検出効率を下げてしまう欠点を持つ。

『すざく』に搭載された FI CCD 及び BI CCD で見た夜地球のスペクトル (太陽光の当たっていない地球を見たときのスペクトル ; 4.2.1 参照) を図 2.2 及び図 2.3 に示す。

どちらも 3×3 モードのデータであり (2.3 参照)、CCD 中心から半径 500 ピクセルの領域までを積分したスペクトルで、積分時間はおよそ 550 ks である。この図から見てとれるように、BI CCD のほうが低エネルギー領域での検出効率が上がっている。一方、高エネルギー領域においては FI CCD のほうがライン成分もよく見えており、バックグラウ

ンドが少ない。よって、高エネルギー領域のバックグラウンドを見る本研究では FI CCD のデータを用いた。(4.1 節参照)

2.2 『すざく』搭載の X 線 CCD XIS

2.2.1 SUZAKU-XIS 装置



図 2.4: 衛星『すざく』の X 線 CCD XIS [3]

先の節でも述べたように、X 線 CCD にはフレーム転送方式が用いられており (図 2.4)、『すざく』の XIS にもこの電荷転送方式が用いられている。

XIS は一画素の大きさが $24 \times 24 \mu\text{m}$ 、画素数は 1024×1026 ある。しかし、転送領域に近い二列は読み飛ばすので、実質有効な画素数は 1024×1024 となる。読みだし端子は CCD 素子あたり 4 つあり、一つの端子が 256×1024 の領域を読み出している。端子が 4 つあるのは、読み出しの作業の高速化をはかるためである。また、『すざく』衛星には 4 台の X 線 CCD が搭載されており、そのうち 3 台が表面照射型 CCD (XIS0,2,3)、残りの一台が背面照射型 CCD (XIS1) となっている。

軌道上でのエネルギー絶対精度の測定には較正線源 (Calibration Source) として ^{55}Fe を用いる。この線源からは $\text{Mn-}K_{\alpha}$ (5.9 keV) および $\text{Mn-}K_{\beta}$ (6.4 keV) の特性 X 線が出る。検出器上のイメージを図 2.5 に示す。これは XIS で完全夜地球 (4.2 参照) を見た 3×3 モードの全データの検出器イメージを足し合わせたもので、検出器イメージの隅の円形のカウンントが多いところが較正線源によるものである。この図から、XIS によって較正線源の位置が異なっていることが分かる。

さらに、可視光に対する措置として、CCD 素子の上面に可視光遮断フィルタ (OBF) が取り付けられている。

2.2.2 XIS の駆動モード

XIS には三通りの駆動モードがあり、それぞれ読み出しの周期や方法が異なっている。

1. Normal モード

通常の観測に用いるモードであり、CCD の全画素を 8 秒の周期で読み出すモードである。つまり、8 秒間露光したのちに読み出す作業を繰り返す。

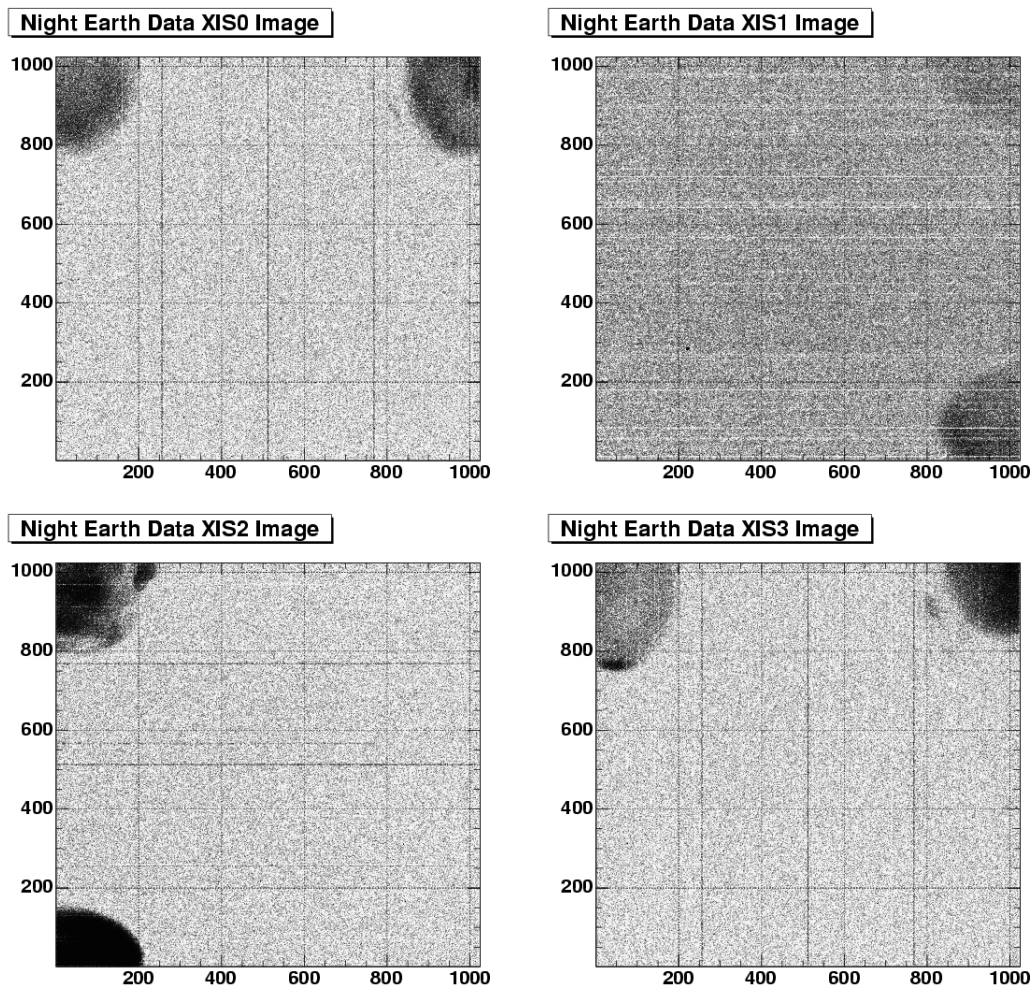


図 2.5: 検出器上の較正線源による X 線イメージ (CCD の隅の円形部分)。左上から横方向に順番に XIS0、XIS1、XIS2、XIS3 でのイメージ。

2. Burst モード

このモードも読み出しの周期は 8 秒である。しかし、撮像領域の電荷を転送したのち、撮像領域の電荷をクリアすることによって実質的な露光時間が 8 秒よりも短くなる。このモードは、読み出しの途中に同じ CCD 画素に X 線があたってしまい、通常よりもエネルギーが高く読み出されてしまうパイルアップの防止ができる。そのため、X 線の強い点源を見る際に用いられる。

3. Parallel-sum モード (P-sum モード)

P-sum モードは撮像領域縦方向の 64/128/256 列を加算し、列ごとに転送領域に送って読み出すモードである。このモードの特徴は、縦方向の位置情報が得られないが、パイルアップの影響は受けにくく、さらに時間分解能が加算列によらず約 8 ミリ秒 (正確には $8/1024$ [秒]) であるため、点源に対し高い時間情報を得ることができるという利点を持つ。よって、このモードは短時間のうちに放射する X 線量が変化するパルサーのような天体の観測時に用いられる。

また、Normal、Burst モードには Window オプションというものがあり、CCD の垂直方向の指定した範囲のみを何度も短い周期で読み出すというものである。ただし、指定

できる範囲は縦 1024 ピクセルのうちの 1/4、1/8、1/16 にのみ限定される。これもパイルアップを避けるのが目的で、明るくて空間的に広がり小さい X 線源の観測に有効なオプションである。ただし、P-sum モードではこのオプションは使用できない。

2.2.3 XIS のデータの処理

XIS のデータはそのままであまりに膨大な量なので、衛星上でデータの処理を行い、選ばれたデータのみを地上に送るようになってきている。データの判別方法としては、以下の方法をとる。[4]

XIS から読み出された生データには X 線を検出していないときの信号も存在する。この信号がダークレベルで、ピクセルごとの暗電流 (2.3.4 参照) と全 CCD 素子共通の回路による電気系ノイズなどで決まる。そのため、X 線信号のみを検出するにはまず、ダークレベルの測定を行う。ダークレベルを決定した後、イベントの信号との差をとりイベントが X 線によるものかどうかを判別する。しかし、日照りの状態から日陰に入ったり、またその逆の場合でもダークレベルが急激に変化してしまい、イベントが来ていなくとも X 線を受け取ったものと認識してしまいかねない。そこで、日照りと日陰の移り変わりごとにダークレベルの補正を行う。

これらの補正と差し引きを行った後、イベントの抽出を行う。イベントとして読み出されるものは、図 2.6 のようになったもので、 3×3 pixel の領域において差し引き後の信号の値 PH_{Event} が回りのピクセル 1 ~ 8 よりも大きく、なおかつ信号の値がイベント閾値 E_{th} を越えたものが読み出される。

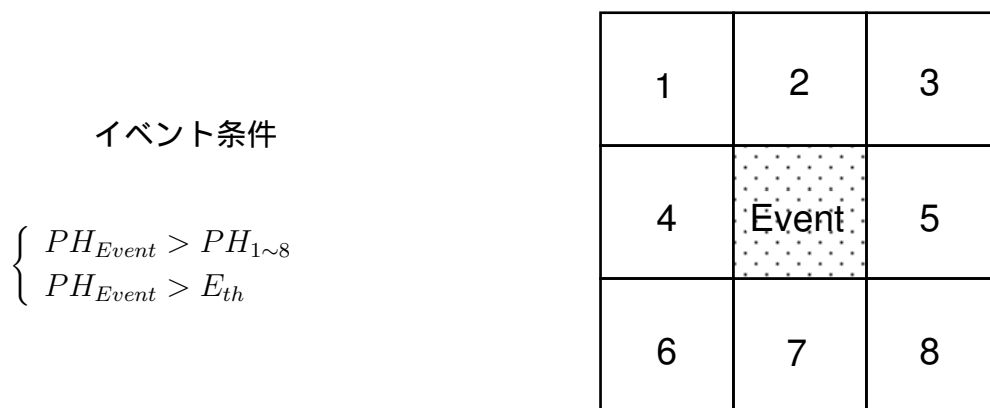


図 2.6: Normal モード及び Burst モードでのイベント

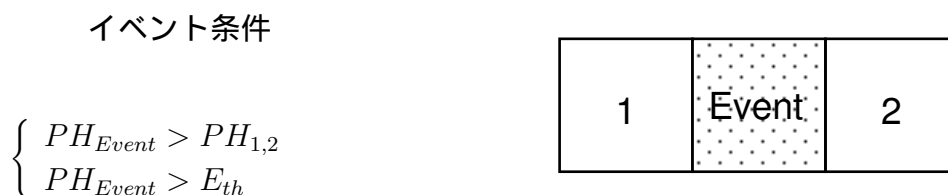


図 2.7: P-sum モードでのイベント

表 2.1: 各エディットモードの情報内容

エディットモード	情報内容
5 × 5	イベント中心座標 イベント中心とその CCD 素子を取り巻く 5 × 5 素子の全信号値
3 × 3	イベント中心座標 イベント中心とその CCD 素子を取り巻く 3 × 3 素子の全信号値 3 × 3 を取り巻く 16 素子のうちスプリット閾値を越えた信号値を持つ素子の位置と信号値、及びスプリット閾値に達しなかった素子の信号値の合計

この 3 × 3 の領域における定義は Normal モードと Burst モードでのみ使える。縦方向の電荷を加算して読み出す P-sum モードでのイベントの定義はこれとは異なっており、図 2.7 のように 1 × 3 pixel の領域において補正後の信号の値がピクセル 1、2 よりも大きく、信号の値がイベント閾値を越えたものがイベントとして読み出される。

X 線 CCD は読み出される際、拡散などで電子雲が空間的に広がり、複数画素に一つのイベントがまたがることがある。その際は、隣接する CCD 画素の電子数の和をとることにより正確なエネルギー情報を得られる。ここでイベントには X 線以外の宇宙線 (バックグラウンド) が混在している可能性があり、受け取ったイベントが X 線によるものかどうかを判別する必要がある。そのために用いるのがグレード判定である。

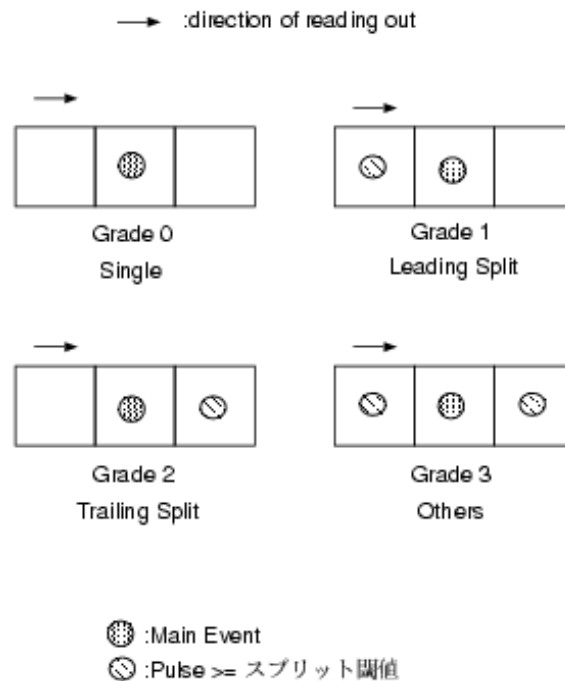


図 2.8: P-sum モードのグレード定義

基本的に XIS では、Normal モード及び Burst モードでは 3 × 3 画素の領域のパターンを用いてグレードを決定する。(図 2.9) このうちイベントとしてみなすことができるのは、グレード 0、2、3、4、6 のみである。なお、単独の画素にのるイベントをシングルイベントというのに対し、複数の画素にまたがるイベントのことをスプリットイベントという。また、P-sum モードではグレードの定義が異なっている。(図 2.8) このうち用いるものは、

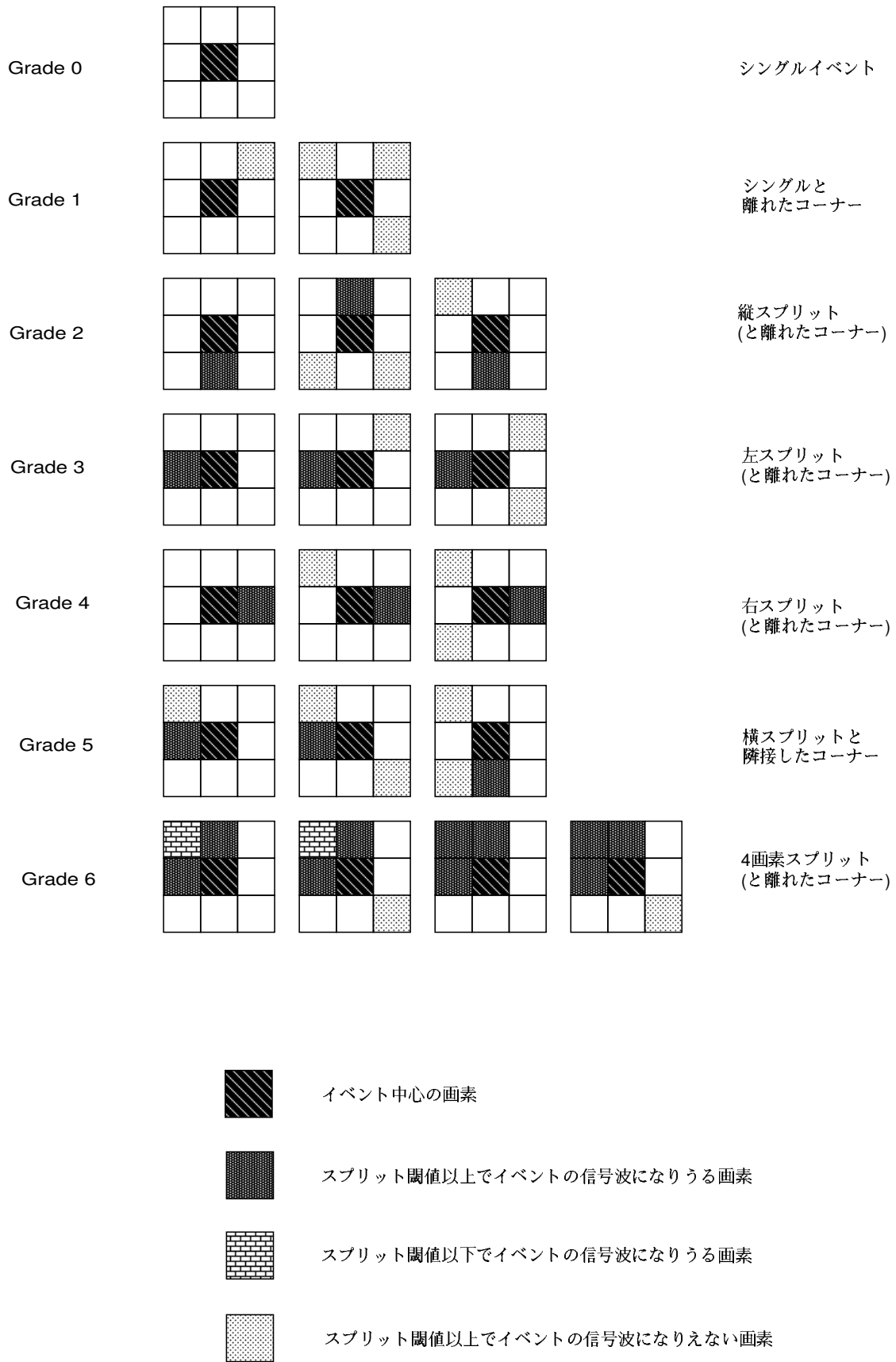


図 2.9: Normal 及び Burst モードのグレード定義

グレード0、1、2である。

さらにXISは撮像データを地上に送る際、指定したイベントフォーマットに加工して転送する。今回の解析では、そのうち 3×3 と 5×5 のものを用了。それぞれの情報内容を、表2.1に示す。 5×5 は 3×3 よりも情報量が多く、データを地上に転送した後(オフライン)、より詳細な解析やバックグラウンドの除去が可能となる。ただしデータ量が多いため、天体からくる信号が少なく、なおかつ地上とのコンタクトの多いときにしか使えない。

2.2.4 XISの基本性能

『すざく』のXISの基本的な性能は、主に以下3つの要素で決まる。

1. エネルギー分解能 ΔE

エネルギー分解能は単色X線を入射した際のピークの広がり(FWHM)であり、生成される光電子数及び読み出し回路のノイズによって決まる。その式は、

$$\Delta E(FWHM) = \omega \times \sqrt{8 \log 2} \cdot \sqrt{N^2 + \frac{FE}{\omega}} (eV) \quad (2.1)$$

となる。ここで、 E は入射X線のエネルギー、 N は読み出しノイズ、 ω はシリコンの平均解離エネルギー(~ 3.65 eV)、 F :ファノ因子である。このファノ因子というのは電子の個数による統計ゆらぎの *Poisson* 分布からのずれを表し、その値はシリコンでは $F = 0.12$ となる [4]。なお、XISのうちFI CCDのエネルギー分解能の値は6 keVにおいて約150 eVである。

2. 暗電流 I

暗電流とは、X線のイベントがきていなくとも流れる微弱な電流のことで、CCDの場合には、シリコン中の価電子帯及び伝導帯の間の1.15 eVのバンドギャップを越えた電子によるものである。ここに格子欠陥があると、伝導帯へ電子が励起されやすくなる、すなわち、暗電流が流れやすくなる。暗電流は温度依存性を持っており、

$$\exp\left(-\frac{E_g}{2k_b T}\right)$$

に比例する。 E_g はバンドのギャップエネルギー、 k_b はボルツマン定数、 T は絶対温度である。よって、CCDを冷却することによって、暗電流、つまりノイズを少なくすることができる。

3. ホットピクセルとフリッカリングピクセル

CCD画素の中には、X線が入射していないときでもほぼ常に信号を出すホットピクセル、頻繁にでたらめなタイミングで信号を出すフリッカリングピクセルというものがある。これらは地上にデータを転送した後、まわりのピクセルとの比較を行い、統計的に有為に頻度の高いピクセルを除去することで対処する。ホットピクセルは特定がたやすく容易に除去できるが、フリッカリングピクセルは特定が比較的困難である。

このようなピクセルを除去しきれず残してしまうと、そのピクセルを X 線イベントと誤認してしまい、X 線を正確に検出できなくなってしまう。これを防止するためには、ピクセルの格子欠陥により生じるホットピクセル及びフリッカリングピクセルを増加させないことが必要である。格子欠陥は暗電流に起因するので、暗電流を抑えるために軌道上では低温（-90 程度）で運用している。冷却にはコールドプレートと Thermo Electric Coolers(TEC) と呼ばれる二種類の冷却装置を用いる。コールドプレートで -40 まで冷却し、そののち各 CCD 素子あたり 3 台の TEC が CCD を -90 まで冷却している。

2.2.5 XIS の応答関数

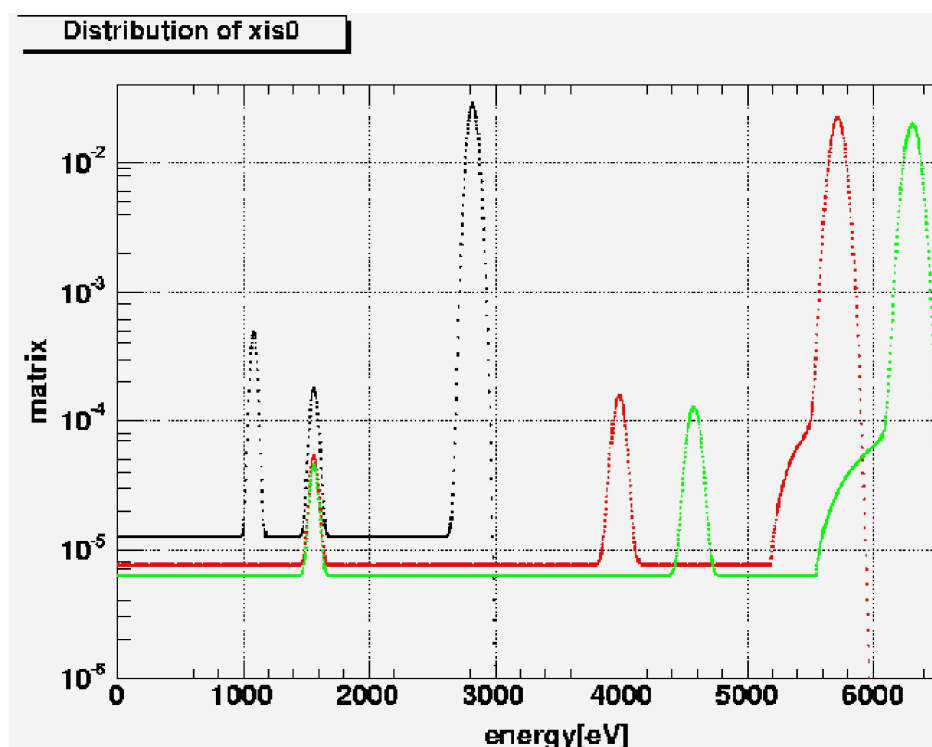


図 2.10: XIS の応答 (それぞれ黒が 3 keV、赤が 5.9 keV、黒が 6.4 keV に対応)

検出器は単色 X 線に対して単独の波高値をもった信号を出すというわけではなく、ばらつきをもつ。この信号の分布の形が応答関数であり、行列の形として表される。つまり、検出器上の信号ベクトル $D(PH)$ は、応答関数 $R(E, PH)$ により天体からのスペクトルのベクトル $S(E)$ が変化し、

$$D(PH) = R(E, PH) \otimes S(E) \quad (2.2)$$

となる。ここで、 PH は ADC の波高値、 E はエネルギーである。

この応答関数は、XIS チームによって地上試験、軌道上較正試験をもとに作成され、キャリブレーションファイルとして公開されている。実際に公開されているファイルから三種

のエネルギーの特性 X 線に対する XIS の応答を作成したものを図 2.10 に示す。横軸が検出される X 線のエネルギーであり、縦軸はそのエネルギーに表れる信号のものと X 線信号に対する割合を示したものである。それぞれ赤が 5.9 keV、緑が 6.4 keV、黒が 3.0 keV に対する応答である。

理想的にはそれぞれ特定のエネルギーのところでのみピークが存在するはずであるが、見て取れるように広がった構造を持っている。この応答関数スペクトルは主に 6 成分に分けることが出来る。(図 2.11)

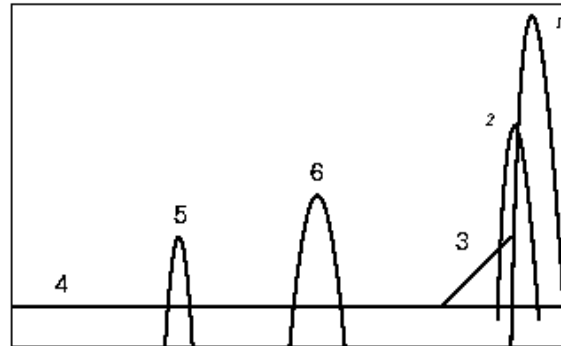


図 2.11: 応答関数の構成成分

もっとも占める割合が大きい 1 がメインのピークで、このピークのエネルギーが検出したイベントのもつエネルギーである。そのすぐ低エネルギー側にあるピーク 2 が、一部の電子が信号として出てこなかったもので、サブピークとなる。サブピークの出来る原因は画素の境界付近で起こったイベントのため、複数の画素に電子が分散されたものなどがある。

成分 3 は三角形の形となっているが、この成分が生じるメカニズムは高エネルギー側と低エネルギー側で異なる。高エネルギー側では 2 のサブピークと同じく一部の電子の分散などによるが、低エネルギー側では検出器の不純物によって吸収されてしまうことで起こる。

成分 4 のコンスタント成分は空乏層と不感層との境界付近での吸収によって一部の電子が不感層に移ってしまったことによるものである。

残る 2 つのピークである成分 5 と 6 はどちらも XIS を形成するシリコンによるものである。それぞれ成分 5 がシリコンの特性 X 線であり、成分 6 がシリコンの特性 X 線のエスケープイベントである。入射 X 線があるピクセル (ピクセル A とする) で吸収され、基底状態の電子を励起した後、高いエネルギー状態の電子が基底状態の空いたところに落ちる際に出る蛍光 X 線を別のピクセル (ピクセル B とする) で検出してしまったとき、これらが別のイベントと見なされ、ピクセル B にはピーク 5 が、ピクセル A にはピーク 6 が出る。そのため、成分 5 の生じるエネルギーはシリコンの特性 X 線のもつエネルギー $E_{Si} = 1.7 \text{ keV}$ である。一方、成分 6 のエネルギーは検出した X 線のもつエネルギーによって異なり、そのエネルギーの値 E_{esc} は入射した X 線のエネルギー E_{in} を用いて、

$$E_{esc} = E_{in} - 1.7 \text{ keV} \quad (2.3)$$

となる。

第3章 X線観測におけるバックグラウンド

3.1 観測に及ぼすバックグラウンドの影響

バックグラウンドとは、観測を行う天体以外からの X 線以外の信号のことで、主に宇宙線起源のものである。このバックグラウンドは、強度の弱い天体や広がった天体の観測において問題となり得る。

バックグラウンドは、大きく二種類に分類できる。宇宙背景 X 線放射 (CXB) と非 X 線バックグラウンド (NXB) である。それぞれ 3.2 節と 3.3 節で詳しく述べる。

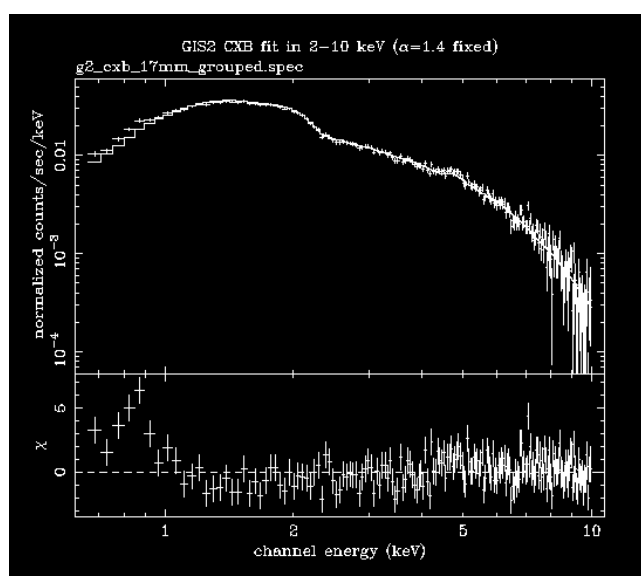


図 3.1: 『あすか』 GIS による CXB のスペクトル。データ (十字) とべき 1.4 のモデル関数 (ヒストグラム) でフィッティングを行ったものである。なお、装置のレスポンスをかけた状態で表示している。[6]

3.2 宇宙背景 X 線放射 (CXB)

宇宙背景 X 線放射 (CXB) とは、全天あらゆる方向に一様分布する宇宙起源の X 線信号であり、『すざく』 XIS のエネルギー帯の 10 keV 以下の領域では、図 3.1 のような乗数が 1.4 のべき関数のスペクトルをとる。この CXB は、1962 年に打ち上げられたロケットによる初の X 線観測で発見された。その後の観測により高エネルギー側までスペクトルの

測定が行われ、温度が約 40 keV の熱的制動放射に似た形をしていたため、当初は宇宙全体に分布する超高温ガスがその起源であるとも考えられてきた。

ただし、宇宙全体に広がる超高温ガスが起源であるならば、宇宙背景マイクロ波放射 (CMB) の形をゆがめることが予想されるが、1989 年打ち上げの宇宙背景放射探査機 (Cosmic Background Explorer; COBE) による CMB の精密測定によって、CXB の広がったガス起源説はほぼ否定され、暗い (遠方の) 活動銀河核などの重ね合わせであると考えられるようにはなった。しかし、その確実な証拠はなかった。

この状況を打破したのが、1993 年に打ち上げられた X 線観測用衛星『あすか』である。『あすか』は 2 ~ 10 keV のエネルギー帯で CXB の約 30 % 以上を点源に分解し、さらに CXB のスペクトルが AGN のスペクトルよりもより硬いというスペクトルパラドックスに解決の兆しを見いだした [7]。つまり、CXB の放射源は無数の点源からの X 線の重ね合わせによるものであるという証拠が初めて得られたのである。その後、1999 年打ち上げの *Chandra* 衛星によってほぼ完全に成分を点源に分解することができ、無数の点源の重ね合わせであることが確実なものとなった。

3.3 非 X 線バックグラウンド (NXB)

非 X 線バックグラウンド (NXB) とは宇宙からの X 線以外のバックグラウンドのことで、宇宙線 (荷電粒子) が起源である。さらに詳しく分類すると、荷電粒子と検出器とが直接反応し検出されるものと、荷電粒子と衛星を構成する物質とが反応することで生じた X 線を検出器が検出したものに分けられる。このいずれもが天体観測におけるノイズであり、装置の改良によって NXB をできるだけ下げるとともに、落としきれなかった成分を精度良く予測して差し引くことが高感度観測を行うために必要である。

3.3.1 South Atlantic Anomaly (SAA) とその影響

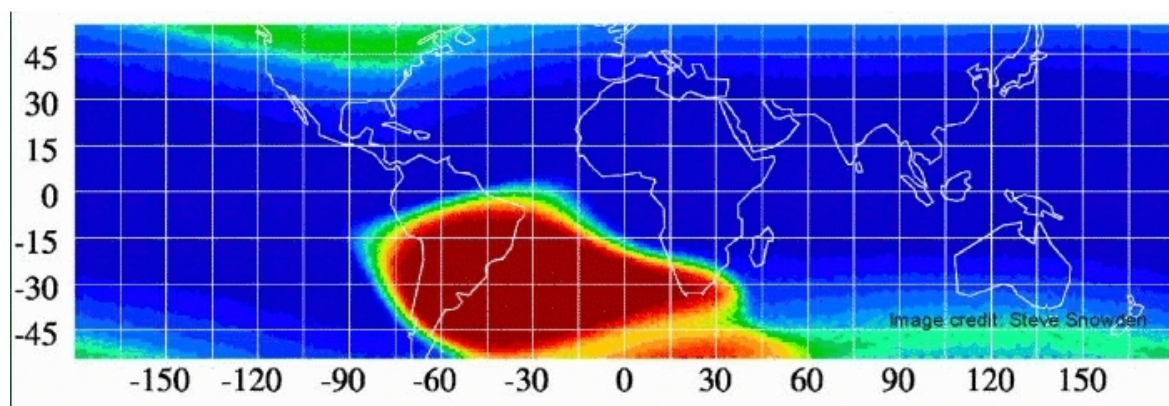


図 3.2: 荷電粒子のカウント数の map(赤が多く、青が少ない)[6]

South Atlantic Anomaly とは、南緯約 31° のブラジル ~ 大西洋上空にあり、宇宙線である荷電粒子の数が大きくはねあがる (300 keV での粒子数が他のエリアの約 1000 倍) 領域

である。図 3.2 に SAA 領域を示す。この図での南米～大西洋上空の赤い領域が SAA に相当する。その原因は地磁気を中心と地球の中心とのずれにあり、地磁気によるシールドが弱く、また荷電粒子が地磁気によって捕獲されることによるものである。

このエリア内においては、検出器はバックグラウンドとなる多数の荷電粒子を受け取ってしまうため、このエリア内のデータは使用できなくなる。また、100～200 MeV のエネルギーを持った陽子と検出器自身とが反応し、放射性同位体を形成し、検出器自身が放射性バックグラウンド源となってしまうため、『すざく』HXD のような高エネルギー X 線観測装置では、SAA 通過直後にバックグラウンドが高くなるという影響が見られる。

3.3.2 Cut Off Rigidity (COR) とその影響

地球に飛来する宇宙線粒子は、地磁気によって軌道を変えられ、シールドされたりトラップされたりする。この地磁気による宇宙線粒子をシールドする能力を表した指標が Cut Off Rigidity である。

低エネルギー荷電粒子は、地磁気に遮られ地表まで到達できない。このようにエネルギーや入射角によって、遠方からの荷電粒子は地表に到達したり、地表に触れずして遠ざかったりする。

地磁気によって荷電粒子の軌道が曲げられ、半径 r の円軌道をとるとき、荷電粒子の運動は、

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

であらわされる。 p は運動量、 m は荷電粒子の質量をそれぞれ表す。一方、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

$$r = \frac{p}{qB}$$

が成立し、さらに光速 c をかけてやると、

$$r = \frac{pc}{qcB} = \frac{R}{cB} \quad (3.3)$$

とあらわされる。この式の $R = \frac{pc}{q}$ を硬度 (Rigidity) とよび、電圧の単位をもち、通常 [GV] 単位で表す。COR とは、「鉛直方向から飛来した粒子が地表に到達するために必要な最低限の硬度」のことである。COR の値が大きいほど、地磁気によるシールド能力が大きくなる。ただし、宇宙線の主成分は陽子であり、GV 単位の rigidity はそのまま GeV 単位の運動量に対応する。そのため、COR を GeV 単位で表すことも多い。本論文も以降、COR を全て [GeV] 単位で表すことにする。

地表付近の地磁気は約 0.4[gauss](=10⁻⁴ T)、『すざく』衛星は高度 550 km 上空の地表付近を飛行しているので、対応する Rigidity は (3.3) 式より、

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

となるため、10 GeV 程度までの宇宙線粒子は地磁気の影響を大きく受けることとなる。

3.4 本研究との関係

3.3節で述べた通り、高感度の観測にはバックグラウンドの精度良い差し引きが必要となってくる。そのために、バックグラウンドを精度良く推測すること(モデル化)が必要となる。ここで、CXBはスペクトルが既知のものであるのに対し、NXBは衛星やその搭載機器によって異なる。また、次の章で詳しく述べるが、NXBが高エネルギー側でバックグラウンド成分として卓越する一方、信号強度は高エネルギー側ほど小さい。そのため、NXBを研究し、高い精度で差し引くことが高感度観測には必須となる。そのために、どのパラメータでバックグラウンドが予測できるのかを確立し、さらにそのパラメータでいかに正確にバックグラウンドの値を得られるかを知る必要がある。これが本研究の主内容であり、詳細は4章及び5章で述べる。

第4章 XIS の 非X線バックグラウンド の特性

本研究では、非X線バックグラウンド(NXB)の特性を調べるために2005年8月22日から2005年12月29日までの地没データを解析した。なお、この日付はおのおのの観測対象の観測開始の日付である。解析には、高エネルギー側でバックグラウンドの少ない(2.1.3参照)3台のFI CCD(XIS0、2、3)のデータをそれぞれたし合わせ、別々に解析を行った。足し合わせたデータのうち地没データの総積分時間は 3×3 モードのデータと 5×5 モードのデータで合計1165 ksであり、そのうち主に本解析に用いた 3×3 モードの完全夜地球(4.2.1参照)のデータは350 ksであった。今回用いたデータを、付録1に載せておく。

このデータを用いてXISバックグラウンドの宇宙線強度や検出器上の位置などへの依存性といった特性を調べ、バックグラウンドのモデル化を行った。以下、データセレクション及びバックグラウンド特性について詳しく述べる。

4.1 データセレクション

『すざく』のデータの中には観測に不向き、すなわちバックグラウンドの研究にも不向きなデータが存在する。そこで、観測データの中から不向きなデータの除去を行った。

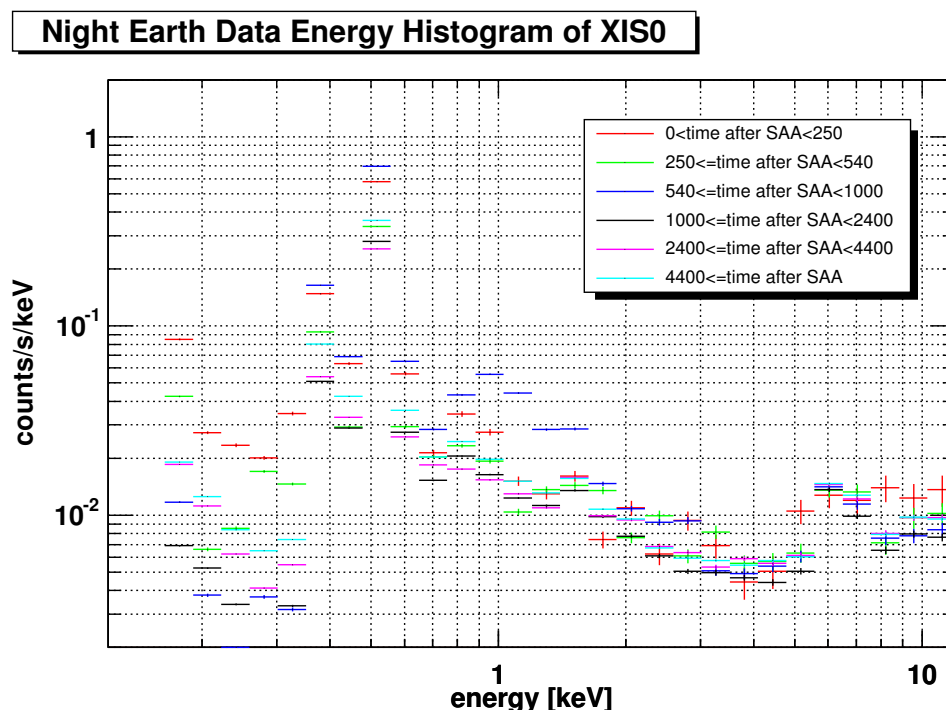


図 4.1: SAA 通過からの経過時間別のバックグラウンドスペクトル。XIS0 の 3×3 データで作成

4.1.1 SAA の影響するデータ除去

はじめに、当然除去すべきデータとして SAA 通過中に得られたデータが挙げられる。まずはこれの除去を行った。

さらに、SAA 通過直後は荷電粒子が多く、バックグラウンドが高いことから、通常の解析には使わない。そこで、SAA 通過後ある一定時間のデータを抜き去ることでバックグラウンドが安定した後のデータを得ることにした。図 4.1 は SAA 通過後の経過時間別にとった『すざく』の夜地球 (4.2 節参照) スペクトルで、XIS0 の 3×3 モードのデータで作成したものである。積分半径は、装置の隅にある較正線源を含まないように検出器中心 (512.5, 512.5) から 500 ピクセルの領域とした。これを見ると SAA 通過後 250 秒までのデータでは 5 ~ 10 keV のカウントレートが他のイベントのものよりも約 2 倍高くなっている。また、他の検出器 XIS2、3 でも同様の結果が得られた。そこで、SAA 通過後 250 秒までのイベントは解析に使用しないこととした。

4.1.2 光洩れの除去

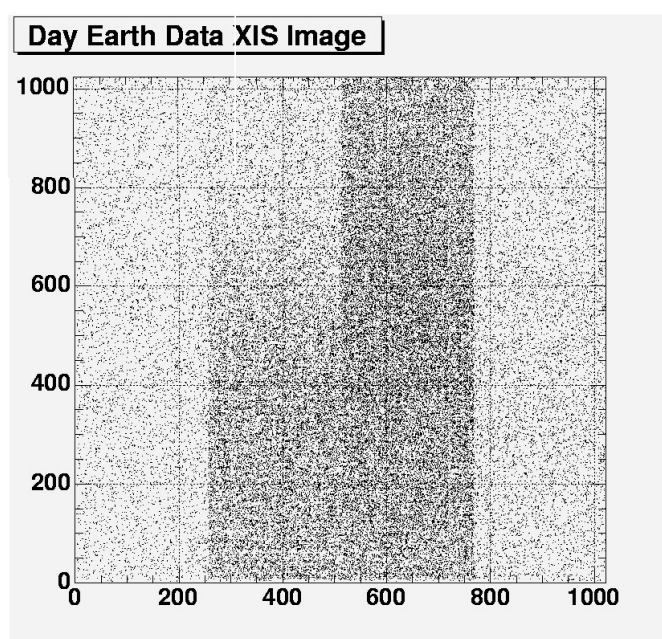


図 4.2: saturation を起こしている検出器のイメージ

次に、解析に使用することの出来ないデータとして、光洩れを起こしているデータがある。光洩れとは、衛星や検出器の筐体のわずかなすき間を通じ可視光や紫外線が入り込み、XIS がそれらを検出している現象である。光洩れを起こしている際には、データのカウントレートが異常に高くなったり、saturation を起こしてしまったりするため、観測には不向きである。saturation とは、イベント数が異常に多くなった結果、読み出し回路、信号処理系の能力を越え、CCD 上の一部の領域しか読み出せなくなる現象で、図 4.2 のように不均一なイメージになってしまう。

そこで、光洩れの回避方法として、5 ~ 10 keV のエネルギー領域でのカウントレートで閾値を設け、その閾値を越えたカウントレートのデータの除去を行った。積分領域は、

やはり検出器中心 (512.5, 512.5) から半径 500 ピクセルの領域で、 3×3 と 5×5 の両方のデータで同じ方法をとった。図 4.3 が今回解析に用いた 3×3 のデータの時間ごとのカウントレートの値である。赤いラインが設けた閾値 0.5 count/s で、その値はカウントレートの平均値のおよそ 10 倍である。

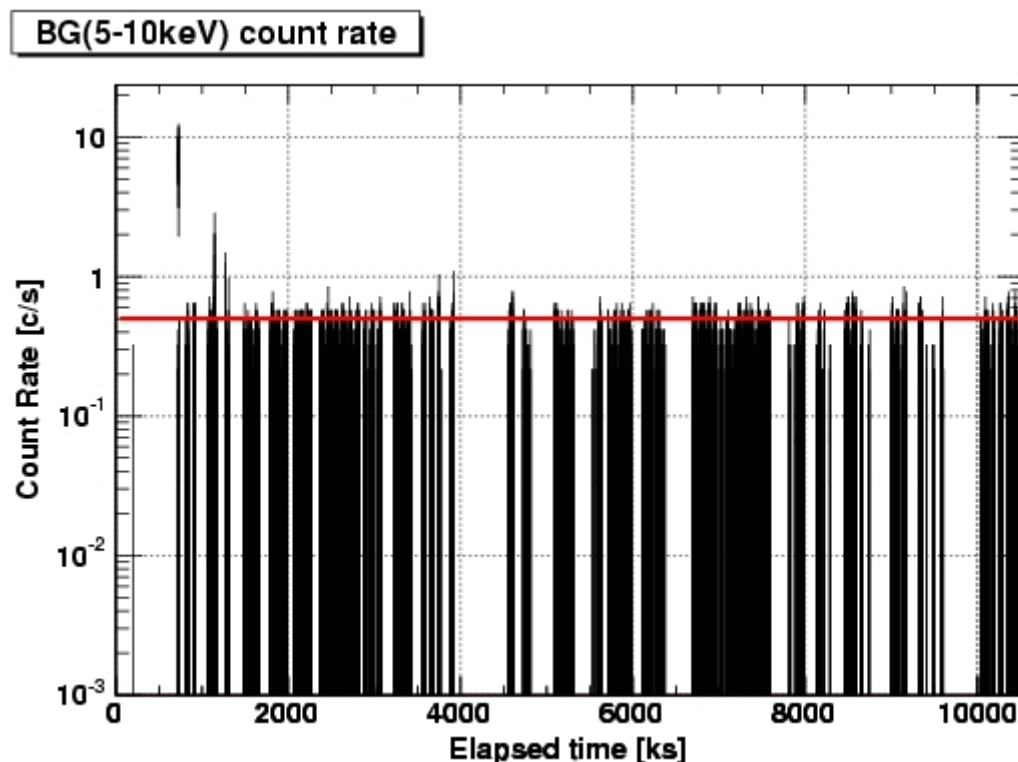


図 4.3: 3×3 データ夜地球データにおける 5 ~ 10 keV のカウントレートの時間ごとの分布。赤いラインが光洩れ対策のために設けたスレッシュホールドラインで 0.5 count/s。検出器中心から 500 ピクセルで積分した。

4.2 全地没データの解析

4.2.1 ブランクスカイと地没データ

3章で述べた通り、バックグラウンドには CXB と NXB がある。この両者を比較するためにまずブランクスカイと地没データの比較を行った。

ブランクスカイには X 線源がなく、そのスペクトルから CXB と NXB の和が得られる。ブランクスカイデータとして、北黄極 (North Ecliptic Pole; NEP : 9 月 2 日観測) の積分時間が 29 ks のデータを用いた。この NEP は季節によらずどの時期でも見えるため、ブランクスカイとしてよく観測に用いられる領域である。

一方地没というのは、観測中に衛星『すざく』の視野に地球が映り込んでしまい、観測すべき X 線天体が見えなくなってしまう状態であり、NXB の研究に適したものである。地没のデータは昼地球と夜地球とに分けて比較を行った。

ここで、『すざく』XRT が太陽光の当たっている地球の点を見ているものが昼地球、太陽光の当たっていない点を見ているものが夜地球であり、昼地球は NXB と太陽からの照

Energy Histogram

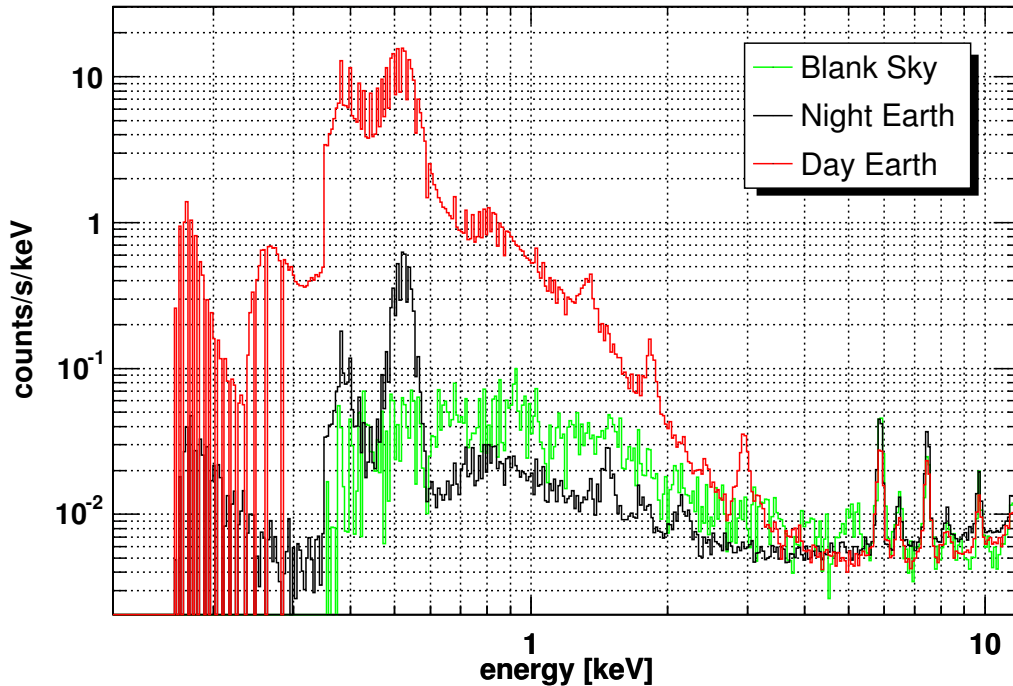


図 4.4: 昼地球 (赤) と夜地球 (黒) 及びブランクスカイ (緑) の XIS0 のスペクトル。CCD の中心から半径 500 ピクセルの領域で積分

り返しの光によるスペクトルの重ね合わせとなっている。一方、夜地球はほぼ NXB のみのスペクトルとなる。実際に昼地球と夜地球、及びブランクスカイそれぞれのスペクトルを重ね合わせたものを図 4.4 に示す。これは XIS0 のデータから作成したもので、おのおのの積分時間はブランクスカイが 29.1 ks、夜地球が 541 ks、昼地球が 351 ks である。この図から、1 keV 以下のエネルギー領域では昼地球のバックグラウンドが夜地球、ブランクスカイよりも 10 倍以上高いのに対し、4 keV 以上の高エネルギー領域では昼地球と夜地球のバックグラウンドが同程度となっているのが分かる。このことから、低エネルギー側では太陽からの照り返しの成分が大きいために昼地球のバックグラウンドが高いが、高エネルギー領域では照り返し成分よりも NXB 成分の方が支配的となることが分かる。さらに、夜地球のバックグラウンドとブランクスカイのスペクトルを比較すると、昼地球と夜地球のバックグラウンドが同程度となる 4 keV 付近ではブランクスカイの方がまだ若干強度が高いが、さらに高エネルギー側の 7 keV 付近ではブランクスカイと地没のバックグラウンドが同程度となる。つまり、高エネルギー帯ではバックグラウンドは NXB が完全に支配的となり、その境界が約 7 keV である。

図 4.4 の低エネルギー側では、ブランクスカイよりも夜地球の方がバックグラウンドが高くなっている。その原因は、夜地球の中には地球による太陽からの照り返しの光の影響を受けてしまうものが存在するためである。夜地球の定義は「『すざく』の望遠鏡の見える地球の点が夜」であったが、『すざく』衛星が見える範囲に昼地球が存在する可能性がある。そのため、夜地球のうち『すざく』から見える領域に昼地球がうつりこんでいないものを完全夜地球と定義した。完全夜地球と通常夜地球の XIS0 のスペクトルを図 4.5 に示す。積分時間はそれぞれブランクスカイが 29.1 ks、通常夜地球が 541 ks、完全夜地球が 370 ks である。おのおののスペクトルを比較すると、高エネルギー側ではバックグラウンドに大きな違いはないが、低エネルギー側では通常夜地球では太陽からの照り返

Energy Histogram

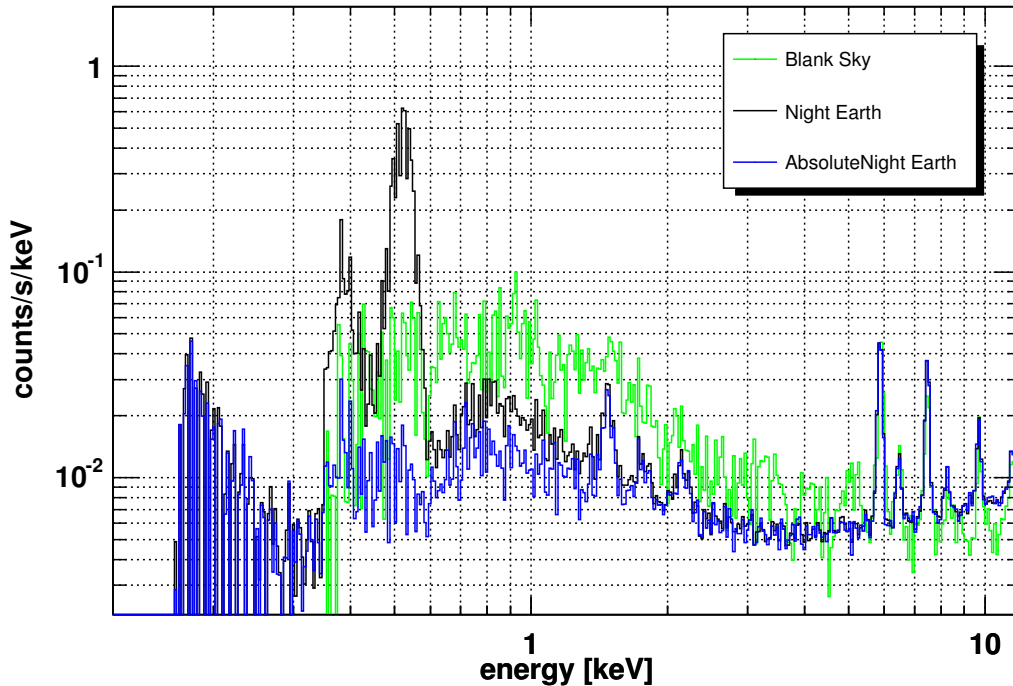


図 4.5: 夜地球 (黒) 及び完全夜地球 (青) とブランクスカイ (緑) のスペクトル。積分半径は図 4.4 と同じ。

し成分が見て取れる。完全夜地球の積分時間は通常夜地球の積分時間の約 7 割と、十分な量のデータが存在するため、今後の解析では完全夜地球のデータを用いた。

CCD モードにより NXB のスペクトルに違いがあるか否かを見るために、各々のモードで完全よる地球スペクトルを作成したものを図 4.6 に示す。3 × 3 データの積分時間は前述のとおり 370 ks、一方、5 × 5 の積分時間は 132 ks である。なお、通常の夜地球の積分時間が 183 ks であったため、5 × 5 データの場合も完全夜地球データは夜地球データ全体の約 7 割存在する。この 2 つのスペクトルを比較すると、エネルギー帯全体に渡り 5 × 5 のほうがバックグラウンドが低いことが分かる。さらに高エネルギー帯では 3 × 3 データではエネルギーが高くなるにつれ顕著にバックグラウンドが上がっていると見て取れる。このことから、3 × 3 のデータと 5 × 5 のデータはまとめてバックグラウンドを見ることはできない。

以上のことから、結論として、

- CXB は低エネルギー側、NXB は高エネルギー側で観測の際のバックグラウンドとして支配的であり、その境界はおよそ 5 keV 付近に存在する。そのため、NXB の解析には 5 keV 以上の高エネルギー領域を使用するのが良い。
- 完全夜地球と夜地球の比較から、夜地球の低エネルギー側には太陽光の照り返しと思われる成分が存在し、完全夜地球ではその成分は存在しない。完全夜地球でも十分な積分時間があるので、解析には完全夜地球のみを用いる。
- 昼地球には地球からの太陽光の照り返し成分が存在しているが、高エネルギー側になるとバックグラウンドに対する寄与はなくなる。よって、必要ならば昼地球データも足して統計を上げることも可能である。

Energy Histogram

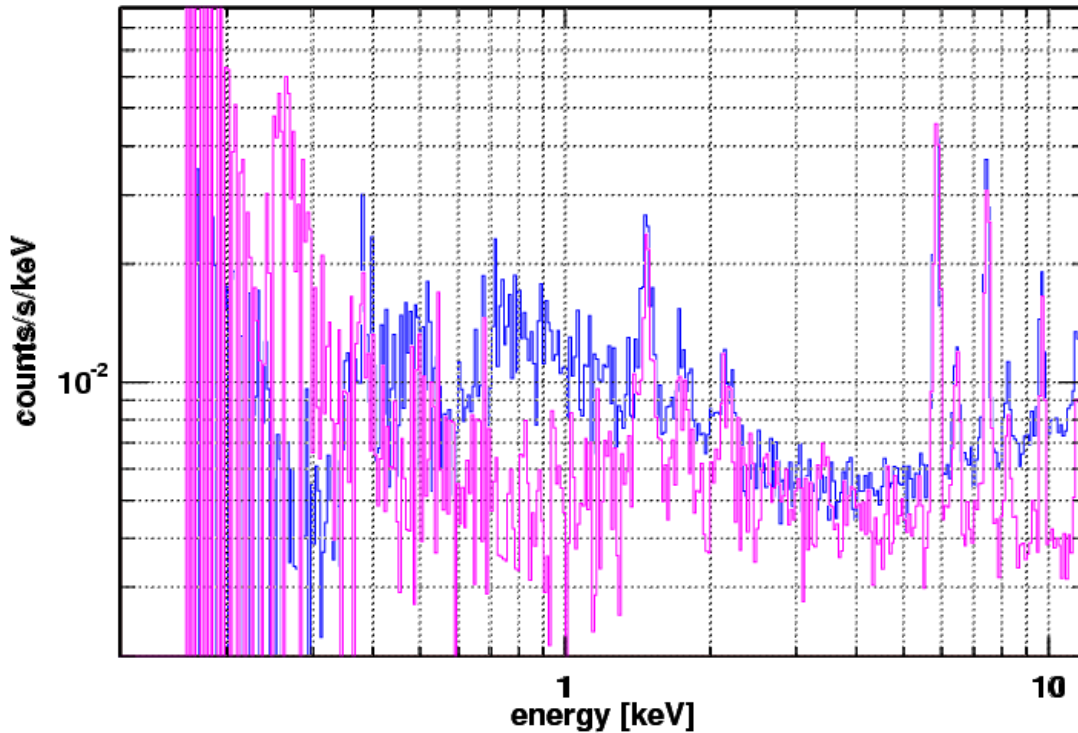


図 4.6: XIS0 による完全夜地球のスペクトル。青が 3×3 、桃色が 5×5 によるもので、検出器中心から半径 500 ピクセルで積分

- 3×3 データと 5×5 のデータでは NXB の強度が異なっているため、同一データとしてまとめてバックグラウンドを見ることはできず、各々別々に調べるべきである。ということが分かった。

4.2.2 ライン成分と連続成分

NXB のさらに詳細な特質を調べるため、NXB が支配的な 5 keV より高エネルギー領域を、ライン成分及び連続成分に分けて考えた。図 4.5 及び 4.6 のスペクトルに見られるラインのエネルギーとそのエネルギーから同定される核種 ([8] 参照) を表 4.1 に記す。ここで、5.9 keV と 6.5 keV のラインは較正線源 (キャルソース) によるものであり、その他は XIS の筐体を構成する原子に起因する特性 X 線であると考えられる。

このラインを除いた連続成分スペクトルはエネルギーの冪関数として表された。高エネルギーになるにつれて傾きが顕著に上がっていった 3×3 データではフラックス F [count/ks/keV] とエネルギー E [keV] との関係式は、およそ

$$F = 2.7E^{0.44} \quad (4.1)$$

であった。一方、 5×5 では 5 keV 以上の領域でのフラックスはエネルギーに対し、

$$F = 4.0 \quad (4.2)$$

のコンスタントな値をとった。

この NXB スペクトルの、検出器上位置依存性や時間変動の評価、宇宙線の量との相関を詳しく調べることにした。

表 4.1: ライン成分一覧

ラインのエネルギー (keV)	ラインの特性 X 線
5.9 keV	Mn- K_{α}
6.5 keV	Mn- K_{β}
7.5 keV	Ni- K_{α}
8.3 keV	Ni- K_{β}
9.7 keV	Au- L_{α}

4.3 時間によるバックグラウンドの変化

『すざく』の前身の X 線観測衛星『あすか』の X 線 CCD である SIS では、時間の経過とともに格子欠陥が増加し、それにともないホットピクセルと暗電流が増加した結果、打ち上げから時間が経つほどバックグラウンドレベルが上がってしまうという現象が見られた。その結果、観測開始から 1 年半の時点で 0.7 keV 以下の低エネルギー領域でのバックグラウンドが観測開始時のバックグラウンドの約 5 倍にも増加した。 ([8] 参照)

AbsoluteNight Earth Data of XIS0 Energy Histogram

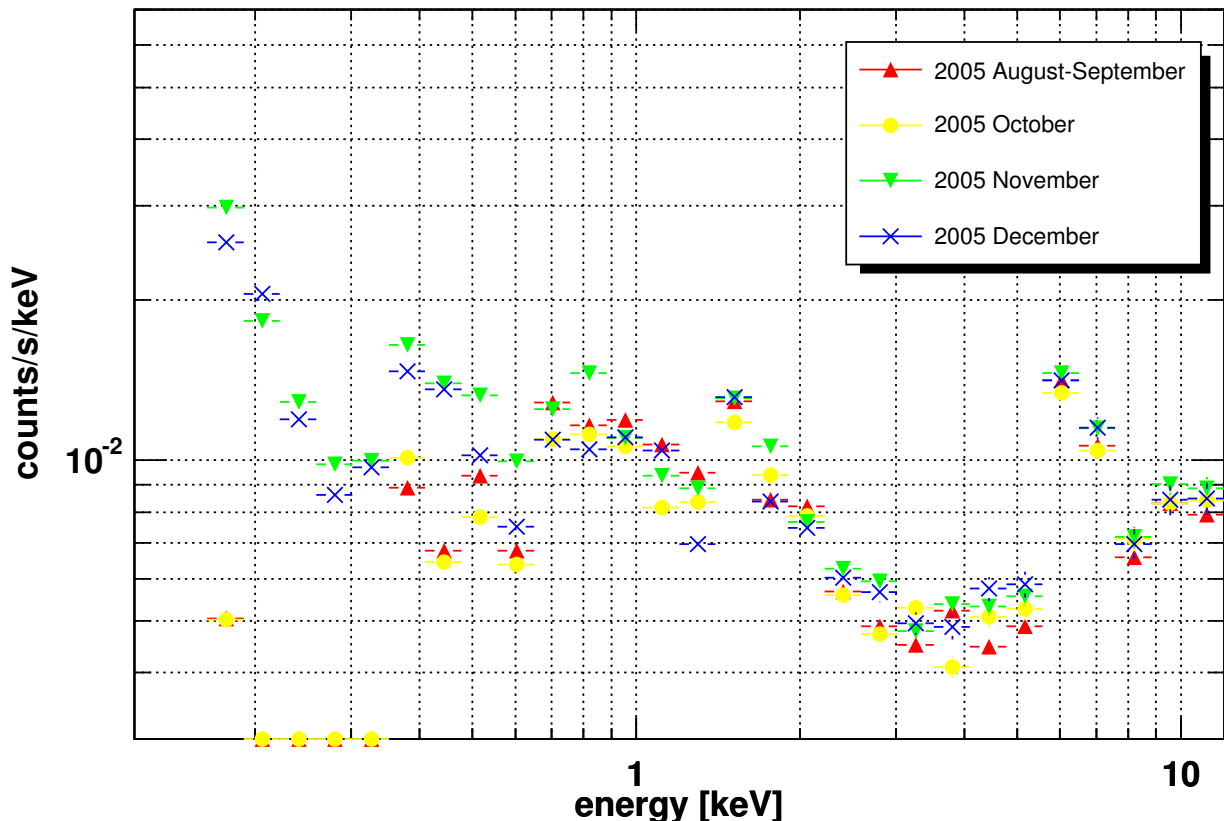


図 4.7: XIS0 の 3 × 3 データから作成した観測開始からの時間ごとのスペクトル。5 keV 以上の高エネルギー側は時期による顕著な違いが存在しない。他の XIS でもこれと同様の結果が得られた。

『すざく』は打ち上げから半年しか経っておらず、さらに 2.2.4 で述べた通り暗電流対策が施されているため、時間による影響は少ないと期待される。さらに、本研究の主な対

象は 5 keV 以上の高エネルギーのバックグラウンドであるが、念のため打ち上げ後の経過時間によってバックグラウンドが本当に増加していないかどうかを確認した。打ち上げ後の経過時間を分割し完全夜地球のスペクトルをとったものが図 4.7 である。この図は月ごとの観測データのバックグラウンドスペクトルであり、赤が 8~9 月、黄が 10 月、緑が 11 月、青が 12 月のデータである。ただし、時期によって宇宙線強度にばらつきが出ないようにするため宇宙線強度のモニタである PINUD の値が 300 以下になるような範囲でカットを行っている。(4.4 節参照)

この図から、5 keV 以上の高エネルギー領域では時期によるバックグラウンドの強度の誤差が 10 % 以内におさまっていることが見て取れる。結果として、今回用いたデータにおいては打ち上げからの経過時間に対する依存性は見て取れないと判断し、全観測データを積分してバックグラウンドの宇宙線強度と位置依存性を調べることにした。なお、0.3 keV 以下の領域に見られるバックグラウンド強度の大きな違いは、ディスクリレベルの変更によるものである。一方、0.7 keV 以下の時期による違いは、地球によって照り返された太陽光の洩れ込みに時期ごとに差が出ているためであると考えられる。

4.4 COR 及び HXD-PIN による粒子モニタとの相関

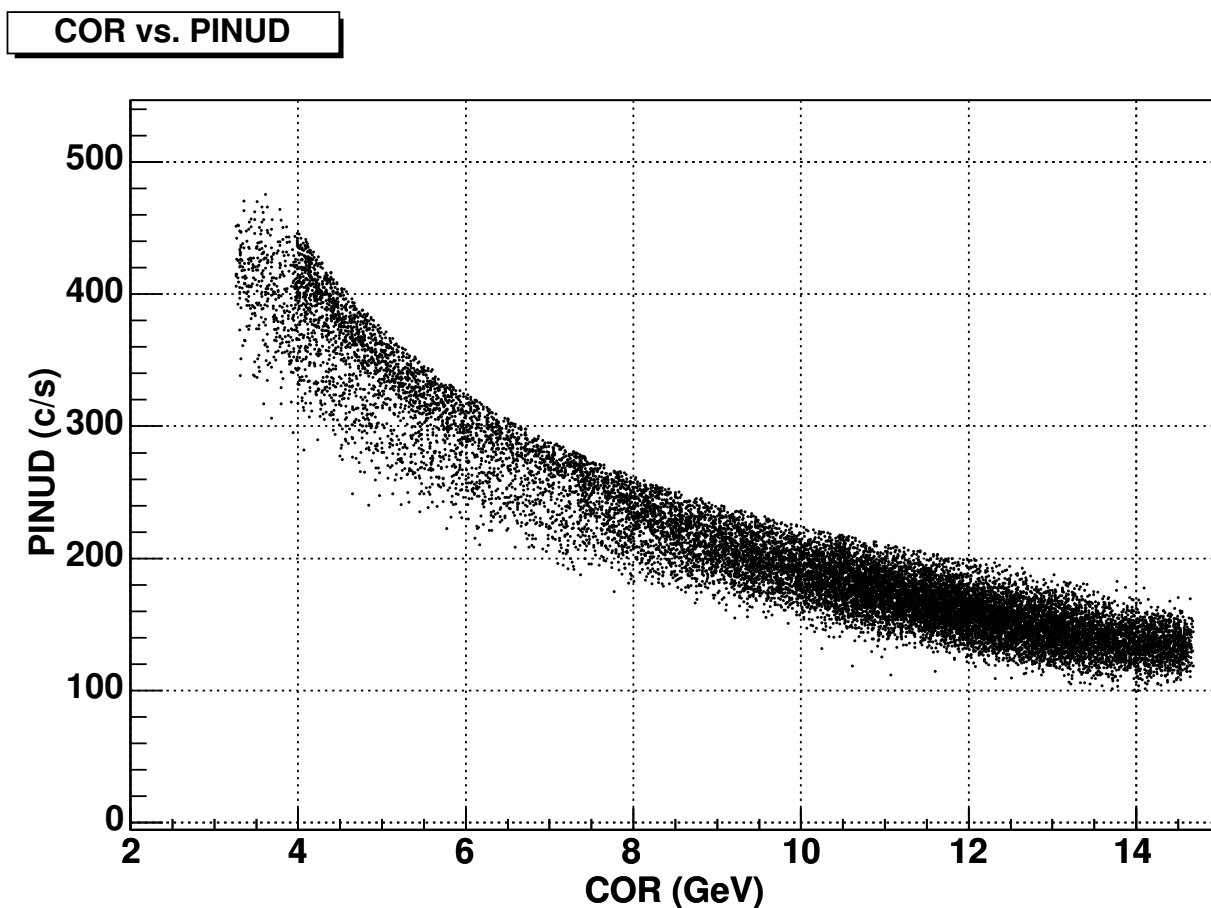


図 4.8: Cut Off Rigidity と HXD-PIN による粒子モニタの値との相関

バックグラウンドを考える上で、検出器に飛来した荷電粒子数は大きく影響する要因の

表 4.2: COR ソート

領域	Cut Off Rigidity の範囲	積分時間
area1	$COR < 4[\text{GeV}/c]$	8.4 ks
area2	$4 \leq COR < 6[\text{GeV}/c]$	39.8 ks
area3	$6 \leq COR < 8[\text{GeV}/c]$	31.0 ks
area4	$8 \leq COR < 10[\text{GeV}/c]$	55.0 ks
area5	$10 \leq COR < 12[\text{GeV}/c]$	105.5 ks
area6	$12 \leq COR < 14[\text{GeV}/c]$	104.0 ks
area7	$COR \geq 14[\text{GeV}/c]$	26.4 ks

一つである。そのため、COR 及び PINUD という 2 種類のパラメータに対する依存性を検討した。

COR は 3.3.2 で述べたように、宇宙線のシールド能力の指標であり、COR の値が大きいほど宇宙線強度が小さく、いいかえるとバックグラウンドが小さくなる。COR は『あすか』など様々な衛星でバックグラウンドを予想する指標として活用されてきた。

一方で PINUD は HXD PIN 検出器を用いた粒子モニタ (4.4.2 参照) であり、宇宙線強度を直接測定している。したがって、PINUD が高いほど XIS のバックグラウンドも高くなると予想される。そこで、XIS の NXB を表す指標としてどちらがより優れているのかを詳しく調べることにした。図 4.8 に COR と PINUD の関係を示しておく。このように両者は反相関の関係を持つ。

4.4.1 COR に対する依存性

Cut Off Rigidity(COR) は、前節で述べた通り、地磁気による荷電粒子をシールドする能力の指標である。そこで、COR の値でソートし、バックグラウンドレベルとの相関を調べた。『あすか』においても COR は $2[\text{GeV}/c]$ ごとに分類され、バックグラウンドとの相関が調べられてきたため、今回の解析でもこの方法をとった。それぞれのカテゴリごとの COR 値を、解析に用いた 3×3 の完全夜地球のデータのおおのこの領域の積分時間とともに表 4.2 に記す。分類した各々のカテゴリでのスペクトルは図 4.9 にまとめた。例によって、これは検出器中心 (512.5, 512.5) から 500 ピクセルでの領域で積分したものである。予想通り、COR の値が増加するのに応じバックグラウンドのカウントレートは減少していることが分かる。

また、図 4.10 には 3×3 及び 5×5 の XIS0 のデータから作成した COR のヒストグラムを示す。この図から分かるように、 5×5 のデータでは COR のカバーする領域も限定されており、総積分時間も 350 ks と少なかったため、この COR 値でのソートを行って PINUD との比較を行うことはしなかった。

4.4.2 HXD-PIN による粒子モニタとバックグラウンドの関係

次に用いたのが、HXD-PIN による粒子モニタのカウントである。

HXD-PIN 検出器は 2 種の閾値を持っており、10 keV のエネルギーレベルに設定された Lower Discriminate (PINLD) と 100 keV のエネルギーレベルに設定されている Upper Discriminate (PINUD) がある。PINLD は PIN 検出器が検出する X 線の選定に、PINUD

Night Earth Data Energy Histogram of XIS0

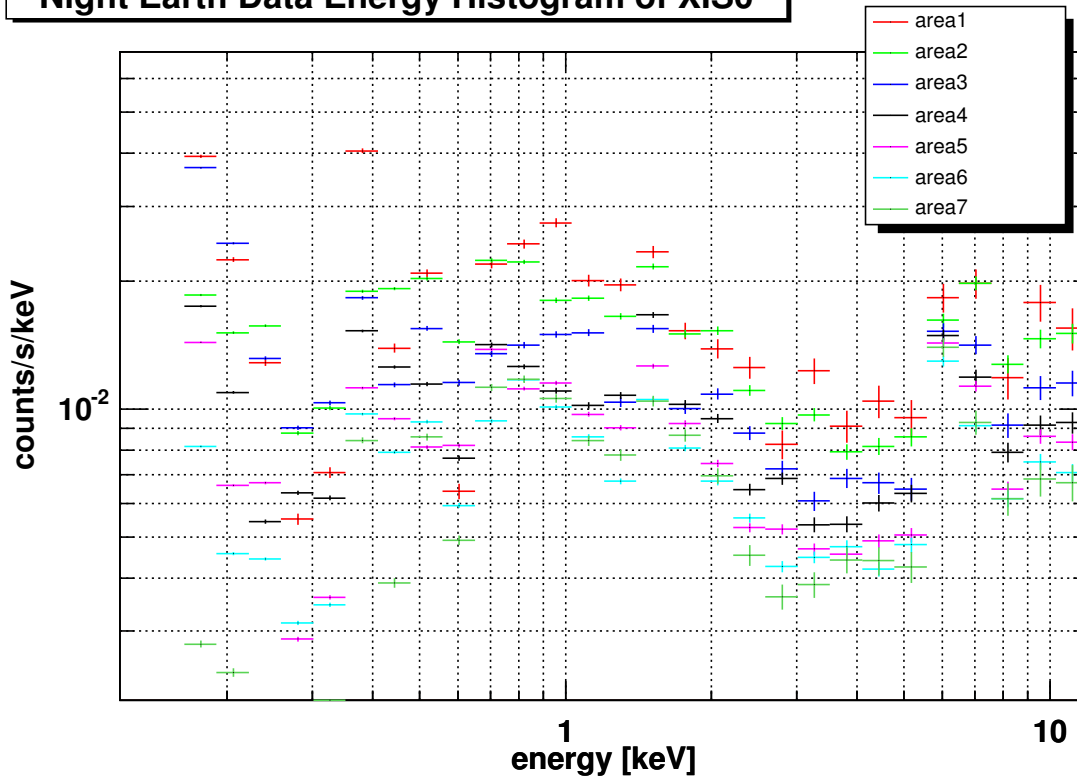


図 4.9: XIS0 の 3 × 3 データの Cut Off Rigidity の値ごとのスペクトル

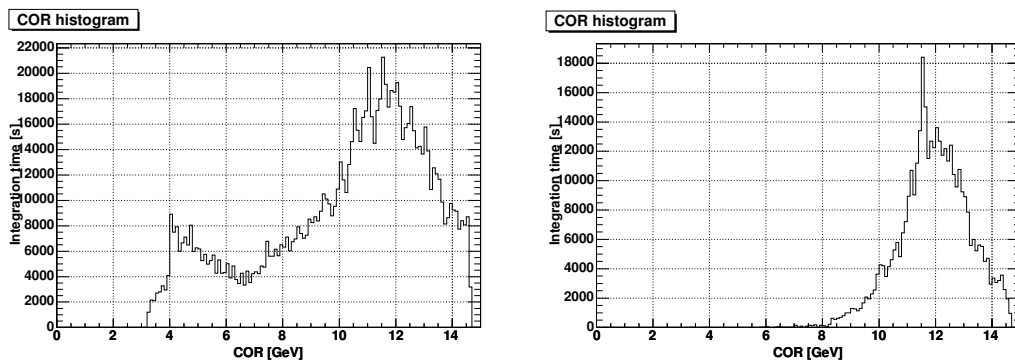


図 4.10: COR のヒストグラム。右が 3 × 3 のデータから、左が 5 × 5 のデータからそれぞれ作成したもので、どちらも SAA を除いた全地没データでの COR 分布である。

はバックグラウンドとなりうる宇宙線のモニタとして用いられている。HXD は SAA を通過する際には PMT の劣化を防ぐ目的で電源を落とすが、SAA 中の荷電粒子のカウントを行い、HXD の放射化モデルに用いるために PIN 検出器にだけは電圧がかけ続けられ、PINUD だけは『すぎく』が SAA を飛行中でもカウントされる。ただし、スケーラーが回りきってしまうのを防ぐために PINUD のカウント数が SAA 以外の領域を飛行しているときの 1/16 となる。そこで、本解析ではカウント数の SAA 中とそれ以外との違いを補正した上で、宇宙線強度のパラメータとして PINUD を用いた。

図 4.11 は 3 × 3 データと 5 × 5 データのそれぞれから作成した PINUD のヒストグラムである。3 × 3 データでは PINUD の値が 450[c/s] 程度まで分布しているのに対し、5 × 5 データでは PINUD が 250[c/s] 以上のものがほとんどないことが分かる。そのため、PINUD

表 4.3: PINUD ソート

領域	PINUD の範囲	積分時間
area1	$406 \leq PINUD < 500$	8.7 keV
area2	$289 \leq PINUD < 406$	39.3 keV
area3	$232.5 \leq PINUD < 289$	31.2 keV
area4	$194 \leq PINUD < 232.5$	55.3 keV
area5	$161.5 \leq PINUD < 194$	104.7 keV
area6	$133 \leq PINUD < 161.5$	104.0 keV
area7	$100 \leq PINUD < 133$	26.7 keV

ソートにも COR ソートと同様、 3×3 データのみで行った。ここで、先ほどの COR のソート時に分類した 7 カテゴリーの積分時間と合うよう COR に対応した PINUD のカテゴリを定義し、完全夜地球のスペクトルを調べた。そのカテゴリー一覧を表 4.3 に、スペクトルを図 4.12 に示す。なお、 3×3 データの積分時間も表 4.3 にともに記しておく。

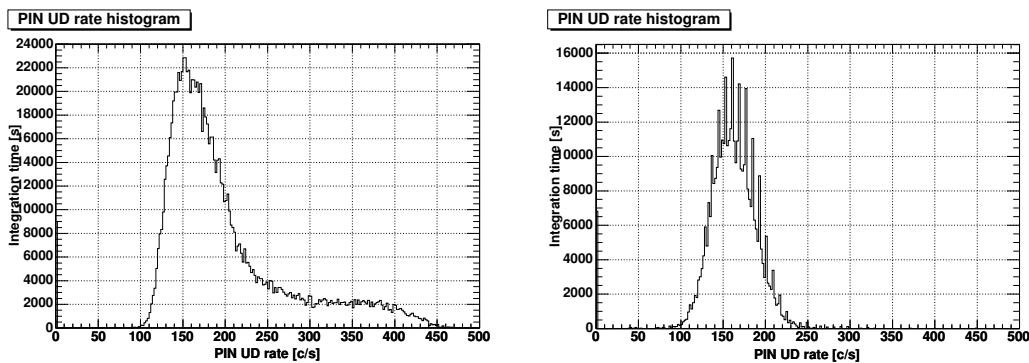


図 4.11: PINUD のヒストグラム。左が 3×3 のデータから、右が 5×5 のデータから作成したもので、どちらも SAA を除いた全データでの分布である。

スペクトルを見ると、PINUD が増加するにつれバックグラウンドの値が高くなっている。ただし、6 keV 付近では PINUD の値に対する依存性が小さい。その原因を調べるためにエネルギーの刻を細かくしたスペクトルを図 4.13 に示す。この図から一定の値をとっているのは 5.9 keV のところであることが分かる。これは較正線源によるもので、宇宙線起源の X 線とは異なる。そのため、宇宙線強度のパラメータである PINUD には依存せず一定値をとる。その他のライン (4.2.2 参照) は PINUD の値によって変動する。つまり、5.9 keV 以外のラインは宇宙線起源の蛍光 X 線であることが言える。

以上のことから、NXB が支配的となる高エネルギー領域では、較正線源のエネルギーを除き、PINUD に応じバックグラウンドの値が高くなることが言えた。ただし、COR と PINUD のソートで同じエリアを比較すると、スペクトルがまったく同じであるというわけではない。つまり、一見奇妙なことに、積分時間が同じになるよう分類しているにもかかわらず、COR と PINUD とでバックグラウンドに対する影響が異なる。そこで、COR と PINUD でバックグラウンドに与える影響についてより詳しく調べることにした。

ここで図 4.7 をもう一度見てみると、COR と PINUD は一対一対応するわけではなく、ばらばらなことが分かる。そこで、本解析に用いた領域の COR 及び PINUD の分布を図 4.14 に示す。

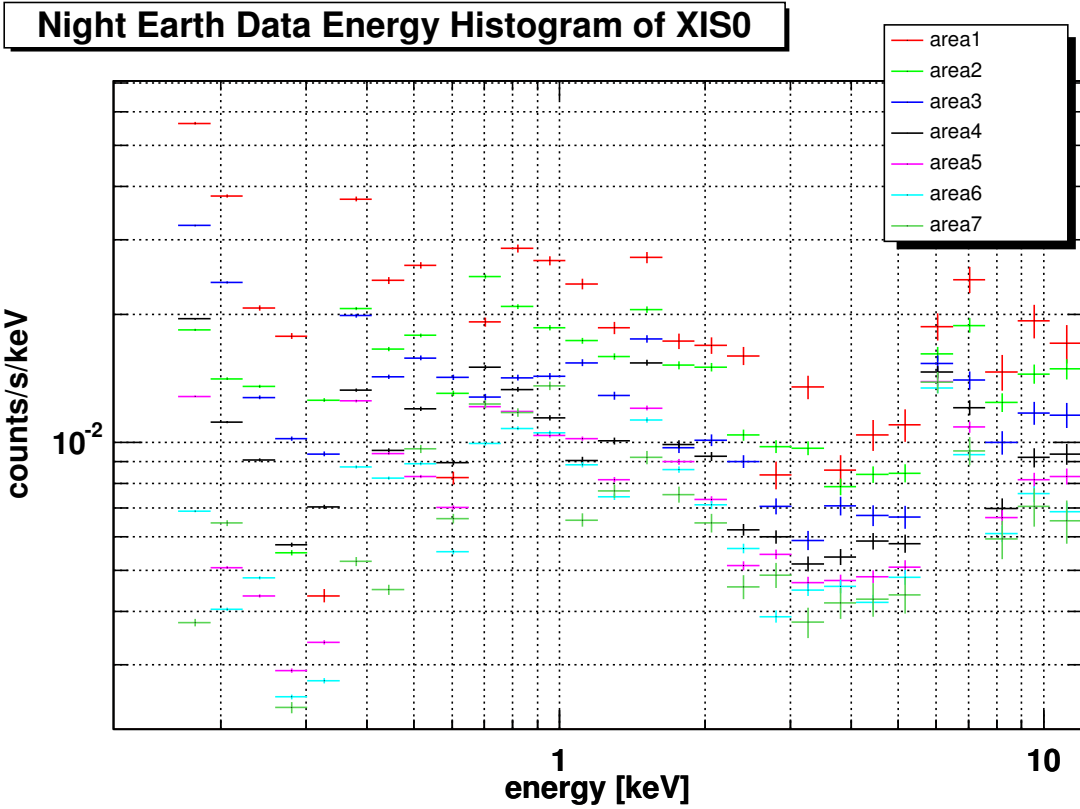


図 4.12: XIS0 の 3 × 3 データの PIN UD の値ごとのスペクトル

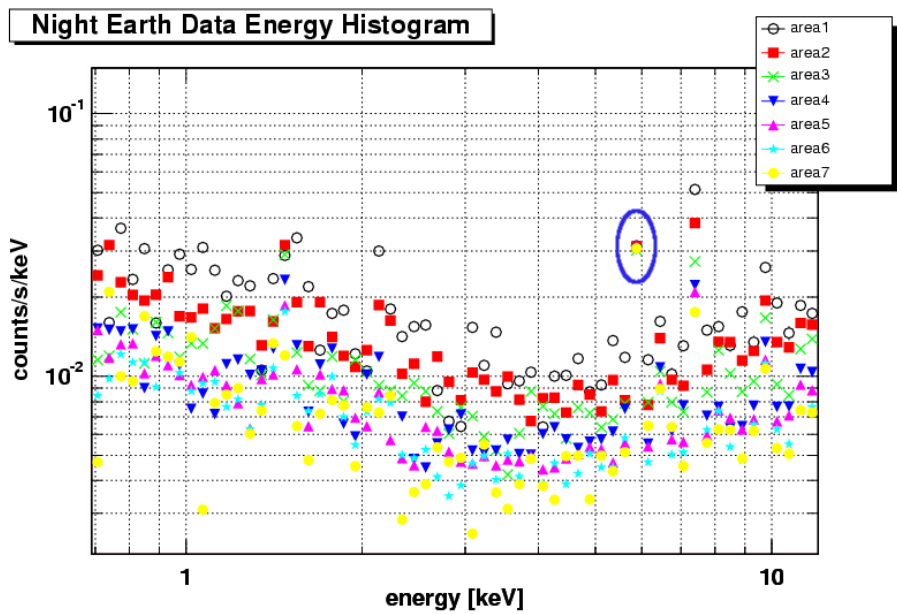


図 4.13: 夜地球スペクトルにおける 5.9 keV の Fe 輝線 (楕円で囲んだもの)。

この図を見ると、PINUD と COR とで宇宙線強度の分布に差が出ていることが分かる。これは、『すざく』のデータ中の COR の値が『ぎんが』時代に作成された COR マップをもとにしており、地磁気の向きの永年変化によってマップが古くなっている可能性が高いためである。この PINUD と COR マップのずれを定量的に見るために地球上の衛星の位置ごとに分けて PINUD と COR の相関を調べた。まずは、北半球と南半球で分け相関

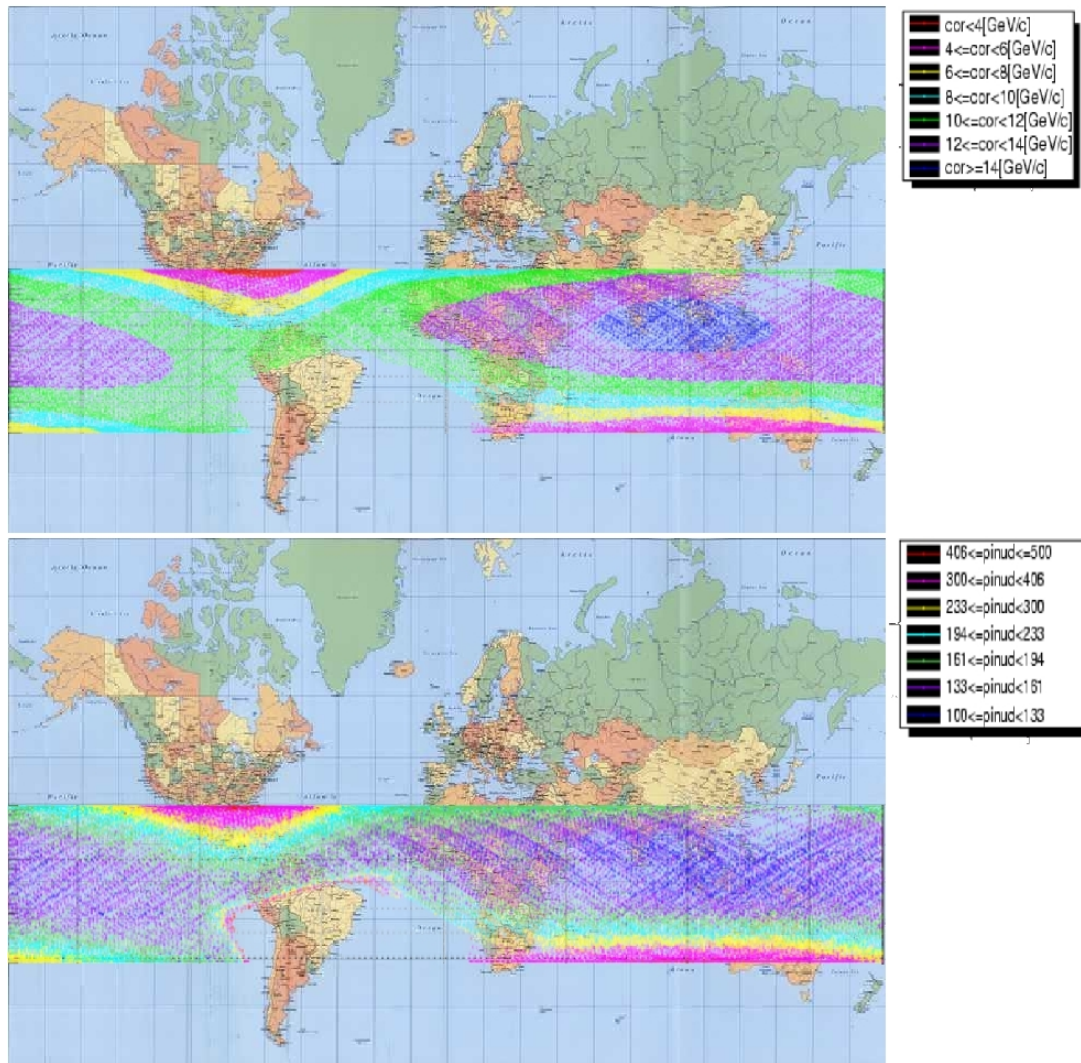


図 4.14: COR(上) と PINUD(下) の衛星軌道上での分布。赤が宇宙線強度が高く、青が宇宙線強度の低い領域。

をとった。その結果のグラフを図 4.15 の左に示す。それぞれ赤が南半球、青が北半球の COR と PINUD の相関のグラフを表している。このグラフから、北半球のほうがばらつきが大きく、南半球と比較して北半球では PINUD は低い値をとりうる事が分かる。次に、北半球の領域内で経度による相関のばらつきを調べた。その結果が図 4.15 の右のグラフである。このグラフでは緑色が経度 280 度 ~ 360 度の、黒がそれ以外のどちらも北半球の領域での相関である。つまり、経度 280 ~ 360 度の領域ではその他の領域よりも COR に対して PINUD の値が低くなっていることが分かる。なお、この領域はちょうど SAA の北側の領域に相当する。

以上のことから、同じ COR の値であっても地球上の場所により PINUD の値、すなわち宇宙線強度が異なり、XIS のバックグラウンドにも違いが出るものと予想される。そこで、北半球と南半球で別々に、検出器中心から半径 500 ピクセルの領域の 5 keV 以上の領域のカウントレートを積分し、COR と PINUD それぞれのパラメータの変動とともに図 4.16 に表した。

上のグラフが COR を横軸に、縦軸に NXB カウントレートをとったもので、下のグラフ

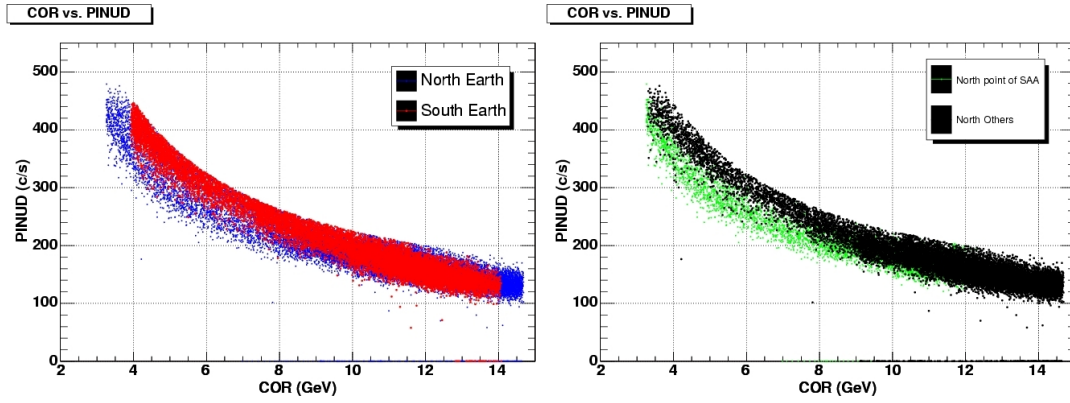


図 4.15: PINUD vs COR(左が北半球と南半球で、右が SAA の北側とそれ以外の北半球で分けたもの)

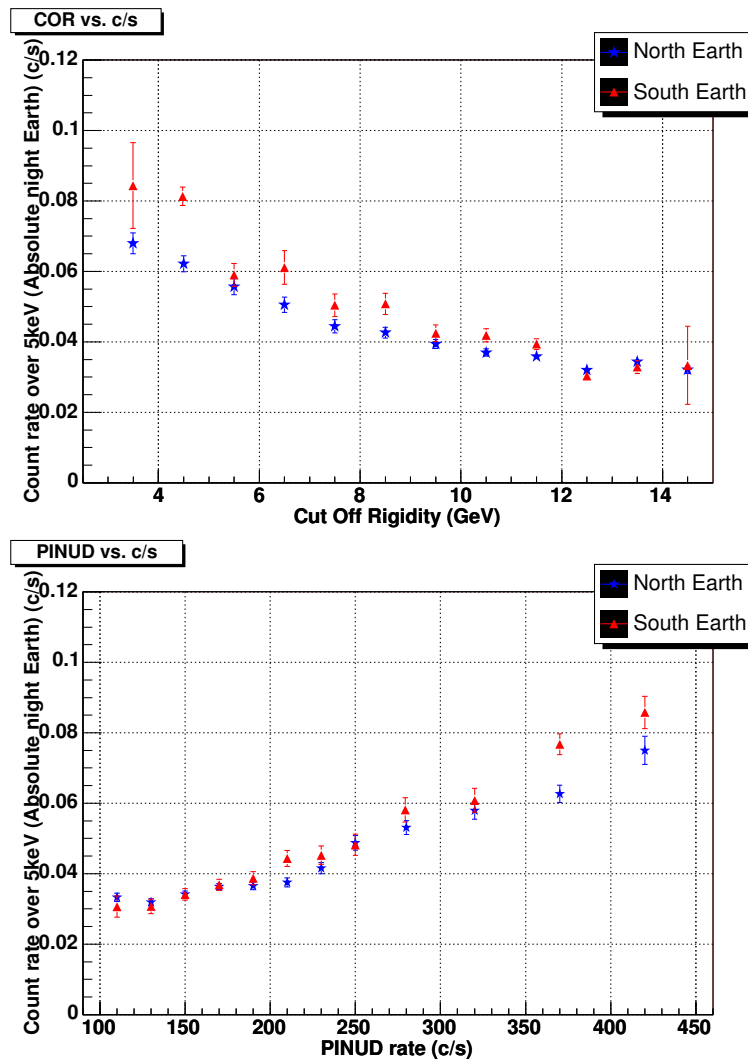


図 4.16: 5keV 以上のエネルギー領域の総カウントレート

は横軸に PINUD カウントレートを、縦軸に NXB カウントレートをとったものである。これを見ると、PINUD の値が 200c/s 以下の領域までは値のばらつきはほとんどないが、対応する COR(10 GeV 以上) では北半球と南半球で差が見られる。また、PINUD が 300c/s までの領域でも、北半球と南半球の値は 10% で一致しているのに対して、それに対応す

Night Earth Data XIS Image, x coordinate

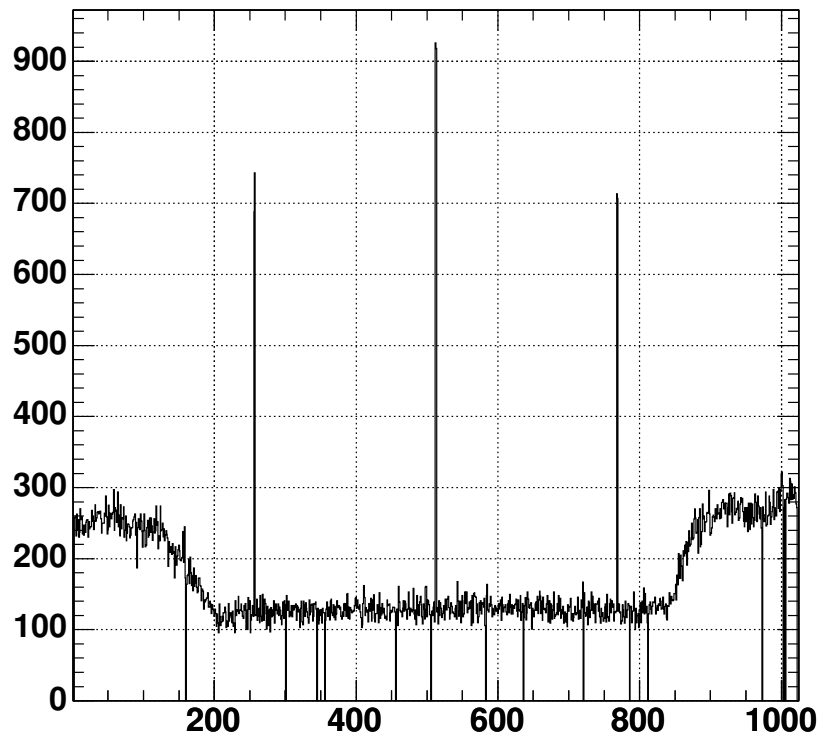


図 4.17: SAA を除く完全夜地球の X 座標のヒストグラム。3 × 3 のデータで作成

る COR が 6 GeV 以上の領域では最大 20% のずれがあり、PINUD のほうがバックグラウンドを予測する指標として優れていることが分かる。なお、PINUD の値が 300 c/s を越える (COR < 6 GeV に対応) と北半球と南半球でのカウントレートのずれが大きく異なってくるが、この領域はバックグラウンドが高いため一般的に解析には用いない領域である。また、図 4.10、4.11 を見ると分かるように、PINUD が 300c/s 以上 (COR が 6 GeV 以下) の領域を除去したとしても、データ全体の約 85% を用いることが可能である。

さらに、PINUD は衛星に飛来する荷電粒子を直接数えるパラメータであるため、地球磁場のシールド以外で宇宙線強度に影響を与える要因の効果も含んでいる。具体的な例として、太陽活動が挙げられる。太陽は 11 年周期で変動し、太陽活動が活発になるにつれ、太陽風の影響で地球に飛来するバックグラウンドとなり得る荷電粒子数が減少する。COR でバックグラウンドのモデル化を行うと、この太陽活動の影響を別の項 (例えば、時間依存性) として考える必要がある。一方、PINUD は検出器が受け取った荷電粒子数の指標であるため、太陽活動の項をバックグラウンドモデルに加える必要がなくてもすむ可能性がある。また、HXD-PIN 検出器と XIS との相関を考えるという点においても、HXD-PIN による粒子モニタの PINUD というパラメータを用いることが有益である。

実際の観測では 1 日単位で同一天体を観測することが多く、COR でバックグラウンドを予測しても問題とはならないことも多い。しかし、比較的短時間の観測でバックグラウンドを予測するには PINUD を用いた方が優れている。以上のことから、本研究では、XIS のバックグラウンドの指標として PINUD を用いることにした。

4.5 検出器上の位置の依存性

XISは読み出しの際に電荷を検出器のX方向あるいはY方向に転送する方式をとり(2.1参照)、読み出し端子から遠いか近いかでピクセルごとに読み出しまでの時間が異なる。そのため、位置依存性が生じる可能性がある。また、XISは望遠鏡でX線を反射させ素子でX線を検出する(1.2参照)が、有効面積が入射角によって異なり、検出器上の中心からの距離によりX線強度に差が生じる。すなわち、バックグラウンドがCXBのように望遠鏡外からくる場合、検出器上の中心からの距離に強度が依存する。そこで、NXBの検出器座標依存性と半径依存の両方を調べた。

4.5.1 特定のデータの除去

位置依存性を調べるにあたって、4.1.1、4.1.2で述べたものに加え、さらに特定のデータの除去を行った。それは、CCDの読み出し領域の端の部分にあたるイベントの除去、及び較正線源によるX線の除去である。

2.2.1で述べたように、XISでは一枚のCCDを4つの等しい大きさの領域に分けて読み出している。そのため、読み出す範囲の端ぎりぎりの領域にX線が入射した場合、有効にバックグラウンドを落とせない可能性がある。実際、図4.17のように、バックグラウンドレベルが高くなっている。よって、この領域のデータの除去を行った。具体的には、256、257、512、513、768、769の6つのチャンネルのデータを除去した。

また、4.4.2で述べたように較正線源によるX線は、宇宙線強度に依存しないライン成分である。さらに、較正線源に近いピクセルではカウントレートが高くなるので、位置依存性を見るには不向きである。そこで、図4.5のスペクトルをもとに、 5.9 ± 0.2 keVのエネルギー領域が鉄ラインによるものと判断して除去した。さらに、図2.5をもとにイメージ上で検出器四隅の 256×256 ピクセル領域を、較正線源の影響が大きい領域としてとり除いた。

4.5.2 中心座標からの距離依存性

続いて検出器の中心からの半径の依存性を見るため、エネルギー領域を3分割し、(0.7 ~ 4.0 keV、4.0 ~ 7.0 keV、7.0 ~ 12.0 keV)それぞれについて半径ごとにとるカウントレートを見た。この領域で分割したのは、4 keVにおけるバックグラウンドに占めるCXBとNXBの割合がほぼ1:1であったのに対し、7 keVでは完全にNXBが支配的となることによる。ここで、カウントレートは積分領域の面積に依存するため、範囲内のCCD素子の面積でカウントレートを割り、 $\text{count}/\text{ks}/\text{mm}^2$ の値を用いた。その結果が、図4.18である。

ここで、左側が 3×3 のデータ、右側が 5×5 のデータである。この図から、どのエネルギー帯においても、バックグラウンドレベルは中心からの距離によらないことが分かる。

ここで、特に天体観測の際NXBが完全に卓越する7 keV以上の領域について、強度の平均値とともにプロットしたものを図4.19に示す。

結果として、3つのFI CCDで有為な半径依存性は見られず、 3×3 ではXIS0が 0.159 ± 0.001 、XIS2では 0.164 ± 0.001 、XIS3では 0.158 ± 0.001 であり、 5×5 ではXIS0が 0.123 ± 0.002 、XIS2が 0.133 ± 0.002 、XIS3が 0.124 ± 0.002 と全てのデータでコンスタントであった。さらに、この値から検出器ごとのバックグラウンドの値にほとんど違いがないことも分かった。

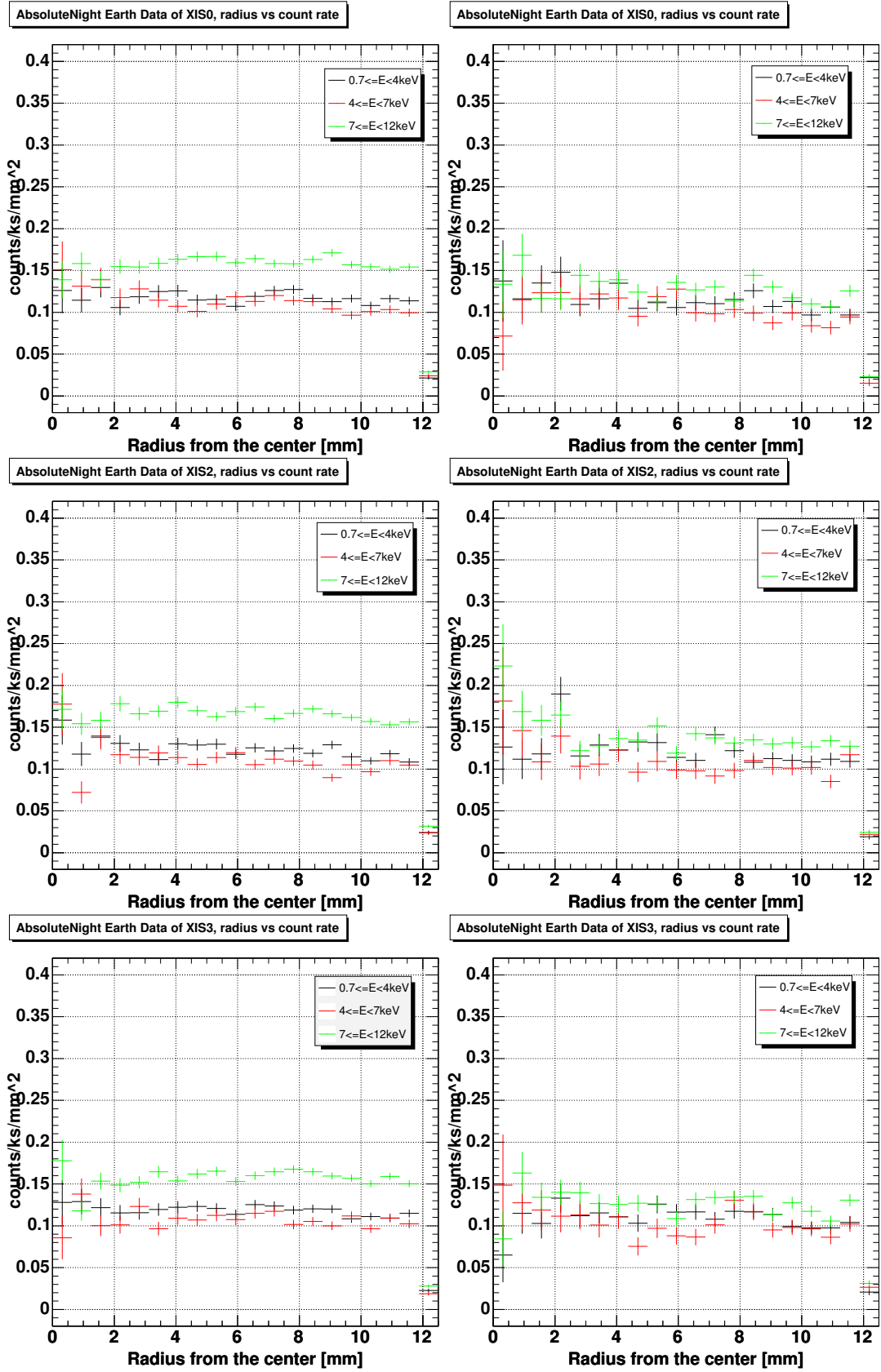


図 4.18: カウントレートの検出器中心からの半径依存性

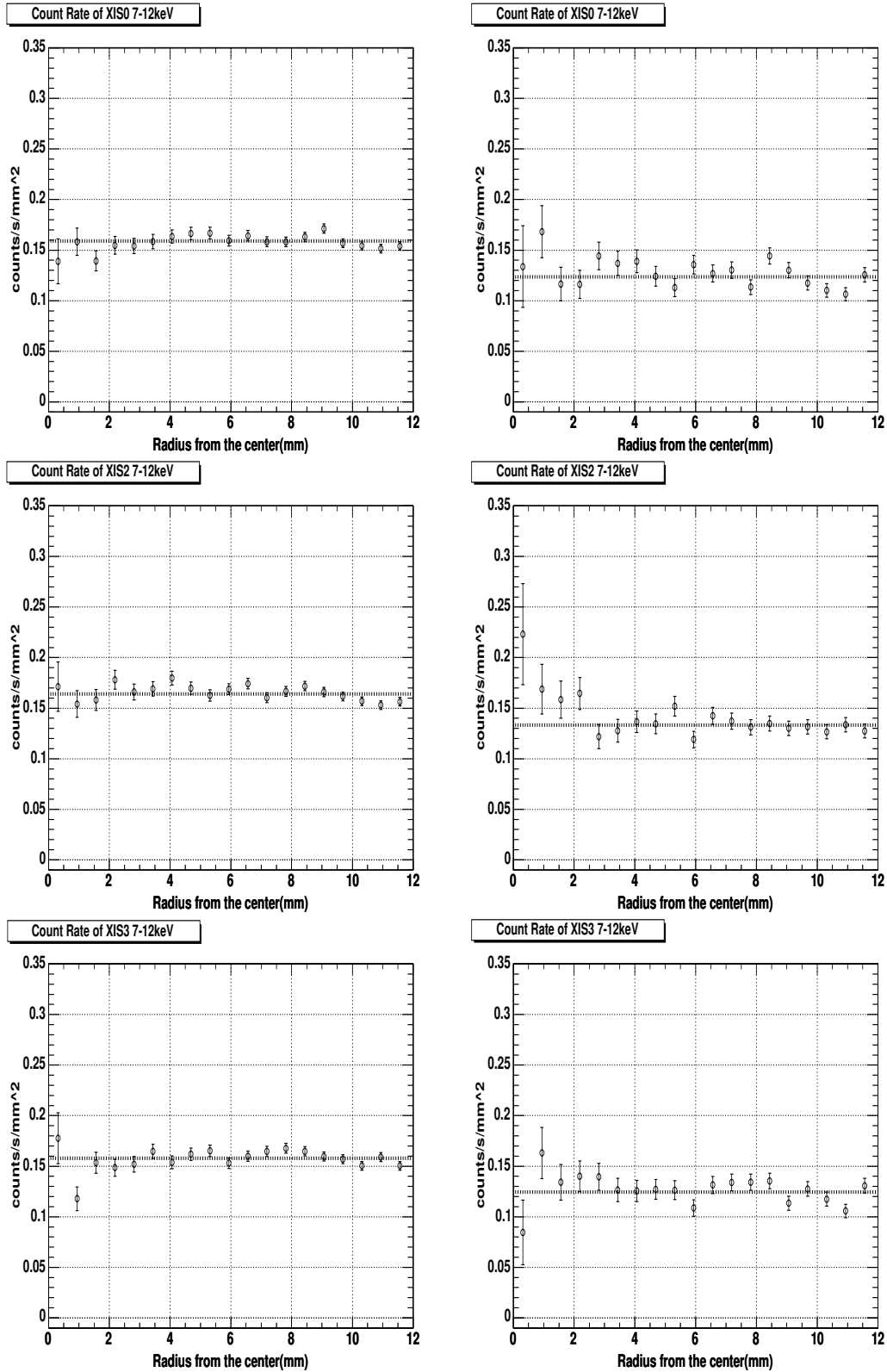


図 4.19: 7keV 以上のエネルギー帯のカウントレートの検出器中心からの半径依存性。ラインがその平均値である。左が 3×3 のデータで右が 5×5 のデータである。上から順に XIS0、2、3 データで作成した。

4.5.3 検出器座標 (detx, dety) の依存性

次に、検出器の座標の依存性を調べた。先ほどの半径依存のときと同様のエネルギー領域に3分割 (0.7 ~ 4.0 keV、4.0 ~ 7.0 keV、7.0 ~ 12.0 keV) して、今度は検出器座標 (検出器の X 座標と Y 座標) を横軸に、縦軸には count/ks/pixel の値をとったグラフ計2種を作成した。検出器 X 座標の依存性を見るために作成したグラフを図 4.20 に、Y 座標の依存性を見るために作成したグラフを図 4.21 にそれぞれ示す。

図 4.20、4.21 から、エネルギーが 7 keV 以上の領域では、XIS0 及び XIS3 は検出器 X 座標成分への依存性はなくコンスタント成分となるが、検出器 Y 座標に対しては一次関数的に増加することが分かる。一方で、XIS2 は検出器 X 座標に対しては一次関数的に減少する一方、検出器 Y 座標に対してはコンスタントである。それよりも低エネルギー帯では、4 ~ 7keV では 7 keV 以上の領域よりもバックグラウンドのカウントは低い、検出器座標依存として 7 keV 以上のエネルギー帯とほぼ同じ傾きを持っていることが分かる。また、4 keV 以下のエネルギー帯ではやや座標依存性が小さいものの、同じ依存性がある。これらの結果から、NXB は検出器の座標に対し依存性を持つことが分かる。この一次関数が X 座標依存性として表れるか Y 座標依存性として表れるかは電荷の読み出し方向と関係がある。電荷の読み出しは較正線源からもっとも遠い列のピクセルで行われる。図 2.5 で分かる通り、XIS0 及び XIS3 は較正線源が dety が 1024 である列の両端に較正線源があるため、dety が大 小の方向に電荷を読み出す、つまり dety の値が増加するにつれ読み出しまでの時間がかかる、ということになる。一方、XIS2 では較正線源は detx が 0 である列の両端にあるため、detx が小 大方向に電荷を読み出し、detx の増加とともに読み出しまでの時間は減少する。よって、読み出しまでの時間が増加するにつれ、バックグラウンドは一次関数的に増加することが分かった。

この依存性を定量的に見るために、7keV よりも高エネルギー帯の領域でのバックグラウンドレベルを詳しく調べることにした。その結果は、X 座標依存を図 4.22 に、Y 座標依存を図 4.23 に示す。

結果として、誤差の範囲内でよく理想値のラインにのっているといえる。さらに、 3×3 と 5×5 でバックグラウンドレベルが異なっており、NXB が支配的となる 7 ~ 12 keV のコンスタント成分を比較すると 5×5 のバックグラウンドが 6.0×10^{-5} に対し、 3×3 では約 8.0×10^{-5} である。また、それぞれの関数の傾きは 3×3 データでは XIS0 で $(2.9 \pm 0.2) \times 10^{-8}$ 、XIS2 で $(3.0 \pm 0.2) \times 10^{-8}$ 、XIS3 で $(2.4 \pm 0.2) \times 10^{-8}$ となる。一方、 5×5 データでは XIS0 で $(1.3 \pm 0.4) \times 10^{-8}$ 、XIS2 では $(1.3 \pm 0.4) \times 10^{-8}$ 、XIS3 では $(1.8 \pm 0.4) \times 10^{-8}$ と、検出器にあまりよらない。

以上から、電荷読み出し方向の違いから XIS 検出器ごとで位置依存性が異なっているため、バックグラウンドとしては検出器座標で同じ領域の完全夜地球データを用いるべきであることが分かった。また、読み出し方向に垂直な座標への依存性はなく、平行な座標には一次関数的に依存するので、適宜領域を広くとることで統計を上げることが可能であると言える。

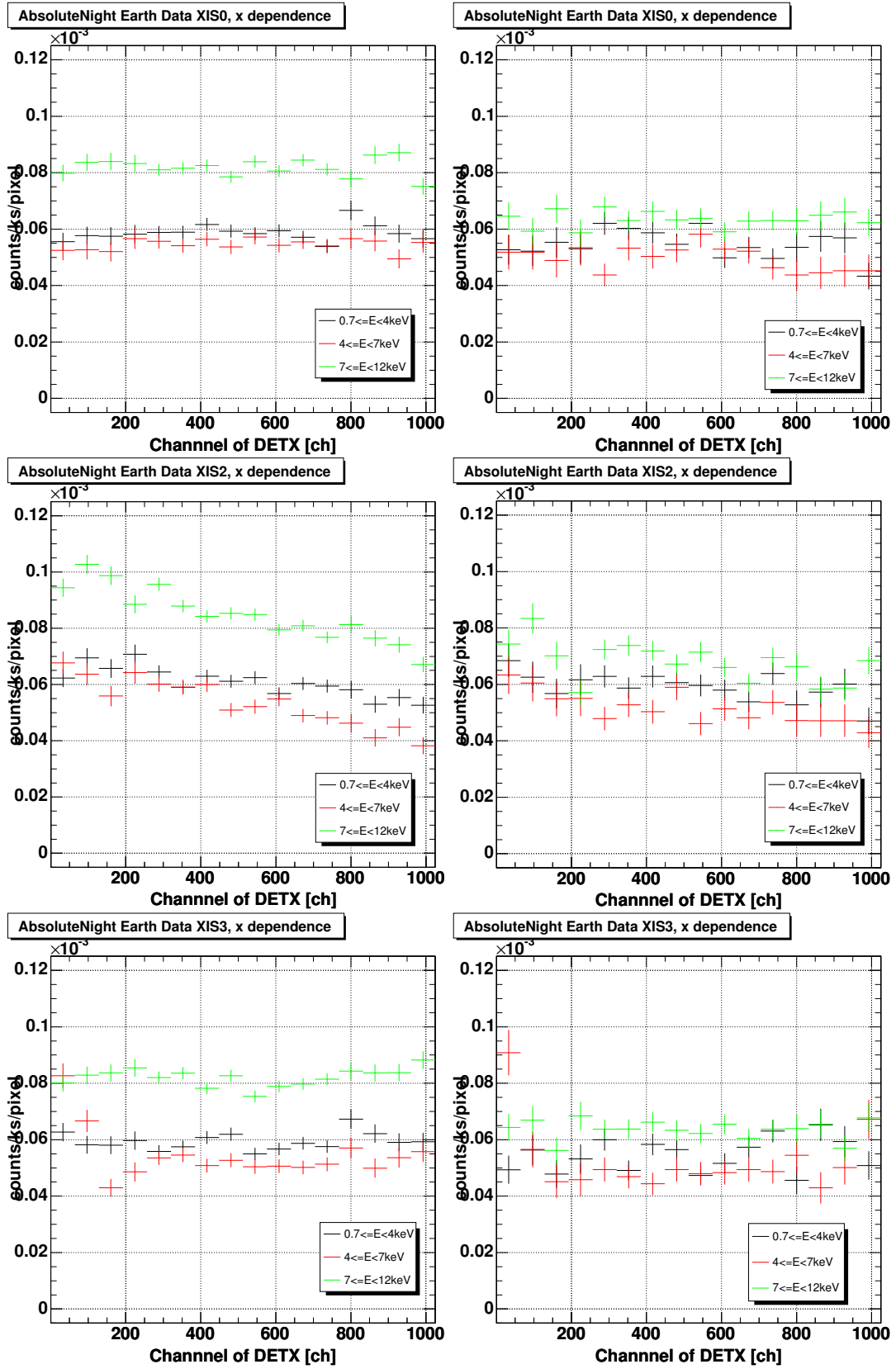


図 4.20: カウントレートの検出器 X 座標依存性。左列が 3×3 、右列が 5×5 データであり、行は上から順に XIS0、2、3

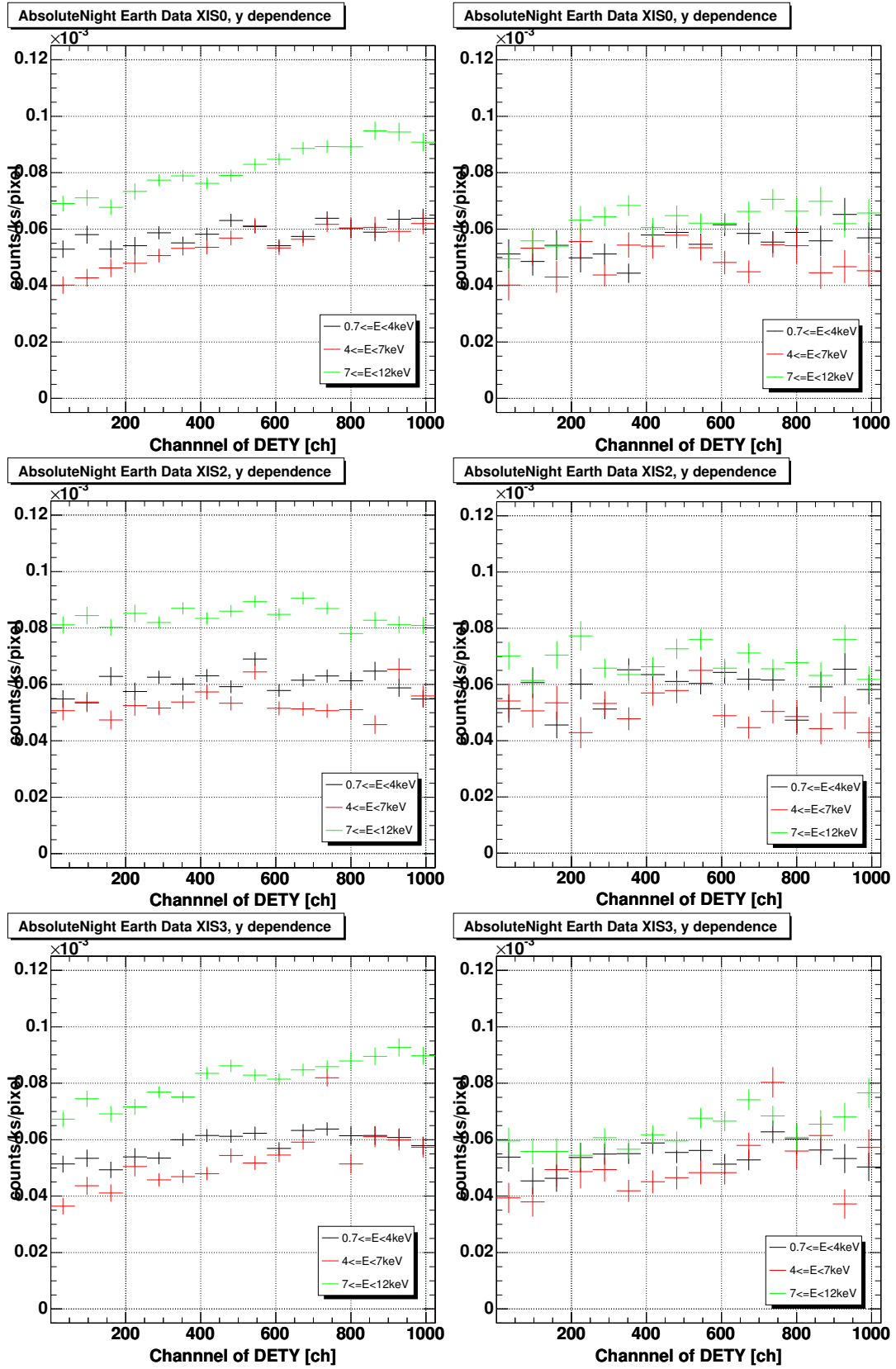


図 4.21: カウントレートの検出器 Y 座標依存性。左列が 3×3 、右列が 5×5 データであり、行は上から順に XIS0、2、3

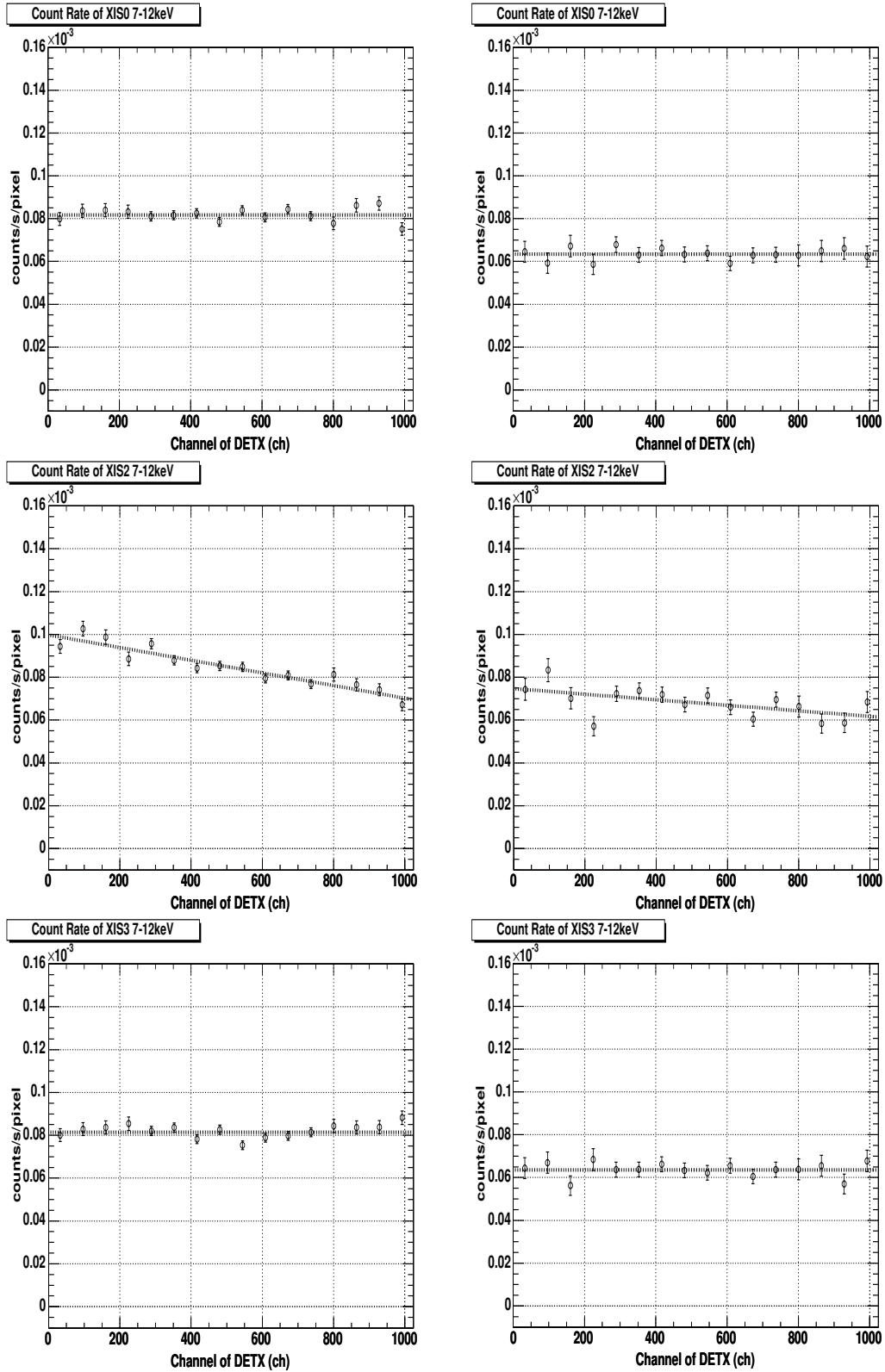


図 4.22: 7keV 以上のエネルギー帯のカウントレートの検出器 X 座標依存性。ラインがその理想値である。左が 3×3 のデータで右が 5×5 のデータである。上から順に XIS0、2、3 データで作成。

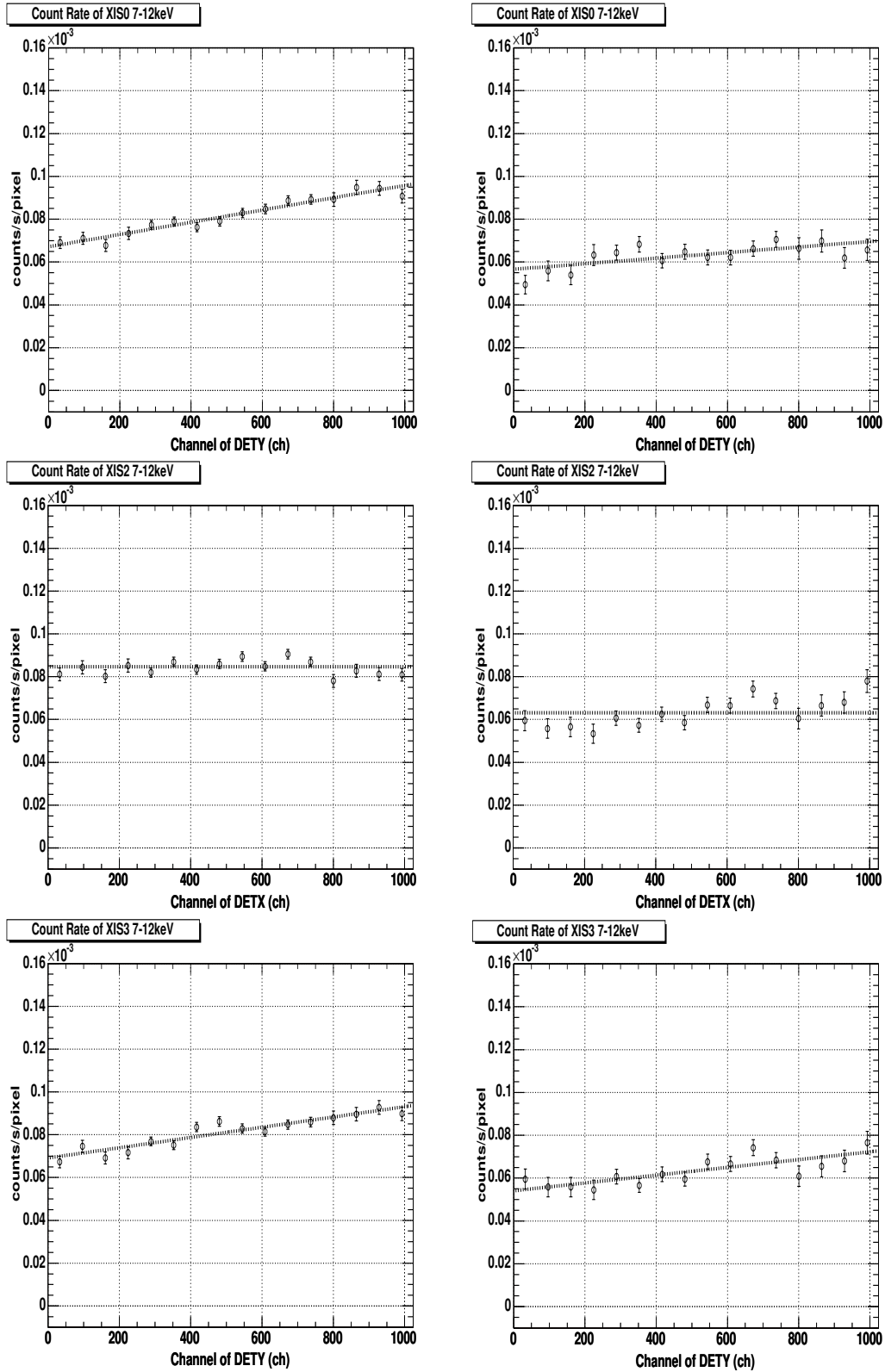


図 4.23: 7keV 以上のエネルギー帯のカウントレートの検出器 Y 座標依存性。ラインがその理想値である。左が 3×3 のデータで右が 5×5 のデータである。上から順に XIS0、2、3 データで作成。

第5章 再現性の評価

5.1 バックグラウンド予測パラメータの確立

今まで見てきた XIS の非 X 線バックグラウンド特質を再びまとめる。

まず、エネルギースペクトルではフラックスの絶対値、及びエネルギーに対する依存性の両方が 3×3 のデータと 5×5 のデータで異なる。完全夜地球の中心から半径 500 ピクセルの領域での全データの積分では、フラックス [count/ks/keV] とエネルギー [keV] 間の関係が 3×3 で $F = 2.7E^{0.44}$ 、 5×5 で $F = 4.0$ をとる。よって、 3×3 モードと 5×5 モードで別々にバックグラウンドを予測する必要がある。

次に、検出器座標依存性は、電荷の読み出し方向に一次関数的な依存性を持ち、XIS0、3 は DETY 正方向に傾きが正となる一次関数に、XIS2 は DETX 負方向に傾きが正となる一次関数となる。また、その傾きは検出器によらずほぼ一定の値をとる。よってバックグラウンドモデル化の際には観測天体と同じ座標での夜地球データを用いるのが良い。ここで読み出し方向に垂直方向の依存性がないことと、平行方向への依存性が一次関数的であることを用いて、積分領域を大きくとって統計を上げることが可能である。

最後に、バックグラウンドは宇宙線の強度に依存する。宇宙線強度の指標には COR と HXD 検出器による宇宙線モニタである PINUD とがあり、PINUD のほうがバックグラウンドの指標として優れている。よって観測と同じ PINUD の夜地球のデータをバックグラウンドと見なすことができる。さらに、バックグラウンドは宇宙線強度に対する依存性が大きい。以下、この PINUD をバックグラウンド予測のパラメータとして確実なものとするため、再現性の評価を行った。

5.2 再現性の評価

バックグラウンドのモデルは、数ヶ月に渡る長期的な平均のバックグラウンドを表すだけでは不十分であり、1 日程度の個々の観測を精度良く再現しなければならない。そこで、再現性の評価を行った。

評価に用いられる指標が χ^2 と自由度 (Degree Of Freedom; DOF) である。 χ^2 とは、実測データの予想値からのずれ具合を表したもので、以下の式 5.1 で定義される。

$$\chi^2 = \sum \frac{(y_{ex} - y_{th})^2}{\sigma^2} \quad (5.1)$$

この式で、 y_{ex} は実測値、 y_{th} は予想値、 σ は誤差の値である。一方自由度とは変数のうち自由に選べるものの数で、データ数からおのこのパラメータ間に成り立つ関係式のパラメータ数を引いたものである。これらの指標を用いて、データのフィッティングの良さを表す基準として χ^2/DOF が用いられ、この値が 1 に近ければデータとモデルの合いが良く、統計的にばらついていないだけであると言える。

そこで、全データから完全夜地球の存在する観測を選び、各々の観測を表 4.3 に従い 7 カテゴリにさらに分割し、PINUD が同じであればバックグラウンドが同じと仮定して、コンスタント値でフィットを行った。XIS0 の 3×3 データの結果を図 5.1 と図 5.2 に示す。

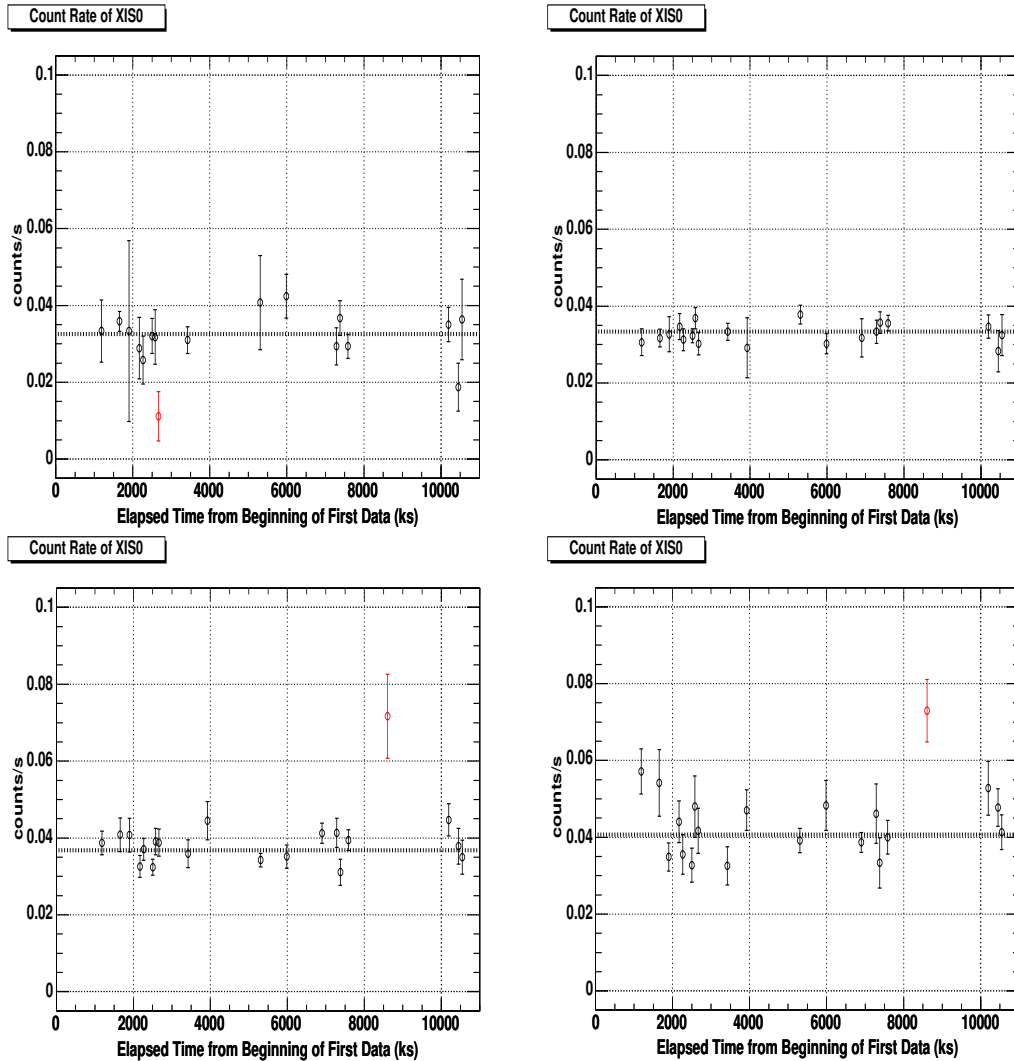


図 5.1: 3×3 データの 5-10keV のエネルギー帯で積分したカウントレートの分布。左上が area1、その隣が area2 の PINUD でのカウントレート。以下、area3、area4 となっている。点線は赤い点を除いたデータの平均値である。

これらのグラフの横軸は 8 月 22 日のデータ (付録参照) の観測開始時間からの経過時間を示しており、縦軸はおのこの観測中の完全夜地球のデータを半径 500 ピクセル、5 ~ 10 keV で積分したカウントレートとなっている。ここでは PINUD による分割前での積分時間が 8 ks 以上あるもののみを用いた。

図から分かるように、突発的にカウントレートが平均から大きくずれる観測が存在する。ずれが統計的に有為かどうかを見るには、ずれを標準偏差で割った値

$$z = \frac{|y_{ex} - y_{th}|}{\sigma} \quad (5.2)$$

を用いた。この値が大きいものほど存在確率は低く、 $z = 2.7$ 以上ずれる確率は 0.67 % で

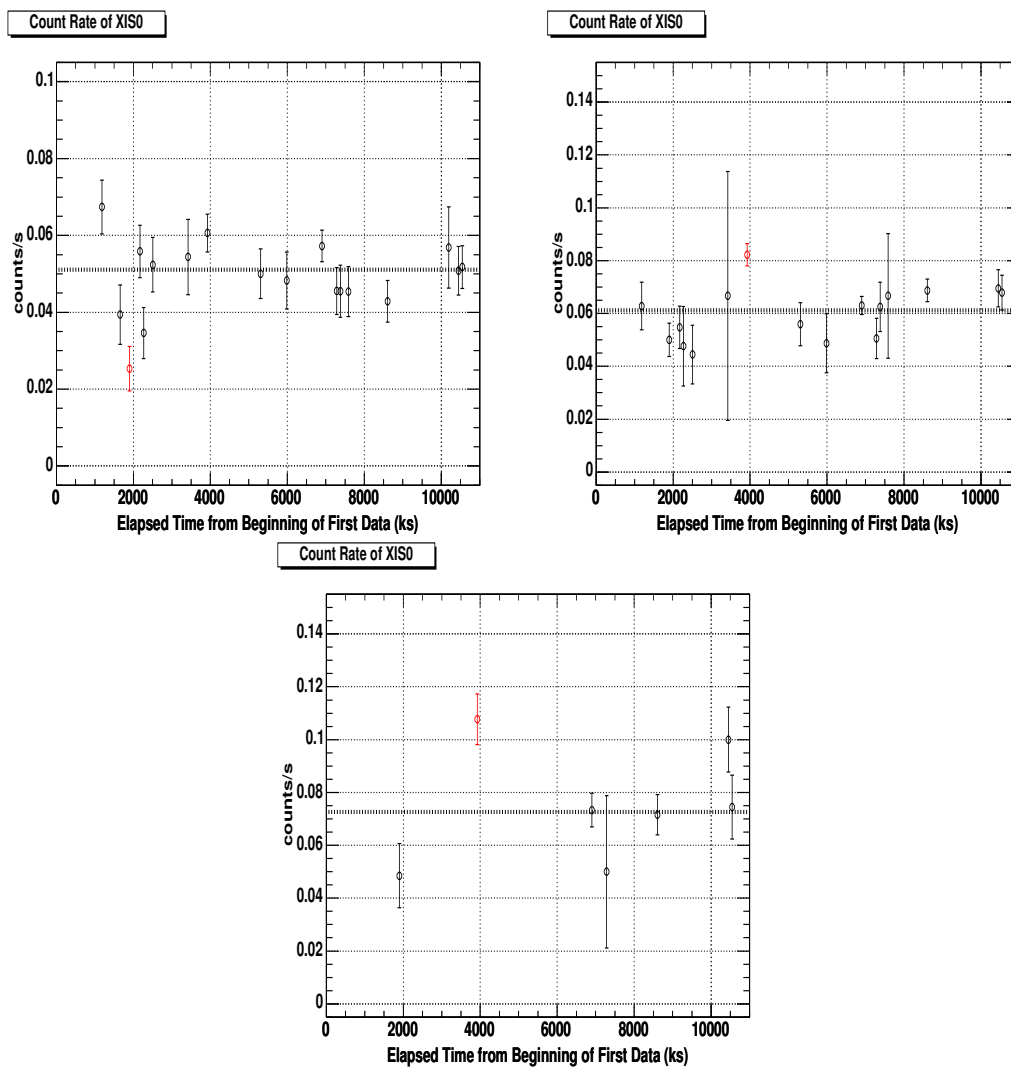


図 5.2: 3×3 データの 5-10keV のエネルギー帯で積分したカウントレートの分布。左上から横向に area5、area6、area7 となっている。点線は赤い点を除いたデータの平均値である。

ある。この値を基準にとり、 z が 2.7 よりも大きくなるものを除いた。ただし、その中には誤差の値が小さいために含まれてしまうものも存在する。そこで、平均値からのずれが 20 % 以内のものは正常なものとして含め、20 % を越えたものを突発的にカウントレートが異常なものとした。さらに、そのような観測は特定の検出器のみでカウントレートが高くなったり低くなったりしていた。そのような観測を図中に赤で示す。これらの観測が混在していた場合、 χ^2/DOF の値はこれらに大きくひきずられてしまうので取り除き、残ったイベントで平均値の算出及び再現性評価を行った。([9] 参照) その結果を表 5.1~5.3 にまとめる。

この結果から言えることとして、PINUD 別に見て、 χ^2/DOF の値が 1 付近にあるので、ごく一部のデータを除き PINUD は良くバックグラウンドを再現できていることが分かった。

また、同じ方法で 5×5 のデータを用いても同様の評価を行った。ただし、先の章で述べた通り、 5×5 のデータはバックグラウンド選別能力が高い。そこで、積分時間が 4 ks 以上のデータを area1~4 でソートし再現性評価を行った。フィットしたものを図 5.3 に、再現性評価の結果を表 5.4~5.6 にそれぞれ示す。

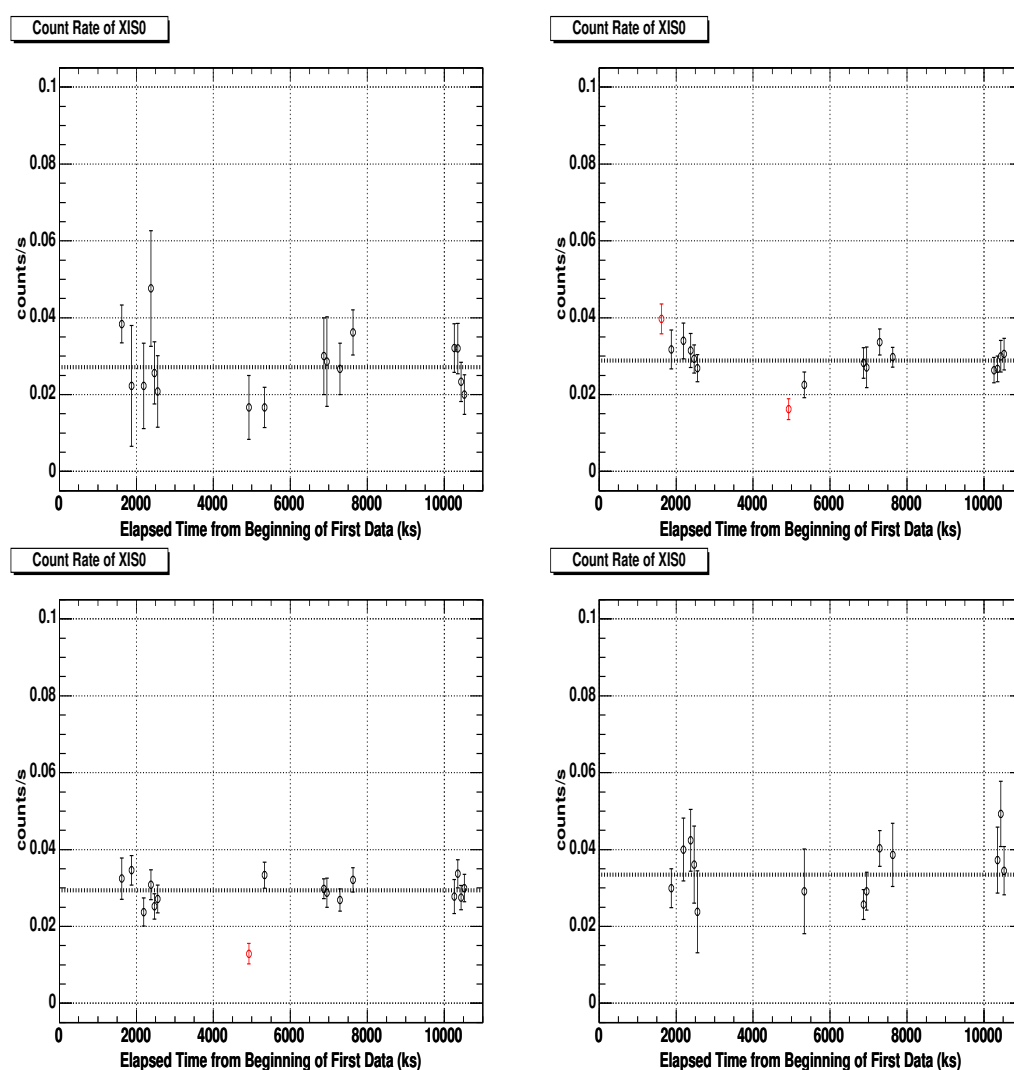


図 5.3: 5×5 データの 5-10keV のエネルギー帯で積分したカウントレートの分布。左上が area1、その隣が area2 の PINUD でのカウントレート。以下、area3、area4 となっている。点線は赤い点を除いたデータの平均値である。

この結果から、 5×5 データは 3×3 データよりも χ^2/DOF の値が 1 に近く、ばらつきが少ないことが分かる。これは 5×5 データの高いバックグラウンド除去能力のためであると考えられる。さらに、このことから 5×5 のデータにおいても PINUD はバックグラウンドをよく表す指標であり、よく再現もできていることが分かった。

5.3 これからの課題

今回の解析で分かったことをふまえ、今後の課題として以下のことが挙げられる。

- PINUD はバックグラウンドを良く再現できていることが分かったが、同じ PINUD でも北半球と南半球とでバックグラウンドがわずかに異なる。そのため、地球上の位置による違いを詳しく調べることで、バックグラウンドの精度をより上げることを目指す。
- 本解析で行った 4ヶ月という短い期間内では打ち上げからの経過時間依存は見られなかったが、ひきつづき時間依存を見ていく必要がある。
- おおのこのデータを見た際に、5~7% の割合で突発的に NXB のカウントレートが高すぎたり低すぎたりするものが存在している。このような現象の原因を究明し、バックグラウンドの再現性を高める。

以上の点などをふまえ、これからも精度の高い観測を行うためにバックグラウンドのモデル化の研究を進めてゆくことが必要不可欠である。

領域	PINUD のとる範囲	平均値	χ^2/DOF	DOF	除去した観測数 /全観測数
area1	100 ~ 133	$(3.3 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	0.962	15	1/17
area2	133 ~ 161	$(3.3 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	0.729	18	0/19
area3	161 ~ 194	$(3.8 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	1.453	18	1/20
area4	194 ~ 233	$(4.1 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	1.750	18	1/20
area5	233 ~ 300	$(5.1 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	1.599	16	1/18
area6	300 ~ 406	$(6.1 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	1.180	14	1/16
area7	406 ~ 500	$(7.3 \pm 0.4) \times 10^{-2}$	1.917	5	1/7

表 5.1: XIS0、 3×3 データでの再現性評価

領域	PINUD のとる範囲	平均値	χ^2/DOF	DOF	除去した観測数 /全観測数
area1	100 ~ 133	$(3.4 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	0.775	16	0/17
area2	133 ~ 161	$(3.4 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	1.230	17	1/19
area3	161 ~ 194	$(3.8 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	0.884	19	0/20
area4	194 ~ 233	$(4.6 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	1.427	19	0/20
area5	233 ~ 300	$(5.3 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	1.125	18	0/19
area6	300 ~ 406	$(6.8 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	1.054	13	2/16
area7	406 ~ 500	$(8.1 \pm 0.4) \times 10^{-2}$	1.323	6	0/7

表 5.2: XIS2、 3×3 データでの再現性評価

領域	PINUD のとる範囲	平均値	χ^2/DOF	DOF	除去した観測数 /全観測数
area1	100 ~ 133	$(3.3 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	1.095	14	2/17
area2	133 ~ 161	$(3.4 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	0.655	18	0/19
area3	161 ~ 194	$(3.7 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	0.796	17	2/20
area4	194 ~ 233	$(4.2 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	1.056	18	1/20
area5	233 ~ 300	$(5.0 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	1.401	16	1/18
area6	300 ~ 406	$(6.2 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	0.652	14	1/16
area7	406 ~ 500	$(8.8 \pm 0.4) \times 10^{-2}$	2.071	5	1/7

表 5.3: XIS3、 3×3 データでの再現性評価

領域	PINUD のとる範囲	平均値	χ^2/DOF	DOF	除去した観測数 /全観測数
area1	100 ~ 133	$(2.7 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	1.301	15	0/16
area2	133 ~ 161	$(2.9 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	0.720	13	2/16
area3	161 ~ 194	$(2.9 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	0.826	14	1/16
area4	194 ~ 233	$(3.4 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	1.204	12	0/13

表 5.4: XIS0、 5×5 データでの再現性評価

領域	PINUD のとる範囲	平均値	χ^2/DOF	DOF	除去した観測数 /全観測数
area1	100 ~ 133	$(2.7 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	1.057	15	0/16
area2	133 ~ 161	$(3.1 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	0.704	14	1/16
area3	161 ~ 194	$(3.2 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	1.175	12	3/16
area4	194 ~ 233	$(3.5 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	0.809	9	3/13

表 5.5: XIS2、 5×5 データでの再現性評価

領域	PINUD のとる範囲	平均値	χ^2/DOF	DOF	除去した観測数 /全観測数
area1	100 ~ 133	$(2.6 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	0.915	14	1/16
area2	133 ~ 161	$(2.9 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	1.083	14	1/16
area3	161 ~ 194	$(3.1 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	0.708	14	1/16
area4	194 ~ 233	$(3.1 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	1.243	12	0/13

表 5.6: XIS3、 5×5 データでの再現性評価

第6章 まとめ

本解析では、『すざく』XIS能力を最大限に生かした高感度観測を行うため、非X線バックグラウンド(NXB)の特性を調べた。そのために、2005年8月～12月までの 3×3 モード及び 5×5 モードにおける完全夜地球のデータを用いた。その積分時間は 3×3 モードで約350 ks、 5×5 モードで約130 ksである。

NXB成分は7 keV以上の高エネルギー帯でバックグラウンドに完全に支配的となり、 3×3 モードでのスペクトルはエネルギーに対して冪が約0.44の冪関数を取り、一方で 5×5 モードではエネルギーによらずフラットなスペクトルであった。よって、 3×3 モードと 5×5 モードのデータで別々に解析を行うこととした。

続いて、打ち上げからの経過時間がバックグラウンドに与える影響を調べた。その結果、打ち上げから半年分のデータでは時間による変動は見られなかった。ただし、このモニタは今後も続けてゆく必要がある。

次に、検出器上の座標の依存性として、中心からの半径の依存性及び検出器のX座標とY座標の依存性を調べた。中心からの半径の依存性はなく、コンスタントな値をとったのに対し、検出器座標の依存性は、電荷の読み出しに垂直な方向には依存性がない一方で、平行の方向には一次関数的に依存性を持っていた。よって、バックグラウンドのモデル化にあたっては、観測対象と同じ領域の夜地球のデータを用いる必要がある。また、積分領域を適宜広くとり統計を上げることが可能であることも分かった。

また、宇宙線強度との関係も調べた。その際に用いたのがCut Off Rigidity(COR)とHXD-PIN検出器の宇宙線モニタのカウントレートの値PINUDである。CORを2 GeVごとのカテゴリに分け、PINUDをその積分時間に合うようカテゴリに分別してスペクトルを作成したところ、両者のバックグラウンドに与える影響が異なっていた。というのも、CORとPINUDが一対一対応するのではなく、北半球と南半球に分けCORとPINUDでソートしたNXBを比較すると、PINUDのほうが地球上での位置によるばらつきが小さいことが分かった。よって、PINUDを用いるほうがバックグラウンドの予測に適していると分かった。

最後に、これらのうち最もバックグラウンドの依存性が大きいPINUDでソートを行い、各観測の夜地球スペクトルを比べることで再現性の評価を行った。そのために、観測データごとに5～10 keVで積分したカウントレートのばらつきを調べた。その結果、約5%の割合で統計的に有為なバックグラウンドレートが異なるものが存在した。その他のデータはPINUDでよく再現できていると言えた。今後、これらの原因究明を行うことで、バックグラウンドの再現性がさらに高まることが期待される。

謝辞

本研究を行うにあたり、様々な方面で御指導くださった大杉先生、指導教官の深沢先生には本当に厚くお礼を申し上げます。そして、論文の書き方をはじめ、本研究全体を通じてご丁寧に御指導くださった水野先生には本当に心より感謝いたします。

さらに、解析で用いたプログラミングの方法が分からなくなったときなどにお忙しいにもかかわらず丁寧にアドバイスをくださった高橋さん、澤本さん、そしてきれいな図の重ね書きをしてくださった千代延さん、そして御世話になった研究室の先輩方、先生方、4年生のみなさん、最後に論文提出のさいに事務処理を行ってくださった事務のみなさん。皆様方の御協力のおかげでこの論文を完成させることができました。本当にみなさん、ありがとうございました。

付録A 解析に用いたデータ集

以降のページには、本解析で用いたデータの観測開始時刻と終了時刻、観測対象とその座標を表す赤経、赤緯、そしておのこのデータ中の完全夜地球の積分時間を記す。

観測開始時刻	観測終了時刻	観測対象	赤経 [deg]	赤緯 [deg]	完全夜地球の 積分時間 [ks] (3 × 3)
20050822183000	20050823022500	NGC 4945	196.3645	-49.4682	0
20050823022500	20050823082600	NGC 4945	196.3645	-49.468	0
20050827101000	20050829012700	Galactic Bulge	236.4299	-31.6998	0
20050829012700	20050830013000	eta Carinae	161.2650	-59.6845	0
20050830013000	20050831013000	N103B	77.2263	-68.7383	0
20050831013000	20050831182000	E0102-72	16.0100	-72.0333	0

表 A.1: 8月の観測データ

観測開始時刻	観測終了時刻	観測対象	赤経 [deg]	赤緯 [deg]	完全夜地球の 積分時間 [ks] (3 × 3)
20050901054000	20050901182000	Cas-A	350.8500	58.8150	0
20050902083000	20050902143000	Vega	279.2347	38.7837	0
20050902143000	20050904150000	NEP	272.8000	66.0000	0
20050904163000	20050909040000	SN1006	226.7000	-41.4000	5.16
20050909040000	20050910140000	SN1006	226.7000	-41.4000	3.42
20050910140000	20050911235000	SN1006	226.7000	-41.4000	3.33
20050911235000	20050913001000	SN1006	226.7000	-41.4000	11.01
20050913013000	20050914120000	Fornax Cluster	54.6442	-35.4855	0
20050914133000	20050915010000	A0535+26	84.7270	26.3160	0
20050916085000	20050918195600	NGC 2110	88.0475	-7.4561	15.06
20050918195600	20050918211600	AB Dor	82.1863	-65.4489	0
20050918211600	20050918223600	4U1626-67	248.0700	-67.4619	0
20050918223600	20050919115800	HESS J1616-50 BG1	243.6615	-51.1763	0
20050919115800	20050920193800	HESS J1616-508	244.1208	-50.8995	6.99
20050920193800	20050921072900	HESS J1616-508 BG2	244.4620	-50.6910	8.7
20050921084900	20050922055600	BD+30.3639	293.6880	30.5160	0.63
20050922055600	20050922071600	GX 17+2	274.0060	-14.0360	0.69
20050922071600	20050923070700	GRO 1655-40	253.5000	-39.8450	0
20050923070700	20050924110500	GC SRC1	266.5110	-28.9260	10.95
20050924110500	20050924124000	GC BGD1	266.5230	-29.5150	0
20050924124000	20050924141600	GC BGD2	266.2040	-29.3250	0
20050924141600	20050925172700	GC SRC2	266.3030	-29.1710	11.43
20050925172700	20050925190200	GC BGD3	266.5900	-28.6510	0
20050925190200	20050926154200	RXJ 1713-3946 BG1	257.3830	-38.8230	0
20050926154200	20050928070600	RXJ 1713-3946	258.0710	-39.9360	21.9
20050928070600	20050929042500	RXJ 1713-3946 BG2	257.2710	-41.0350	9.51
20050929042500	20050930042900	GC SRC2	266.3026	-29.1711	8.19
20050930042900	20050930060500	GC BGD1	266.5230	-29.5150	0.21

表 A.2: 9月の観測データ

観測開始時刻	観測終了時刻	観測対象	赤経 [deg]	赤緯 [deg]	完全夜地球の 積分時間 [ks] (3 × 3)
20051001062100	20051001073500	GC BGd3	266.5900	-28.6510	0
20051001082500	20051002081600	A2218	248.9758	66.2166	4.47
20051002081600	20051003074600	A2218 offset	244.4500	65.4600	2.55
20051003074600	20051003111000	AM Her	274.0554	49.8680	0
20051003111000	20051004105000	North Polar Spur	260.5875	4.7566	6.54
20051004105000	20051004115000	QSO1727+5	262.0763	50.2194	0
20051004115000	20051005032400	M82-WIND	148.8687	69.7554	3.36
20051005032400	20051005043500	A2312	283.4510	68.3850	0
20051005043500	20051005151200	Cyg X-1	299.5908	35.2018	0
20051005151200	20051006102500	Her X-1	254.4575	35.3424	0
20051006142900	20051010104700	ABELL 3376	90.5625	-39.9500	14.25
20051010120700	20051012070500	GC SGR B2	266.8752	-28.4409	3.18
20051012070500	20051012110500	GC SGR B2 BG	267.0926	-28.1330	0.03
20051012134500	20051015090700	NGC 3516	166.6979	72.5686	12.3
20051015130000	20051016150000	NGC 1313 ULX	49.5642	-66.5333	0
20051016162000	20051018232000	GRS1915+105	288.7983	10.9456	0
20051019004000	20051019223200	M82-WIND	148.8687	69.7554	0
20051022015500	20051024062600	MKN 3	93.9013	71.0375	3.12
20051024062600	20051026113000	RXJ 1856.5-3754	284.1470	-37.9096	4.59,0
20051026113000	20051027043400	A2218	248.9750	66.2167	0
20051027043400	20051027110500	A2218 offsetB	249.8780	65.2253	0
20051027110500	20051028022400	M82-WIND	148.8690	69.7554	0
20051028022400	20051030213000	GALACTIC RIDGE	281.0000	-4.0700	23.61
20051030213000	20051102010200	AE AQUARII	310.0380	-0.9290	0

表 A.3: 10月の観測データ

観測開始時刻	観測終了時刻	観測対象	赤経 [deg]	赤緯 [deg]	完全夜地球の 積分時間 [ks] (3 × 3)
20051102010200	20051102233900	SS Cyg	325.6780	43.5860	0
20051102233900	20051103194500	CH Cyg	293.6885	30.5164	2.19
20051103194500	20051104082000	SN1987A	83.8667	-69.2697	0
20051104082000	20051106140400	SWIFT J0746.3+2548	116.6080	25.8173	7.47
20051106140400	20051107140200	NGC 2992	146.4250	-14.3264	12.03
20051107140200	20051110185500	A3376 WEST RELIC	90.0000	-40.0330	1.38
20051110185500	20051113102100	NGC4051	180.7900	44.5314	1.11,0
20051113102100	20051114052100	SMC Diffuse 1	13.0400	-72.8300	0
20051114052100	20051115195500	LOCKMAN HOLE	163.4000	57.6000	0
20051115195500	20051118141500	A1413	178.8290	23.6419	23.79,0.87
20051118141500	20051119204500	SSCYG-TOO	325.6780	43.5860	4.74
20051119204500	20051120232500	NGC 2992	146.4250	-14.3264	5.55
20051120232500	20051122145700	A1060 offset	159.5160	-27.5283	10.74
20051122145700	20051123171800	A1060	159.1784	-27.5283	11.49
20051123171800	20051124045500	CYGNUS LOOP NE1	314.1760	31.7450	1.59
20051124045500	20051124161400	CYGNUS LOOP NE2	313.9550	31.9610	1.83
20051124172500	20051127080900	PG1211+143	183.5738	14.0536	20.31
20051127080900	20051128040000	A2801	9.6430	-29.1210	0
20051128040000	20051128210900	A2811	10.4700	-28.5590	0
20051128210900	20051129173300	A2811 offset	10.1780	-28.7360	0
20051129173300	20051130053900	CYGNUS LOOP NE3	313.7460	32.1880	0.78
20051130053900	20051130182300	CYGNUS LOOP NE4	313.4900	32.3740	2.46
20051130182300	20051202084000	PKS2155-304	329.7170	-30.2260	0

表 A.4: 11月の観測データ

観測開始時刻	観測終了時刻	観測対象	赤経 [deg]	赤緯 [deg]	完全夜地球の 積分時間 [ks] (3 × 3)
20051202084000	20051203040000	A2804	9.6430	-29.1210	0
20051203040000	20051206022000	1H0707-495	107.1729	-49.5517	0
20051206022000	20051207224000	NGC4636	190.7250	2.7520	8.22
20051207224000	20051210115100	MGC5-23-16	146.9174	-30.9489	0
20051210115100	20051210183600	A1795 Center	207.2186	26.5929	0
20051210183600	20051211074100	A1795 NearNorth	207.2186	26.7929	0
20051211074100	20051211232100	A1795 FarNorth	207.2186	26.9929	0
20051211232100	20051212125100	A1795 NearSouth	207.2186	26.3929	0
20051212125100	20051213100000	A1795 FarSouth	207.2186	26.1929	5.1
20051213100000	20051214120900	NGC 2992	146.4250	-14.3264	0
20051214120900	20051214122300	HCG62	193.2750	-9.2042	0
20051216012630	20051219103000	E0102-72	16.0083	-72.0313	6.09,4.08
20051219103000	20051223071400	RXJ 0852-4622 NW	132.2417	-45.6508	0
20051223071400	20051224085100	RXJ 0852-4622 NW Offset	135.0727	-47.9942	0
20051224085100	20051227060000	HGC 4388	186.4454	12.6620	9.66,1.68
20051227060000	20051228042000	CENTAURUS CLUSTER	192.2054	-41.3111	6.84
20051228042000	20051229060000	CENCL Offset1	192.2054	-41.4440	8.58
20051229060000	20051230083000	CENCL Offset2	192.2054	-41.1780	9.06

表 A.5: 12月の観測データ

参考文献

- [1] <http://www.astro.isas.ac.jp/suzaku/instruments>
すざく衛星の概要と搭載機器

- [2] <http://www.isas.ac.jp/j/snews/2006/0126.shtml>
すざく搭載 X 線微小熱量計 XRS 不具合原因究明報告

- [3] <http://space.mit.edu/XIS/gallery.html>
SUZAKU XIS Project at MIT

- [4] 東海林 雅幸 Astro-E2 衛星搭載 XIS のデータ処理方法の最適化大阪大学 修士論文
2004 年

- [5] 辻本 匡弘 X 線 CCD 検出器 -CCD-CREST(deep2)- の性能評価と性能向上
京都大学 修士論文 2000 年

- [6] <http://heasarc.gsfc.nasa.gov>

- [7] <http://www.isas.ac.jp/ISASnews/No.204/x-ray.html>
上田佳宏 『見えてきた宇宙背景 X 線放射の正体』

- [8] ISAS RN 621
ASCA Studies of Faint X-ray Sources and
the Relation to the Cosmic X-ray Background
Yoshihiro Ueda

- [9] DATA REDUCTION and ERRORANALYSIS for the physical science
PHILIP.R.BEVINGTON D.KEITH ROBINSON
2nd Edition

- [10] Suzaku/XIS background report
by H. Katayama et al.