X線天文衛星 「すざく」アーカイブデータを用いた 天体カタログの開発

東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 修士課程
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
hiroki@astro.isas.jaxa.jp

山崎 廣樹
学籍番号 35-146133

指導教員 海老沢 研 教授

平成 28 年 3 月 2 日

目 次

第 1 章　概要 **13**

第 2 章　序論 **15**

2.1　X 線天文衛星とカタログ 15

2.1.1　Uhuru 17

2.1.2　Ariel-5 18

2.1.3　High Energy Astrophysics Observatory-1 (HEAO-1) 20

2.1.4　Einstein 21

2.1.5　ROntgen Satellite (ROSAT) 22

2.1.6　Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics (ASCA) 23

2.1.7　Chandra 25

2.1.8　XMM-Newton 27

2.1.9　Swift 28

2.1.10　Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI) 29

2.1.11　Spectrum-Roentgen-Gamma (SRG) 衛星 30

第 3 章　X 線天文衛星すざく **33**

3.1　概要 34

3.2　軟 X 線反射望遠鏡 (XRT) 35

3.3　X 線 CCD カメラ (XIS) 38

3.3.1 X 線 CCD カメラについて 38
3.3.2 XIS の構造 38
3.3.3 XIS の性能 40

第 4 章 すざく衛星の観測とアーカイブデータ 43

4.1 すざく衛星の観測 44
4.2 すざくデータの処理 44
4.3 カタログ作成に用いるアーカイブデータ 46

第 5 章 天体検出 47

5.1 天体検出に用いるツール 48
5.2 天体検出の準備 50
5.2.1 概要 50
5.2.2 天体データのダウンロード 50
5.2.3 イベントファイルの作成 51
5.2.4 観測イメージの作成 53
5.2.5 Exposure Map の作成 54
5.2.6 較正線源の位置をすべて除去した観測イメージと Exposure Map の作成 56
5.3 ewavelet 57
5.4 誤検出の除去 61

第 6 章 天体のフラックスと有意度の算出 63

6.1 フラックスの算出の原理 64
6.2 変換係数 $A_{s,b}$ の計算 65
6.3 誤検出を除くためのイメージフィッティング 70
6.4 全検出器を足し合わせたイメージフィッティング 71

第 7 章　結果 **73**

7.1　すざくの位置決定精度 74

7.2　各エネルギーバンドでの検出をまとめた結果 74

7.3　個別の天体である確度が高いものについて同一天体にまとめた結果 80

7.4　ライトカーブとスペクトルの抽出 86

7.5　既知の X 線天体との対応 91

第 8 章　考察 **93**

8.1　対応 X 線天体を持たない天体の興味深い時間変動について 94

8.1.1　バックグラウンドの変動だと考えられるもの 97

8.1.2　すざくの位置決定誤差により、新 X 線天体とみなされたもの 99

8.1.3　対応 X 線天体を持たず、興味深いライトカーブを示すもの 107

第 9 章　まとめ **117**

付 録 A　wavdetect による天体検出 **123**

A.1　wavdetect 124

図 目 次

2.1 Uhuru 衛星 17
2.2 4U カタログの全天における感度マップ 18
2.3 4U カタログに掲載されている天体位置 18
2.4 3A カタログの全天マップ 19
2.5 1H カタログの Exposure Map 20
2.6 1H カタログに掲載されている天体位置 21
2.7 Einstein 衛星 22
2.8 RASS の Exposure Map 23
2.9 RASS-BSC に掲載されている天体位置と Hardness Ratio 23
2.10 ASCAGIS のポインティング位置 24
2.11 ASCAGPS カタログに掲載されている天体の有意度マップ 25
2.12 Chandra 衛星の外観 26
2.13 CSC に掲載されている天体位置 26
2.14 XMM-Newton 衛星の外観 27
2.15 3XMM カタログに用いた観測のポインティング位置 28
2.16 SWIFT カタログに掲載されている天体位置と種類 29
2.17 1SXPS カタログで用いられた観測のポインティング位置 29
2.18 MAXI カタログに掲載されている天体位置と種類 30
2.19 eROSITA を構成する装置 31

2.20 eROSITA による全天観測の Exposure Map、バックグラウンドマップ、感度マップ . 32

3.1 X 線天文衛星すざくの外観 34
3.2 X 線天文衛星すざくの軌道 35
3.3 XRT の外観と配置図 36
3.4 PSF のエネルギー依存性 36
3.5 XIS の外観と断面図 39
3.6 XIS の FI と BI の量子効率の比較図 39
3.7 XIS の座標系 40

4.1 すざくデータの処理の流れ 45
4.2 2516 観測のポインティング位置 46
4.3 全検出器を足し合わせた exposure time に対する観測数の分布 46

5.1 メキシカンハット関数 49
5.2 天体検出の準備の流れ 50
5.3 Eta Carinae (ID; 403036010) の観測における XIS0,1,3 のイメージを結合したもの . . 55
5.4 Eta Carinae (ID; 403036010) の観測における XIS0,1,3 の Exposure Map を結合したもの 56
5.5 図 5.3 上の各検出器の較正線源を全て取り除いたもの 57
5.6 図 5.4 上の各検出器の較正線源を全て取り除いたもの 58
5.7 ewavelet の入出力 59
5.8 Eta Carinae (ID; 403036010) の観測における ewavelet による天体検出の結果 59
5.9 Eta Carinae (ID; 403036010) の観測における ewavelet による天体検出の結果 2 62

6.1 RXJ 2056.6 + 4940 (ID; 406014010) の XIS1 の all バンド (0.5−10 keV) のイメージと Crab Nebula の XIS1 における hard (2 − 10 keV) バンドのイメージから作成された Sugizaki et al. (2009) のモデル 69

6.2 RXJ 2056.6 + 4940 (ID; 406014010) のスペクトル 69

6.3 RXJ 2056.6 + 4940 (ID; 406014010) の位置における量子効率と有効面積をかけたもの 69

6.4 Eta Carinae (ID; 403036010) の観測で各検出器における hard バンド (2.0−10 keV) のイメージにある誤検出 70

7.1 すざくの位置決定精度 74

7.2 各エネルギーバンドでの検出をまとめた結果 77

7.2 各エネルギーバンドでの検出をまとめた結果 78

7.2 各エネルギーバンドでの検出をまとめた結果 79

7.3 同一天体を選び出す手順の例 80

7.4 同一天体にまとめた 3549 天体のライトカーブ (一部) 87

7.4 同一天体にまとめた 3549 天体のライトカーブ (一部) 88

7.5 同一天体にまとめた 3549 天体のスペクトル (一部) 89

7.5 同一天体にまとめた 3549 天体のスペクトル (一部) 90

7.6 対応 X 線天体を調べた過程 92

8.1 興味深い時間変動を探す過程 94

8.2 バックグラウンドの変動であると考えられる天体のライトカーブ 98

8.3 すざくの観測目的天体とすでに分類されている天体のライトカーブ 103

8.3 すざくの観測目的天体とすでに分類されている天体のライトカーブ 104

8.4 すざくの観測目的天体でなく、詳しい分類もされていない興味深い天体のライトカーブ 105

8.4 すざくの観測目的天体でなく、詳しい分類もされていない興味深い天体のライトカーブ 106

8.5 興味深い変動を示す天体のライトカーブ 113

8.5 興味深い変動を示す天体のライトカーブ 114
8.5 興味深い変動を示す天体のライトカーブ 115
8.5 興味深い変動を示す天体のライトカーブ 116

A.1 PSF の広がりの位置依存性を調べた結果 125
A.2 Eta Carinae(ID; 403036010) の観測で 0.5−10 keV のイメージにおける wavdetect による天体検出の結果 1 126
A.3 Eta Carinae(ID; 403036010) の観測で 0.5−10 keV のイメージにおける wavdetect による天体検出の結果 2 126

表 目 次

2.1 本章で紹介したカタログについて 16

3.1 すざく衛星の基本性能 37

5.1 ウェーブレット変換を用いた検出の長所と短所 48

5.2 Eta Carinae (ID; 403036010) の観測における ewavelet での検出結果 60

6.1 RXJ 2056.6 + 4940 のスペクトルフィッティング結果 67

6.2 変換係数のまとめ 68

6.3 Eta Carinae (ID; 403036010) の hard バンド (2.0−10 keV) のイメージにある誤検出のフラックス 71

7.1 検出された天体 (一部) 75

7.1 検出された天体 (一部) 76

7.2 同一天体でまとめた結果 82

7.2 同一天体でまとめた結果 83

7.2 同一天体でまとめた結果 84

7.2 同一天体でまとめた結果 85

8.1 対応 X 線天体を持たない変動の激しい 47 天体 95

8.1 対応 X 線天体を持たない変動の激しい 47 天体 96

8.2 すざくの位置決定誤差により、新 X 線天体とみなされたもの 102

8.3 他波長の天体と対応している可能性があるもの 110
8.3 他波長の天体と対応している可能性があるもの 111
8.3 他波長の天体と対応している可能性があるもの 112

第1章　概要

X 線天文衛星「すざく」は 2005 年 7 月に打ち上げられ、2015 年 5 月まで観測を継続した。「すざく」に搭載されている X 線 CCD カメラ XIS (X-ray Imaging Spectrometer) は、$17' \times 17'$ の視野と約 $1'$ の点源応答関数を持ち、0.2–12 keV の X 線で撮像分光観測を行った。観測目的天体は通常、視野の中心に配置されるが、視野内に存在する他の X 線天体も同時に観測される。「すざく」の観測データはアーカイブ化されており、そのアーカイブから XIS の視野に含まれるソース情報をまとめたカタログを作成できる。XIS の感度は同様のエネルギー帯を持つ Chandra 衛星や XMM 衛星には及ばないが、それらが観測していない天域においては、新たな X 線天体が発見される可能性がある。また、X 線天体は大きな時間変動を示すものが多く、Chandra 衛星や XMM 衛星が観測した天域においても、突発天体を発見したり、既知の天体の時間変動を調べることができる。筆者はこれらの可能性に科学的価値を見出だし、「すざく天体カタログ」の開発をした。

カタログ作成においては、まず天体検出が必要である。そこで筆者は、ウェーブレット変換を用いた天体検出を行う XMM 衛星の標準ツールである ewavelet を採用した。次に、「すざく」衛星の応答関数を考慮し、検出されたカウントレートから物理的なフラックスを計算するアルゴリズムを開発した。これらの検出アルゴリズムを、2015 年 10 月までに公開されており、Normal mode で観測されている全 2516 観測 (全天の 0.4 %) に対して適用した。その結果、有意度が 5σ 以上の X 線源が 5531 個検出された。5σ 検出感度は、すざくの典型的な観測時間 134 ks (全検出器を足し合わせた) で、5.0×10^{-14} erg cm^{-2} s^{-1} (0.5–10 keV) である。 また、同じ天域の複数観測がある場合、位置決定精度を考慮し、個別の天体である確度が高い同一天体を判定した。5531 個の X 線源から同一天体にまとめると、3549 天体になった。これらの観測間の時間変動も調べた。続けて、3549 天体のライトカーブとスペクトルを抽出した。さらに、他の X 線天文衛星で観測された既知の X 線天体との対応を調べた。その結果、対応 X 線天体がないものは 1156 天体あることが分かった。最後に、これら 1156 天体の時間変動に注目し、新たな X 線天体である可能性が高く、非常に面白い変動を示すものを 22 天体選び出した。それらの天体について考察を行った。

第2章　序論

Contents

2.1　X 線天文衛星とカタログ 15
2.1.1　Uhuru 17
2.1.2　Ariel-5 18
2.1.3　High Energy Astrophysics Observatory-1 (HEAO-1) 20
2.1.4　Einstein 21
2.1.5　ROntgen Satellite (ROSAT) 22
2.1.6　Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics (ASCA) 23
2.1.7　Chandra 25
2.1.8　XMM-Newton 27
2.1.9　Swift 28
2.1.10　Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI) 29
2.1.11　Spectrum-Roentgen-Gamma (SRG) 衛星 30

本章の執筆にあたり、「シリーズ現代の天文学 17 宇宙の観測 —高エネルギー天文学」(日本評論社、井上一 · 小山勝二 · 高橋忠幸 · 水本好彦 編) と 「進化する X 線天文衛星」(大橋隆哉 1993, 天文月報 (6 月号), 86, 244) の記述を参考にした。

2.1　X 線天文衛星とカタログ

この章では、これまでに出版された X 線天体のカタログを紹介する。この節で紹介するカタログの一覧を、表 2.1 にまとめる。

表 2.1: 本章で紹介したカタログをまとめたもの。

カタログ名 (衛星名)	期間 [a]	天域の広さ	天体数	エネルギーバンド	感度	Reference
		(deg^2)		(keV)	(erg cm^{-2} s^{-1})	
4U (Uhuru)	1970.12–1973.3 (1970.12–1973.3)	全天	339	2–6	2.7×10^{-11}	Forman et al. (1978)
3A (Ariel-5)	1974.10–1980.3 (1974.10–1980.3)	全天	251	2–6	3.12×10^{-11}	McHardy et al. (1981)
1H (HEAO-1)	1977.8–1978.2 (1977.8–1979.3)	全天	842	0.5–25	3.6×10^{-12} [b]	Wood et al. (1984)
2E (Einstein)	1978.11–1982.3 (1978.11–1982.3)	800	4,806	0.16–3.5	7.0×10^{-14}	Harris et al. (1993)
RX (ROSAT)	1990.6–1990.12 (1990.6–1999.2)	全天	125,000	0.1–2.4	$\sim 10^{-13}$	Boller et al. (2014)
ASCAGIS (ASCA)	1993.5–2000.5 (1993.5–2000.5)	278	2,533	0.7–10	1.0×10^{-13}	Ueda et al. (2005)
ASCAGPS (ASCA)	1993.5–2000.5 (1993.5–2000.5)	63	163	0.7–10	3.0×10^{-13}	Sugizaki et al. (2001)
CSC (Chandra)	1999.7–2007.7 (1999.7–)	320	94,676	0.2–7.0	4.0×10^{-15}	Evans et al. (2010)
3XMM (XMM-Newton)	2000.3–2012.2 (2000.3–)	877	396,910	0.2–12	2.4×10^{-14} [c]	Rosen et al. (2015)
SWIFT (Swift)	2004.12–2010.9 (2004.12–)	全天	1,171	14–195	1.0×10^{-11}	Baumgartner et al. (2013)
1SXPS (Swift)	2005.1–2011.12 (2004.12–)	1905	151,524	0.3–10	9.0×10^{-14}	Evans et al. (2014)
2MAXI (MAXI)	2009.7–2012.9 (2009.7–)	全天	500	3–10	7.5×10^{-12}	Hiroi et al. (2013)
eROSITA (SRG)	–	全天	–	0.5–10	6.0×10^{-14}	Merloni et al. (2012)
本研究 (SUZAKU)	2005.7–2015.8 (2005.7–2015.8)	175	3,549	0.5–10	5.0×10^{-14}	本論文 7 章

[a] カタログに掲載されている天体の観測期間。かっこの中はミッション期間。

[b] 5 keV でのフラックス (erg cm^{-2} s^{-1} keV^{-1})

[c] カタログに掲載されている天体の平均フラックス。

2.1.1 Uhuru

世界で初めての X 線天文衛星が 1970 年 12 月ケニア沖からアメリカ航空宇宙局 (NASA) によって打ち上げられ、スワヒリ語の自由という意味で Uhuru と名付けられた。本体は 1 m にも満たない、約 64 kg という衛星で、有効面積 840 cm^2 で角分解能 $5° \times 5°$ の比例計数管を 2 台搭載していた。比例計数管の X 線入射窓の前面に機械的コリメータをのせて X 線入射方向を限定し、衛星を周期約 10 分でゆっくり自転させ、自転軸を変えながら 2 – 20 keV の X 線で全天をサーベイした。感度は、2–6 keV で 2.7×10^{-11} erg cm^{-2} s^{-1} である [1]。図 2.1 に Uhuru 衛星の外観と装置を示す。

Uhuru 衛星が観測した天体はカタログ化され、第 4 版まで出版されており、4U カタログと呼ばれている。この 4U カタログには、1970 年 12 月 12 日から 1973 年 3 月 18 日 (1972 年の 7 月から 12 月を除く) までの 429 日間に観測された 339 天体の 2 – 6 keV でのフラックスなどが記載されている (Forman et al. 1978)。図 2.2 と図 2.3 に Uhuru 衛星の全天の感度マップと天体の位置をそれぞれ示す。Uhuru 衛星による観測から、連星系、超新星残骸、セイファート銀河と銀河団が検出された。また、銀河団からの広がった X 線放射が発見された。

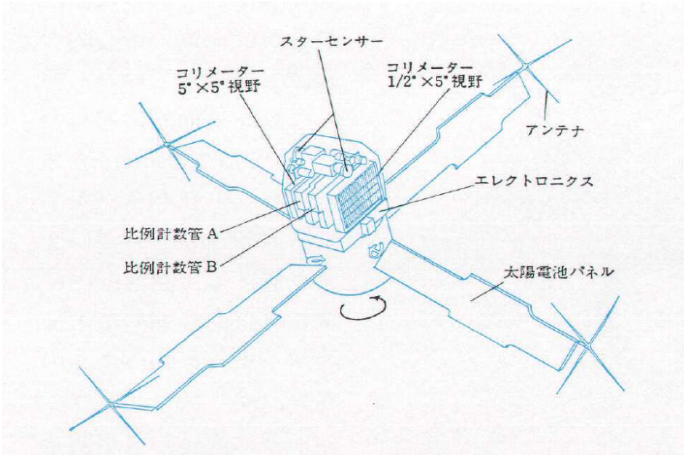

図 2.1: Uhuru 衛星 (大橋隆哉 1993, 天文月報 (6 月号), 86, 244)。

[1] https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/uhuru/uhuru.html

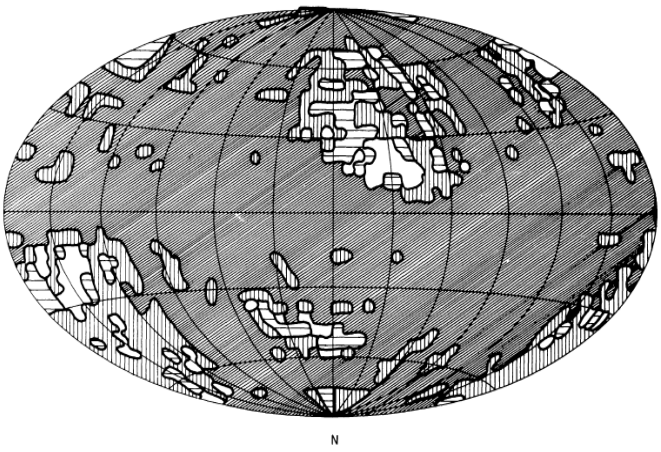

図 2.2: 4U カタログの全天における感度マップ。横線は $5-10$ counts s^{-1}、縦線は $2-5$ counts s^{-1} の感度である領域。斜線部分は 2 counts s^{-1} の感度である領域で、空白は観測されていない領域。銀河座標系で描かれている (Forman et al. 1978)。

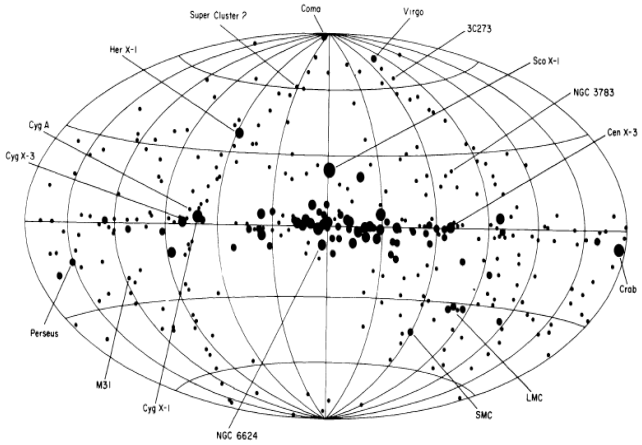

図 2.3: 4U カタログに掲載されている天体位置。銀河座標系で描かれている (Forman et al. 1978)。 シンボルの大きさが X 線強度を表している。

2.1.2 Ariel-5

Ariel-5 衛星は、1974 年 10 月 15 日にインド洋のサン · マルコ · プラットホームから打ち上げられたイギリスの X 線天文衛星である [2]。1960 年代初頭から 1980 年にかけて行われたイギリスの人工衛星プログラムである Ariel 計画の 5 番目の衛星でもある。この衛星は、有効面積 3 cm^2 で 3–6 keV に感度を持つピンホールカメラ 1 台からなる All-Sky Monitor (ASM) と、有効面積 290 cm^2 で 1.5–20 keV

[2] http://heasarc.nasa.gov/docs/ariel5/ariel5.html

に感度を持つ比例計数管 2 台からなる Sky Survey Instrument (SSI) を搭載していた (Priedhorsky & Holt 1987)。ASM の角分解能は $10^\circ \times 10^\circ$ で、機体が一回転する度に全天の大部分を観測した。SSI の角分解能は $0.75^\circ \times 10^\circ$ である。

Ariel-5 衛星の SSI が観測した天体のカタログは、第 3 版まで出版されており、天体名に「3A」が付けられている (3A カタログ)。このカタログには、打ち上げからミッション終了の 1980 年 3 月までの約 5.5 年間に観測された 251 天体の $2-6$ keV でのフラックスなどが記載されている (Warwick et al. 1981; McHardy et al. 1981)。図 2.4 に 3A カタログに掲載されている天体位置と Ariel-5 衛星の感度マップを示す。感度は、2–6 keV で 3.12×10^{-11} erg cm^{-2} s^{-1} である。Ariel-5 衛星による観測から、X 線新星など時折明るくなる天体、長周期で明るくなるパルサー (A 0535+262) が発見された。その他にも、系外天体からの鉄輝線の放射も初めて発見された。また、セイファート銀河の研究などで成果をあげている。

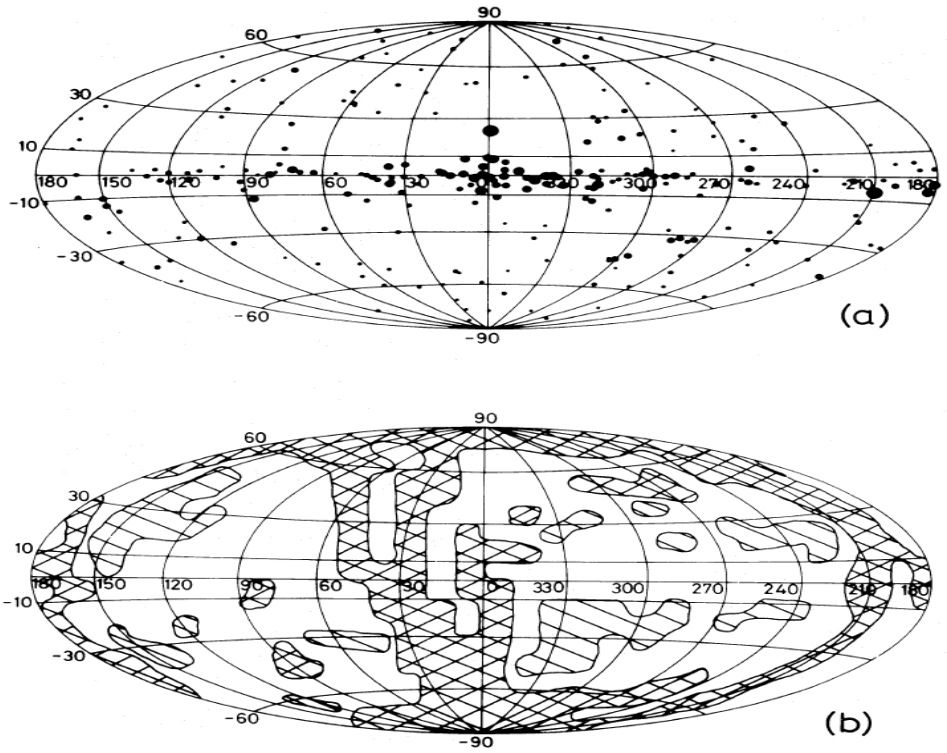

図 2.4: (a) 3A カタログに掲載されている天体の位置。黒丸の大きさは明るさを表している。(b)Ariel-5 衛星の感度マップ。濃い網の領域ほど、感度が良いことを示す。銀河座標系で描かれている (McHardy et al. 1981)。

2.1.3　High Energy Astrophysics Observatory-1 (HEAO-1)

HEAO-1 衛星は、1977 年 8 月 12 日にアメリカのフロリダ州にあるケープ·カナベラルから NASA によって打ち上げられた重量 3 t の大型衛星である [3]。この衛星には、Large-Area Sky Survey instrument (LASS)、Cosmic X-ray Experiment (CXE)、Modulation Collimator instrument (MC)、Hard X-Ray / Low-Energy Gamma-ray experiment の 4 種類の観測機器が搭載された。LASS は、0.25–25 keV のエネルギー範囲をカバーし、有効面積 1350–1900 cm^2 の比例計数管 7 台から構成されている [4]。角分解能は $0.1^\circ \times 1^\circ$ で、感度は 5 keV で 0.25 mCrab である。CXE は、2–60 keV のエネルギーをカバーし、Low Energy Detectors (LED)、Medium Energy Detector (MED)、High Energy Detector (HED) の 3 つの検出器を組みあわせたものである。4 つ目の観測機器は、ヨウ化ナトリウム (NaI) のシンチレーション検出器を用いており、20 keV から 10 MeV に感度を持つ。

打ち上げから 6ヶ月間に LASS の全天サーベイによって検出された 842 天体がカタログ化されており、天体名に「1H」が付けられている (1H カタログ)。このカタログには、0.5–25 keV、2–6 keV、2–10 keV でのカウントレートなどが記載されている (Wood et al. 1984)。図 2.5 に 1H カタログの Exposure Map、図 2.6 にカタログに掲載されている天体位置を示す。感度は、5 keV で 3.6×10^{-12} erg cm^{-2} s^{-1} keV^{-1} である。 HEAO-1 の観測から、1 mCrab (2.4×10^{-11} erg cm^{-2} s^{-1}) 強度までの完全な $\log N - \log S$ 関係、セイファート銀河の X 線スペクトルが光子指数 1.6 のベキ関数で表せること、X 線背景放射のスペクトルが 40 keV の制動放射に良く合うことなどが発見された。

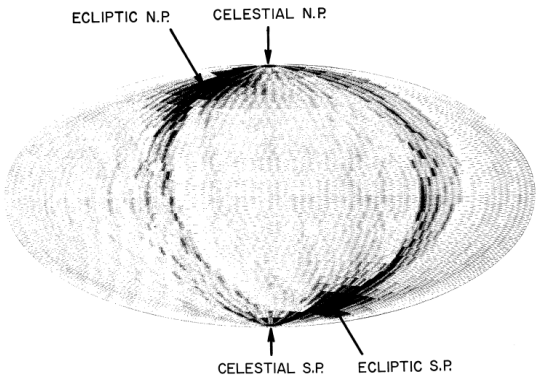

図 2.5: 1H カタログの Exposure Map。色が濃いほど、exposure が長い。銀河座標系で描かれている (Wood et al. 1984)。

[3] https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heao1/heao1.html
[4] http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1977-075A-01

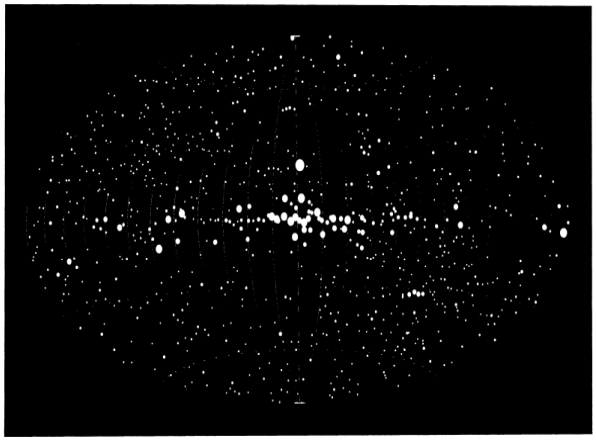

図 2.6: 1H カタログに掲載されている天体位置。白丸が大きいほど、フラックスが大きいことを表している。銀河座標系で描かれている (Wood et al. 1984)。

2.1.4 Einstein

Einstein 衛星は 1978 年に NASA によって打ち上げられ、初めて X 線望遠鏡が搭載された。焦点距離 3.4 m の Wolter I 型 (3.2 節) の X 線反射鏡によって、0.1–4 keV のエネルギーの X 線を結像、集光した。視野中心での角分解能は約 2 秒角、集光面積は 0.25 keV で 400 cm^2、4 keV で 30 cm^2 であった。この衛星には、4 種類の焦点面検出器が搭載されており、撮像能力を持つものは High Resolution Imager (HRI) と Imaging Proportional Counter (IPC) である。HRI は、位置検出型の検出器で、望遠鏡の持つ 2 秒角の角分解能での撮像を可能にした。IPC は位置検出型の比例係数管で、X 線天体の位置を空間分解能 1 分角の誤差以内で決定できた。IPC の視野は 1 平方度である。他に、位置分解能を持たない Solid State Spectrometer と Focal Plane Crystal Spectrometer が搭載されていた。

Einstein 衛星は、反射望遠鏡によりそれまでの観測装置に比べて 2 桁高い感度と撮像能力を実現し、ポインティング観測を行った。打ち上げからミッション終了までの 2.5 年間に観測された 3969 個のポインティング (約 800 平方度) で検出された 4806 天体が掲載されている Einstein IPC Sources Catalog がある。天体名に「2E」が付けられている。このカタログには、0.16–3.5 keV のカウントレートなどが記載されている (Harris et al. 1993)。感度は、0.16–3.5 keV で 7.0×10^{-14} erg cm^{-2} s^{-1} である。Einstein 衛星は、銀河系内については、約 50 個の超新星残骸を捉え、そのうち 10 個以上について中心にパルサーが存在することを発見した。系外については、アンドロメダ銀河内に 100 個以上の X 線源の発見、楕円銀河やスターバースト銀河にホットガスハローの発見、活動銀河と銀河団の光度関数の宇宙論的進化、X 線背景放射に占めるクエーサーの割合の推定など、数々の成果を上げた。

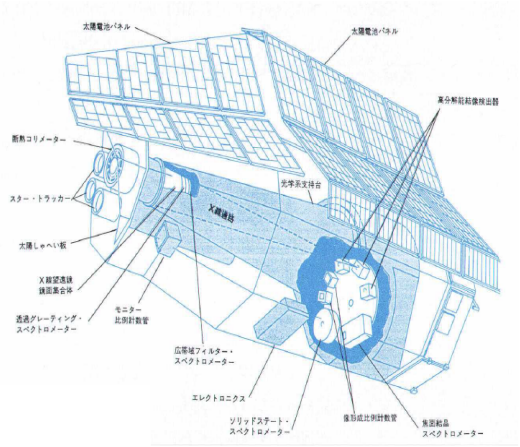

図 2.7: Einstein 衛星 (大橋隆哉 1993, 天文月報 (6 月号), 86, 244)。

2.1.5 ROntgen Satellite (ROSAT)

ROSAT 衛星は、ドイツがイギリス、アメリカとの国際協力で開発した衛星で、1990 年に打上げられた。主要観測装置である X 線望遠鏡と広視野の極端紫外線望遠鏡を搭載した。X 線望遠鏡のエネルギー範囲は、0.1–2 keV である。焦点面検出器には Position Sensitive Proportional Counter (PSPC) と High Resolution Imager (HRI) が使われた。PSPC は、直径 2 度の視野、視野中心で 25 秒角の空間分解能、1 keV で約 300 cm^{-2} の大きな有効面積を持つ。HRI は、エネルギー分解能はないが、視野中心での空間分解能は 2 秒角と、当時では最高の性能を持っていた。

ROSAT 衛星は、最初の 6ヶ月で高感度かつ高角度分解能の全天サーベイ (RASS; ROSAT All-Sky Survey) を行い、その後はポインティング観測を行った。全天サーベイからは、125,000 個の X 線天体が検出された。これらの X 線天体は、RASS Bright Source Catalog (RASS-BSC; Voges et al. 1999) と RASS Faint Source Catalogue[5] (RASS-FSC) に掲載されている。天体名に「RX」が付けられている (2 つ合わせて、RX カタログと呼ぶ)。RASS-BSC には PSPC で検出され、0.05 counts s^{-1} 以上で、有意度が 99.9%である 18,811 天体の 0.1–2.4 keV でのフラックスなどが記載されている。一方、RASS-FSC には、有意度が 99.9%以下である約 106,000 天体が掲載されている。感度は、0.1–2.4 keV で $\sim 10^{-13}$ erg cm^{-2} s^{-1} である (Boller et al. 2014)。図 2.8 に、RASS の Exposure Map、図 2.9 に RASS-BSC に掲載されている天体位置と Hardness Ratio を示す。ROSAT 衛星では、活動銀河核の軟 X 線放射成分や銀河団の高温ガスの空間分布の研究など幅広い成果をあげた。

[5] http://www.xray.mpe.mpg.de/rosat/survey/rass-fsc/

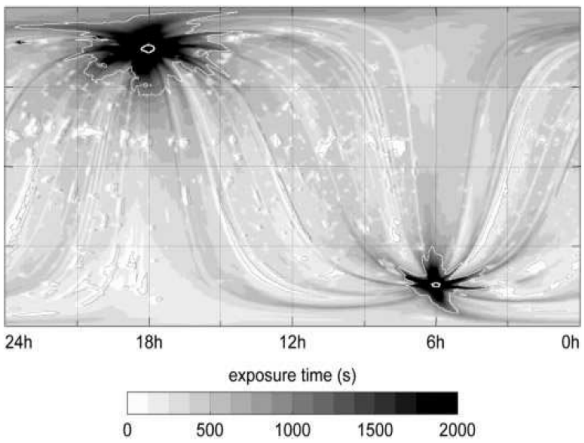

図 2.8: RASS の Exposure Map。色が濃いほど、exposure が長い。赤道座標系で描かれている (Voges et al. 1999)。

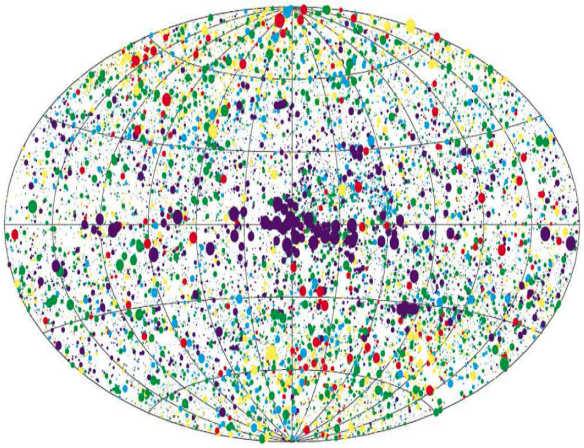

図 2.9: RASS-BSC に掲載されている天体位置と Hardness ratio。色が紫になるほどハードな天体で、丸印が大きいほどフラックスが大きい。銀河座標系で描かれている (Voges et al. 1999)。

2.1.6 Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics (ASCA)

ASCA (和名; あすか) は、日本がアメリカとの国際協力で開発した衛星で、1993 年に打上げられた。日本としては、初めて本格的な X 線反射鏡を搭載した X 線天文衛星である。ROSAT の反射鏡は超低膨張率のガラスで作られているが、あすかはアルミの薄板を用いることで軽量化に成功した。あすか衛星は、約 10 keV の X 線エネルギーまでの集光撮像観測を初めて可能にした。さらに、焦点面検出器として、個々の X 線光子のエネルギーを測定できる X 線 CCD (Charge Coupled Device) を使用した初めての衛星である。これにより、鉄輝線付近 ($\sim$ 6.4 keV) でのエネルギー分解能は蛍光比

例計数管に比べて約 3 倍向上した。あすか衛星には同じ方向を観測する 4 台の多層薄板型 X 線が搭載され、その 2 台の焦点面には X 線 CCD カメラ (SIS; Solid Imaging Spectrometer) が、残りの 2 台には、位置検出型蛍光比例係数管 (GIS; Gas Imaging Spectrometer) が置かれた。GIS は SIS に比べてエネルギー分解能は劣るが、より広い視野と高いエネルギーでより大きな感度を持つので、SIS と相補的な役割を果たした。あすか衛星は、ポインティング観測を行った。

あすか衛星が検出した天体のカタログとして、高銀緯 ($|b| > 10°$) については ASCA GIS Source Catalog (ASCAGIS; Ueda et al. 2001, Ueda et al. 2005)、銀河面 ($|l| < 45°, |b| < 0°.4$) については ASCA Galactic Plane Survey X-Ray Source Catalog (ASCAGPS; Sugizaki et al. 2001) がある。ASCAGIS カタログには、1993 年から 2000 年まで行われた ASCA Medium Sensitivity Survey (278 平方度) で観測された 2533 天体の 0.7–7.0、2–10、0.7–2.0 keV でのフラックスなどが記載されている。天体名に「1AXG」が付けらている。感度は、0.7–10 keV で 10^{-13} erg cm^{-2} s^{-1} である。図 2.10 に ASCAGIS のポインティング位置を示す。ASCAGPS カタログには、ASCA Galactic Plane Survey (63.04 平方度) で GIS によって検出された 163 天体の 0.7–10 keV のフラックスなどが記載されている。天体名に「AX」が付けらている。感度は、0.7–10 keV で $10^{-12.5}$ erg cm^{-2} s^{-1} である。図 2.11 に ASCAGPS カタログに掲載されている天体の有意度マップを示す。あすか衛星は、活動銀河核からの非対称に広がった鉄輝線の発見、銀河中心付近の分子雲からの鉄からの蛍光 X 線の発見、原始星からの X 線放射の発見などの成果をあげた。

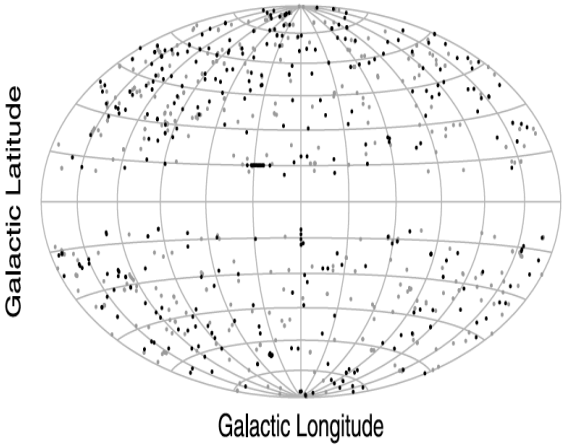

図 2.10: ASCAGIS のポインティング位置。 銀河座標系で描かれている (Ueda et al. 2005)。

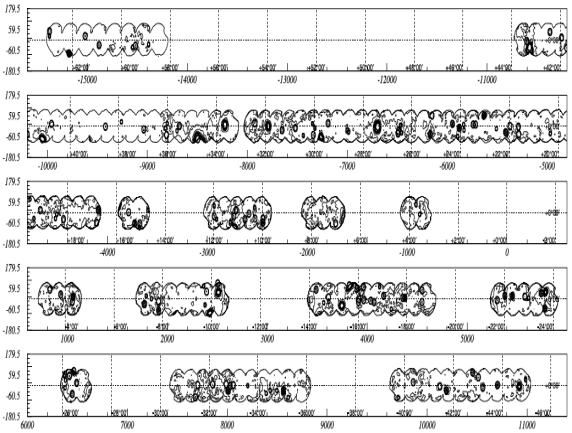

図 2.11: ASCAGPS カタログに掲載されている天体の有意度マップ 。大きい円が 5 σ 以上の天体、小さい円が 4 σ 以上 5 σ 以下の天体。銀河座標系で描かれている (Sugizaki et al. 2001)。

2.1.7 Chandra

Chandra 衛星は、Einstein 衛星に続く X 線反射望遠鏡を搭載し、1999 年にスペースシャトルから打上げられたアメリカの大型衛星である。この衛星の最大の特徴は、視野中心で 0.5 秒角という高い空間分解能である。X 線反射鏡 (High Resolution Mirror Assembly) は、焦点距離 10 m のウォルター I 型 X 線反射鏡で、10 keV までカバーしている。焦点面 X 線検出器として、X 線 CCD カメラ (ACIS; Advanced CCD Imaging Spectrometer) と高分解能カメラ (HRI; High Resolution Imager) を搭載している。さらに、反射鏡と検出器の間に、2 種類の透過型回折格子を出し入れすることができ、高空間分解能を生かして、高エネルギー分解能を達成している。Chandra 衛星はポインティング観測を行っている。図 2.12 に Chandra 衛星の外観を示す。

Chandra 衛星が検出した天体のカタログとして、打ち上げから 8 年の間に検出された天体をまとめた Chandra Source Catalog (CSC; Evans et al. 2010) が出版されている (現在、第一版のみ)。天体名には「CXO」が付けらている。CSC には、ACIS で検出された 320 平方度中にある 94,676 天体の 0.2–0.5、0.5–1.2、1.2–2.0、2.0–7.0、0.5–7.0 keV でのフラックスなどが記載されている。感度は、0.2–7.0 keV で 4×10^{-15} erg cm^{-2} s^{-1} である。図 2.13 に、検出された天体位置を示す。Chandra 衛星の成果の一つとして、宇宙背景 X 線放射を空間的に高い割合で分解できたことがある。それまでに、ROSAT 衛星は 2 keV の X 線エネルギーで宇宙背景 X 線放射の 70–80 %を個々の X 線天体に分解し、2–10 keV のエネルギー範囲ではあすか衛星により、その 30%が個々の天体に分解されていた。さらに、Chandra 衛星では、2–10 keV のエネルギー範囲で、約 80%を個々の X 線源に分解することができた。

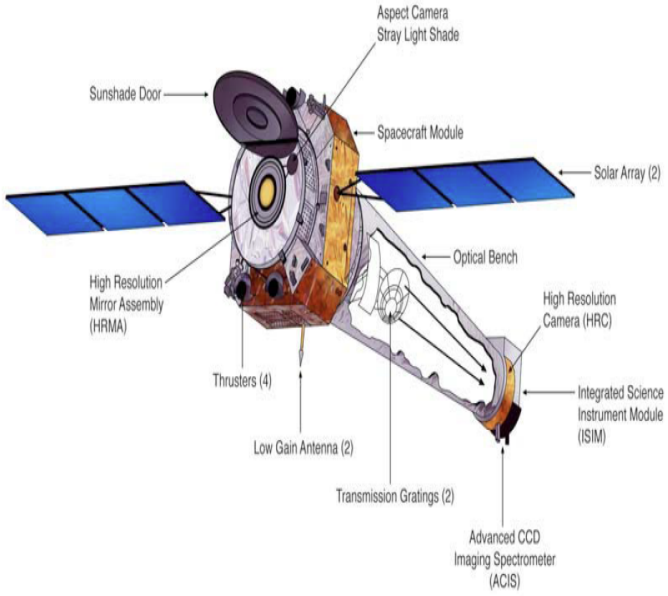

図 2.12: Chandra 衛星の外観 (Weisskopf 2012)。

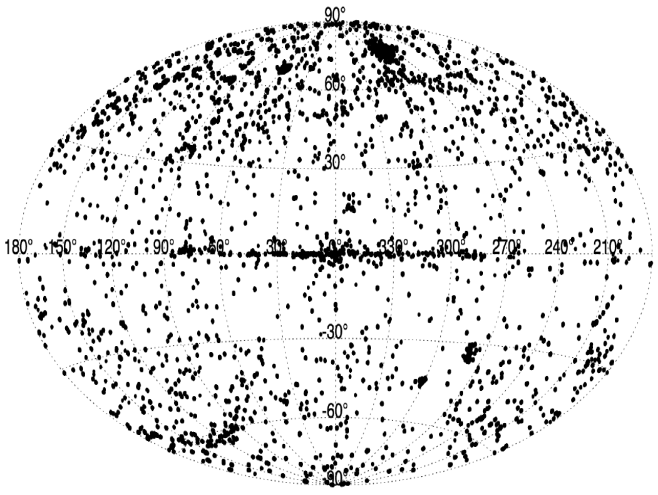

図 2.13: CSC に掲載されている天体位置。銀河座標系で描かれている (Evans et al. 2010)。

2.1.8 XMM-Newton

XMM (X-ray Multi-Mirror Mission)-Newton 衛星はヨーロッパ宇宙機関 (ESA) が 1999 年に打ち上げた 3 台の X 線反射鏡を持つ大型の X 線天文衛星である。望遠鏡の有効面積は 1 keV で 3 台合わせて 1400 cm^2、空間分解能は 15 秒角である。3 台の望遠鏡の焦点面それぞれに X 線 CCD カメラ (EPIC; European Photon Imaging Camera) が置かれている。その 1 台は PN-CCD と呼ばれ、縦方向の転送のみを行うものである。他の 2 台には、反射型回折格子 (RGS; Reflection Grating Spectrometer) が装備され、回折した X 線を検出するための専用の X 線 CCD カメラ (MOS1、MOS2) が備えられている。XMM-Newton 衛星の特徴は、鉄輝線 ($\sim$ 6.4 keV) 周辺で約 1000 cm^2 の大きな集光面積と X 線 CCD の分解能を組み合わせた分光観測と、$\sim$2 keV 以下における RGS による点源の高分解分光観測である。XMM-Newton 衛星は、ポインティング観測を採用している。図 2.14 に XMM-Newton 衛星の外観を示す。

XMM-Newton 衛星が検出した天体のカタログとして、XMM-Newton serendipitous source catalog があり、現在、第 3 版まで出版されている (Rosen et al. 2015)。天体名に「3XMM」が付けられている (3XMM カタログ)。このカタログには、877 平方度中で検出された 396,910 天体の 0.2–0.5、0.5–1.0、1.0–2.0、2.0–4.5、4.5–12、0.2–12 keV のフラックスなどが記載されている。図 2.15 に 3XMM カタログに用いた観測のポインティング位置を示す。平均感度は、0.2–12 keV で 2.4×10^{-14} erg cm^{-2} s^{-1} である。

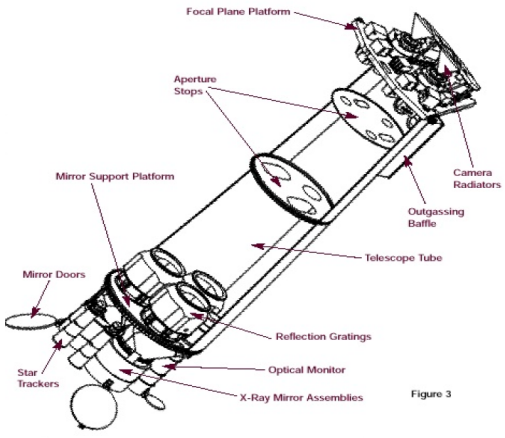

図 2.14: XMM-Newton 衛星の外観 (http://xmm.esac.esa.int/)。

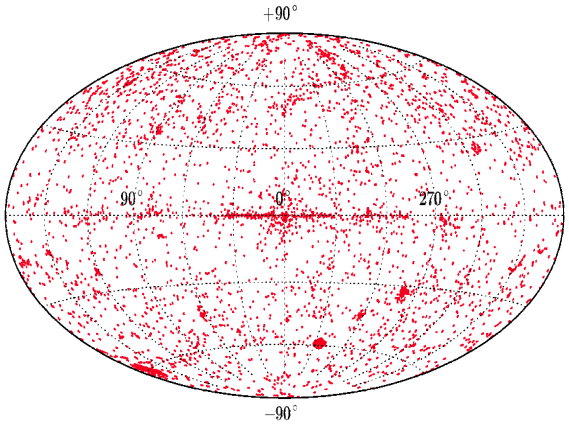

図 2.15: 3XMM カタログに用いた観測のポインティング位置。銀河座標系で描かれている (Rosen et al. 2015)。

2.1.9 Swift

2004 年に打上げられた Swift 衛星は、ガンマ線バーストの監視に加えて、自動追尾まで行う初めての衛星である。Swift 衛星には、10–150 keV 程度に感度を持ち、全天の約 6 分の 1 をカバーする広い視野のガンマ線撮像検出器 (BAT; Burst Alert Telescope が搭載されている。また、0.3–10 keV に感度を持つ X 線望遠鏡 (XRT) と 170–600 nm に感度を持つ紫外線可視光望遠鏡 (UVOT) も搭載されている。XRT は X 線 CCD を焦点面検出器として持ち、BAT が検出したガンマ線バーストを追観測する。UVOT は、XRT と同様にガンマ線バーストを追観測し、1ks の観測で 24 等の明るさの天体を検出できる。Swift 衛星は、ガンマ線、X 線、紫外線、可視光線に渡る広い領域でガンマ線バーストとその残光を観測することができる。

BAT が検出した天体のカタログとして、Swift BAT 70-Month Hard X-ray Survey catalog がある (Baumgartner et al. 2013)。天体名には「SWIFT」が付けられている (SWIFT カタログ)。このカタログには、2004 年 12 月から 2010 年 9 月までの 70ヶ月間に検出された 1,171 天体の 14–195 keV でのフラックスなどが記載されている。感度は 14–195 keV で 1.0×10^{-11} erg cm^{-2} s^{-1} である。図 2.16 に SWIFT カタログに掲載されている天体の位置と種類を示す。また、XRT が検出した天体カタログとして、1SXPS (Swift-XRT point source) カタログがある (Evans et al. 2014)。天体名には「1SXPS」が付けられている。このカタログには、2005 年 1 月から 2012 年 10 月までに 1905 平方度で検出された 151,524 天体の 0.3–10 keV でのフラックスなどが掲載されている。感度は、0.3–10 keV で 9×10^{-14} erg cm^{-2} である。図 2.17 に 1SXPS カタログのポインティング位置を示す。

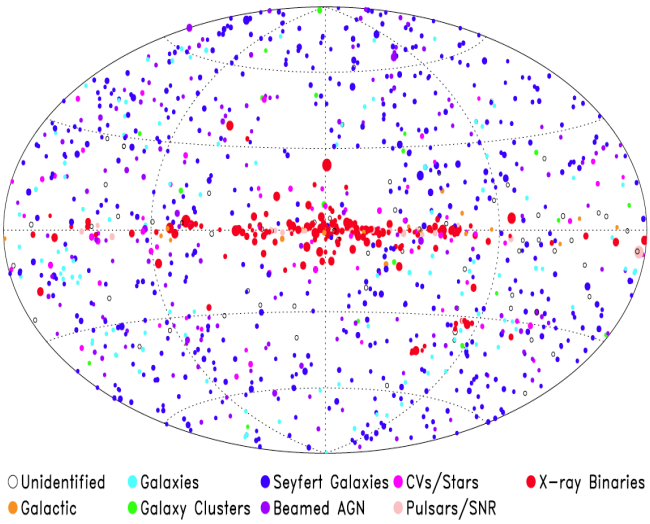

図 2.16: SWIFT カタログに掲載されている天体位置と種類。銀河座標系で描かれている (Baumgartner et al. 2013)。

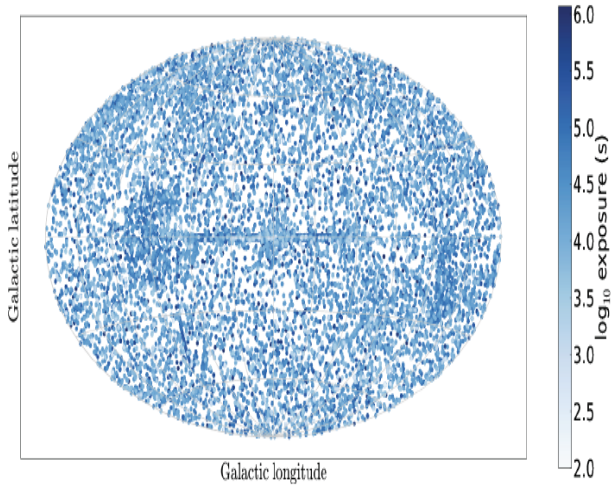

図 2.17: 1SXPS カタログで用いられた観測のポインティング位置。銀河座標系で描かれている (Evans et al. 2014)。

2.1.10 Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI)

全天 X 線監視装置 (MAXI; Monitor of All-sky X-ray Image) は 2009 年 7 月 23 日に国際宇宙ステーションきぼう実験棟船外実験プラットフォームに取り付けられた X 線観測装置である [6]。宇宙ステーションが地球を周回するのを利用して、全天観測を行っている。MAXI には、比例計数管を用い

[6] http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/maxi/

たガススリットカメラ (GSC; Gas Slit Camera) と X 線 CCD スリットカメラ (SSC; Solid-State Slit Camera) の 2 種類のカメラが搭載されている。GSC は 2–30keV を、SSC は 0.5–10keV をカバーする。角分解能は約 1 度である。

MAXI が検出した天体のカタログして、37-month MAXI/GSC source catalog が出版されている。天体名に「2MAXI」が付けられている (2MAXI カタログ; Hiroi et al. 2013)。このカタログには、2002 年 9 月から 2012 年 10 月までの 37ヶ月の間に観測された、銀緯 $b > |10°|$ で有意度が 7 σ 以上である 500 天体の 4–10、3–4 keV のフラックスなどが記載されている。感度は 4–10 keV で 7.5×10^{-12} erg cm^{-2} s^{-1} である。このエネルギーバンドの全天サーベイ装置では過去最高感度である。図 2.18 に MAXI カタログに掲載されている天体位置と種類を示す。

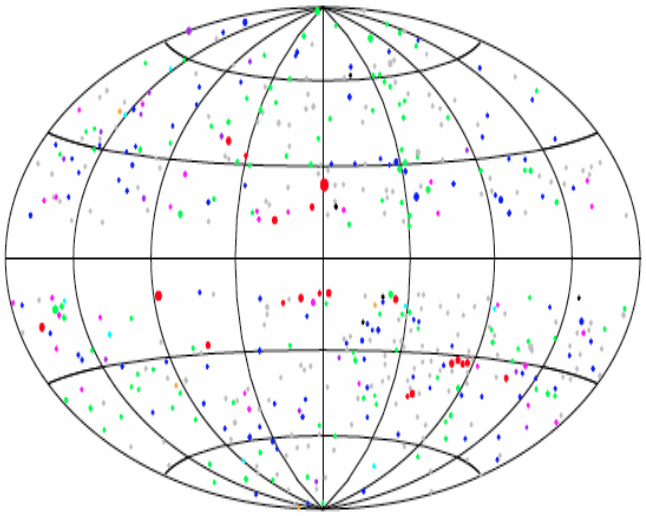

図 2.18: MAXI カタログに掲載されている天体位置と種類。銀河座標系で描かれている。 黒が Swift カタログの天体で同定されていないもの。シアンが銀河。紫がセイファート銀河とブレーザー。マゼンタが星。赤が X 線連星。丸印の大きさはフラックスの明るさを表している (Hiroi et al. 2013)。

2.1.11 Spectrum-Roentgen-Gamma (SRG) 衛星

SRG 衛星はドイツとロシアが共同で計画している、2017 年に打ち上げられ、第 2 ラグランジュポイントを周回する予定の衛星である (Predehl & Pavlinsky 2014)。打ち上げから 3ヶ月後から 4 年間は全天観測を行い、その後 3.5 年間はポインティング観測を行う予定である。SRG 衛星の主要なミッションとして、extended ROentgen Survey with an Imaging Telescope Array (eROSITA; Merloni et al. 2012) を用いた全天観測ミッションが計画されている。eROSITA は 7 台の X 線望遠鏡とそれぞ

れの焦点面に置かれた、XMM 衛星搭載の EPIC-pn と同様の CCD 検出器から構成される (図 2.19)。エネルギー範囲は 0.5–10 keV、エネルギー分解能は 6 keV で 138 eV、有効面積は 1keV で 1400 cm^2 である。視野は 0.8 平方度、角度分解能は視野中心で 15 秒角である。図 2.20 に予想される全天観測の Exposure Map、バックグラウンドマップ、感度マップを soft バンド (0.5–2.0 keV) と hard バンド (2.0–10 keV) それぞれについて示す。予想される感度は、0.5–10 keV で 6.0×10^{-14} erg cm^{-2} s^{-1} である。eROSITA の科学的目標は、

- 銀河団ガスのダイナミクス、銀河系高温ガスの起源を明らかにするために、50,000 から 100,000 個の銀河団を発見すること
- 隠された活動銀河核を統計的に調べるために、まだ見つかっていないものを 300,000 個発見すること

などである。

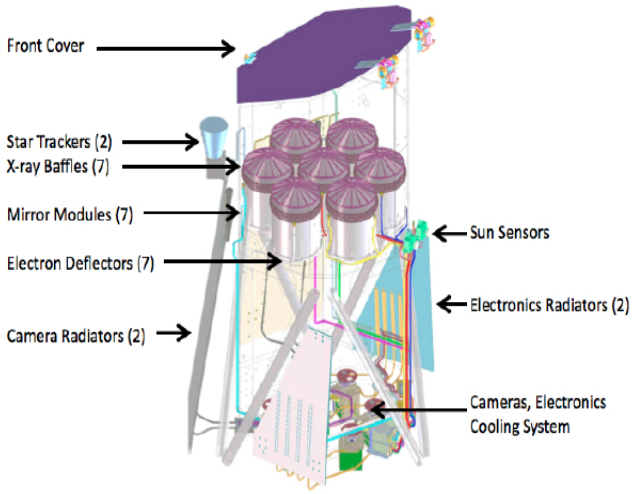

図 2.19: eROSITA を構成する装置 (Merloni et al. 2012)。

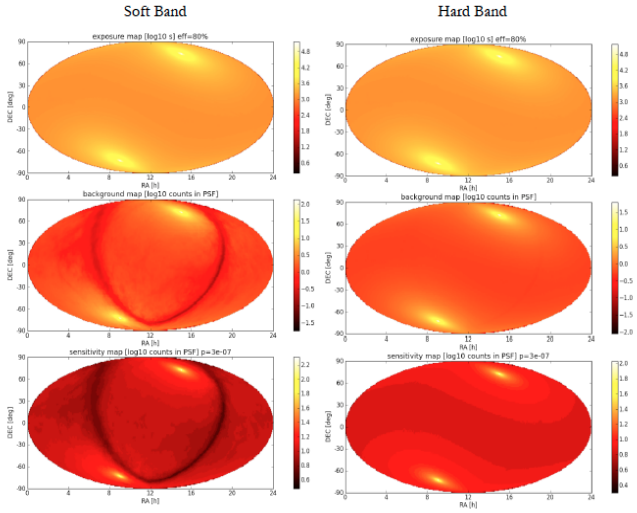

図 2.20: eROSITA による予想される全天観測の Exposure Map、バックグラウンドマップ、感度マップ (Merloni et al. 2012)。

第3章　X線天文衛星すざく

Contents

3.1 概要 **34**
3.2 軟 X 線反射望遠鏡 (XRT) **35**
3.3 X 線 CCD カメラ (XIS) **38**
3.3.1 X 線 CCD カメラについて 38
3.3.2 XIS の構造 38
3.3.3 XIS の性能 40

3.1　概要

X 線天文衛星「すざく」(図 3.1) は、「はくちょう (1979 年打上げ)」、「てんま (1893 年)」、「ぎんが (1987 年)」、「あすか (1993 年)」に続く日本で 5 番目の X 線天文衛星である (Mitsuda et al. 2007)。すざく衛星は 2005 年 7 月 10 日に鹿児島県内之浦から、宇宙科学研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) の M-V-6 号ロケットによって打ち上げられた。すざくは、全長 6.5 m、幅 5.4 m、重量 1680 kg の衛星で、高度約 550 km の略円軌道上を約 96 分で周回していた (図 3.2)。2015 年 6 月 1 日以降、衛星との通信が間欠的にしか確立できない状態が続き、2015 年 8 月 26 日に観測を終了した [1]。

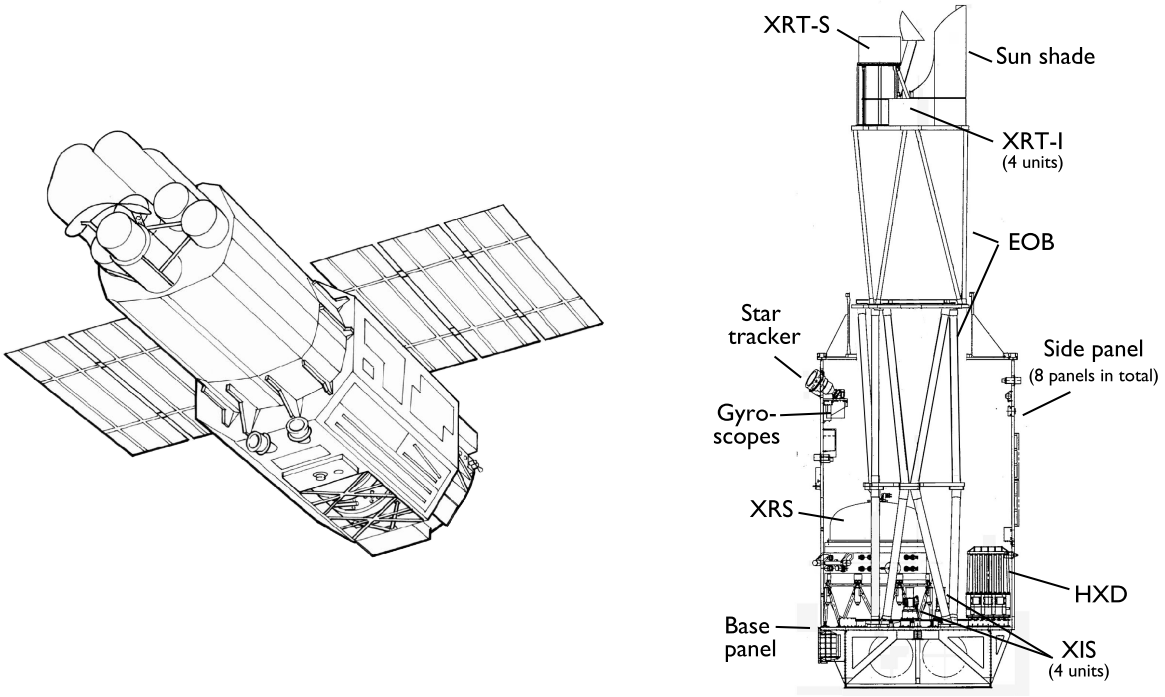

図 3.1: X 線天文衛星すざくの外観 (Mitsuda et al. 2007)。右図はすざくに搭載されている各装置の位置。

すざく衛星には 4 台の X 線 CCD カメラからなる X 線撮像検出器 (X-ray Imaging Spectrometer, XIS) と、硬 X 線検出装置 (Hard X-ray detetor, HXD)、X 線マイクロカロリメーター (X-Ray Spectrometer, XRS) の 3 つの観測装置が搭載されていた。XIS の 4 台の CCD カメラと XRS は 5 つの X 線反射望遠鏡 (X-Ray Telescope, XRT) の焦点面に配置されているが (図 3.1)、XRS は衛星を軌道投入したあとで、冷却材であるヘリウムを消失したことにより観測が不可能となった。すざく衛星に搭載されている各検出器ごとの基本性能を表 3.1 に示す。

[1] http://www.jaxa.jp/press/2015/08/20150826_suzaku_j.html

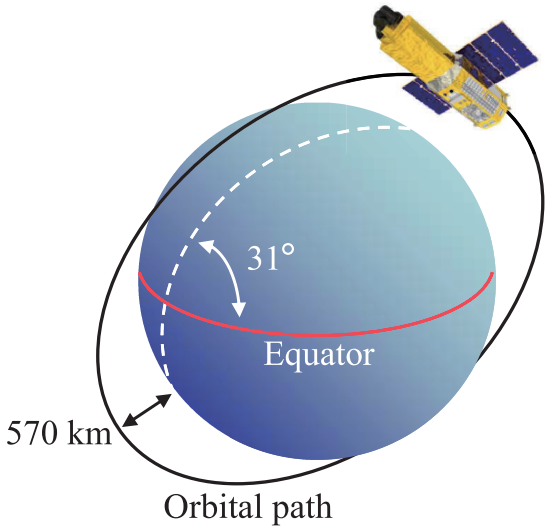

図 3.2: X 線天文衛星すざくの軌道 (The Suzaku Technical Description より)。

3.2 軟 X 線反射望遠鏡 (XRT)

X 線に対する物質の屈折率は 1 より小さいので、光を屈折させて集光することが難しい。そのため、多くの X 線望遠鏡では、小さい角度で入射してきた X 線を反射させる「全反射」や、周期的な層構造によって干渉を引き起こし、強度を大きくし反射率を高める「ブラッグ反射」を利用している。

すざく衛星搭載の XRT (Serlemitsos et al. 2007) は、口径 40 cm の多重薄板 X 線望遠鏡である。回転双曲面と回転放物面で 2 回全反射させ、光軸から外れた方向での像収差を小さくした光学系を Wolter I 型と呼ぶが、これを XRT で円錐 2 段で近似して用いている。XRT は全部で 5 台搭載されていて、そのうち 4 台は XRT-I、残りの 1 台は XRT-S と呼ばれる (図 3.3)。XRT-I は 175 枚の反射鏡から成り、焦点距離は 4.75 m で、その焦点面には XIS が置かれている。一方、XRT-S は 168 枚の反射鏡で構成され、焦点距離は 4.5 m、その焦点面には XRS が配置されている。XRT の反射鏡は、レプリカ法でアルミ薄板上に鏡面を形成されており、散乱の影響を大幅に抑えることができる。反射鏡前面にはプリコリメーターが搭載され、あすか衛星と比較して、多重薄板 X 線望遠鏡固有の問題であった迷光を約 1 桁減少させている。

XRT の空間分解能は、点源全光量の半分が直径約 2 分角の円に含まれる程度である (Half Power Diameter, HPD)。XRT-I 1 台あたりの有効面積は 1.5 keV と 7.0 keV でそれぞれ 450 cm^2 と 250 cm^2 となっており、4 台合わせると 7 keV で 1000 cm^2 を超える。また、PSF のエネルギー依存性はほとんど無視できる (図 3.4)。

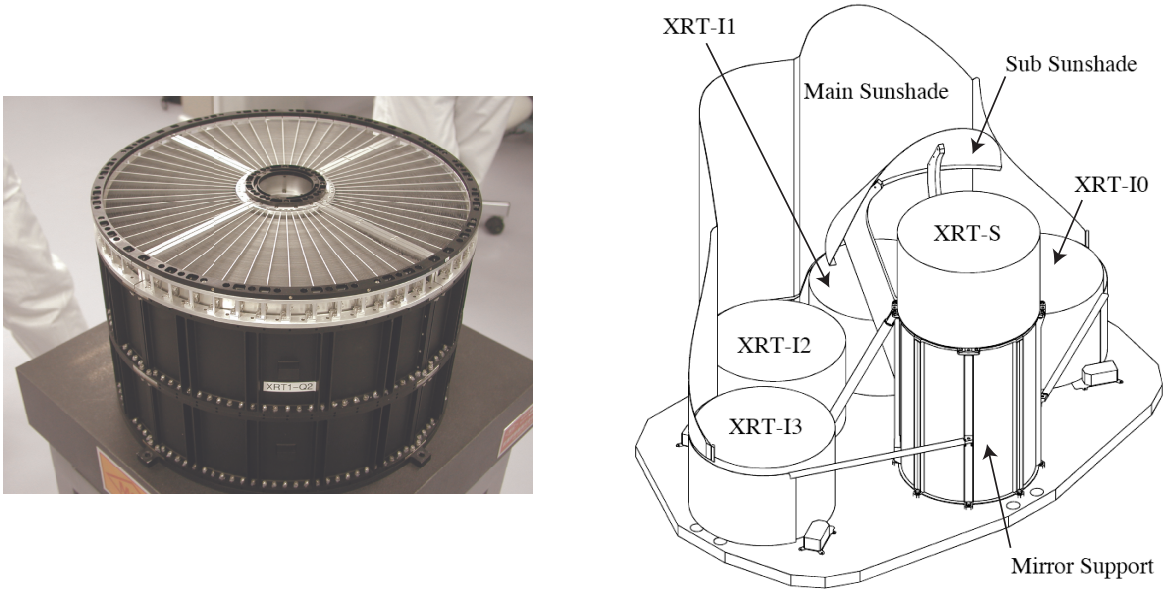

図 3.3: XRT-I1 のフライトモデルの外観 (左) と XRT-I, XRT-S の配置図 (右)(Serlemitsos et al. 2007)。

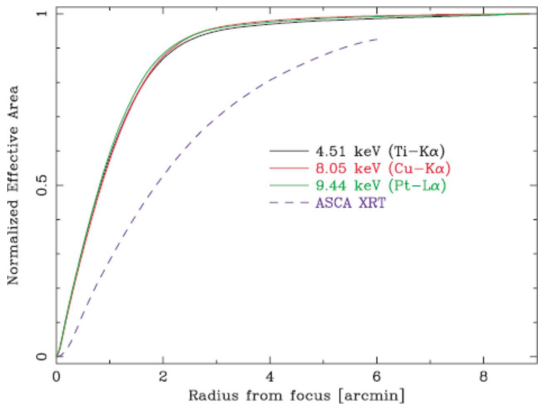

図 3.4: XRT の Encircled-energy fraction (Serlemitsos et al. 2007)。

表 3.1: すざく衛星の基本性能。(Mitsuda et al. 2007 を基に作成)。

衛星	軌道遠地点高度	568 km
	軌道周期	96 min
	軌道傾斜角	31°
	観測効率	∼43 %
XRT	焦点距離	4.75 m
	視野	∼17′ at 1.5 keV
		∼13′ at 8 keV
	有効面積	440 cm^2 at 1.5 keV
		250 cm^2 at 8 keV
	空間分解能	2′ (HPD)
XIS	視野	17′.8×17′.8
	エネルギー帯	0.2–12.0 keV
	エネルギー分解能	∼130 eV at 6 keV (FWHM)
	有効面積	330 cm^2 (FI), 370 cm^2 (BI) at 1.5 keV
		160 cm^2 (FI), 110 cm^2 (BI) at 8 keV
	時間分解能	8 s (normal mode), 7.8 ms (P-sum mode)
	ピクセル数	1024×1024 pixels
HXD	視野	34′×34′(≤100 keV)
		4°.5×4°.5 (≥100 keV)
	エネルギー帯	10–70 keV (PIN)
		40–600 keV (GSO)
	エネルギー分解能	∼3.0 keV (PIN, FWHM)
		$7.6/\sqrt{E_{\rm MeV}}$ % (GSO, FWHM)
	有効面積	∼160 cm^2 at 20 keV
		∼260 cm^2 at 100 keV
	時間分解能	61 μs

3.3　X 線 CCD カメラ (XIS)

3.3.1　X 線 CCD カメラについて

CCD (Charged Coupled Device) カメラは、2 次元アレイ状に半導体検出器を並べたものである。10 keV 以下の X 線の相互作用は光電吸収が支配的であり、X 線光子が半導体の空乏層に入射するとある確率で光電吸収を起こす。光電吸収によって作られた光電子は、半導体物質中の荷電子帯にいる電子を励起して約 E/W 個の電子正孔対を生成する。ここで、W は半導体物質の種類で決まる平均電離エネルギーで、ケイ素 (Si) の場合は $W \sim 3.65$ eV である。生成された電子数から、入射 X 線光子エネルギーを測定することができる。可視光 CCD カメラの電荷の読み出しには、受光用素子と電荷転送用素子が交互に並ぶ Interline Transfer 型が使われている。しかし、その構造では X 線に対して、電荷転送用素子部分のみを遮断するシールドが作れないので、 Frame Transfer 型が X 線 CCD カメラでは主流となっている。Frame Transfer 型は撮像領域のほかに露光後の CCD フレームデータを一時的に保持しておく蓄積領域を持っており、X 線を遮断するシールドが蓄積領域に設けられている。撮像領域のデータを蓄積領域に転送し、読み出し口まで転送が行われているときに、受光面では次の露光が行われている。そのため、露光中に 1 ピクセルに複数の X 線光子が入射した場合、X 線光子を個々に区別できずに、X 線光子のエネルギーが足し合わされた 1 つの光子として判別されてしまう。これを「パイルアップ」と呼び、明るい天体を観測した場合は避けられない。

3.3.2　XIS の構造

4 台の X 線 CCD カメラから構成された検出器である XIS (図 3.5; Koyama et al. 2007) は、それぞれが XRT-I の焦点面に置かれている。XIS は 0.2–12.0 keV に感度を持ち、天体の撮像と分光を同時に行うことができる。XIS 0, 2, 3 は表面照射型 (Front-Illuminated; FI) で、XIS 1 は背面照射型 (Back-Illuminated: BI) の CCD カメラである。 FI は電極側から X 線を入射させる型で、エネルギー分解能に優れる反面、受光面に電極や絶縁層などの構造を持つために低エネルギー X 線の検出効率が悪い。一方、BI は低エネルギー側の検出効率は優れているが、X 線の吸収点が電極から遠くなるためエネルギー分解能が悪くなる。両者の量子効率の比較を図 3.6 に示す。一般に CCD カメラは可視光の信号も検出してしまう。そのため、各 XIS には可視光遮断フィルター (Optical Blocking Filter; OBF) が取り付けられている。

XIS 検出面上の位置は複数の座標系によって表される。座標系として、RAW 座標系、ACT 座標系、DET 座標がある。RAW 座標系は CCD 素子の読み出し順に付いている XIS に特有の座標系

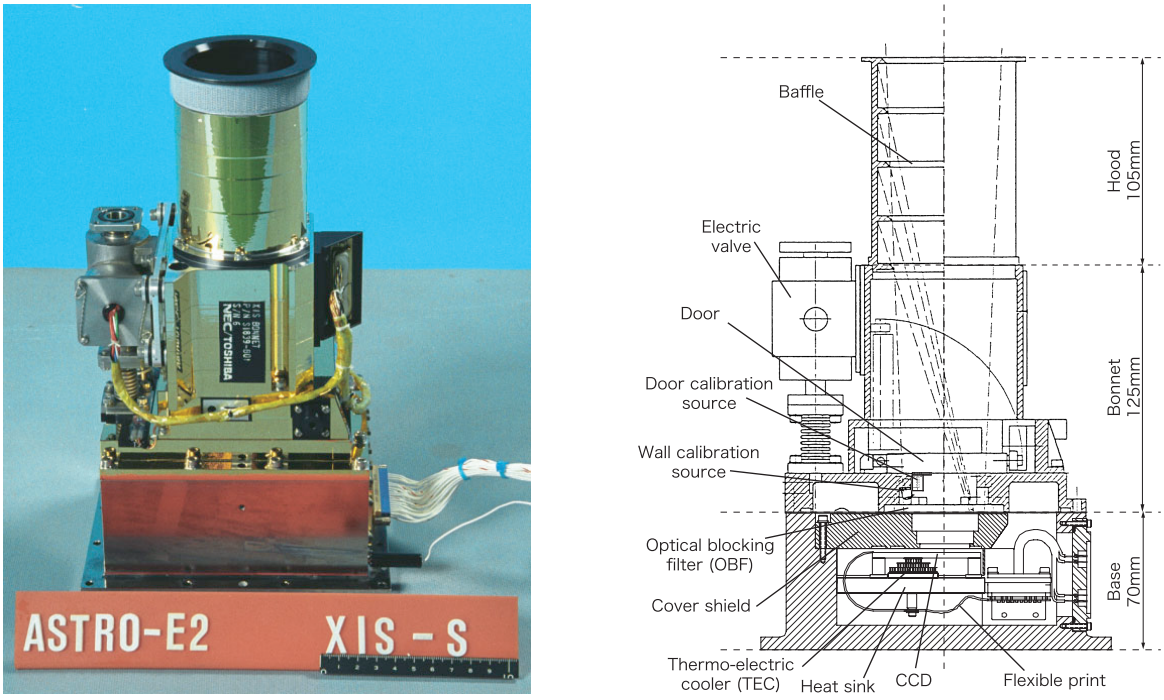

図 3.5: すざく衛星に搭載されている XIS の外観 (左) とその断面図 (右)(Koyama et al. 2007)。

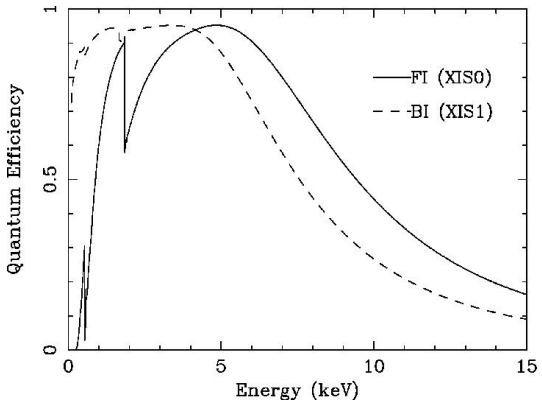

図 3.6: XIS の FI と BI の量子効率の比較図 (Koyama et al. 2007)。横軸はエネルギー、縦軸は量子効率を表す。

である。RAWX は 0 から 255 までの整数を、RAWY は 0 から 1023 までの整数をとる。ACT 座標系は CCD 素子上の物理的なピクセル位置を示す XIS に特有の座標系である。ACTX は横転送、ACTY は縦転送方向であり、CCD を見下ろす方向に座標系が定められている。ACTX, ACTY ともに 0 から 1023 までの整数を取る。DET 座標は、XIS, XRS を含む全ての検出器で共通の座標系であり、検出器から鏡を見上げる向きで定義されている。この座標系でイメージを描くと天球上の天体のイメージとなる。DETX, DETY ともに 1 から 1024 までの整数を取る。図 3.7 に XIS の座標系を示す。各 CCD カメラの segment A と segment D の角 にそれぞれ 1 つずつ較正線源 (^{55}Fe) が取り付けられている。これらは、軌道上でエネルギースケールを較正するために用いられている。

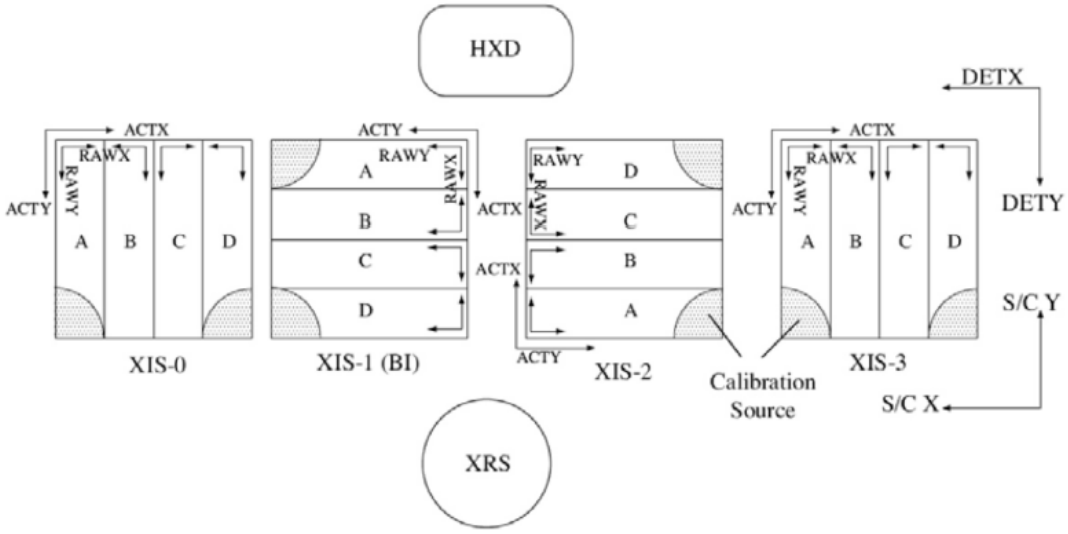

図 3.7: XIS の座標系 (「Astro-E2 XS Science FITS 確認書」より)。較正線源の位置が灰色で示されている。

3.3.3　XIS の性能

XIS は XRT と組み合わせることにより、17′.8×17′.8 の視野を持っている。XIS の観測モードには、Normal mode と Parallel-sum clocking mode (P-sum mode) があり、時間分解能はそれぞれ 8 s, 7.8 ms である。 Normal mode の場合は時間分解能とパイルアップ耐性を高めるために、Window オプションと Burst オプションを選択することができる。Window オプションは、CCD 全体ではなく、CCD の $1/n$ (n =4 or 8) のピクセルのみを読み出すオプションである。観測した領域のイベントを失うことなく観測ができるが、観測できる領域が $1/n$ に制限されてしまい、較正線源も観測されない。一方、Burst オプションは、8 s 間の露光に対し、最初の $(8-m)$ s のイベントを捨ててし

まうオプションである (m =0.1, 0.3, 0.5, 0.6, 2.0)。観測領域のイメージは失われず較正線源も観測されるが、$(1 - m/8)$ の割合のイベントが失われる。どちらのオプションを利用するかは観測対象の明るさや時間変動、サイエンス目的などに応じて異なる。

4 台の XIS のうち、XIS2 の全体と XIS0 の一部において、それぞれ 2006 年 11 月 9 日と 2009 年 6 月 23 日に生じた微小隕石の衝突と推測されている事故により、観測が不可能となった [2,3] 。XIS0 の不感領域は、2009 年 6 月 23 日から 2014 年 10 月 2 日まで ACTX= 70 – 110 の範囲であったが、2014 年 10 月 2 日からは ACTX=0-210 に拡大した。さらに、2015 年 4 月 17 日からは、segment A のほぼ全領域に拡大した [4]。

[2] http://www.astro.isas.ac.jp/suzaku/doc/suzakumemo/suzakumemo-2007-08.pdf
[3] http://www.astro.isas.ac.jp/suzaku/doc/suzakumemo/suzakumemo-2010-01.pdf
[4] http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/analysis/xis/

第4章　すざく衛星の観測とアーカイブデータ

Contents

4.1 すざく衛星の観測 44
4.2 すざくデータの処理 44
4.3 カタログ作成に用いるアーカイブデータ 46

4.1　すざく衛星の観測

すざくに搭載されている X 線 CCD カメラ、XIS において、観測目的天体は視野の中心に配置されるが、視野中に存在する他の X 線天体も同時に観測された。すざくの観測データは、processing-team がプロセスを行い、観測提案をした Principal Investigator (PI) に渡された。PI に渡した 1 年後に、ISAS の Data ARchive and Transmission System [1](DARTS) と NASA の High Energy Astrophysics Science Archive Research Center [2] (HEASARC) から一般公開されている。ただし、キャリブレーション観測のデータは直ちに公開された。これら公開された全アーカイブデータを用いて、XIS の視野に含まれるソース情報を集約したカタログを作成することができる。すざくの X 線感度は同様のエネルギー帯を持つ Chandra や XMM-Newton には及ばないが、Chandra や XMM-Newton が観測していない天域においては、すざくアーカイブから新たな X 線天体が発見される可能性がある。また、ほとんどの X 線天体は大きな時間変動を示すので、Chandra や XMM が観測した天域においても、突発天体が発見されたり、既知の X 線天体の時間変動を調べられる可能性がある (表 2.1)。

4.2　すざくデータの処理

すざくの観測には、識別番号 (シーケンス番号) が振られ、ポインティングデータの場合、**CAAtttppz** のように 9 桁の数字で表されている。それぞれの数字の意味は以下のとおりである。

- **C** は、カテゴリーを示す。
  C=1 Calibration
  C=4 Galactic Compact Sources (stars, CV, NS, BH, XRB)
  C=5 Galactic Diffuse
  C=7 Extragalactic Compact
  C=8 Extragalactic Diffuse
  C=9 Gamma-Ray Burst and other non-proposal TOO (Super Novae)

- **AA** は、観測フェーズの番号を示す。
  AA=00 Science Working Group phase
  AA=01 AO-1 phase

[1] http://www.darts.isas.jaxa.jp/index.html.ja
[2] http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/archive.html

AA=02 AO-2 phase
以下、同様

- **ttt** は、それぞれのカテゴリー、観測フェーズの中でのターゲットごとの通し番号を示す。
- **pp** は、ひとつのターゲットにおいて複数の観測をする場合のマルチポインティング番号を示す。
- **z** は、通常、0 であるが、長い観測の場合にファイルサイズその他の条件によってプロセッシングを分割しなければならないときに使用された。

識別番号ごとに、衛星の状態を知るためのデータ (House Keeping Data)、検出器からの観測データ、衛星の姿勢を記述した姿勢データ (ATT)、軌道データ (ORB)、時刻データ (TIM) が衛星から出力される。これらは、すべて FITS format で 配布される。

観測データは、衛星で観測されたあと、SIRIUS というデータベースに格納されて、図 4.1 のように処理されて FITS 化される。さらに、Suzaku ftools を用いて較正情報 (caldb) が付加され、配布される。最初に、衛星の生データを FITS 化しただけのものは、First FITS File (FFF) と呼ばれ、較正情報が付加されたものは Secound FITS File (SFF) と呼ばれる。最後に SFF から非 X 線イベントが除かれて、科学解析に用いられる cleaned event となる。

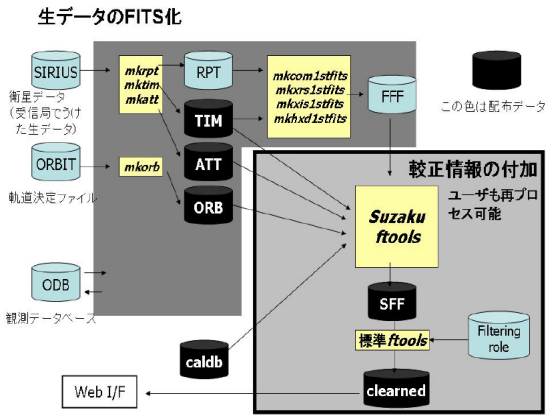

図 4.1: すざくデータの処理の流れ (「すざく」ファーストステップガイド第 4.0.3 版 より)。途中の RPT (Row Packet Telemetry data) は生データであり、公開されない。

4.3　カタログ作成に用いるアーカイブデータ

カタログ作成には、2015 年 10 月 30 日までに DARTS のすざくアーカイブから公開されたものから、全ての XIS において Normal mode で観測された 2516 観測を用いた。これらの観測データには、 3.3.3 節で述べた XIS0 の不感領域があるものを含むが、それ以外にイメージの欠落があるものは使わなかった。図 4.2 にこれら 2516 観測のポインティング位置を示す。観測した正味の天域の広さは、175 平方度 (全天の 0.4%) である。観測時間を全検出器を足し合わせた exposure time から計算すると、337 Ms である。また、図 4.3 に、全検出器を足し合わせた exposure time に対する観測数の分布を示す。

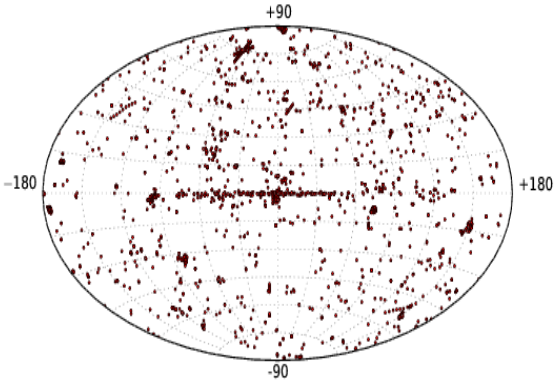

図 4.2: 2516 観測のポインティング位置。銀河座標系で表している。

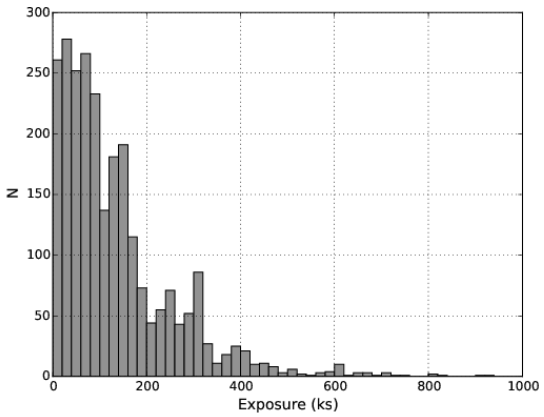

図 4.3: 全検出器を足し合わせた exposure time に対する観測数の分布。中間値は、134 ks である。

第5章　天体検出

Contents

5.1 天体検出に用いるツール 48

5.2 天体検出の準備 50

5.2.1 概要 50

5.2.2 天体データのダウンロード 50

5.2.3 イベントファイルの作成 51

5.2.4 観測イメージの作成 53

5.2.5 Exposure Map の作成 54

5.2.6 較正線源の位置をすべて除去した観測イメージと Exposure Map の作成 . . . 56

5.3 ewavelet 57

5.4 誤検出の除去 61

5.1　天体検出に用いるツール

NASA の X 線天文衛星 Chandra のデータ解析ソフトウェアの Chandra Interactive Analysis of Observations (CIAO) には、ウェーブレット変換を用いて天体検出を行う wavdetect[1] というツールがある。ウェーブレット変換では、メキシカンハット関数 (図 5.1) を基底関数としてデータの畳み込みを行う。ウェーブレットスケールをうまく定めると、正の値 (中心コーン) の場所はソース領域、その周りの負の値 (くぼみ) の場所はバックグラウンド領域に割当てられ、ソース領域からバックグラウンド領域を差し引くことができる。また、小さいウェーブレットスケールを点源に、大きいウェーブレットスケールを広がった天体に割り当てて検出することができる。この天体検出の長所と短所を、ROSAT や Einstein 衛星の天体カタログに用いられた celldetect[2] と比較して、表 5.1 に示す。また、ヨーロッパ宇宙機関 (ESA) の X 線天文衛星 XMM−Newton のデータ解析ソフトウェアである Science Analysis System (SAS) にも、wavdetect と同じくウェーブレット変換を用いた天体検出を行う ewavelet[3] というツールがある。しかし、すざく衛星用のデータ解析ソフトウェアパッケージの HEASoft には、天体検出用のツールがない。天体検出用のツールを新たに開発するか、または既存のものをすざく衛星用に適用させることが考えられるが、既存のものを用いることが出来れば開発の手間が省ける。

CIAO の天体検出ツールである wavdetect の使い方を説明している Chandra スレッド [4] には XMM−Newton のデータに対応した使い方が示されているので、まず、それを参考にすざくのデータについて wavdetect を用いて天体検出を行う方法を検討した。しかし、wavdetect よりも、ewavelet の方が複数のウェーブレットスケールを入力することで、暗い点源や広がった天体をよく検出できることが分かったので、ewavelet をすざくの天体検出に用いることにした。なお、wavdetect による天体検出の方法を、付録 A に示した。

表 5.1: ウェーブレット変換を用いた検出の長所と短所 (http://cxc.harvard.edu/ciao/download/doc/detect_manual/intro_tour.html)。

Method	Strengths	Weaknesses
celldetect	1. ROSAT や Einstein 衛星の天体カタログに用いられた実績がある。 2. 天体が混み合った領域以外において、暗い点源を良く検出できる。	1. 広がった天体を複数の点源として検出する。 2. 混み合った領域にある天体を独立に検出するのが難しい。
wavdetect (ewavelet)	1. 混み合った領域にある天体を独立に検出できる。 2. 広がった天体を良く検出できる。	1.celdetect よりも検出に時間がかかる。

[1] http://cxc.harvard.edu/ciao/ahelp/wavdetect.html
[2] http://cxc.harvard.edu/ciao/ahelp/celldetect.html
[3] http://xmm.esac.esa.int/sas/9.0.0/doc/ewavelet/index.html
[4] http://cxc.harvard.edu/ciao/threads/wavdetect/

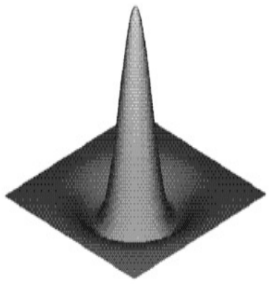

図 5.1: wavdetect と ewavelet で用いられているメキシカンハット関数 (Freeman et al. 2002)。

5.2　天体検出の準備

5.2.1　概要

すざくのデータにおいて ewavelet を用いて天体検出を行うためには、X 線イベント情報が格納されているイベントファイルから抽出した天体のイメージと検出器上のある場所がどれくらいの時間、露光されたかを示す Exposure Map が必要である。以下ではその天体のイメージと Exposure Map の作成について、図 5.2 の流れに沿ってシーケンス番号 403036010、Eta Carina のデータを例にして説明する。

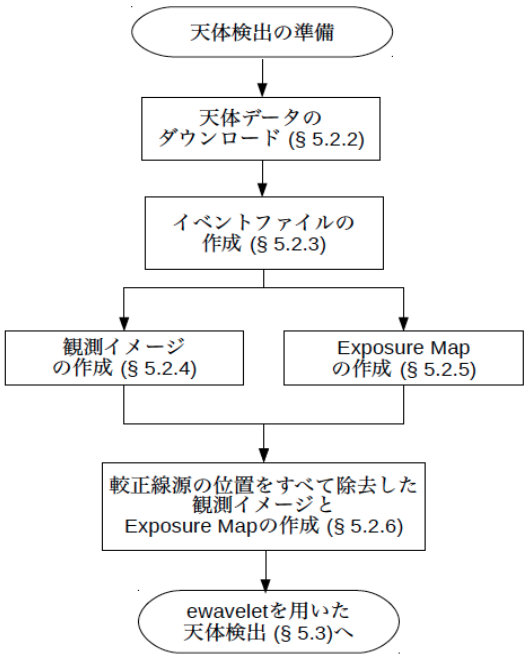

図 5.2: 天体検出の準備の流れ。

5.2.2　天体データのダウンロード

最初に、wget で Eta Carina (403036010) のデータをダウンロードする [5]。必要なファイルは、

- cleaned event ファイル (xis/event_cl/内にある)

[5] http://darts.isas.jaxa.jp/pub/suzaku/ver2.2/403036010/ からダウンロードできる

- 姿勢ファイル (auxil/内にある拡張子が “.att” であるもの)
- 解析に必要な衛星共通系の情報をまとめたファイル (auxil/内中にある拡張子が “.mkf’ であるもの)

である。

5.2.3 イベントファイルの作成

次に、解析ディレクトリを作成し、イベントファイル “ae403036010xi0_0_3x3n066a_cl.evt.gz” と “ae403036010xi0_0_5x5n066a_ cl.evt.gz” をそのディレクトリに持って来る。そして、XIS ごとに 3 × 3 モードと 5 × 5 モードを結合したイベントファイルを FTOOLS (Blackburn 1995) の xselect というツールで作成する。その際、天体検出には必要ない較正線源を除去する。ここでは、その結合と除去の仕方を XIS0 を例にして以下に示す。%で始まる行がコマンド、#で始まる行はコメントである。

```
#xselect の起動
% xselect
#セッションネーム
% suzaku
#イベントファイルの読み込み
% read event  "ae403036010xi0_0_3x3n066a_cl.evt.gz ae403036010xi0_0_5x5n066a_cl.evt.gz"
#ディレクトリの指定
% ./
#較正線源の除去をする STAUS は較正線源のピクセルのステータス、GRADE は ASCA グレードを表している。下記の「//」は表示の問題上改行してるだけで、 実際にコマンドを打つときは続けて入力することを意味する。
% filter column "STATUS=0:65535 131072:196607 262144:327679 393216:458751 //
GRADE=0:0 2:4 6:6"
#0.5-10.0 keV のデータを使うために、フィルターをかける
% filter pha_cutoff  137 2740
#上記の条件に合ったイベントを抽出する
% extract event
#結合したイベントファイルを保存
```

```
% save event xis0_cl_pre.evt
#Use filtered events as input data file ?と聞かれるので、以下を入力する
% yes
#xselect を抜ける
% exit
#Save this session?と聞かれるが、保存する必要はないので、以下を入力する
% no
```

XIS1、3 についても、“xis1_cl_pre.evt”、“xis3_cl_pre.evt” を作っておく。しかし、これらのイベントファイルをそのまま使うと、ポインティング位置の揺らぎが大きいために、Exposure 補正がうまくいかないことがある。すでに、cleaned event では平均からのずれである”ANG_DIST”の値を用いて”ANG_DIST< 1.5 arcmin”の時間帯を使うという条件がかけられている [6] が、さらに、FTOOLS の maketime コマンドでより厳しく”ANG_DIST< 0.5 arcmin”の条件を課す。そのために、mkf ファイルを auxil/から解析ディレクトリに持って来て、

```
% maketime  mkf.fits mkf_gti.fits "(ANG_DIST<0.5)" NAME VALUE TIME no
```

を実行し、GTI (Good Time Interval) ファイルである “mkf_gti.fits” を作成する。この GTI ファイルを使ってフィルターをかけるために、以下のコマンドを実行し、xis0_cl.evt を作成する。

```
#xselect の起動
% xselect
#セッションネーム
% suzaku
#イベントファイルの読み込み
% read event  "xis0_cl_pre.evt"
#ディレクトリの指定
% ./
#GTI フィルターをかける
% filter time file mkf_gti.fits
#上記の条件に合ったイベントを抽出する
% extract event
#結合したイベントファイルを保存
```

[6] http://heasarc.nasa.gov/docs/suzaku/processing/criteria_xis.html

```
% save event xis0_cl.evt
#Use filtered events as input data file ?と聞かれるので、以下を入力する
% yes
#xselect を抜ける
% exit
#Save this session?と聞かれるが、保存する必要はないので、以下を入力する
% no
```

他の検出器でも同様に “xis1_cl.evt”、“xis3_cl.evt” を作成する。ここで、例に挙げている観測では、XIS2 の観測はない。もし、XIS2 の観測があれば、“xis2_cl.evt” を作成する必要がある。

5.2.4 観測イメージの作成

5.2.3 節で作成したイベントファイルを使って、以下のコマンドを実行し、イメージファイル “xis0_cl.img” を抽出する。

```
#xselect の起動
% xselect
#セッションネーム
% suzaku
#イベントファイルの読み込み
% read event  "xis0_cl.evt"
#ディレクトリの指定
% ./
#上記の条件に合ったイメージを抽出する
% extract image
#結合したイメージファイルを保存
% save image xis0_cl.img
#xselect を抜ける
% exit
#Save this session?と聞かれるが、保存する必要はないので、以下を入力する
% no
```

他の検出器でも同様に “xis1_cl.img”、“xis3_cl.img” を抽出する。これらは、6.3 節で用いる。

また、XIS0、1、3 のイベントファイルを結合してイメージを抽出するために、以下のコマンドを実行し、イメージファイル “xisa_cl.img” (図 5.3) を抽出する。

```
#xselect の起動
% xselect
#セッションネーム
% suzaku
#イベントファイルの読み込み
% read event  "xis0_cl.evt xis1_cl.evt  xis3_cl.evt"
#ディレクトリの指定
% ./
#ビンまとめ
% set xybinsize 8
#上記の条件に合ったイメージを抽出する
% extract image
#結合したイメージファイルを保存
% save image xisa_cl.img
#xselect を抜ける
% exit
#Save this session?と聞かれるが、保存する必要はないので、以下を入力する
% no
```

XIS2 の観測があれば、XIS0、1、2、3 のイベントファイルを結合してイメージを抽出する。フラックスを測るときのイメージフィットを高速化するためにはビンまとめをした方が良いが、ビンまとめをしすぎると近接した天体を分離できなくなる。これを考慮して、天体検出には 8 ビンまとめしたイメージを使う。ここで、それぞれの検出器ごとに較正線源を除いているが、各検出器で較正線源の位置が違うことに注意が必要である。

5.2.5　Exposure Map の作成

次に、検出器ごとに Exposure Map を作成する。以下では、XIS0 の場合を例に示している。他の検出器も同様に実行する。FTOOLS の xisexpmapgen コマンドを実行するために人工衛星の姿勢

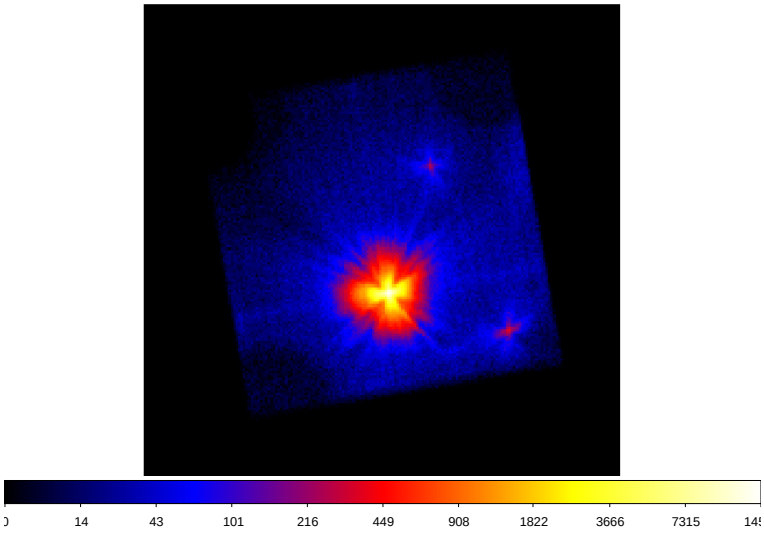

図 5.3: Eta Carinae (ID; 403036010) の観測における XIS0,1,3 のイメージを結合したもの (xisa_cl.img)。ここでは、単に各検出器で較正線源を取り除き結合している。

ファイル “attitude.fits” を、auxil/から解析ディレクトリに持ってくる。解析ディレクトリで

```
% xisexpmapgen xis0_expmap.img  xis0_cl.evt attitude.fits
```

を実行する。その結果、“xis0_expmap.img” というファイルの第一エクステンションに Exposure Map が作成される。同時に同じファイル内のプライマリにマスクイメージも作成されるが、天体検出に必要なのは Exposure Map だけである。検出器ごとに Exposure Map を作成しておく。それらを結合するために、CIAO の dmimgcalc を

```
% dmimgcalc "xis0_expmap.img[2]","xis1_expmap.img[2]","xis3_expmap.img[2]" //
none sum_expmap.img  op="imgout=(img1+img2+img3)"
```

と実行し、“sum_expmap.img” を作成する。 ここで、CIAO では、プライマリを用いる場合にはファイル名のあとに [1] を、第一エクステンションを用いる場合には [2] を指定する必要があることに注意する。また、“xisa_cl.img” のビンまとめと同じ値で “sum_expmap.img” もビンまとめする。その際、FTOOLS の fimgbin を用いて、

```
% fimgbin sum_expmap.img  sum_expmap_8.img 8 average=yes
```

とすれば、8 ビンまとめされた “sum_expmap_8.img” (図 5.4) という Exposure Map が作られる。

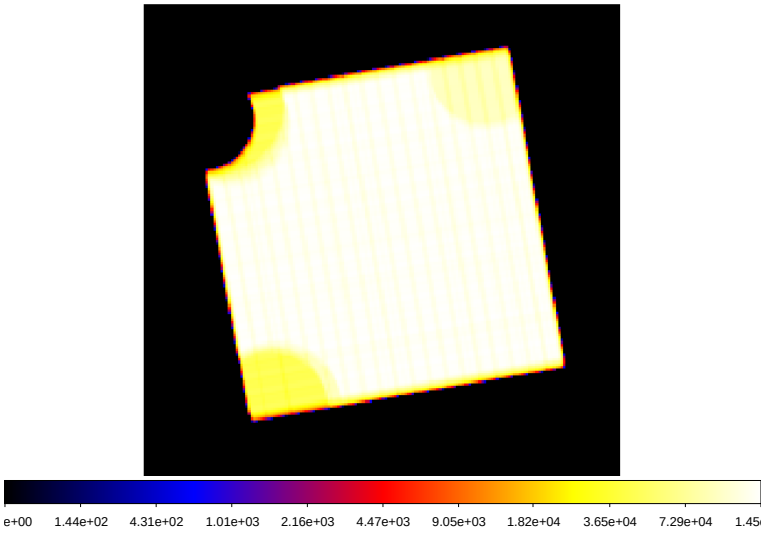

図 5.4: Eta Carinae(ID; 403036010) の観測における XIS0,1,3 の Exposure Map を結合したもの (sum_expmap_8.img)。ここでは、各検出器で較正線源を取り除き結合している。

5.2.6　較正線源の位置をすべて除去した観測イメージと Exposure Map の作成

各検出器で較正線源の位置が違うことを補正するために、“xisa_cl.img” の FI または BI すべての較正線源を取り除く。そのために、5.2.5 節で検出器ごとに作成した Exposure Map を使う。まず、各検出器の Exposure Map を掛けた “xisa_expmap_times.img” を作成するために、

```
% dmimgcalc "xis0_expmap.img[2]","xis1_expmap.img[2]","xis3_expmap.img[2]" //
 none xisa_expmap_times.img  op="imgout=(img1*img2*img3)"
```

を実行する。

```
% fimgbin xisa_expmap_times.img  xisa_expmap_times_8.img 8 average=yes
```

を実行し、8 ビンまとめされた “xisa_expmap_times_8.img” を作成する。次に、“xisa_expmap_times_8.img” の Exposure の値がゼロより大きいピクセルをすべて 1 の値に置き換えた “xisa_expmap_times_count1 .img” を作成する。そのために、FTOOLS の fimgtrim を

```
% fimgtrim infile=xisa_expmap_times_8.img threshlo=I threshup=0 const_up=1 //
outfile=xisa_expmap_times_count1.img clobber=yes
```

のように実行する。そして、“xisa_cl.img” (図5.3)、“sum_expmap_8.img”(図5.4) それぞれを “xisa_expmap_times_count1.img” と掛けて、各検出器の較正線源を取り除いた “xisa_cl_calmask.img” (図 5.5) と “sum_expmap_8_calmask.img” (図 5.6) を作る。そのために、

```
% dmimgcalc xisa_cl.img,xisa_expmap_times_count1.img none //
 xisa_cl_calmask.img op="imgout=(img1*img2)" clobber=yes
```

```
% dmimgcalc sum_expmap_8.img,xisa_expmap_times_count1.img none //
sum_expmap_8_calmask.img op="imgout=(img1*img2)" clobber=yes
```

を実行する。

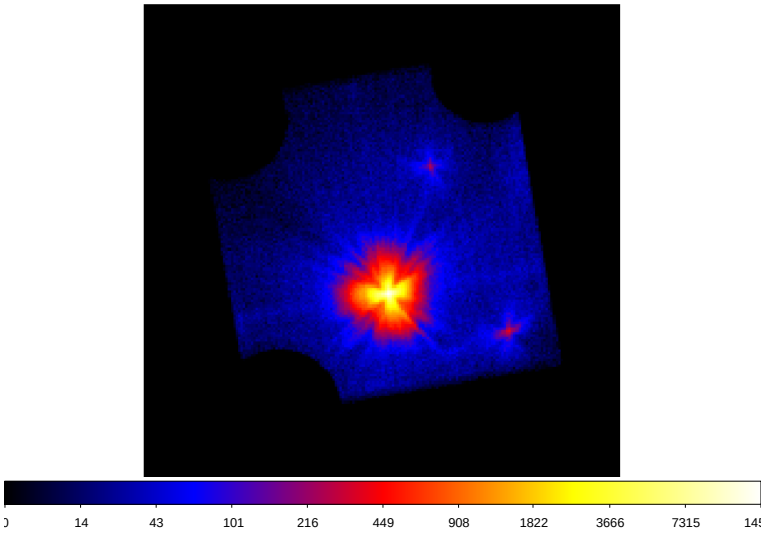

図 5.5: 図 5.3 上の各検出器の較正線源を全て取り除いたもの (xisa_cl_calmask.img)。

5.3 ewavelet

これまでに、ewavelet に必要な天体イメージ “xisa_cl_calmask.img” (図 5.5) と Exposure Map “sum_expmap_8_calmask.img” (図 5.6) を作成した。最後に、これらを ewavelet に入力して、

```
% ewavelet imageset=xisa_cl_calmask.img expmapset=sum_expmap_8_calmask.img \\
srclistset=source_list.fits minscale=1.41 maxscale=32 threshold=7.0 edgethreshold=7.0
```

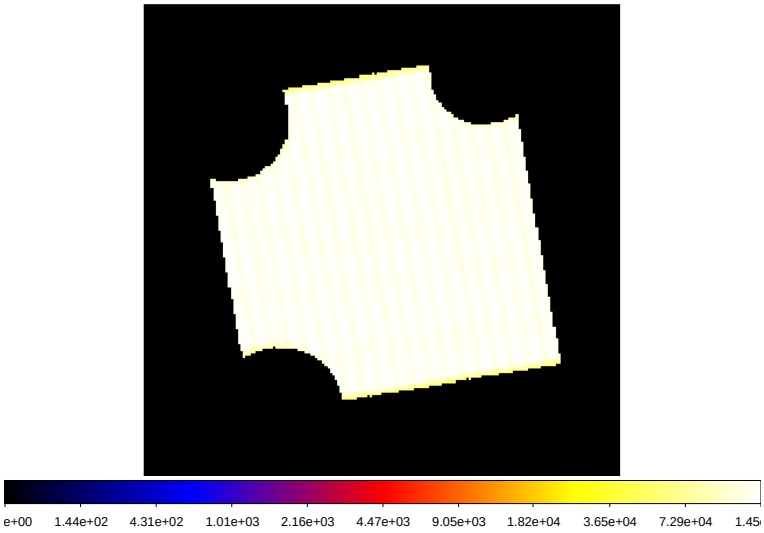

図 5.6: 図 5.4 上の各検出器の較正線源を全て取り除いたもの (sum_expmap_8_calmask.img)。

と実行する。ewavelet の入出力の概要を図 5.7 に示す。出力された “source_list.fits” には検出された天体の位置、検出に使われたウェーブレットスケール、PSF をガウシアンと仮定したときのソースカウント (SCTS) などが記載されている。minscale と maxscale はそれぞれウェーブレットスケールの最小値と最大値で、ewavelet はその範囲内で $\sqrt{2}$ ずつ変えて天体検出を行う。threshold は detection threshold を意味し、edgethreshold は検出器の端の方の誤検出を防ぐために設けられたものである [7]。threshold と edgethreshold を 7.0 σ にすることで、誤検出を少なくすることができたので、以降、この設定値を用いる。図 5.8 (左) に検出結果を示す。ここで、

```
% dmimgcalc xisa_cl_calmask.img,sum_expmap_8_calmask.img none //
xisa_cl_expcorr.img op="imgout=(img1/img2)" clobber=yes
```

を実行して、exposure 補正を施した画像に検出結果を示している。0.5−2.0 keV と 2.0−10 keV のイメージにおける検出結果もそれぞれ図 5.8 (中央) と図 5.8 (右) に示す。また、各バンドの検出をまとめたものを表 5.2 に示す。これらの検出結果を見ると、PSF の裾の誤検出があったり (図の天体番号 1,2,7,13)、バックグラウンドを広がった天体だと誤検出していること (図の天体番号 9,11) が分かった。これらを除去するアルゴリズムが必要である。それを次節で検証する。

[7] http://xmm.esac.esa.int/sas/9.0.0/doc/ewavelet/index.html の 3.2 節を参照

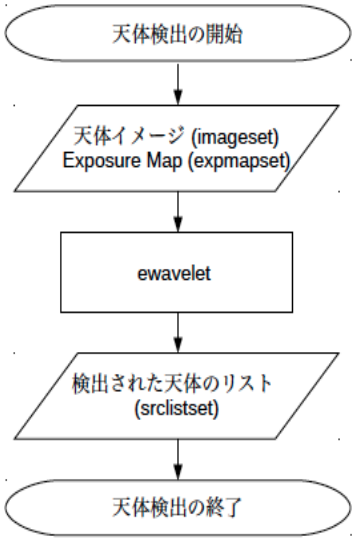

図 5.7: ewavelet の入出力。

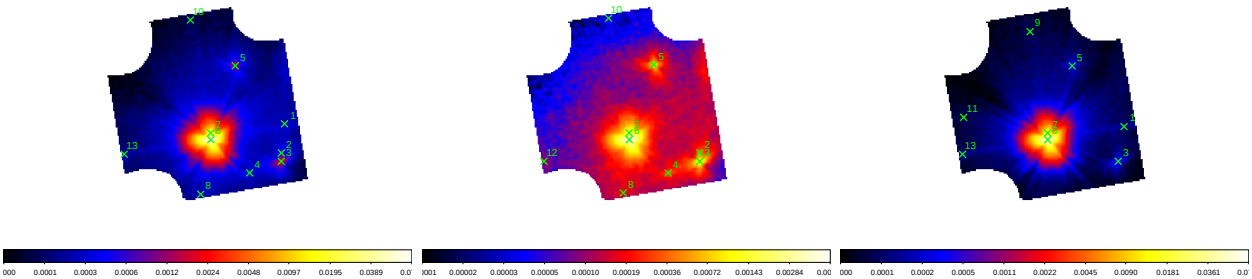

図 5.8: Eta Carinae (ID; 403036010) の観測における ewavelet による天体検出の結果。左:0.5−10 keV。中央:0.5−2.0 keV。右:2.0−10 keV。

表 5.2: Eta Carinae (ID; 403036010) の観測における ewavelet での検出結果。

No.[a]	RA,DEC[b]	WSCALE[c]	SCTS[d]	EXTENT[e]	BG_MAP[f]	SCTS/$\sqrt{\text{BKG}}$[g]
		all/soft/hard	all/soft/hard	all/soft/hard	all/soft/hard	all/soft/hard
	(deg,deg)	(pixel)	(10^2 counts)	(pixel)	(counts pixel^{-1})	
1	161.0270, −59.6613	8.0/–/2.0	46.9/–/2.29	18.8/–/4.30	51.1/–/10.8	9.3/–/4.3
2	161.0407, −59.7059	1.4/1.4/–	2.17/1.86/–	2.30/2.43/–	51.2/36.4/–	3.5/3.4/–
3	161.0410, −59.7194	1.4/1.4/1.4	37.4/27.4/10.1	3.59/3.67/3.41	65.2/46.6/18.7	34.3/29.1/18.3
4	161.1412, −59.7380	1.4/2.0/–	3.98/6.82/–	3.65/4.68/–	33.6/21.7/–	5.0/8.3/–
5	161.1877, −59.5658	1.4/1.4/1.4	21.0/15.8/5.35	3.47/3.52/3.23	49.3/31.8/17.2	23.0/21.2/10.6
6	161.2651, −59.6848	1.4/1.4/1.4	1542/120/1425	3.57/3.89/3.54	2071/190/1881	252/59.3/246
7	161.2655, −59.6740	1.4/1.4/1.4	101/7.98/93.3	3.33/3.33/3.33	1503/145/1358	20.8/5.3/20.2
8	161.2905, −59.7712	2.0/2.0/–	5.42/3.11/–	5.24/4.71/–	22.7/16.2/–	5.8/4.4/–
9	161.3208, −59.5116	–/–/8.0	–/–/14.8	–/–/18.8	–/–/7.90	–/–/7.4
10	161.3298, −59.4916	2.0/2.0/–	2.32/1.32/–	4.71/4.31/–	8.54/3.42/–	4.5/4.4/–
11	161.5318, −59.6487	–/–/5.7	–/–/7.43	–/–/13.3	–/–/7.19	–/–/5.5
12	161.5360, −59.7191	–/2.0/–	–/2.56/–	–/4.71/–	–/7.14/–	–/5.4/–
13	161.5380, −59.7079	1.4/–/2.0	2.45/–/4.46	3.33/–/5.33	14.9/–/6.62	5.1/–/8.7

[a] 図 5.8 の中にある天体の番号。

[b] 各バンドの位置の平均値。J2000 を採用している。

[c] ウェーブレットスケール

[d] PSF をガウシアンで近似したときのソースのカウント数。

[e] ガウシアンの半値幅。

[f] バックグラウンドの 1 pixel あたりのカウント数。

[9] 5.4 節で述べているソースのカウント数をバックグラウンドのカウント数の平方根で割ったもの。

5.4 誤検出の除去

まず、PSF の裾で起きる誤検出を取り除くアルゴリズムを考える。視野の中心に近くある Eta Carinae の PSF の裾で誤検出が発生しているが、これは PSF の細かい構造が天体と誤検出された結果である。この誤検出を除く準備として、PSF の細かい構造を均すために、ガウシアンで “xisa_cl_expcorr.img” を 1σ (8.3 秒角) と 2σ でスムージングをかけたイメージを用意する。FTOOLS の fgauss を用いて、

```
% fgauss xisa_cl_expcorr.img xisa_cl_expcorr_smo1.img 1.0
```

と実行し、1σ でスムージングをかけた “xisa_cl_expcorr_smo1.img” を作成する。また同様に、2σ でスムージングをかけた “xisa_cl_expcorr_smo2.img” を作成する。真の天体はその PSF のピークで検出されるはずだが、PSF の裾の誤検出は真のピークから外側に向かってカウントが減っていく途中に位置している。このことから、我々は、検出位置から 3 pixel (25 秒角) 以上外側にカウント値が増えている方向があれば、その検出は PSF の裾であると判断するアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムをウェーブレットスケール 1.4 と 2.0 pixel で検出されたものに対しては “xisa_cl_expcorr_smo1.img” 上で、2.8 と 4.0 pixel で検出されたものに対しては “xisa_cl_expcorr_smo2.img” 上で実行し、誤検出を除去した。

次に、5.3 節の最後で述べたバックグラウンドが広がった天体と誤検出されているものを除くために、ewavelet で生成された “source_list.fits” に記載されているソースカウント値 (SCTS; counts)、天体の広がりを評価した EXTENT 値 (pixel)、1 pixel あたりバックグラウンド値 (counts/pixel) を用いる (それぞれの値は表 5.2 に掲載)。ここで、EXTENT 値は、ガウシアンの半値幅 (FWHW) に相当する。この EXTENT 値からガウシアンの 1σ あたりの半径 (pixel) は、$\sigma = \mathrm{FWHW}(\sqrt{8\ln 2})^{-1}$ から計算できる。SCTS を 5 σ の半径内のバックグラウンド値の平方根で割り (表 5.2 の最後のカラム)、ウェーブレットスケールが 5.65 pixel でその割った値が 7 以下である検出と 8.0 pixel 以上で割った値が 10 以下であるものは、バックグラウンドが広がった天体と誤検出されたものと判断した。このアルゴリズムによって、誤検出を取り除くことができることを良く知られている観測領域内 (Eta carina など) で確認した。

以上のアルゴリズムを実行した結果を図 5.9 に示す。図 5.9 を見ると、まだ完全には PSF の裾の誤検出を除くことができていない (図 5.9 の天体番号 1,13)。この誤検出を除く方法については、次章で述べる。

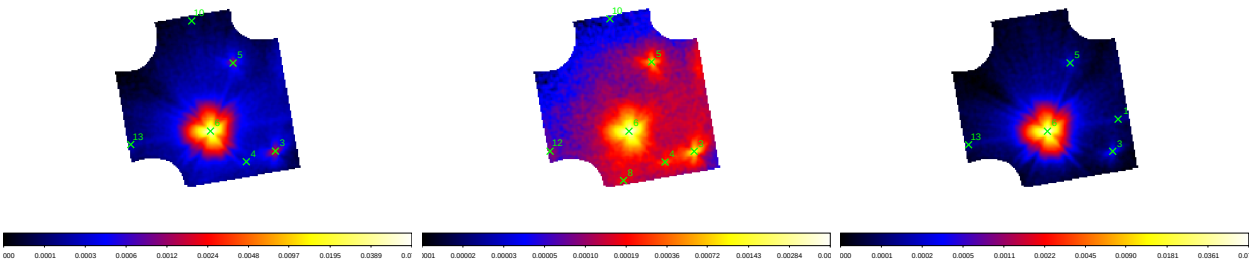

図 5.9: Eta Carinae (ID; 403036010) の観測で検出された天体に誤検出を除くアルゴリズムを適用した結果。左:0.5−10 keV。中央:0.5−2.0 keV。右:2.0−10 keV。図中の天体番号は表 5.2 とリンクしている。

第6章　天体のフラックスと有意度の算出

Contents

6.1 フラックスの算出の原理 64
6.2 変換係数 $A_{s,b}$ の計算 65
6.3 誤検出を除くためのイメージフィッティング 70
6.4 全検出器を足し合わせたイメージフィッティング 71

6.1　フラックスの算出の原理

5 章では、すべての検出器の画像を重ねて天体検出を行い、天体の位置を求めた。本章では、Sugizaki et al. (2009) の PSF モデルをデータにフィットすること (イメージフィット) で、検出天体のフラックスと有意度を検出器、エネルギーバンドごとに算出する。まず、このモデルを介して、データからフラックスを算出する原理について述べる。Sugizaki et al. (2009) は Crab Nebula の入射スペクトルを仮定し、2–10 keV で各スカイ座標 (X,Y) における PSF モデルを作成した。

モデルのスカイ座標 (X,Y) におけるカウント数は、

$$\mathrm{Model}_{\mathrm{crab}}(X,Y) = F_{\mathrm{crab}}\ t_{\mathrm{crab}}\ R^{\mathrm{crab}}_{\mathrm{xis1,hard}}(x,y)\ PSF(x,y;X,Y) \tag{6.1}$$

と書ける。各パラメータの意味は、

F_{crab}	Crab Nebula の $2-10$ keV のフラックス (photons cm^{-2} s^{-1})
t_{crab}	Crab Nebula の exposure (s)
x,y	天体 (Crab Nebula) の位置
$R^{\mathrm{crab}}_{\mathrm{xis1,hard}}(x,y)$	Crab Nebula のスペクトルを仮定した XIS1、2−10 keV バンド におけるフラックスからカウント値への変換係数 (counts photons^{-1} cm^2)
$PSF(x,y;X,Y)$	Sugizaki et al. (2009) が仮定した PSF モデル (pix^{-1})。 エネルギー依存性はないと仮定し、$\int\int PSF(x,y;X,Y)dXdY = 1$ と 規格化されている。

である。一方、検出器 s、エネルギーバンド b における、ある天体のスカイ座標 (X,Y) で検出されるカウント数は、

$$\mathrm{DATA}_{s,b}(X,Y) = F_{s,b}\ t_s\ R_{s,b}(x,y)\ PSF(x,y;X,Y) \tag{6.2}$$

と書ける。各パラメータの意味は、

$F_{s,b}$	検出器 s におけるバンド b でのフラックス (photons cm^{-2} s^{-1})
t_s	ある観測の検出器 s における exposure (s)
$R_{s,b}(x,y)$	ある天体のスペクトルを仮定した検出器 s、バンド b における 天体位置 (x,y) でのフラックスからカウント値への変換係数 (counts photons^{-1} cm^2)

である。モデルを介して、$F_{s,b}$ を求めることが目的なので、(6.2) 式を (6.1) 式を用いて変形すると、

$$F_{s,b} = \frac{t_{\mathrm{crab}}\ R^{\mathrm{crab}}_{\mathrm{xis1,hard}}(x,y)\ \mathrm{DATA}_{s,b}(X,Y)}{t_s\ R_{s,b}(x,y)\ \mathrm{Model}_{\mathrm{crab}}(X,Y)}\ F_{\mathrm{crab}} \tag{6.3}$$

となる。ここで、

$$A_{s,b} = \frac{t_{\rm crab}\ R^{\rm crab}_{\rm xis1,hard}(x,y)}{R_{s,b}(x,y)}\ F_{\rm crab} \tag{6.4}$$

とおくと、

$$F_{s,b} = \frac{A_{s,b}\ {\rm DATA}_{s,b}(X,Y)}{t_s\ {\rm Model}_{\rm crab}(X,Y)} \tag{6.5}$$

と書ける。t_s は観測から得られ、${\rm DATA}_{s,b}(X,Y)/{\rm Model}_{\rm crab}(X,Y)$ はイメージフィットから求めることができる。よって、$A_{s,b}$ を決めれば、天体のフラックス $F_{s,b}$ を求めることができる。逆に、独立な方法で $F_{s,b}$ を求めて (6.5) 式を用いれば、$A_{s,b}$ を求めることができる。ただし、ここで、(6.4) 式はスペクトル依存性を持つことに注意が必要である。Crab Nebula と同じ入射スペクトルを持つ天体について、(6.5) 式は正しい値を与えるが、Crab Nebula と入射スペクトルの違いが大きいほど、真の値と (6.5) 式の違いは大きくなる。

6.2 変換係数 $A_{s,b}$ の計算

変換係数 $A_{s,b}$ を求めるために、鉄輝線があまり強くなく、Crab Nebula と同様にベキ型関数でほとんどスペクトルフィットできる RXJ 2056.6 + 4940 の観測 (ID; 406014010) を用いる。この観測の exposure は $t = 2.51 \times 10^4$ s である。

まず、イメージフィットから $N = {\rm DATA}_{s,b}(X,Y)/{\rm Model}_{\rm crab}(X,Y)$ を求める。フィッティングの効率を上げるために、1 σ (8.3 秒角) でガウシアンスムージングをかけたイメージを用いる (図 6.1 左)。図 6.1 左は、XIS1 の all バンド (0.5−10 keV) のイメージを例に挙げている。フィッティング方法として、イメージの各ビンのカウント数が小さいので、ポアソン最尤法を採用する。すなわち、キャッシュ統計 (Cash 1979) が最小になるパラメータ値を求める。キャッシュ統計は、

$$C \equiv 2\sum_{i,j}\{M(i,j) - D(i,j)\ln M(i,j)\} \tag{6.6}$$

と書ける。ここで、$D(i,j)$ と $M(i,j)$ はピクセル (i,j) のデータとモデルを表す。また、モデルは、σ の値を 0 から 5.0 に変えてスムージングをかけたものの中で、キャッシュ統計が最小になる 1.9 σ でガウシアンスムージングをかけたものを用いる (図 6.1 右)。フィッティングの最小値化アルゴリズムは CERN の MINUIT パッケージ [1] を使い、そのパッケージの MIGRAD と MINOS 関数でパラメータ値を求める。(6.5) 式にはあらわにバックグラウンドを書いていないが、1 観測中では一様だと仮

[1] http://seal.web.cern.ch/seal/snapshot/work-packages/mathlibs/minuit/

定してフィットを行う。これ以降のイメージフィットでは、バックグラウンドはこの仮定をしている。フィッティング結果を表 6.2 に示す。

次に、スペクトルフィットから、各検出器、エネルギーバンドにおける $F_{s,b}$ (photons cm^{-2} s^{-1}) を求める。スペクトル解析では、スペクトルモデルに E と PI (PHA invariant) の対応関係を表す無次元の行列 RMF (redistribution matrix file) と検出器の有効面積を表す面積の次元を持つベクトル ARF (ancillary response file) を畳み込んでカウントに焼き直したものを実際の検出器のカウントと比較している。スペクトルフィットには解析ソフトウェア `XSPEC` (ver 12.8.2 ; Arnaud 1996) を使用する。ここでは、物理的な議論は必要でなく、単にデータを再現するようなモデルを使えばよい。そのモデルとしてベキ型関数 `powerlaw` と星間吸収 `wabs` (Morrison & McCammon 1983) を掛け合わせたものを用いた。XIS1 においては、データをより良く再現するために、`gaussian` も加えている。フィッティング結果を図 6.2 と表 6.1 に示す。また、モデルから求めた $F_{s,b}$ を表 6.2 に示している。

最後に、(6.5) 式から $A_{s,b}$ を求めるが、この $A_{s,b}$ は、(6.4) 式から、Crab Nebula のスペクトルに依存しているだけでなく、RXJ 2056.6+4940 のスペクトルにも依存している。そこで、Crab Nebula のスペクトルだけに依存したものに補正する。そのために、$A_{s,b}$ に $R_{s,b}/R^{\rm crab}_{s,b}$ を掛ける。$R_{s,b}$ と $R^{\rm crab}_{s,b}$ は、RMF から求めた量子効率と ARF から有効面積をかけたもの (図 6.3) を、RXJ 2056.6+4940 と Crab Nebula のスペクトルをそれぞれ重み付け平均したものである。ここで、Crab Nebula のスペクトルは、`wabs*powerlaw` で表すことができ、柱密度は $N_H = 0.35 \times 10^{22}$ cm^{-2}、光子指数は 2.08、`powerlaw` の規格化定数は 9.70 photons keV^{-1} cm^{-2} s^{-1} である (Sugizaki et al. 2009)。表 6.2 に $R_{s,b}$、$R^{\rm crab}_{s,b}$ と補正した $A_{s,b}$ を示す。この RXJ 2056.6 + 4940 の観測 (ID; 406014010) では XIS2 の観測は無いが、XIS2 がある観測では XIS2 と同じ FI 型である XIS3 の $A_{s,b}$ を代用する。

表 6.1: RXJ 2056.6 + 4940 のスペクトルフィッティング結果。エラー計算は行っていない。power-law の norm の単位は 10^{-2} photons keV^{-1} cm^{-2} s^{-1}。gaussian の norm の単位は 10^{-5} photons keV^{-1} cm^{-2} s^{-1}。

		XIS0	XIS1	XIS3
Intersteller absorption	N_H (10^{20} cm^{-2})	1.72	1.74	1.79
Power law	Photon index	2.06	2.10	2.12
	norm	1.35	1.49	1.50
Gaussian	E (keV)	–	0.60	–
	Sigma (10^{-4} keV)	–	3.39	–
	norm	–	2.79	–
Gaussian	E (keV)	–	0.70	–
	Sigma (10^{-4} keV)	–	1.24	–
	norm	–	1.28	–
	Reduced chisq (d.o.f)	1.03(351)	0.89(362)	1.17(356)

表 6.2: 変換係数のまとめ。XIS2 は XIS3 のものを代用。

検出器	$E_{\rm band}$	N	$F_{s,b}$	$R_{s,b}$	$R_{s,b}^{\rm crab}$	$A_{s,b}$
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
XIS0	all	12.2	5.1	183	151	1.27
	soft	3.1	1.2	191	132	1.40
	hard	9.1	3.9	180	179	1.09
XIS1	all	13.3	5.4	181	172	1.08
	soft	4.0	1.3	212	170	1.04
	hard	9.3	4.1	171	175	1.08
XIS3	all	12.7	5.2	184	155	1.22
	soft	3.2	1.2	197	139	1.33
	hard	9.4	4.0	180	179	1.07

(1) エネルギーバンド。

(2) $\mathrm{DATA}_{s,b}(X,Y)$ と $\mathrm{Model}_{\rm crab}(X,Y)$ の比 (10^{-3})。

(3) RXJ 2056.6＋4940 のスペクトルフィットから求めたフラックス (10^{-3} photons cm^{-2} s^{-1})。

(4) RXJ 2056.6 + 4940 のスペクトルを仮定したフラックスからカウント値への変換係数 (counts photons^{-1} cm^2)。

(5) Crab Nebula のスペクトルを仮定したフラックスからカウント値への変換係数 (counts photons^{-1} cm^2)。

(6)6.2 節で補正したもの (10^{-4})。

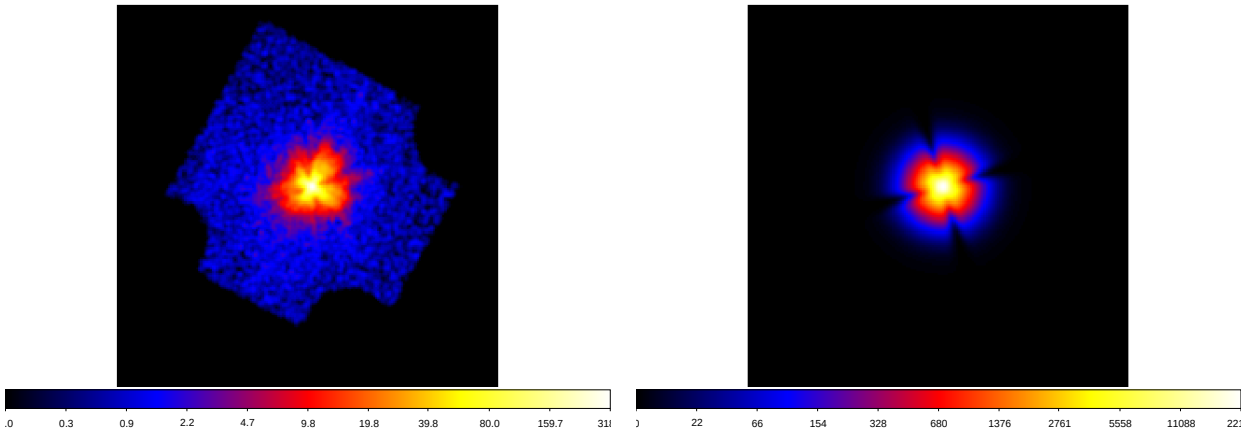

図 6.1: 左: RXJ 2056.6 + 4940 (ID; 406014010) の XIS1 の all バンド (0.5−10 keV) のイメージ。右: Crab Nebula の XIS1 における hard バンド (2 − 10 keV) イメージから作成された Sugizaki et al. (2009) のモデル。

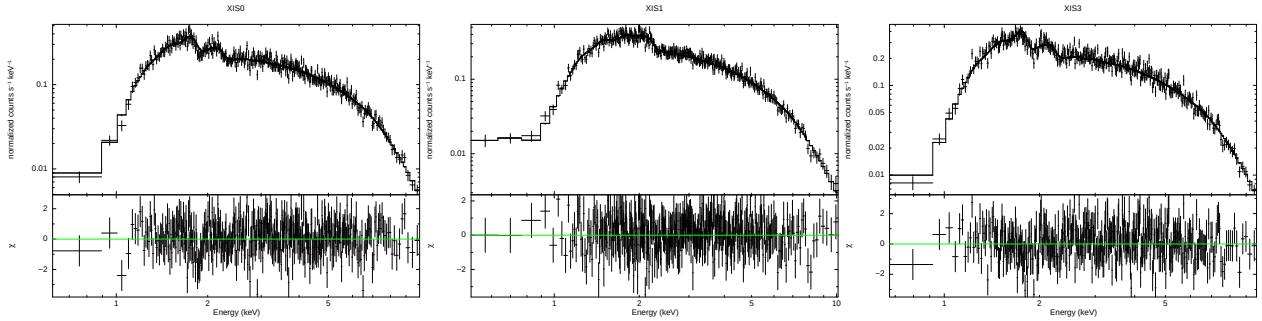

図 6.2: RXJ 2056.6 + 4940 (ID; 406014010) のスペクトル。

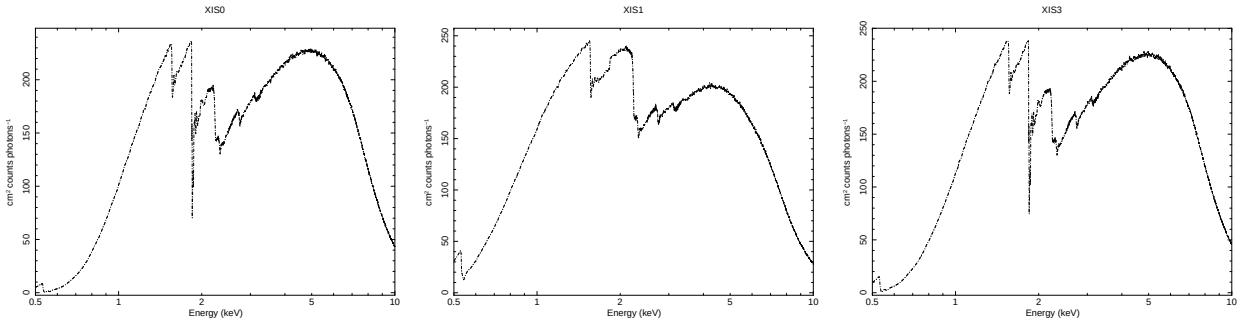

図 6.3: RXJ 2056.6 + 4940 (ID; 406014010) の位置における量子効率と有効面積をかけたもの。

6.3　誤検出を除くためのイメージフィッティング

次に、誤検出を除くために各検出器でイメージフィットを行う。5.4 節の図 5.9 で示したように、まだ PSF の裾の誤検出を完全には取り除けていない。このイメージは全検出器を足し合わせたものであり、各検出器での 2.0–10 keV におけるイメージを図 6.4 に示す。図 6.4 を見ると、XIS0 と XIS3 ではイメージの中央付近にある Eta Carinae に対して左右に PSF の裾が伸びているが、XIS1 では上下に伸びている。図 5.9 で示した誤検出 (図 6.4 の天体番号 1,13) は、XIS0 と XIS3 では PSF の裾の上にあるが、読み出し方向が違うため、XIS1 では PSF の裾の上にはない。よって、各検出器でイメージフィットを行い、すべての検出器で有意に検出された天体だけを選び出すことで、PSF の裾の誤検出はほぼ除くことができる。ここでは MIGRAD 関数を用いて、フラックスとそのエラーを見積もり、有意度を調べる。検出の有意度は、

$$\text{Detection Significance } (\sigma) = \frac{\text{Best Fit Flux}}{1\ \sigma\ \text{Error of Flux}} \tag{6.7}$$

から求める (Ueda et al. 2001)。表 6.3 に誤検出の各検出器でのフラックスと有意度を示す。予測したとおり、XIS1 では検出されていないことが分かる。このような PSF の裾の誤検出を除くために、XIS0 に不感領域がない観測では、すべての検出器で有意度が 3.0 σ 以上でないものを誤検出とした。XIS0 に不感領域 (3.3.3 節) がある観測では、XIS1 と XIS3 ともに 3.0 σ 以上でないものを誤検出とした。

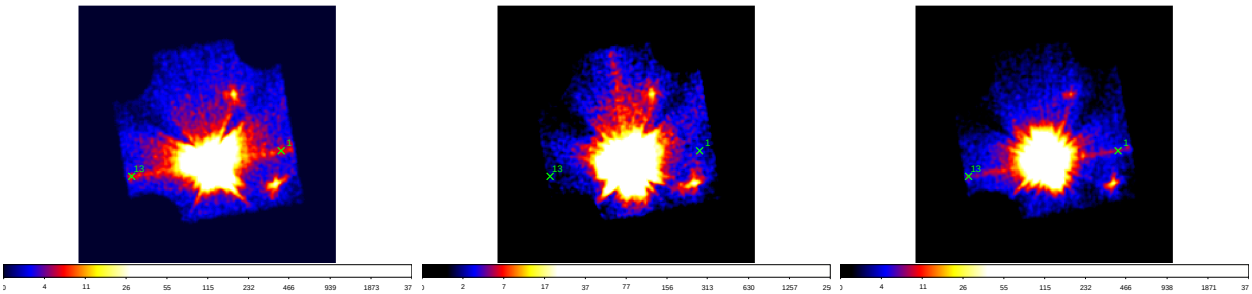

図 6.4: Eta Carinae (ID; 403036010) の観測で各検出器における hard バンド (2.0−10 keV) のイメージの誤検出 (緑印)。左:XIS0。中央:XIS1。右:XIS3。図中の番号は、表 5.2 とリンクしている。

表 6.3: Eta Carinae (ID; 403036010) の hard バンド (2.0−10 keV) のイメージにある誤検出のフラックスと有意度。

天体番号 [a]	フラックス	有意度
	XIS0/XIS1/XIS3	XIS0/XIS1/XIS3
	(photons cm^{-2} s^{-1})	(σ)
1	$1.2 \times 10^{-4}/5.8 \times 10^{-8}/1.2 \times 10^{-4}$	22/0.02/21
13	$7.7 \times 10^{-5}/5.2 \times 10^{-10}/8.2 \times 10^{-5}$	15/0.006/15

[a] 図 6.4 の中にある天体の番号。表 5.2 とリンクしている。

6.4 全検出器を足し合わせたイメージフィッティング

最後に、統計を稼ぐために全検出器を足し合わせて、各エネルギーバンドでイメージフィットを行い、フラックスと有意度を算出する。モデル関数は、

$$\mathrm{DATA}_b(X,Y) = F_b \sum_b \frac{t_s}{A_{s,b}} \mathrm{Model}_{\mathrm{crab}}(X,Y) \tag{6.8}$$

であり、フラックス F (photons cm^{-2} s^{-1}) をフリーパラメーターとしてフィットする。フィッティングには、MIGRAD と MINOS 関数を用いる。MINOS 関数では 1σ の正と負のエラーをそれぞれ計算するが、それらの値はほとんど変わらないので、Hiroi et al. (2013) と同様に負のエラーを採用する。有意度は、(6.7) 式から求める。

第7章　結果

Contents

7.1 すざくの位置決定精度 74
7.2 各エネルギーバンドでの検出をまとめた結果 74
7.3 個別の天体である確度が高いものについて同一天体にまとめた結果 80
7.4 ライトカーブとスペクトルの抽出 86
7.5 既知の X 線天体との対応 91

7.1　すざくの位置決定精度

複数の観測から検出された天体が同一であるかどうかを判定するために、すざくの位置決定精度を調べる。そのために、装置のキャリブレーションのために 50 回観測された超新星残骸 E0102–72 の観測視野に含まれる高質量 X 線連星 RX J0103.6–7201 を用いる。この天体の位置は、SIMBAD astronomical database (SIMBAD) より赤経 15°.9059、赤緯 −72°.0261 である。この位置に対するすざくの検出位置を図 7.1 に示す。図 7.1 から、90%の観測が入る半径が 26 秒角であることが分かった (紫の円)。以下、この半径を本研究ではすざくの位置決定誤差 (90%) とする。視野外の明るい天体の迷光上の誤検出と Crab Nebula のように明らかにパイルアップしている天体を除いた上で、いずれかのエネルギーバンドで検出の有意度が 5σ 以上であるものを最終的なカタログに掲載する。

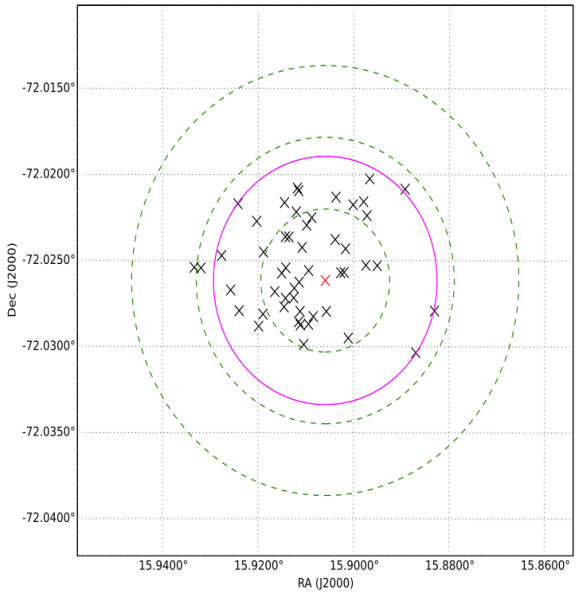

図 7.1: すざくの位置決定精度。すざくで 50 回観測されている高質量 X 線連星 RX J0103.6–7201 について、SIMBAD の座標 赤経 15°.9059、赤緯 −72°.0261 (赤印) に対するすざくの座標のずれを調べた。緑の円は、内側から半径 15、30、45 秒角である。紫の円は、半径 26 秒角で 90%の観測が含まれる。

7.2　各エネルギーバンドでの検出をまとめた結果

まず、各観測シークエンスごとに、それぞれのエネルギーバンドで検出された位置から 26 秒角以内にある検出を同一天体であるとみなし、検出結果をまとめた。その結果、5531 個の X 線源が検出された。これらの検出の一部を表 7.1 と図 7.2 に示す。全部については、付録 B (電子版) に示して

いる。表 7.1 には、各バンドの検出位置を平均したもの、フラックス、有意度、Hardness Ratio (HR) を載せている。HR の定義は、

$$\mathrm{HR} = \frac{h - s}{h + s} \tag{7.1}$$

であり、h と s はそれぞれ 2.0–10 keV (hard)、0.5–2.0 keV (soft) での光子フラックス (photons cm^{-2} s^{-1}) である。また、広がった天体か点源かの指標になるウェーブレットスケールも載せている。ウェーブレットスケールの値が小さいと点源である可能性が高く、大きいと広がった天体である可能性が高い。5σ 検出感度は、全検出器を足し合わせた観測時間の中間値 134 ks (4.3 節) で、all (0.5–10 keV)、soft、hard バンドそれぞれ、5.0×10^{-14}、1.6×10^{-14}、3.7×10^{-14} erg cm^{-2} s^{-1} である。

表 7.1: 検出された天体 (一部)。

No.[a]	Seq.[b]	Position (J2000) R.A. (deg)	Position (J2000) Decl. (deg)	Flux all[c]/soft[c]/hard[c] (10^{-13} erg cm^{-2} s^{-1})	Significance all[c]/soft[c]/hard[c] (σ)	Hardness Ratio	Scale[d] all[c]/soft[c]/hard[c] (pixel)
1	100003010	76.4282	−67.8828	309/163/5.43	220/241/18	−0.98±0.00	4.0/4.0/2.8
2	100003010	76.4585	−67.8434	–/–/6.93	–/–/23	+1	–/–/2.0
3	100003010	76.4759	−68.0355	181/96.8/4.06	180/160/20	−0.98±0.00	2.8/2.8/2.8
1	100032010	49.3817	−66.6402	1.13/0.35/–	18/14/–	−1	2.0/2.8/–
2	100032010	49.3973	−66.5453	11.7/4.96/3.89	113/91/38	−0.62±0.01	1.4/1.4/1.4
3	100032010	49.5685	−66.4805	144/43.4/97.6	410/280/280	−0.20±0.00	1.4/1.4/1.4
4	100032010	49.5796	−66.5945	39.2/11.6/27.3	192/141/116	−0.17±0.01	1.4/1.4/1.4
1	100046010	163.1722	57.6176	0.87/0.23/–	19/16/–	−1	2.0/2.0/–
2	100046010	163.2510	57.5087	0.50/0.14/–	14/10/–	−1	2.8/2.0/–
3	100046010	163.2561	57.7047	2.46/1.37/–	43/58/–	−1	1.4/1.4/–
4	100046010	163.3213	57.6000	3.31/1.10/1.97	77/60/42	−0.30±0.01	1.4/1.4/1.4
5	100046010	163.4036	57.6351	1.06/0.51/–	35/41/–	−1	1.4/1.4/–
6	100046010	163.4171	57.5194	1.63/0.61/0.68	38/37/16	−0.50±0.02	1.4/1.4/2.8
7	100046010	163.4296	57.5905	0.80/0.31/–	29/27/–	−1	4.0/4.0/–
8	100046010	163.5153	57.6754	1.12/0.43/0.42	34/30/12	−0.55±0.03	1.4/1.4/2.0
9	100046010	163.5312	57.5913	1.09/0.38/0.52	34/32/17	−0.42±0.03	1.4/1.4/2.8
10	100046010	163.5457	57.5146	0.36/0.14/–	12/13/–	−1	2.0/2.0/–
11	100046010	163.6111	57.6163	1.09/–/1.50	30/–/31	+1	1.4/–/1.4
1	403016010	40.0141	61.1295	16.6/7.97/2.66	111/136/32	−0.82±0.01	1.4/1.4/1.4
2	403016010	40.1379	61.2303	79.9/18.5/70.6	394/242/273	0.07±0.00	1.4/1.4/1.4
3	403016010	40.1933	61.2823	2.57/1.03/–	36/34/–	−1	2.0/2.0/–
1	404031010	85.6432	−40.9756	0.93/0.31/–	13/13/–	−1	2.8/2.8/–
2	404031010	85.7148	−41.0004	4.56/1.52/2.76	77/45/35	−0.30±0.02	4.0/5.7/4.0
3	404031010	85.8361	−41.0326	81.3/16.9/77.0	366/213/274	0.15±0.00	1.4/1.4/1.4
1	407045010	69.8274	−4.6556	1.43/0.44/–	21/17/–	−1	2.0/2.0/–
2	407045010	69.8695	−4.5959	21.8/7.51/12.2	137/106/80	−0.34±0.01	1.4/1.4/1.4
3	407045010	69.9305	−4.6040	1.93/0.74/–	29/26/–	−1	2.8/4.0/–
1	505092010	262.6638	−21.4783	2065/969/380	544/607/260	−0.79±0.00	8.0/8.0/8.0
2	505092010	262.8027	−21.4287	–/–/2.65	–/–/8.8	+1	–/–/2.8
1	506018010	304.5253	40.7331	6.74/3.36/–	37/48/–	−1	1.4/1.4/–
2	506018010	304.6571	40.6828	30.0/0.60/45.3	143/20/141	0.91±0.00	1.4/2.0/1.4

[a] シークエンス内で天体番号を付けていて、図 7.2 中の番号とリンクしている。
[b] シークエンス番号。
[c] エネルギーバンド。 all=0.5–10 keV、soft=0.5–2.0 keV、hard=2.0–10 keV。
[d] ウェーブレットスケール。

表 7.1: 検出された天体 (一部)。

No.[a]	Seq.[b]	Position (J2000) R.A. (deg)	Position (J2000) Decl. (deg)	Flux all[c]/soft[c]/hard[c] (10^{-13} erg cm^{-2} s^{-1})	Significance all[c]/soft[c]/hard[c] (σ)	Hardness Ratio	Scale[d] all[c]/soft[c]/hard[c] (pixel)
1	701004010	130.5712	36.4171	1.49/0.46/0.97	43/32/27	−0.23±0.02	1.4/1.4/1.4
2	701004010	130.6312	36.2800	3.20/1.05/1.89	75/57/46	−0.30±0.01	4.0/4.0/5.7
3	701004010	130.7338	36.3654	80.0/24.6/53.2	501/390/315	−0.21±0.00	8.0/8.0/8.0
1	702123010	244.4299	−59.3937	0.54/0.17/–	11/9.5/–	−1	1.4/2.0/–
2	702123010	244.6482	−59.4526	107/33.2/70.1	484/367/304	−0.23±0.00	1.4/1.4/1.4
3	702123010	244.7641	−59.3840	9.06/3.12/5.04	108/79/61	−0.35±0.01	8.0/8.0/8.0
4	702123010	244.8117	−59.3342	1.60/0.66/–	28/24/–	−1	1.4/2.0/–
1	801075010	318.4496	2.4745	6.58/–/9.84	26/–/30	+1	1.4/–/2.0
2	801075010	318.4846	2.5656	52.3/18.2/28.2	117/116/68	−0.37±0.01	16.0/16.0/16.0
1	804047010	181.7680	65.1658	0.49/0.15/–	16/11/–	−1	2.0/2.8/–
2	804047010	181.9323	65.2648	1.07/0.34/0.67	24/25/18	−0.26±0.03	1.4/1.4/2.0
3	804047010	182.0228	65.1743	5.31/2.58/1.16	112/88/29	−0.76±0.01	2.8/2.8/1.4
4	804047010	182.2461	65.1679	0.49/0.16/–	20/19/–	−1	2.0/2.8/–

[a] シークエンス内で天体番号を付けていて、図 7.2 中の番号とリンクしている。
[b] シークエンス番号。
[c] エネルギーバンド。 all=0.5–10 keV、soft=0.5–2.0 keV、hard=2.0–10 keV。
[d] ウェーブレットスケール。

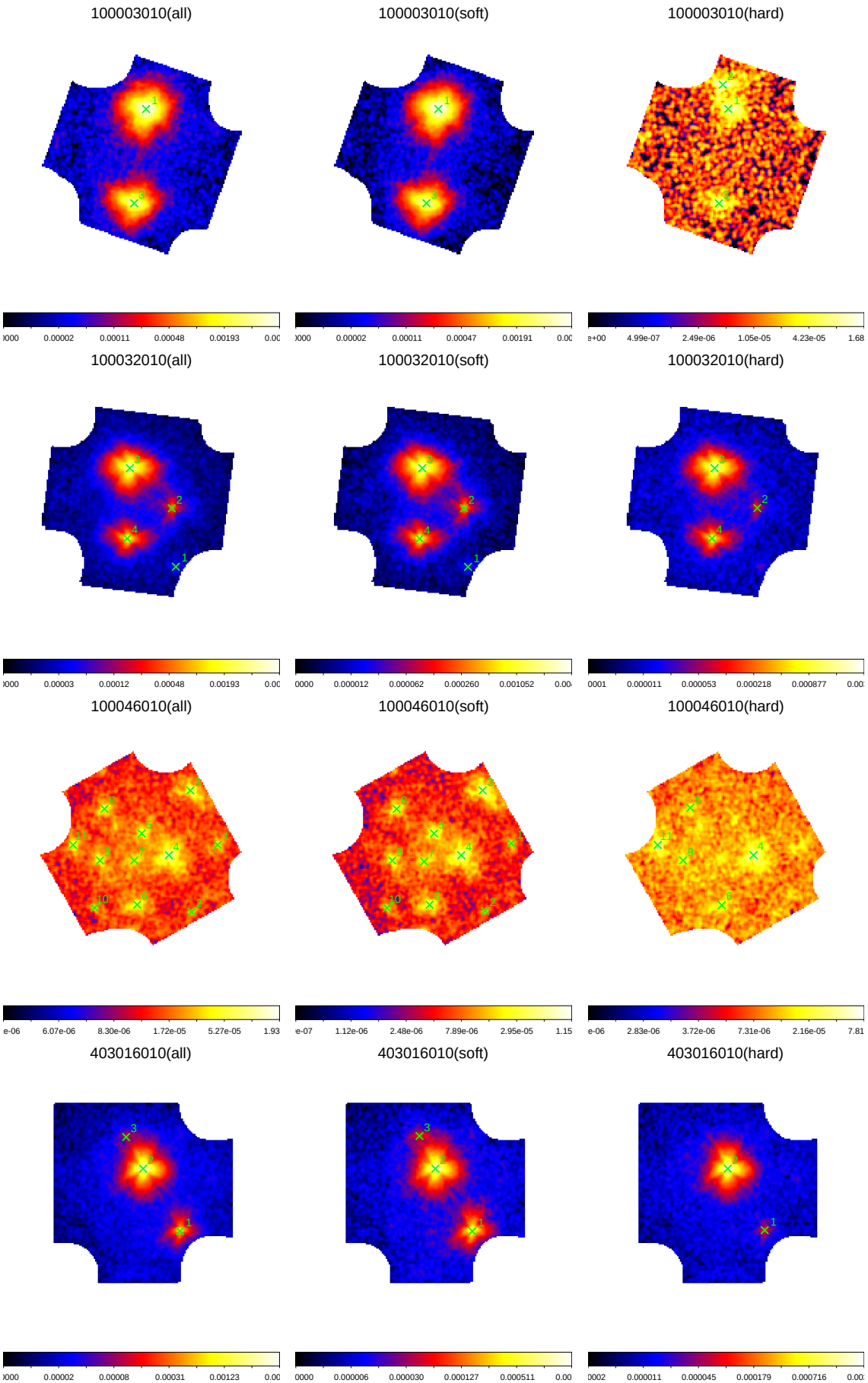

図 7.2: 各エネルギーバンドでの検出をまとめた結果。タイトルには、シークエンス番号とエネルギーバンドを書いている。図中の数字は、表 7.1 の天体番号とリンクしている。

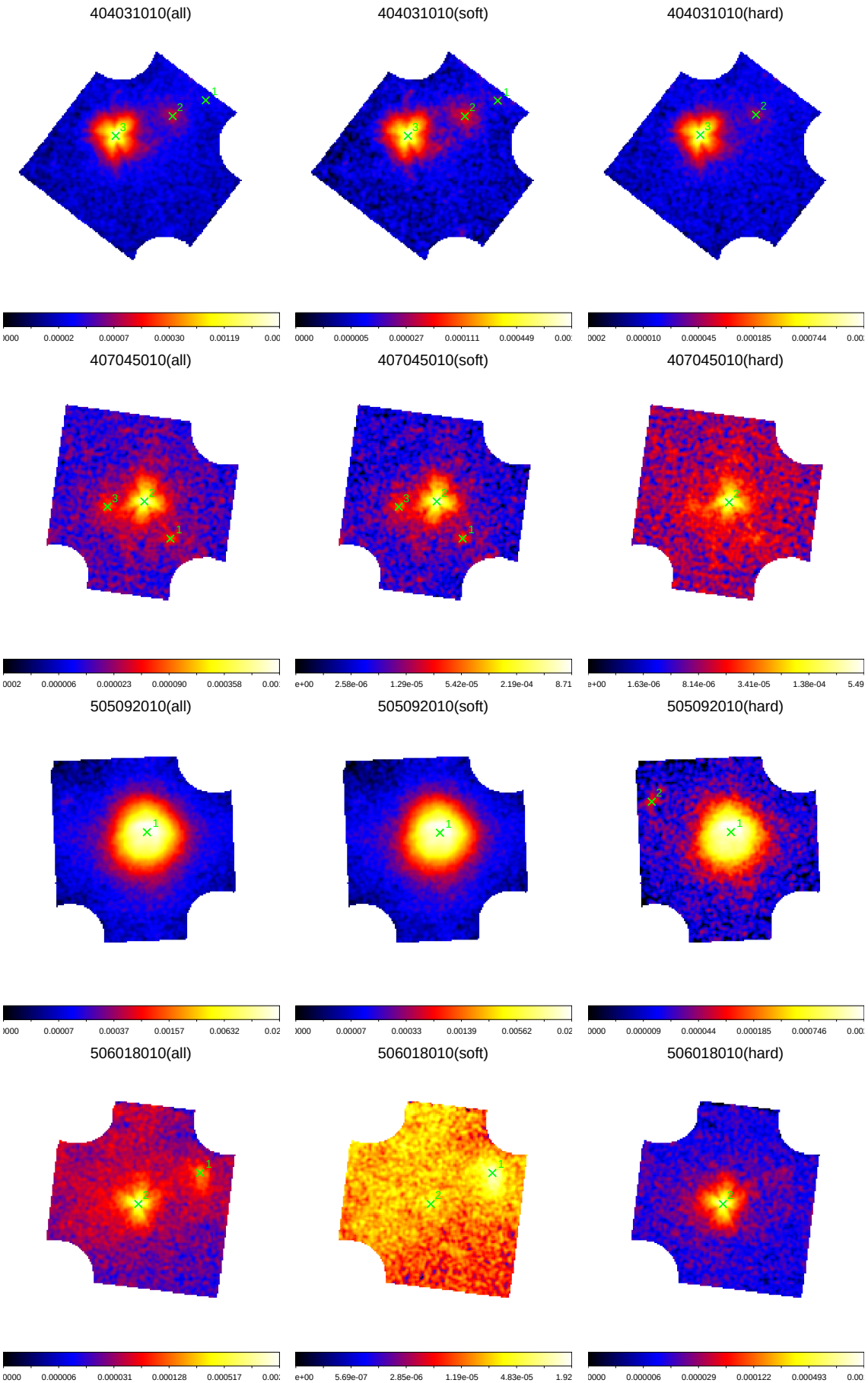

図 7.2: *continue.*

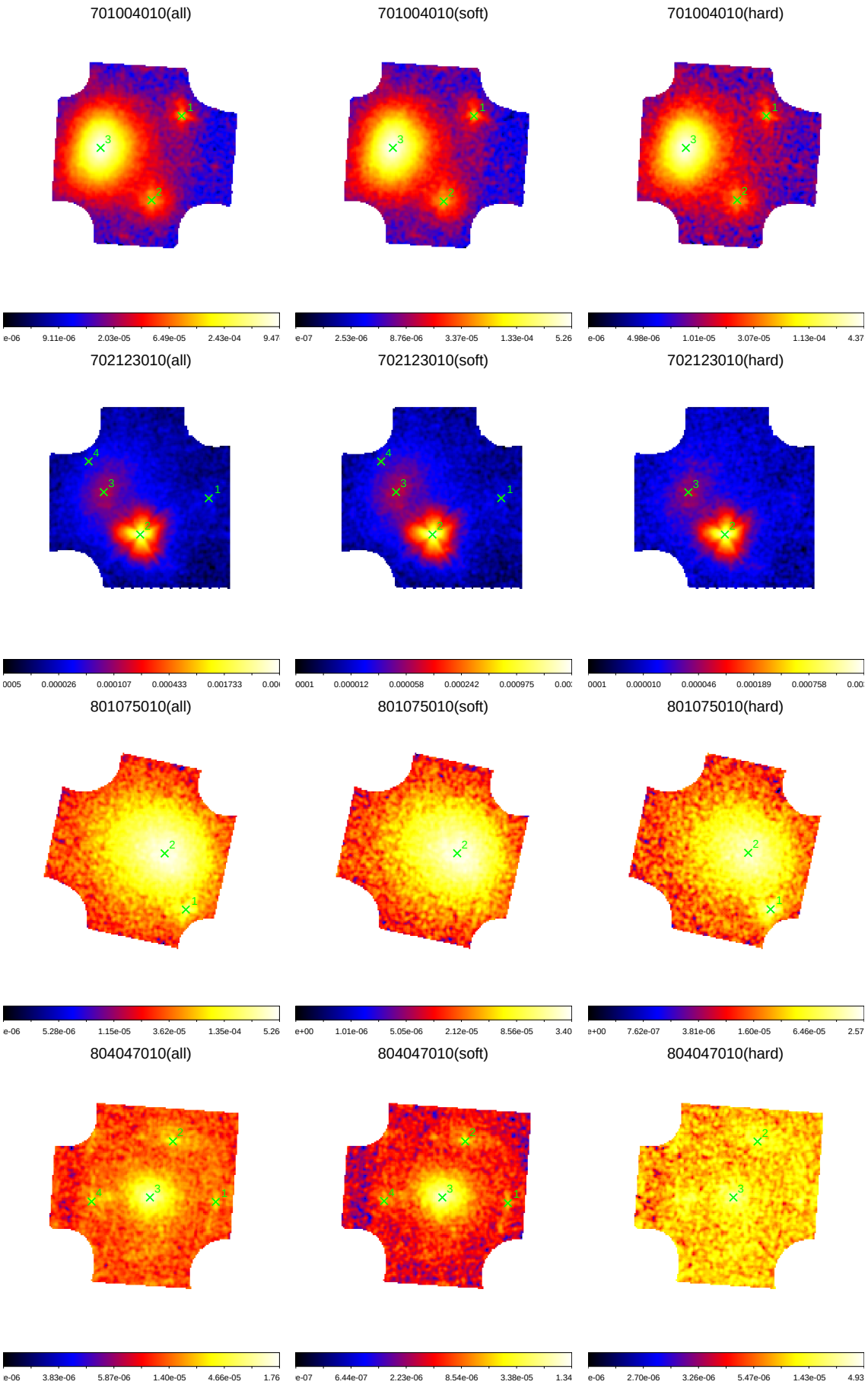

図 7.2: *continue.*

7.3　個別の天体である確度が高いものについて同一天体にまとめた結果

7.2 節の結果には、7.1 節で述べた RX J0103.6–7201 のように、2 回以上観測されている天体の情報が独立に含まれている。そこで、それらの情報を 1 つにまとめる。

まず、複数の観測で検出された天体位置について以下の手順を行い、同一天体を選び出した。例として、4 つの天体 A、B、C、D から同一天体を選び出す手順を図 7.3 に示している。

1. 各天体に対して、異なる観測シークエンスの天体のうち、40 秒角以内にあるものをリストアップした。
2. 作成したリストを比較して重複するものがあれば、それらのリストを結合して、同一天体候補とした。
3. 同一天体候補の平均位置を求めて、その位置から 26 秒角以内にあるものを同一天体であると決定した。図 7.3 では、A と B が A、B、C の平均位置から 26 秒角以内にあり、同一天体である。

段階的に独立な天体の数は 4539 であった。

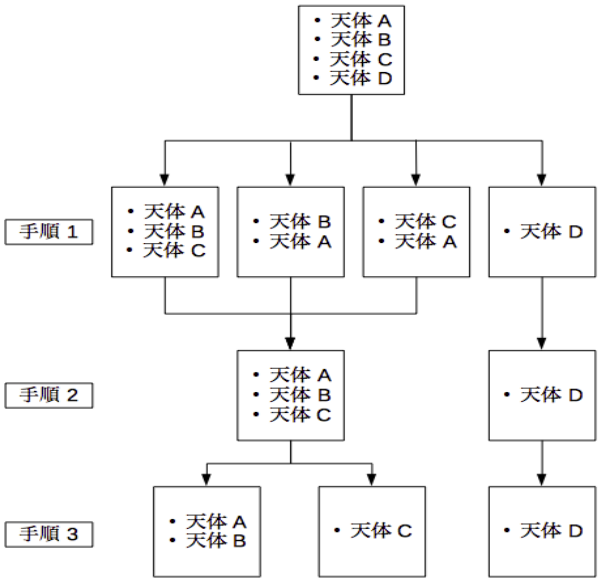

図 7.3: 4 つの天体 A、B、C、D から同一天体を選び出す手順。

次に、フラックスは、エラーで重み付け平均をとった。そのときに、検出されなかったエネル

ギーバンドがあれば、そのエネルギーバンドのフラックスを 0 とし、エラーは全検出器を足し合わせた観測時間の中間値 134 ks (4.3 節) での 1 σ の値に置き換えた。平均フラックスのエラーは誤差伝搬則から求めた。有意度は、平均フラックスをそのエラーで割ったものである。ウェーブレットスケールは、検出されたエネルギーバンドのものだけを平均した。HR は、平均したフラックスを用いて、(7.1) 式と同様に計算した。

同じ天体が 2 観測以上で検出された場合には、各エネルギーバンドでそれらの観測間の変動率を求めた。ここでも、検出されなかったエネルギーバンドがあれば上記と同様に処理した。変動率の定義は、Edelson et al. (2002) より、

$$F_{\rm var} = \sqrt{\frac{S^2 - \langle \sigma_{\rm err}^2 \rangle}{\langle X \rangle^2}} \tag{7.2}$$

である。そのエラーは、

$$\sigma_{F_{\rm var}} = \frac{1}{F_{\rm var}} \sqrt{\frac{1}{2N}} \frac{S^2}{\langle X \rangle^2} \tag{7.3}$$

である。ここで、

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (X_i - \langle X \rangle)^2 \tag{7.4}$$

である。N は観測数、X_i はある観測におけるフラックス、$\langle X \rangle$ は観測間での平均フラックス、$\langle \sigma_{\rm err}^2 \rangle$ は観測間におけるフラックスのエラーの自乗平均である。

最終的に目視によって、以下の A∼D の検出を除き、個別の天体である確度の高い 3549 天体をカタログに掲載した。このカタログの一部を表 7.2 に示す。全部については、付録 C (電子版) に示す。

A. 視野内にある明るい天体の PSF の裾上にある検出

B. 視野外にある明るい天体の PSF の裾のもれこみ

C. 視野の端にある検出

D. 視野全体に広がった天体の一部

表 7.2: 同一天体でまとめた結果。

No.	Position (J2000) R.A. (deg)	Decl. (deg)	Flux[a] all[j]/soft[j]/hard[j] (10^{-13} erg cm^{-2} s^{-1})	Significance all[j]/soft[j]/hard[j] (σ)	Hardness Ratio	F_{var}[b] all[j]/soft[j]/hard[j] (%)	F_{KS}[c] all[j]/soft[j]/hard[j]	Scale[d] all[j]/soft[j]/hard[j] (pixel)	N_{obs}[e]	N_{src}[f]	Counterpart Name[g]	Type[h]	Distance[i] (arcsec)
1†	0.2461	−57.8136	6.60/2.30/3.56	98/63/60	−0.37±0.01	−/−/−	4e−03/2e−02/2e−02	2.0/2.8/1.4	1	0	−	−	−
2†	0.3208	−57.8979	1.19/0.43/0.0	22/20/0.0	−1.00±0.20	−/−/−	1e−01/1e−03/2e−03	2.8/2.0/−	1	0	−	−	−
3†	0.3860	62.4901	2.51/0.0/2.51	20/0.0/15	1.00±0.04	−/−/−	4e−01/2e−01/5e−01	2.8/−/4.0	1	0	−	−	−
4	1.4609	20.2217	0.49/0.12/0.0	33/20/0.0	−1.00±0.41	30±13/87±36/−	1e−06/6e−06/4e−02	2.8/2.8/−	3	1	2XMM J000549.4+201308	XrayS	18
5†	1.4695	20.2914	0.16/0.0/0.0	8.6/0.0/0.0	−	−/−/−	7e−06/2e−05/4e−02	4.0/−/−	1	0	−	−	−
6	1.5067	20.0686	0.094/0.12/0.0	5.3/16/0.0	−1.00±0.49	140±71/＜8/−	2e−01/4e−01/1e−01	2.8/2.4/−	2	1	2XMM J000601.3+200353	XrayS	14
7	1.5588	20.3076	0.66/0.0/0.0	37/0.0/0.0	−	78±39/−/−	6e−18/3e−13/3e−06	2.0/−/−	2	1	2XMM J000613.0+201818	XrayS	17
8	1.5857	20.2051	38.7/7.68/36.1	740/404/572	0.17±0.00	141±58/154±63/110±45	0/0/0	1.4/1.4/1.4	3	2	MRK 0335	G	17
											2XMM J000618.7+201220	XrayS	25
9†	1.5920	20.3345	0.0/0.12/0.0	0.0/12/0.0	−1.00±0.71	−/−/−	2e−08/5e−07/6e−03	−/4.0/−	1	0	−	−	−
10†	2.1777	59.0479	1.00/0.073/0.0	20/6.5/0.0	−1.00±0.84	26±14/141±71/−	5e−02/4e−01/1e−01	2.4/2.8/−	2	0	−	−	−
11	2.3010	59.1497	4.85/2.44/0.0	75/82/0.0	−1.00±0.03	＜0.5/＜0.5/−	3e−02/2e−01/1e−02	1.4/1.4/−	2	1	beta Cas	!*	17
12	2.6282	10.9738	115/33.3/82.1	492/357/319	−0.15±0.00	−/−/−	0/0/0	1.4/1.4/1.4	1	1	MRK 1501	G	5
13†	2.8877	52.6302	0.86/0.0/0.76	22/0.0/15	1.00±0.08	12±8/−/139±72	6e−02/9e−02/2e−01	2.1/−/2.0	2	0	−	−	−
14†	3.1486	52.5176	0.33/0.17/0.0	7.8/11/0.0	−1.00±0.50	−/−/−	4e−01/2e−01/2e−01	4.0/4.0/−	1	0	−	−	−
15[l]	3.3260	−49.1160	16.4/5.09/10.7	54/42/32	−0.22±0.02	−/−/−	4e−01/9e−01/2e−01	4.0/5.7/4.0	1	1	3XMM J001318.4–490648	−	10
16	3.4650	−30.4157	2.06/0.68/1.20	50/42/24	−0.31±0.02	13±8/16±9/140±71	3e−01/2e−02/1e−01	2.1/2.1/1.4	2	4	CXO J001351.5–302500	XrayS	4
											1WGA J0013.8–3024	XrayS	8
											CXO J001351.1–302436	XrayS	21
17	3.5346	−30.3677	0.0/4.88/0.0	0.0/154/0.0	−1.00±0.02	−/−/−	2e−01/4e−01/3e−01	−/4.0/−	1	2	2XMM J001407.9–302204	XrayS	4
											1WGA J0014.1–3021	XrayS	18
18†	3.5785	−30.3811	52.8/14.8/32.8	457/337/343	−0.20±0.00	32±16/17±8/37±19	2e−01/3e−01/8e−02	8.5/8.5/8.5	2	0	−	−	−
19	3.5952	−30.2521	0.39/0.10/0.0	10/8.4/0.0	−1.00±0.82	−/−/−	4e−01/4e−01/2e−01	2.0/2.8/−	1	2	CXO J001423.7–301454	XrayS	18
											GALEXASC J001424.27–301505.2	QSO	19
20	3.6537	−30.2697	0.35/0.0/0.0	11/0.0/0.0	−	−/−/−	4e−01/5e−01/3e−01	4.0/−/−	1	1	GALEXASC J001438.15–301626.7	G	21
21	3.7723	−30.4080	0.85/0.26/0.0	18/15/0.0	−1.00±0.33	−/−/−	1e−01/2e−01/4e−01	2.8/2.8/−	1	2	GALEXASC J001504.82–302421.5	G	11
											GALEXASC J001506.79–302433.5	QSO	19
22†	3.8339	−30.3313	0.0/0.15/0.0	0.0/11/0.0	−1.00±0.57	−/−/−	3e−02/7e−02/2e−04	−/5.7/−	1	0	−	−	−
23	4.7573	−40.8596	8.48/2.89/5.12	59/48/38	−0.31±0.01	−/−/−	1e−01/1e−01/1e−01	5.7/5.7/5.7	1	1	1RXS J001859.7–405128	XrayS	24
24[m]	4.8190	−40.8561	2.51/0.91/0.0	24/22/0.0	−1.00±0.10	−/−/−	3e−01/2e−01/1e−01	2.0/2.0/−	1	1	1SXPS J001915.8–405128	−	10
25	4.8693	−70.8878	1.31/0.38/0.83	28/24/16	−0.21±0.03	−/−/−	4e−01/3e−01/5e−01	1.4/2.0/2.8	1	1	2XMM J001924.8–705307	XrayS	20
26	4.9788	−70.9538	0.68/0.25/0.0	20/22/0.0	−1.00±0.34	−/−/−	4e−02/2e−01/4e−02	2.0/2.0/−	1	1	2XMM J001951.9–705701	XrayS	19
27	5.0576	−71.0514	0.48/0.18/0.0	9.8/13/0.0	−1.00±0.46	−/−/−	3e−01/5e−01/1e−01	2.8/2.8/−	1	1	2XMM J002011.1–710256	XrayS	15
28	5.1568	−70.9268	1.00/0.0/1.22	29/0.0/33	1.00±0.07	−/−/−	3e−01/6e−01/1e−01	1.4/−/1.4	1	1	GALEXASC J002034.99–705525.8	G	17
29[l]	5.4634	61.7581	0.90/0.0/0.0	14/0.0/0.0	−	−/−/−	1e−02/5e−01/8e−03	4.0/−/−	1	1	3XMM J002153.3+614520	−	17
30	5.5393	−18.8941	26.6/10.8/10.0	142/88/45	−0.57±0.01	−/−/−	2e−12/1e−10/1e−02	1.4/1.4/2.0	1	1	WISE J002209.25–185334.7	VisS	4
31	5.7066	61.7304	3.07/0.0/2.89	36/0.0/30	1.00±0.03	−/−/−	4e−02/8e−02/1e−01	1.4/−/1.4	1	1	CXO J002249.7+614346	XrayS	3
32	5.7363	61.6846	50.1/10.0/49.4	291/138/182	0.19±0.00	−/−/−	4e−08/8e−04/1e−05	1.4/1.4/1.4	1	1	CXO J002257.6+614107	XrayS	7
33	5.8402	−71.9819	0.95/0.0/0.91	28/0.0/19	1.00±0.10	−/−/−	3e−01/1e−01/2e−01	2.0/−/2.8	1	1	CXO J002319.9–715854	XrayS	8
34	6.0226	−72.0814	27.7/11.5/10.2	273/215/111	−0.58±0.00	−/−/−	3e−04/1e−02/7e−03	2.0/1.4/1.4	1	54	NGC 0104	*Cl	0

[a] 観測間でエラー重み付け平均をとったもの。
[b] 観測間の変動率。
[c] 一番変動している観測の KS テストの結果。この確率が小さいほど、大きく変動している。
[d] 平均したウェーブレットスケール。
[e] 観測数。
[f] 対応 X 線天体数。
[g] 対応 X 線天体名。距離が近いものを 3 つ代表してあげている。
[h] 対応 X 線天体の分類。
[i] 対応 X 線天体との距離。
[j] エネルギーバンド。 all=0.5–10 keV、soft=0.5–2.0 keV、hard=2.0–10 keV。
[k] SIMBAD で見つかったもの。
[l] 3XMM カタログで見つかったもの。
[m] 1SXPS カタログで見つかったもの。
† 対応 X 線天体が見つからなかったもの。

表 7.2: 同一天体でまとめた結果。

No.	Position (J2000) R.A. (deg)	Decl. (deg)	Flux[a] all[j]/soft[j]/hard[j] (10^{-13} erg cm^{-2} s^{-1})	Significance all[j]/soft[j]/hard[j] (σ)	Hardness Ratio	F_{var}[b] all[j]/soft[j]/hard[j] (%)	F_{KS}[c] all[j]/soft[j]/hard[j]	Scale[d] all[j]/soft[j]/hard[j] (pixel)	N_{obs}[e]	N_{src}[f]	Counterpart Name[g]	Type[h]	Distance[i] (arcsec)
											CXO J002404.9–720451	XrayS	2
											CXO J002404.9–720455	XrayS	3
35	6.1558	−71.8560	0.0/0.11/0.0	0.0/9.4/0.0	−1.00±0.79	−/−/−	2e−02/2e−01/1e−02	−/2.0/−	1	1	1WGA J0024.5–7151	XrayS	16
36	6.1749	−72.0105	0.72/0.27/0.0	24/27/0.0	−1.00±0.32	−/−/−	8e−02/4e−01/4e−02	2.8/2.8/−	1	1	CXO J002438.8–720046	XrayS	17
37[k]	6.2129	−71.9900	1.64/0.63/0.91	49/43/29	−0.40±0.02	−/−/−	7e−02/1e−01/2e−01	8.0/8.0/8.0	1	2	[KG95] Source B	X	16
											2E 0022.5–7216	X	16
38	6.2994	12.2903	7.45/2.51/4.20	75/62/50	−0.33±0.01	−/−/−	2e−02/1e−01/1e−01	1.4/1.4/1.4	1	1	1RXS J002510.8+121725	XrayS	15
39†	6.3953	12.2692	4.58/1.82/0.0	43/39/0.0	−1.00±0.05	−/−/−	3e−01/3e−01/6e−01	8.0/8.0/−	1	0	−	−	−
40	7.2060	59.2877	300/60.3/284	584/304/435	0.17±0.00	−/−/−	4e−05/5e−04/2e−03	1.4/1.4/1.4	1	1	V0709 Cas	V*	7
41	7.2292	59.3211	0.0/2.77/0.0	0.0/43/0.0	−1.00±0.03	−/−/−	1e−03/1e−01/6e−03	−/1.4/−	1	1	1WGA J0028.9+5919	XrayS	16
42	8.3946	−19.3585	7.93/3.55/2.15	89/86/34	−0.69±0.01	−/−/−	2e−01/4e−01/9e−02	1.4/1.4/1.4	1	1	WISE J003334.36–192132.9	QSO	8
43†	8.9905	64.2642	1.27/0.0/1.38	22/0.0/22	1.00±0.06	−/−/−	5e−04/7e−04/1e−01	1.4/−/2.0	1	0	−	−	−
44†	9.0822	64.2809	1.08/0.0/1.32	22/0.0/25	1.00±0.07	−/−/−	3e−02/2e−01/6e−02	1.4/−/1.4	1	0	−	−	−
45†	9.0909	−44.1428	1.63/0.49/1.05	27/22/15	−0.22±0.04	−/−/−	5e−03/2e−01/2e−02	2.8/2.8/2.8	1	0	−	−	−
46†	9.1859	−44.1777	1.60/0.60/0.0	34/28/0.0	−1.00±0.14	−/−/−	1e−01/2e−02/3e−01	2.8/2.0/−	1	0	−	−	−
47	9.4688	12.6393	3.14/1.30/1.05	39/43/15	−0.61±0.02	−/−/−	3e−01/8e−01/3e−01	1.4/1.4/2.8	1	2	1RXS J003751.8+123810	XrayS	15
											1FGL J0038.0+1236:[TKM2013] 1	XrayS	22
48†	9.5429	12.6968	0.77/0.22/0.0	12/7.0/0.0	−1.00±0.38	−/−/−	4e−01/7e−01/4e−01	2.0/4.0/−	1	0	−	−	−
49†	9.6034	−29.2182	0.54/0.20/0.0	11/11/0.0	−1.00±0.43	−/−/−	5e−03/2e−01/3e−03	2.8/2.0/−	1	0	−	−	−
50†	9.6351	−29.0788	6.15/2.68/2.09	57/65/28	−0.62±0.01	−/−/−	5e−01/7e−01/4e−01	8.0/8.0/8.0	1	0	−	−	−
51†	9.9155	−28.9052	1.86/0.97/0.0	30/34/0.0	−1.00±0.09	−/−/−	8e−03/1e−01/5e−02	5.7/5.7/−	1	0	−	−	−
52†	9.9479	−28.9337	1.14/0.0/1.10	21/0.0/17	1.00±0.08	−/−/−	2e−01/4e−01/8e−02	2.0/−/2.0	1	0	−	−	−
53	10.0141	−28.8993	1.69/0.96/0.0	24/29/0.0	−1.00±0.09	−/−/−	3e−01/7e−01/3e−01	4.0/2.8/−	1	1	APMUKS(BJ) B003734.56–291035.9	G	20
54†	10.2482	−28.6832	1.18/0.56/0.0	22/19/0.0	−1.00±0.16	−/−/−	3e−05/6e−06/3e−01	2.0/2.0/−	1	0	−	−	−
55[l]	10.4521	−9.4553	12.7/4.25/7.74	100/90/67	−0.29±0.01	−/−/−	1e−01/5e−01/8e−02	8.0/8.0/8.0	1	1	3XMM J004149.8–092727	−	21
56†	10.4703	−12.9087	0.89/0.30/0.0	12/9.8/0.0	−1.00±0.29	−/−/−	1e−01/6e−01/2e−01	4.0/4.0/−	1	0	−	−	−
57	10.5343	−28.5311	123/43.7/64.8	343/260/184	−0.39±0.00	−/−/−	4e−01/3e−01/4e−01	8.0/8.0/8.0	1	1	ABELL 2811	GClstr	18
58†	10.5481	−12.8147	1.81/0.32/1.87	16/9.7/13	0.27±0.06	−/−/−	1e−01/5e−01/2e−01	1.4/1.4/2.0	1	0	−	−	−
59	10.5569	41.3108	10.2/3.35/7.59	76/62/56	−0.19±0.01	−/−/−	2e−06/1e−02/2e−05	1.4/1.4/1.4	1	2	CXO J004213.1+411836	V*	6
											RX J0042.2+4118	XrayS	25
60	10.5650	−9.6651	2.61/0.89/1.46	43/36/24	−0.35±0.02	−/−/−	5e−01/6e−01/5e−01	1.4/1.4/2.0	1	1	SDSS J004216.09–093958.7	*	9
61†	10.5658	−9.9853	6.72/3.06/1.46	141/133/48	−0.75±0.00	−/−/−	0/0/4e−28	1.4/1.4/1.4	1	0	−	−	−
62	10.5667	41.2904	4.26/1.30/0.0	40/31/0.0	−1.00±0.07	−/−/−	6e−05/5e−02/2e−05	1.4/1.4/−	1	3	CXO J004215.8+411720	XrayS	5
											CXOM31 J004215.6+411721	V*	7
											CXO J004215.5+411721	XrayS	7
63	10.5788	41.2062	4.24/1.84/0.0	49/50/0.0	−1.00±0.05	−/−/−	1e−02/3e−02/2e−01	1.4/1.4/−	1	3	CXO J004218.3+411223	V*	6
											2XMM J004219.5+411224	XrayS	8
											RX J0042.2+4112	XrayS	20
64	10.5793	41.2346	7.54/2.25/5.76	73/53/57	−0.13±0.01	−/−/−	2e−02/4e−02/8e−02	1.4/2.0/1.4	1	2	SKHV 148	*Cl	5
											MESSIER 031:[BGM2013] 02	XrayS	5

[a] 観測間でエラー重み付け平均をとったもの。
[b] 観測間の変動率。
[c] 一番変動している観測の KS テストの結果。この確率が小さいほど、大きく変動している。
[d] 平均したウェーブレットスケール。
[e] 観測数。
[f] 対応 X 線天体数。
[g] 対応 X 線天体名。距離が近いものを 3 つ代表してあげている。
[h] 対応 X 線天体の分類。
[i] 対応 X 線天体との距離。
[j] エネルギーバンド。 all=0.5–10 keV、soft=0.5–2.0 keV、hard=2.0–10 keV。
[k] SIMBAD で見つかったもの。
[l] 3XMM カタログで見つかったもの。
[m] 1SXPS カタログで見つかったもの。
† 対応 X 線天体が見つからなかったもの。

表 7.2: 同一天体でまとめた結果。

No.	Position (J2000) R.A. (deg)	Decl. (deg)	Flux[a] all[j]/soft[j]/hard[j] (10^{-13} erg cm^{-2} s^{-1})	Significance all[j]/soft[j]/hard[j] (σ)	Hardness Ratio	F_{var}[b] all[j]/soft[j]/hard[j] (%)	F_{KS}[c] all[j]/soft[j]/hard[j]	Scale[d] all[j]/soft[j]/hard[j] (pixel)	N_{obs}[e]	N_{src}[f]	Counterpart Name[g]	Type[h]	Distance[i] (arcsec)
65	10.5915	41.2675	6.09/2.73/5.37	34/28/31	−0.26±0.02	−/−/−	3e−02/3e−01/6e−02	1.4/2.0/1.4	1	4	CXO J004221.4+411601	V*	6
											MESSIER 031:[BGP2014] 140	XrayS	13
											MESSIER 031:[BGP2014] 134	XrayS	15
66	10.5973	41.2615	6.74/1.30/3.37	33/13/17	−0.13±0.05	−/−/−	2e−01/3e−01/2e−01	1.4/1.4/1.4	1	5	MESSIER 031:[BGM2013] 03	XrayS	8
											CXO J004222.9+411535	V*	8
											CXO J004224.1+411536	V*	10
67†	10.6057	−10.0616	1.49/0.49/0.84	46/39/26	−0.32±0.02	−/−/−	2e−18/3e−23/4e−05	1.4/1.4/2.0	1	0	–	–	–
68†	10.6096	−9.7719	0.44/0.0/0.53	9.5/0.0/10	1.00±0.17	−/−/−	3e−02/4e−01/4e−03	2.8/–/4.0	1	0	–	–	–
69†	10.6172	−9.9458	0.57/0.25/0.0	23/25/0.0	−1.00±0.35	−/−/−	1e−01/6e−02/1e−01	1.4/2.0/–	1	0	–	–	–
70	10.6192	41.1675	3.58/1.07/2.50	51/38/35	−0.18±0.02	−/−/−	8e−03/2e−01/3e−02	1.4/1.4/1.4	1	1	CXO J004228.2+411000	V*	5
71	10.6193	41.2082	6.75/2.11/4.53	62/47/41	−0.22±0.02	−/−/−	2e−01/2e−01/3e−01	1.4/1.4/1.4	1	4	CXO J004228.3+411223	XrayS	7
											CXOM31 J004228.2+411222	V*	8
											MESSIER 031:[BGM2013] 06	XrayS	8
72	10.6316	41.2733	11.7/4.47/6.21	83/73/46	−0.41±0.01	−/−/−	1e−18/2e−05/5e−17	1.4/1.4/1.4	1	2	MESSIER 031:[BGM2013] 07	XrayS	5
											CXO J004231.1+411621	V*	5
73	10.6331	41.3285	3.07/0.98/0.0	31/17/0.0	−1.00±0.09	−/−/−	8e−02/1e−01/2e−01	1.4/2.0/–	1	1	NBol 001	*Cl	9
74	10.6347	41.2221	12.8/3.93/8.46	105/77/70	−0.22±0.01	−/−/−	3e−04/9e−03/5e−03	1.4/1.4/1.4	1	3	RX J0042.5+4113	XrayS	4
											CXO J004232.0+411314	V*	6
											CXO J004232.7+411310	V*	10
75[l]	10.6381	−9.9299	0.45/0.0/0.0	17/0.0/0.0	–	−/−/−	5e−02/2e−01/2e−01	2.8/–/–	1	1	3XMM J004234.7−095542	–	24
76†	10.6408	−10.0088	0.45/0.17/0.0	20/21/0.0	−1.00±0.51	−/−/−	1e−01/7e−02/1e−01	1.4/1.4/–	1	0	–	–	–
77	10.6466	41.3352	3.73/1.08/3.84	36/19/48	0.03±0.03	−/−/−	1e−01/8e−02/3e−01	1.4/2.0/2.0	1	2	CXO J004235.2+412005	V*	1
											CXO J004236.1+412022	XrayS	18
78	10.6623	41.2685	78.4/22.6/50.2	333/227/219	−0.20±0.00	−/−/−	2e−19/2e−06/4e−19	1.4/1.4/1.4	1	4	CXO J004238.6+411603	*Cl	5
											CXO J004239.5+411614	XrayS	10
											CXO J004240.8+411609	XrayS	22
79†	10.6671	−9.8925	0.48/0.21/0.0	17/18/0.0	−1.00±0.41	−/−/−	6e−02/2e−01/1e−01	2.8/2.8/–	1	0	–	–	–
80	10.6872	41.1945	7.74/2.84/3.54	97/82/50	−0.46±0.01	−/−/−	1e−03/7e−05/3e−01	1.4/1.4/1.4	1	2	CXO J004244.8+411138	V*	2
											CXO J004244.3+411158	V*	19
81	10.6928	41.2937	17.4/5.45/11.6	105/80/72	−0.22±0.01	−/−/−	2e−04/2e−02/1e−04	1.4/2.0/1.4	1	4	CXO J004246.0+411736	*Cl	2
											MESSIER 031:[VG2007] 042	XrayS	9
											CXO J004244.9+411739	XrayS	16
82	10.6962	41.2745	27.7/10.7/15.3	126/108/75	−0.40±0.01	−/−/−	3e−12/6e−04/2e−13	1.4/2.8/1.4	1	12	CXO J004247.1+411628	PN	1
											MESSIER 031 N2004−11f	Nova	8
											CXO J004247.8+411623	V*	10
83	10.7048	41.2571	27.5/9.07/13.6	150/113/82	−0.38±0.01	−/−/−	3e−12/5e−05/8e−09	1.4/1.4/1.4	1	4	NBol 096	V*	8
											RX J0042.8+4115 NED01	XrayS	12
											NBol 095	*	16
84	10.7155	−23.5460	7.88/0.89/9.53	55/23/57	0.52±0.02	−/−/−	5e−02/2e−01/2e−01	1.4/4.0/1.4	1	2	1WGA J0042.8−2332	XrayS	12
											NGC 0232 E	G	23

[a] 観測間でエラー重み付け平均をとったもの。
[b] 観測間の変動率。
[c] 一番変動している観測の KS テストの結果。この確率が小さいほど、大きく変動している。
[d] 平均したウェーブレットスケール。
[e] 観測数。
[f] 対応 X 線天体数。
[g] 対応 X 線天体名。距離が近いものを 3 つ代表してあげている。
[h] 対応 X 線天体の分類。
[i] 対応 X 線天体との距離。
[j] エネルギーバンド。 all=0.5–10 keV、soft=0.5–2.0 keV、hard=2.0–10 keV。
[k] SIMBAD で見つかったもの。
[l] 3XMM カタログで見つかったもの。
[m] 1SXPS カタログで見つかったもの。
† 対応 X 線天体が見つからなかったもの。

表 7.2: 同一天体でまとめた結果。

No.	Position (J2000) R.A. (deg)	Decl. (deg)	Flux[a] all[j]/soft[j]/hard[j] (10^{-13} erg cm^{-2} s^{-1})	Significance all[j]/soft[j]/hard[j] (σ)	Hardness Ratio	F_{var}[b] all[j]/soft[j]/hard[j] (%)	F_{KS}[c] all[j]/soft[j]/hard[j]	Scale[d] all[j]/soft[j]/hard[j] (pixel)	N_{obs}[e]	N_{src}[f]	Counterpart Name[g]	Type[h]	Distance[i] (arcsec)
85†	10.7184	−9.6322	1.04/0.30/0.72	17/14/11	−0.17±0.05	−/−/−	2e−02/3e−01/4e−02	1.4/1.4/2.8	1	0	–	–	–
86	10.7206	41.3162	14.5/5.11/8.13	121/98/71	−0.36±0.01	−/−/−	2e−02/4e−02/2e−02	1.4/1.4/1.4	1	3	CXO J004252.5+411854	V*	6
											MESSIER 031 N2003–11a	Nova	15
											CXO J004252.5+411834	XrayS	24
87†	10.7234	−9.9584	0.35/0.14/0.0	13/12/0.0	−1.00±0.61	−/−/−	2e−01/6e−01/7e−02	2.8/2.8/–	1	0	–	–	–
88	10.7298	41.2683	11.0/5.66/5.89	66/86/38	−0.53±0.01	−/−/−	6e−07/1e−02/6e−06	1.4/1.4/1.4	1	3	CXO J004254.9+411603	V*	4
											CXO J004255.4+411608	XrayS	4
											RX J0042.8+4115 NED03	XrayS	19
89	10.7311	41.4333	2.73/0.78/1.94	34/23/23	−0.15±0.03	−/−/−	2e−01/4e−01/1e−01	1.4/1.4/1.4	1	5	CXO J004255.3+412556	V*	3
											RX J0042.9+4125	SNR	10
											GALEXASC J004253.61+412550.7	UvS	23
90	10.7438	41.1853	6.12/1.98/4.11	83/66/55	−0.24±0.01	−/−/−	8e−02/3e−01/1e−01	1.4/1.4/1.4	1	4	CXOM31 J004257.9+411104	XrayS	6
											CXO J004257.9+411106	XrayS	7
											MESSIER 031:[BGM2013] 23	XrayS	7

[a] 観測間でエラー重み付け平均をとったもの。
[b] 観測間の変動率。
[c] 一番変動している観測の KS テストの結果。この確率が小さいほど、大きく変動している。
[d] 平均したウェーブレットスケール。
[e] 観測数。
[f] 対応 X 線天体数。
[g] 対応 X 線天体名。距離が近いものを 3 つ代表してあげている。
[h] 対応 X 線天体の分類。
[i] 対応 X 線天体との距離。
[j] エネルギーバンド。 all=0.5–10 keV、soft=0.5–2.0 keV、hard=2.0–10 keV。
[k] SIMBAD で見つかったもの。
[l] 3XMM カタログで見つかったもの。
[m] 1SXPS カタログで見つかったもの。
† 対応 X 線天体が見つからなかったもの。

7.4　ライトカーブとスペクトルの抽出

7.3 節で同一天体にまとめた 3549 天体のライトカーブとスペクトルを、Encircled-energy fraction が 90%になる半径 2.2 分角 (図 3.4) の円領域から抽出する。その際、近接した天体のものが漏れ込むことがあるが、その対処は行わない。また、複数の観測がある場合、2.2 分角の円領域の半分以上が視野外にある観測のライトカーブとスペクトルは抽出しない。まず、ライトカーブはバックグラウンドを差し引かずに各観測、各エネルギーバンドで抽出した。XMM で見つかった星のフレア時間が 1 ks ∼ 10 ks なので (Pye et al. 2015)、そのようなフレアを捉え、かつ十分な統計を稼ぐために 30 分 (1.8 ks) でビンまとめした。また、変動していない確率を示すコルモゴロフ-スミルノフ検定 (KS テスト) を FTOOLS の lcstats によって行った。表 7.2 には、もっとも変動が大きい (確率が小さい) 観測のものを載せている。スペクトルは、FTOOLS の xisnxbgen によって非 X 線バックグラウンド (NXB) をシミュレートし、それを差し引き、各観測を足し合わせた。ただし、シークエンス番号 102021010 は特殊運用が行われており、xisnxbgen がその運用に対応していなかったので、バックグラウンドを目視でソース領域と同じ半径 2.2 分角の円領域でとった。また、シークエンス番号 105004040 は、原因が分からないが、XIS1 の NXB スペクトルを作ることができなかったので、上記と同じく目視でバックグラウンド領域をとった。図 7.4 と図 7.5 に一部の天体のライトカーブとスペクトルを示す。全部については、付録 D (電子版) に示す。

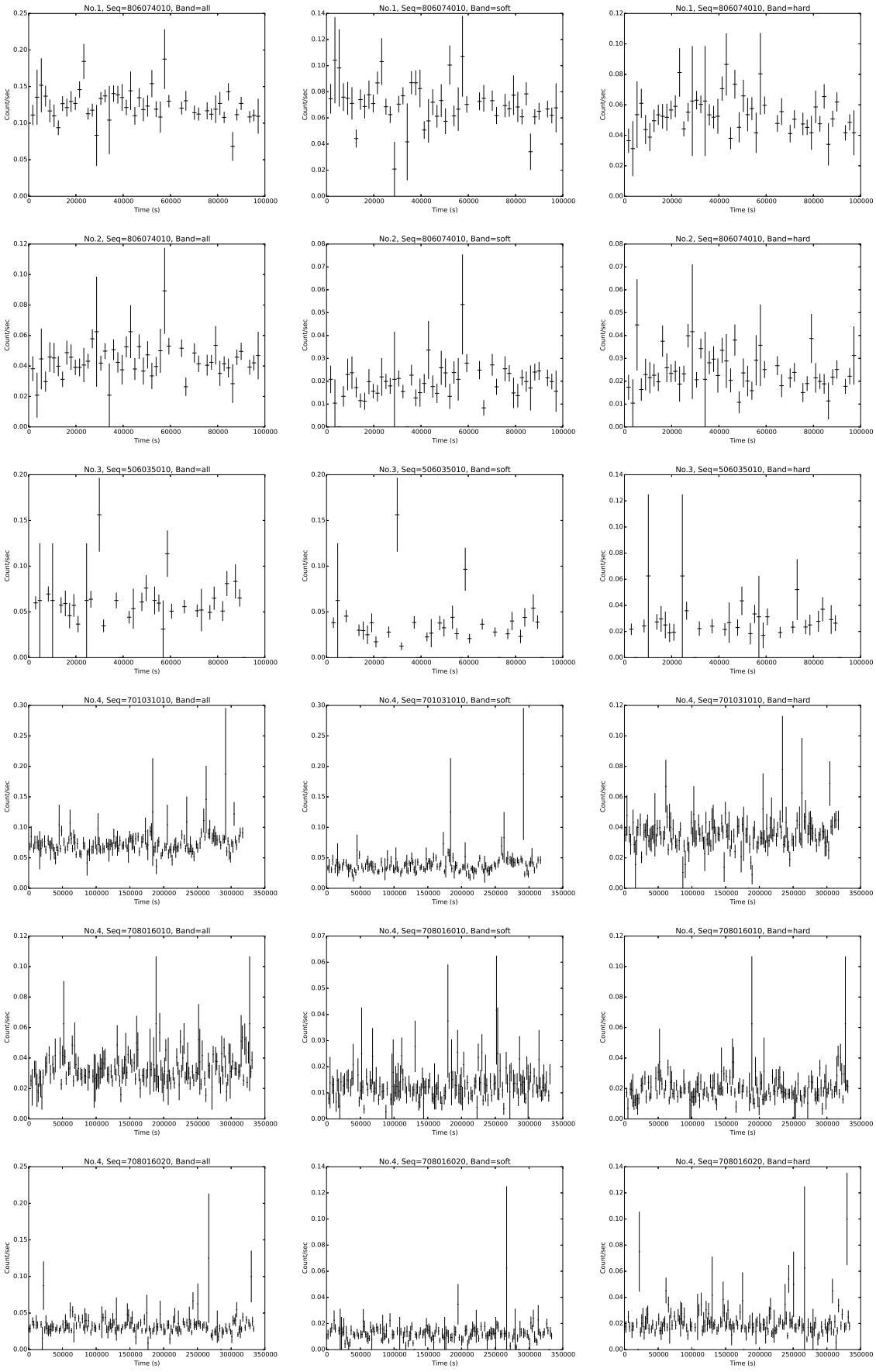

図 7.4: 同一天体にまとめた 3549 天体の各観測、各エネルギーバンドのライトカーブ (一部)。

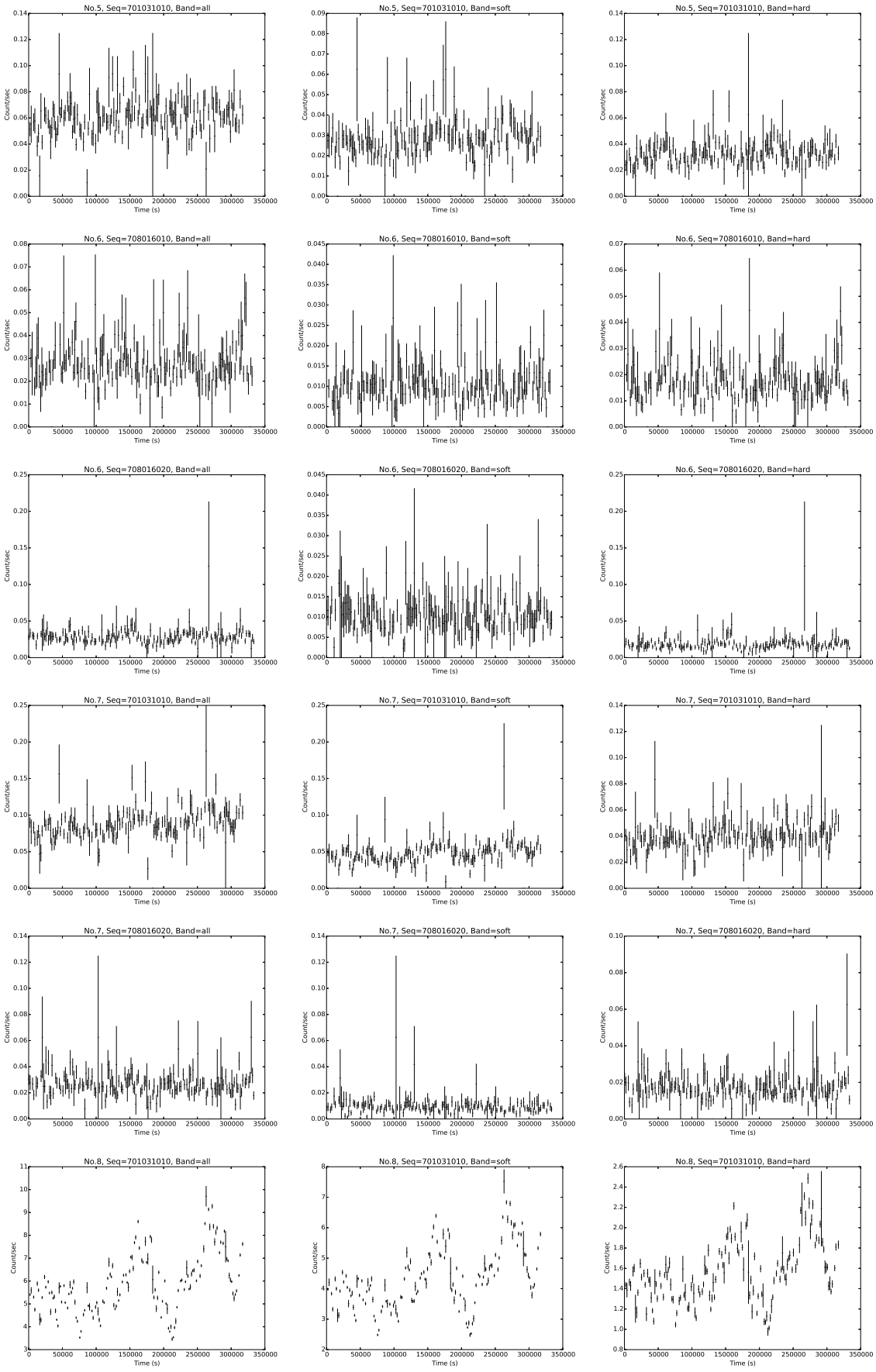

図 7.4: *continue.*

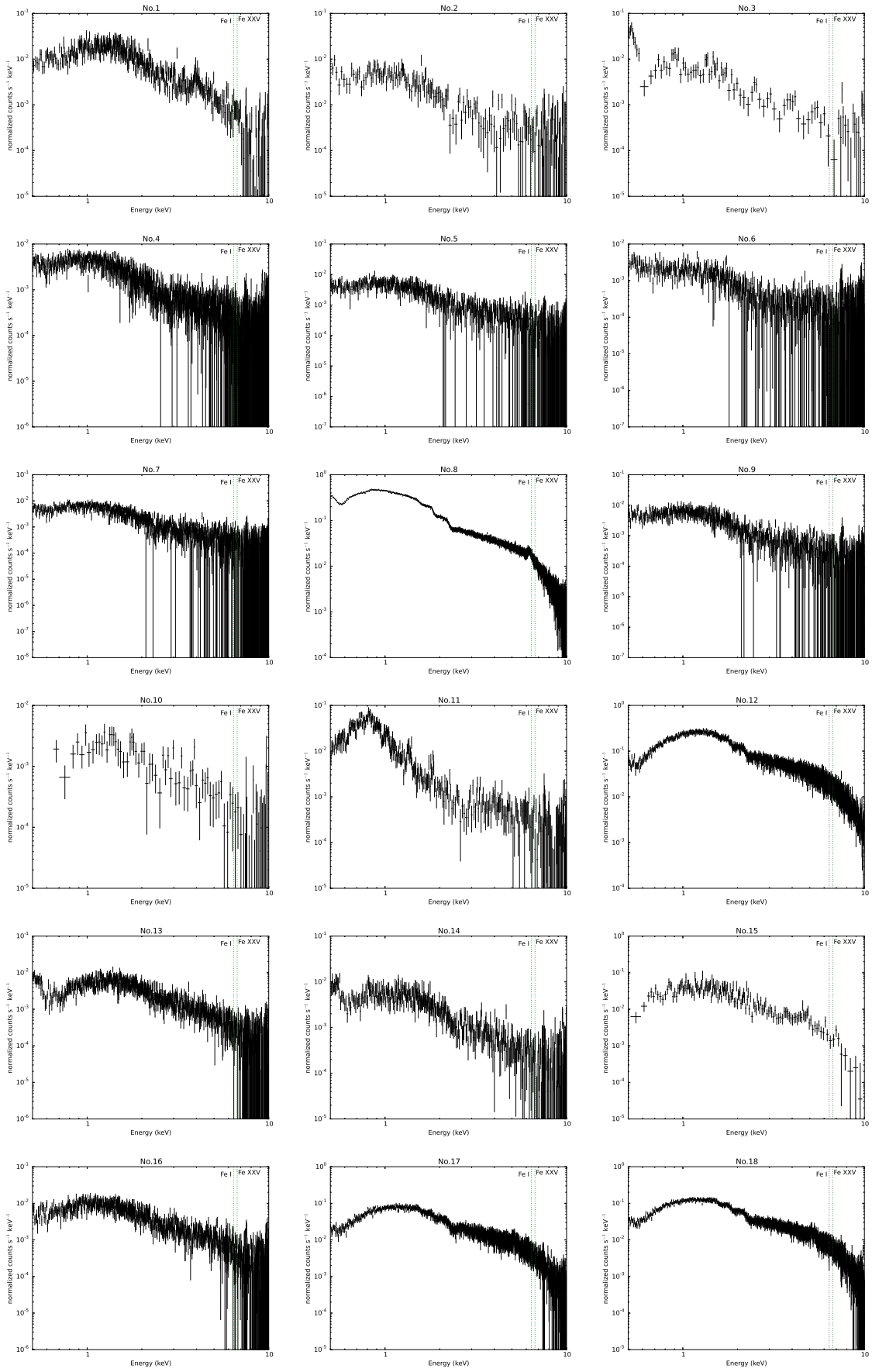

図 7.5: 同一天体にまとめた 3549 天体のスペクトル (一部)。期待される鉄輝線エネルギーのところに線を引いた。

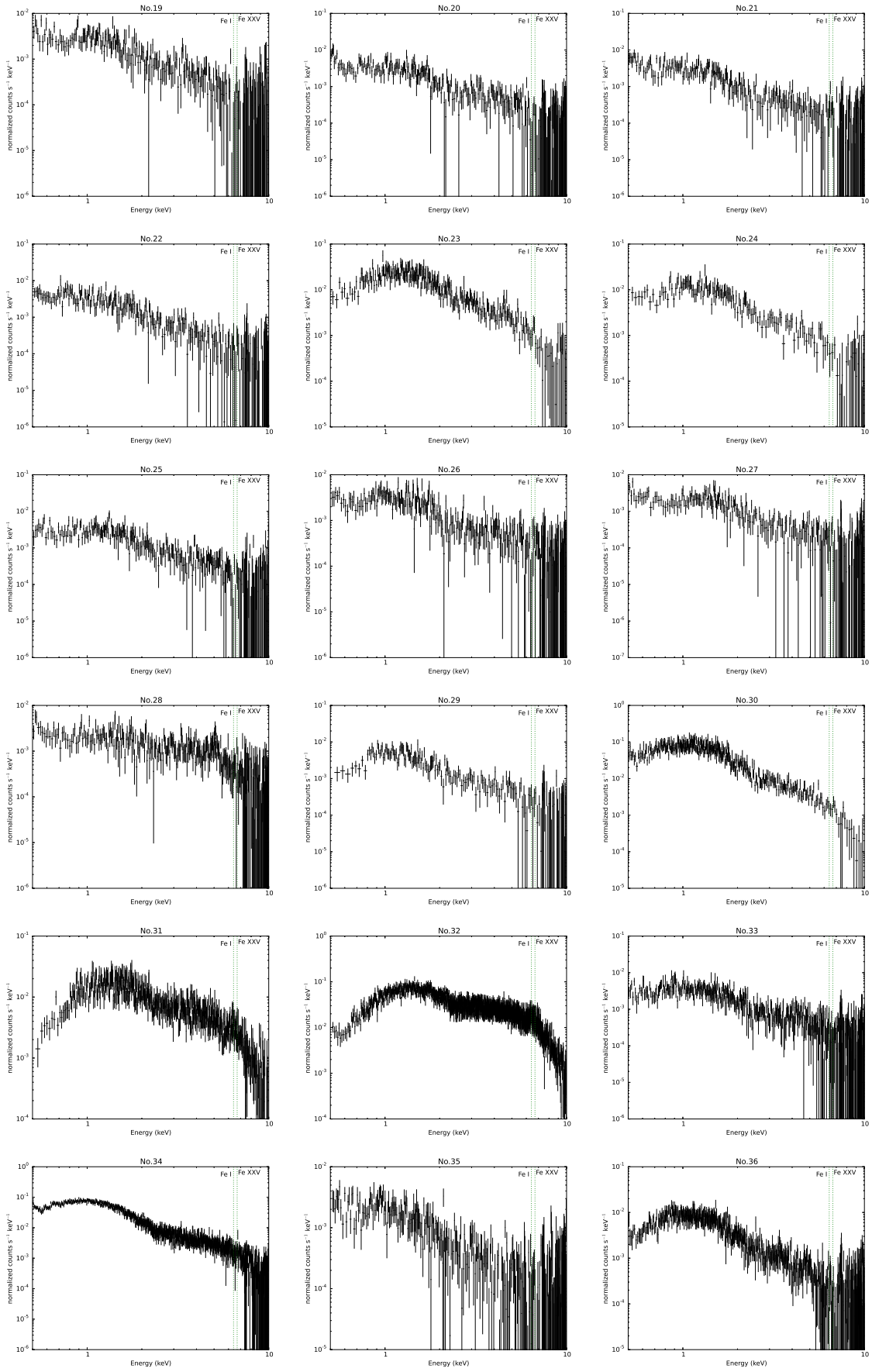

図 7.5: *continue.*

7.5 既知の X 線天体との対応

すざくによって検出された天体に対応する、他の X 線天文衛星 (XMM や Chandra など) で検出された天体を調べる。ここでは、すざく天体に対して、26 秒角以内にある天体を対応 X 線天体とする。まず、NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) を用いて、対応 X 線天体を調べた。その結果、すざくで検出された 3549 天体のうち、1903 天体については対応 X 線天体が見つかった。次に、SIMBAD を用いて、残りの 1646 天体の対応 X 線天体を調べると、対応 X 線天体が 68 天体に対して見つかった。

しかし、NED と SIMBAD には、2.1.7 節で述べた最新の Chandra Source Catalog は含まれているが [1]、2.1.8 節で述べた最新の 3XMM カタログと 2.1.9 節で述べた最新の 1SXPS カタログは含まれていない。そこでまず、まだ対応 X 線天体が見つかっていない 1578 天体について、3XMM カタログに対応 X 線天体があるかを調べた。その結果、292 天体について対応 X 線天体が見つかった。次に、残りの 1286 天体について、1SXPS カタログに対応 X 線天体があるかを調べると、130 天体に対して対応 X 線天体が見つかった。このうち、表 7.3 でコメントが付いていないものは、1156 天体である。これまでの対応 X 線天体を調べた過程を図 7.6 に示す。

対応 X 線天体について調べた結果は、表 7.2 に載せている。全体については、付録 C (電子版) に示す。NED で見つかったものについては表 7.2 の No. のコラムに印を付けておらず、SIMBAD、XMM カタログ、1SXPS カタログで見つかったものにはそれぞれ、k、l、m を付けている。対応 X 線天体がないものには、† を付けている。天体の分類は調べたデータベースの表記 [4] に対応している。XMM カタログ、1SXPS カタログのものについては、横棒を引いている。1 つのすざく天体について多数の対応 X 線天体がある場合には、その天体に対して距離の近いものから 3 つだけ載せている。

[1]なお、NED に含まれている X 線天体カタログは、NED Source Nomenclature[2] で Object Types を “xray” に設定することで調べた。また、SIMBAD については、Dictionary of Nomenclature of Celestial Objects [3] で Object class を “X” に設定することで調べた。

[4]NED の表記: https://ned.ipac.caltech.edu/help/faq5.html#5k、SIMBAD の表記: http://cds.u-strasbg.fr/cgi-bin/Otype?Unknown

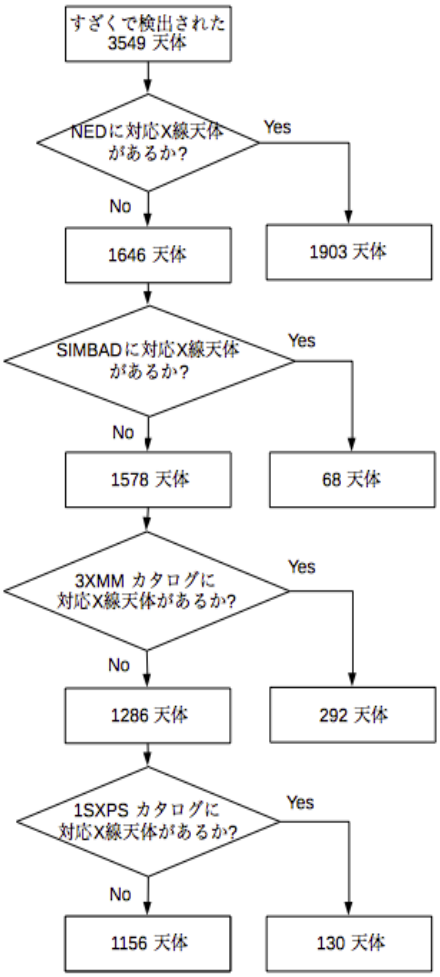

図 7.6: 対応 X 線天体を調べた過程。

第8章　考察

Contents

8.1　対応 X 線天体を持たない天体の興味深い時間変動について 94
8.1.1　バックグラウンドの変動だと考えられるもの 97
8.1.2　すざくの位置決定誤差により、新 X 線天体とみなされたもの 99
8.1.3　対応 X 線天体を持たず、興味深いライトカーブを示すもの 107

8.1　対応 X 線天体を持たない天体の興味深い時間変動について

7.5 節の対応 X 線天体を持たない 1156 天体のうち、KS テストの確率が 1×10^{-8} 以下であり、既知の天体と近接していない 47 天体の時間変動から、星のフレアなどの興味深いものがあるかどうか調べる。表 8.1 に 47 天体の位置やフラックスの情報を示す。また、この節の流れを図 8.1 に示す。

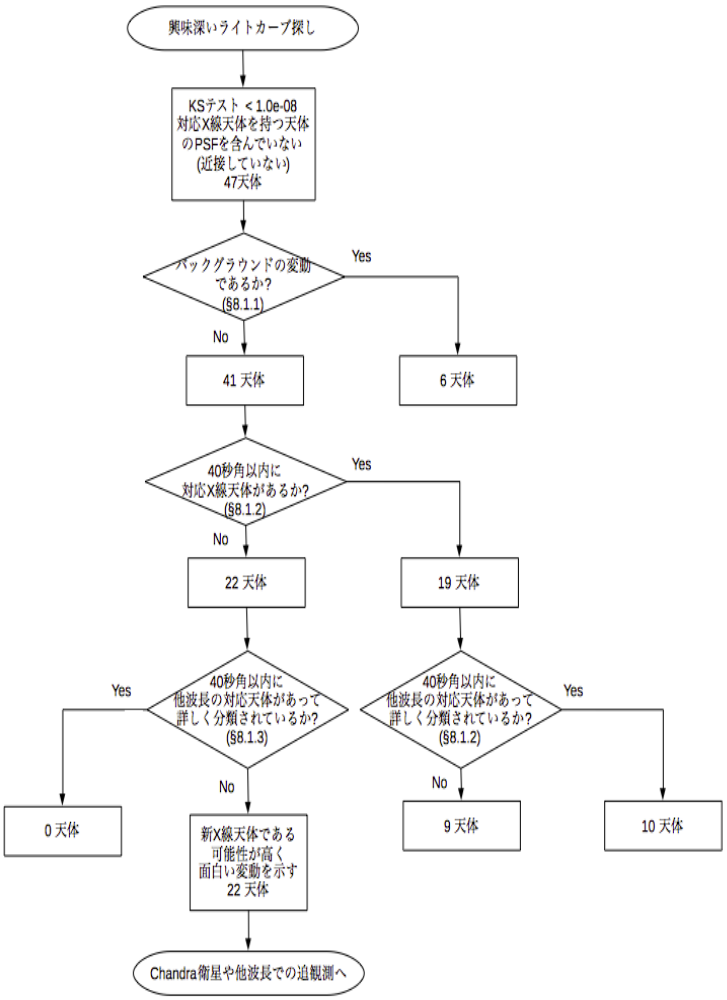

図 8.1: 興味深い時間変動を探す過程。

表 8.1: 対応 X 線天体を持たない変動の激しい 47 天体。

No.	Position (J2000) R.A. (deg)	Position (J2000) Decl. (deg)	Flux[a] all[f]/soft[f]/hard[f] (10^{-13} erg cm^{-2} s^{-1})	Significance all[f]/soft[f]/hard[f] (σ)	Hardness Ratio	F_{var}[b] all[f]/soft[f]/hard[f] (%)	F_{KS}[c] all[f]/soft[f]/hard[f]	Scale[d] all[f]/soft[f]/hard[f] (pixel)	N_{obs}[e]
61	10.5658	−9.9853	6.72/3.06/1.46	141/133/48	−0.75±0.00	−/−/−	0/0/4e−28	1.4/1.4/1.4	1
67	10.6057	−10.0616	1.49/0.49/0.84	46/39/26	−0.32±0.02	−/−/−	2e−18/3e−23/4e−05	1.4/1.4/2.0	1
319	28.6580	37.0056	2.66/1.07/1.02	38/31/17	−0.56±0.02	−/−/−	0/6e−39/1e−10	1.4/1.4/2.8	1
324	28.7205	36.9193	1.40/0.56/0.58	25/24/11	−0.53±0.04	−/−/−	2e−12/2e−16/3e−01	1.4/2.0/4.0	1
373	35.4471	61.9441	1.52/0.46/0.95	29/24/14	−0.24±0.04	−/−/−	0/5e−29/7e−20	1.4/2.0/2.8	1
374	35.5164	61.8937	0.0/0.19/0.0	0.0/13/0.0	−1.00±0.44	−/−/−	4e−13/3e−13/3e−03	−/4.0/−	1
386	37.0710	31.3131	436/122/321	1343/911/907	−0.12±0.00	−/−/−	0/0/0	1.4/1.4/1.4	1
501	48.6164	40.8167	4.44/1.46/2.69	29/20/14	−0.29±0.04	−/−/−	0/9e−32/5e−27	1.4/1.4/2.8	1
742	75.5881	13.8142	0.95/0.34/0.0	38/37/0.0	−1.00±0.15	25±11/13±6/−	2e−25/8e−17/7e−11	2.3/2.5/−	3
773	79.0405	−0.1476	545/193/280	1279/792/651	−0.40±0.00	−/−/−	0/0/0	1.4/1.4/1.4	1
834	83.5080	−63.9120	5.52/2.02/2.66	101/105/51	−0.43±0.01	−/−/−	0/2e−36/1e−14	2.0/2.0/2.0	1
836	83.5671	−63.9418	0.80/0.25/0.53	25/21/15	−0.24±0.04	−/−/−	1e−12/6e−05/9e−09	2.0/2.0/4.0	1
998	104.3455	−55.8182	3.72/1.42/1.61	77/76/37	−0.49±0.01	−/−/−	1e−10/3e−10/3e−02	1.4/1.4/1.4	1
1016	105.2935	−29.1133	2.18/0.0/3.25	48/0.0/49	1.00±0.03	−/−/−	3e−12/5e−04/3e−09	1.4/−/1.4	1
1017	105.3022	−29.0723	0.75/0.0/0.93	18/0.0/17	1.00±0.10	−/−/−	3e−12/2e−04/9e−09	2.8/−/2.8	1
1018	105.3552	−29.1249	0.0/0.24/0.0	0.0/16/0.0	−1.00±0.36	−/−/−	6e−14/5e−15/4e−05	−/4.0/−	1
1019	105.4252	−29.1572	0.61/0.22/0.0	13/13/0.0	−1.00±0.39	−/−/−	6e−11/8e−08/1e−04	2.0/2.0/−	1
1081	117.1123	−19.3833	1.28/0.60/0.0	18/23/0.0	−1.00±0.14	−/−/−	3e−06/9e−10/2e−01	1.4/1.4/−	1
1093	118.8182	21.9251	0.86/0.32/0.0	21/17/0.0	−1.00±0.27	−/−/−	3e−22/1e−22/5e−05	2.0/2.8/−	1
1125	125.9657	−42.8930	970/500/0.0	365/364/0.0	−1.00±0.00	−/−/−	2e−16/4e−15/7e−03	2.8/2.8/−	1
1158	128.8314	−43.5378	10.5/3.95/4.76	45/33/28	−0.47±0.02	−/−/−	0/7e−25/1e−32	1.4/1.4/2.0	1
1203	134.1585	78.3477	2.88/1.29/0.73	55/47/10	−0.71±0.02	−/−/−	0/0/1e−13	1.4/1.4/2.0	1
1204	134.6120	−47.4702	1.87/0.44/1.65	35/23/24	0.06±0.03	−/−/−	1e−12/3e−08/7e−09	1.4/1.4/1.4	1
1270	140.5032	−63.3815	5.53/1.56/4.13	47/39/32	−0.12±0.02	−/−/−	0/0/0	1.4/1.4/1.4	1
1554	168.7719	32.6076	0.0/0.0/0.25	0.0/0.0/10	1.00±0.35	−/−/−	3e−03/6e−10/2e−01	−/−/2.8	1
1592	174.8547	−65.3991	1167/422/582	1266/1440/978	−0.42±0.00	−/−/−	0/0/0	4.0/4.0/4.0	1
1730	184.7914	−63.1527	35.0/15.7/7.83	85/92/28	−0.74±0.01	−/−/−	4e−27/1e−16/4e−13	1.4/1.4/1.4	1
2119	206.8803	−60.6158	249/23.1/321	813/334/648	0.61±0.00	−/−/−	0/0/0	1.4/1.4/1.4	1
2267	222.5662	−24.4233	30.2/15.1/2.98	143/138/28	−0.89±0.00	−/−/−	4e−15/2e−13/3e−03	1.4/1.4/1.4	1
2324	226.6486	−41.3168	2.47/0.84/1.30	38/28/19	−0.37±0.03	−/−/−	8e−09/6e−03/7e−11	1.4/1.4/1.4	1
2325	226.6584	−41.4126	0.85/0.0/0.0	17/0.0/0.0	−	−/−/−	4e−13/6e−05/4e−18	1.4/−/−	1
2327	226.7390	−41.3266	1.17/0.39/0.0	19/18/0.0	−1.00±0.22	−/−/−	1e−09/2e−07/7e−20	2.8/2.8/−	1
2478	243.8850	59.2344	3.90/1.09/2.95	80/53/42	−0.11±0.01	−/−/−	0/0/0	1.4/2.0/1.4	1
2596	252.2932	−43.9219	15.7/7.56/2.62	92/96/25	−0.81±0.01	−/−/−	3e−08/3e−10/2e−01	1.4/1.4/1.4	1
2597	252.3522	−43.8174	53.9/0.46/81.8	191/17/251	0.96±0.00	−/−/−	0/8e−04/0	1.4/2.0/1.4	1
2801	266.1823	−27.2288	10.3/2.31/9.31	119/60/92	0.09±0.01	−/−/−	9e−16/3e−05/8e−12	1.4/1.4/1.4	1
2871	266.8628	−28.0969	1.41/0.20/1.45	30/18/24	0.37±0.03	−/−/−	7e−10/7e−08/2e−05	1.4/2.8/2.0	1
2985	272.5251	66.0283	0.63/0.25/0.30	26/28/8.5	−0.48±0.05	30±15/28±15/125±80	1e−13/1e−08/1e−09	2.1/2.1/4.0	2
2986	272.6316	66.0046	0.42/0.097/0.0	24/13/0.0	−1.00±0.63	9±6/140±71/−	9e−18/2e−14/9e−11	3.4/4.0/−	2
2988	272.8600	66.0912	0.24/0.0/0.0	8.0/0.0/0.0	−	−/−/−	5e−12/5e−13/2e−04	4.0/−/−	1
3011	275.6473	−15.6528	0.75/0.0/0.82	18/0.0/16	1.00±0.11	−/−/−	1e−13/1e−01/1e−17	4.0/−/4.0	1
3032	276.8810	−13.2947	2.58/1.01/1.06	48/51/22	−0.52±0.02	−/−/−	7e−38/1e−35/9e−08	1.4/1.4/4.0	1
3074	281.0386	−4.0904	1.96/0.0/2.59	52/0.0/51	1.00±0.03	−/−/−	0/6e−08/0	1.4/−/1.4	1
3192	299.9732	65.1500	3883/1387/2009	4016/3142/2341	−0.40±0.00	−/−/−	0/0/0	2.0/2.8/2.0	1
3252	311.2309	30.2647	0.32/0.0/0.0	7.1/0.0/0.0	−	−/−/−	2e−10/4e−12/2e−02	4.0/−/−	1

[a] 観測間でエラー重み付け平均をとったもの。
[b] 観測間の変動率。
[c] 各観測の中で一番変動しているものの KS テストの結果。この確率が小さいほど、大きく変動している。
[d] 平均したウェーブレットスケール。
[e] 観測数。
[f] エネルギーバンド。 all=0.5–10 keV、soft=0.5–2.0 keV、hard=2.0–10 keV。

表 8.1: 対応 X 線天体を持たない変動の激しい 47 天体。

No.	Position (J2000) R.A. (deg)	Decl. (deg)	Flux[a] all[f]/soft[f]/hard[f] (10^{-13} erg cm^{-2} s^{-1})	Significance all[f]/soft[f]/hard[f] (σ)	Hardness Ratio	F_{var}[b] all[f]/soft[f]/hard[f] (%)	F_{KS}[c] all[f]/soft[f]/hard[f]	Scale[d] all[f]/soft[f]/hard[f] (pixel)	N_{obs}[e]
3285	313.1413	55.2475	1.45/0.44/0.95	50/38/29	−0.22±0.02	4±3/＜0.5/16±9	9e−14/3e−13/8e−06	1.4/1.4/2.1	2
3310	314.0785	31.4207	0.067/0.008/4.39	4.5/1.4/58	0.99±0.01	69±17/148±37/30±8	4e−15/3e−15/1e−02	2.7/3.0/2.2	8

[a] 観測間でエラー重み付け平均をとったもの。
[b] 観測間の変動率。
[c] 各観測の中で一番変動しているものの KS テストの結果。この確率が小さいほど、大きく変動している。
[d] 平均したウェーブレットスケール。
[e] 観測数。
[f] エネルギーバンド。 all=0.5–10 keV、soft=0.5–2.0 keV、hard=2.0–10 keV。

8.1.1 バックグラウンドの変動だと考えられるもの

まず、47 天体のうち、No.2324、No.2325、No.2327、No.2985、No.2986、No.2988 の 6 天体について、以下の考察を行い、バックグラウンドの変動であると判断した。考察した 6 天体のライトカーブを図 8.2 に載せている。

No.2324

SN1006 という超新星残骸のバックグラウンドで検出された天体。60 ks あたりから減光しており、160 ks あたりに星のフレアのような変動が見える。同じ観測シークエンス内にある対応 X 線天体を持たない No.2325 と No.2327 に変動が類似している。No.2327 との距離が 4 分角でソース領域が重さなっているから、互いに影響していると考えられる。しかし、No.2325 とは 5.8 分角離れておりソース領域が重さならないので、No.2324 に影響しているとは考えにくい。ライトカーブはバックグラウンドを引いていないので、バックグラウンドの変動を見ている可能性がある。

No.2985

NEP 領域の観測から検出された天体。観測のはじめに、hard バンドで急激な増光が見えるが、No.2986 と No.2988 に変動が類似している。No.2986 とは 3 分角とソース領域が重さなっているから、互いに影響していると考えられる。しかし、No.2988 とは 9 分角離れているので、No.2985 に影響しているとは考えにくい。ライトカーブはバックグラウンドを引いていないので、バックグラウンドの変動を見ている可能性がある。

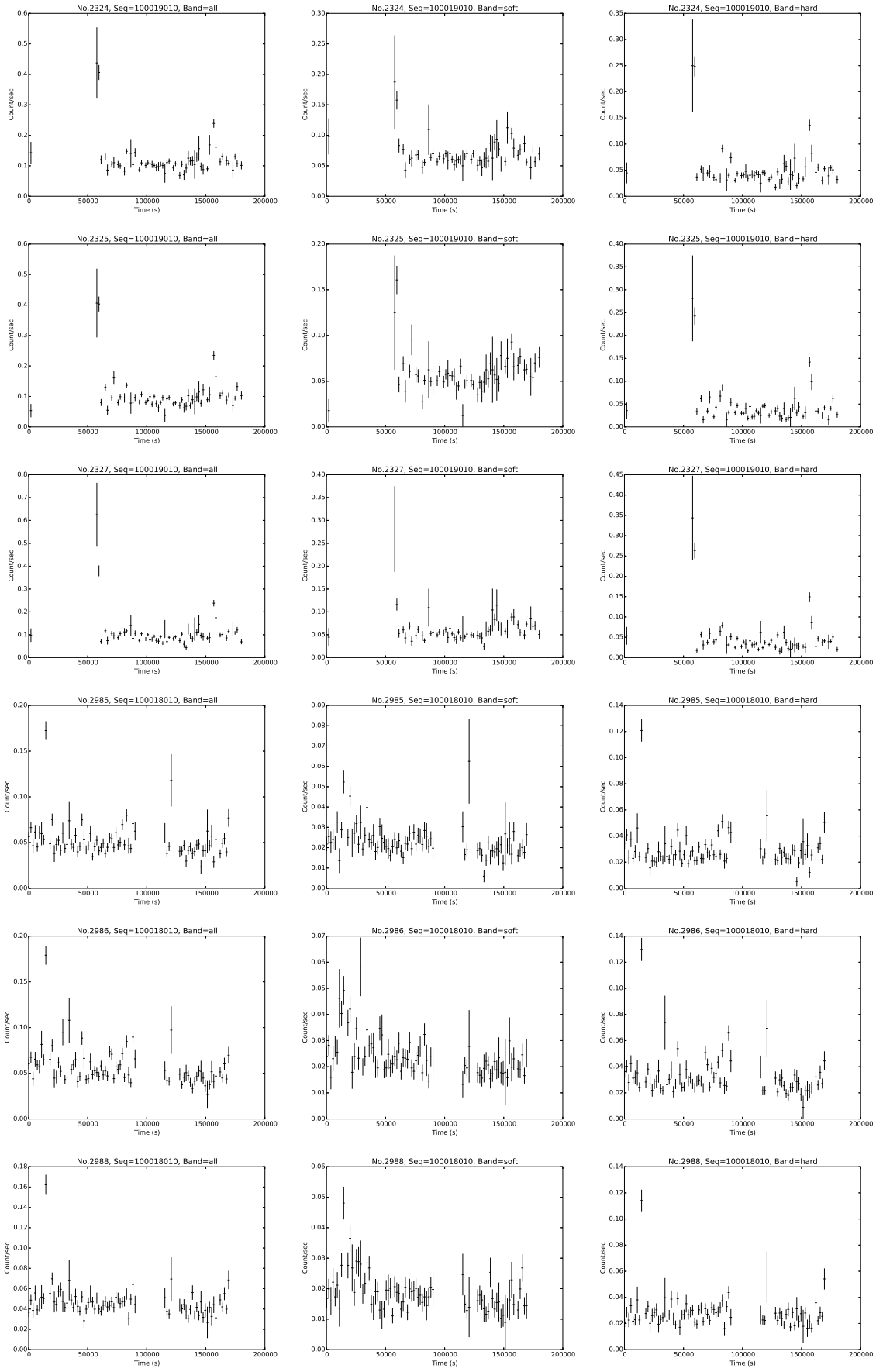

図 8.2: バックグラウンドの変動であると考えられる天体のライトカーブ。

8.1.2 すざくの位置決定誤差により、新 X 線天体とみなされたもの

7.1 節で求めた位置決定精度 26 秒角は 90%の誤差であり、残りの 10%に対応 X 線天体が存在する可能性がある。そこで、位置決定誤差を見直し、経験的におおよそ 100%となる 40 秒角以内の対応 X 線天体を、8.1.1 節の 6 天体を除いた 41 天体に対して調べた。調べた結果を表 8.2 にまとめ、以下で考察した。

No.386

すざくの 観測目的天体でセイファート 1 型銀河 NGC 0931 である。すでに Einstein 衛星などで検出されている。

No.773

すざくの観測目的天体でセイファート 1 型銀河 Mrk 1095 である。すでに ROSAT 衛星によって検出されている。

No.834

125 ks あたりにすべてのバンドでフレアが見える。31.6 秒角離れた位置に ROSAT 衛星で検出されているが、同定されていない X 線天体がある。

No.998

120 ks あたりに soft バンドでフレアが見える。34.1 秒角離れた位置に ROSAT 衛星で検出されているが、同定されていない X 線天体がある。

No.1016

観測のはじめに all バンドでフレアが見える。29.4 秒角離れた位置に Swift 衛星で検出された天体がある。

No.1017

hard バンドで、90 ks あたりにフレアが見える。29.4 秒角離れた位置に Swift 衛星で検出された天体がある。

No.1018

30 ks あたりに、すべてのバンドでフレアが見える。40.0 秒角離れた位置に Swift 衛星で検出された天体がある。

No.1204

hard バンドで 50 ks あたりにフレアが見える。31.8 秒離れた位置に Chandra 衛星で検出された天体があり、原始星に分類されている。

No.1270

55 ks あたりにすべてのバンドでフレアが見られる。39.7 秒角離れた位置に XMM 衛星で検出された天体がある。

No.1592

すざくの観測目的天体で、食連星* 12 Mus である。すでに Einstein 衛星などで検出されている。

No.2119

すざくの観測目的天体で、すでに Uhuru 衛星などで検出されているセイファート 1 型銀河 2MASS J13473599−6037037 である。

No.2267

すざくの観測目的天体で、すでに ROSAT 衛星で検出されている接触連星 HD 130693 である。

No.2596

すざくの観測目的天体で、すでに ROSAT 衛星で検出されている Rotationally variable Star の HD 326277 である。

No.2597

すざくの観測目的天体で、すでに Swift 衛星で検出されている高質量 X 線連星 2MASS J16492695−4349090 である。

No.2801

すざくの観測目的天体で、すでに ROSAT 衛星で検出されている Be 型星 HD 161103 である。

No.3032

15 ks あたりに、すべてのバンドでフレアが見える。28.9 秒角離れた位置に ROSAT 衛星で検出された星があるが、詳しい分類は分かっていない。

No.3074

hard バンドでフレアが見られる。26.6 秒角と 27.2 秒角離れた位置にそれぞれに Chandra 衛星で検出されているが、同定されていない天体がある。

No.3192

SWIFT J2000.0+6509 が 33.1 秒角にあるが、時間変動を見てすざくの観測目的天体である可能性が高く、すでに Einstein 衛星で検出されている BL Lac 天体の QSO B1959+650 である。

No.3285

130 ks あたりに soft バンドでフレアが見える。28.4 秒角離れた位置に Chandra 衛星で検出された天体があるが、同定されていない。

上記の考察より、すざくの観測目的天体が 9 天体あった。すでに原始星に分類されているものが 1 天体あった。これら 10 天体のライトカーブを図 8.3 に示す。また、10 天体とは別に、興味深い時間変動を示す 9 天体のライトカーブを図 8.4 に示す。これらは、星のスペクトル型など詳しい分類がされていない。

表 8.2: すざくの位置決定誤差により、新 X 線天体とみなされたもの。

No.	Counterpart Name[a]	Position (J2000) R.A. (deg)	Position (J2000) Decl. (deg)	Type[b]	Distance[c] (arcsec)	Spectral type[d]	Note[e]
386	NGC 0931	37.0603	31.3116	G	33.3	–	A
773	Mrk 1095	79.0475	−0.1499	Seyfert_1	26.3	–	B
834	RX J0533.9−6355	83.4995	−63.9200	X	31.6	–	B
998	1RXS J065723.9−554938	104.3495	−55.8273	X	34.1	–	B
1016	1SXPS J070109.2−290623	105.2885	−29.1064	–	29.4	–	C
1017	1SXPS J070111.4−290355	105.2978	−29.0653	–	28.8	–	C
1018	1SXPS J070123.9−290653	105.3498	−29.1148	–	40.0	–	C
1204	2MASS J08582985−4728230	134.6243	−47.4730	Candidate_YSO	31.8	–	B
1270	2XMM J092156.1−632318	140.4840	−63.3884	XrayS	39.7	–	A
1592	* 12 Mus	174.8733	−65.3977	EB*	28.3	G2III+	B
2119	2MASS J13473599−6037037	206.9000	−60.6177	Seyfert_1	35.4	–	B
	2XMM J134728.5–603728	206.86878	–60.62471	XrayS	38.2	–	A
2267	HD 130693	222.5773	−24.4277	EB*WUMa	39.6	G8IV	B
2596	HD 326277	252.3053	−43.9244	RotV*	32.9	K0IV	B
2597	2MASS J16492695−4349090	252.3622	−43.8191	HMXB	27.0	B0.5Ib	B
2801	HD 161103	266.1907	−27.2290	Be*	27.3	B0.5III/IVe	B
3032	BD−13 4986	276.8892	−13.2938	Star	28.9	–	B
3074	2MASS J18441095−0405170	281.0456	−4.0880	IR	26.8	–	B
	CXOGPE J184407.6−040514	281.03166	−4.0872	X	27.2	–	B
3192	SWIFT J2000.0+6509	299.9950	65.1508	*	33.1	–	A
	QSO B1959+650	299.9993	65.1485	BLL	39.9	–	B
3285	CXO J205230.9+551437	313.1291	55.2437	VisS	28.4	–	A

[a] 対応 X 線天体名。

[b] 対応 X 線天体の分類。

[c] 対応 X 線天体との距離。

[d] スペクトル型。

[e] A:NED から調べたもの。B:SIMBAD から調べたもの。C:1SXPS カタログから調べたもの。

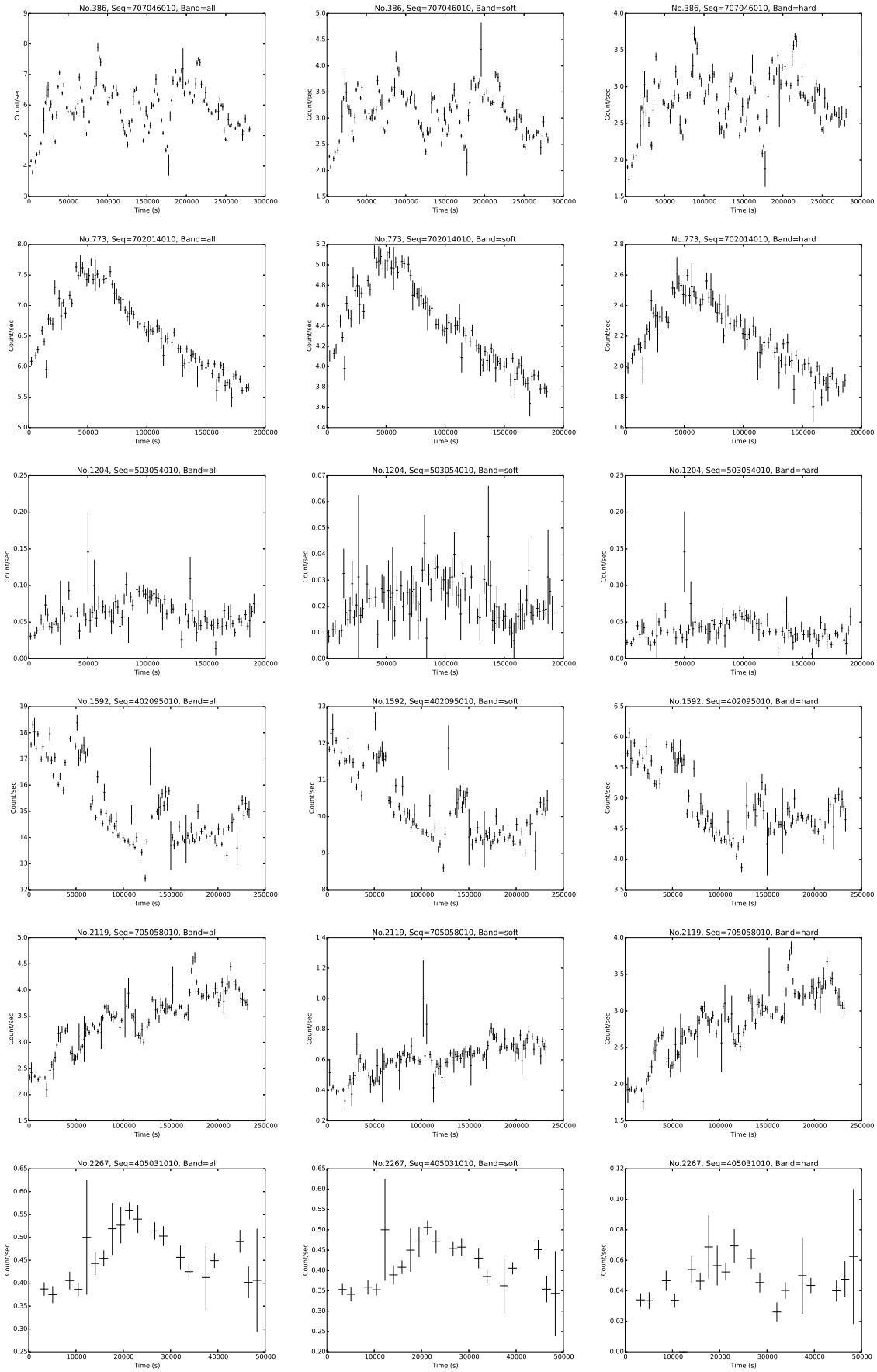

図 8.3: すざくの観測目的天体とすでに分類されている天体のライトカーブ。

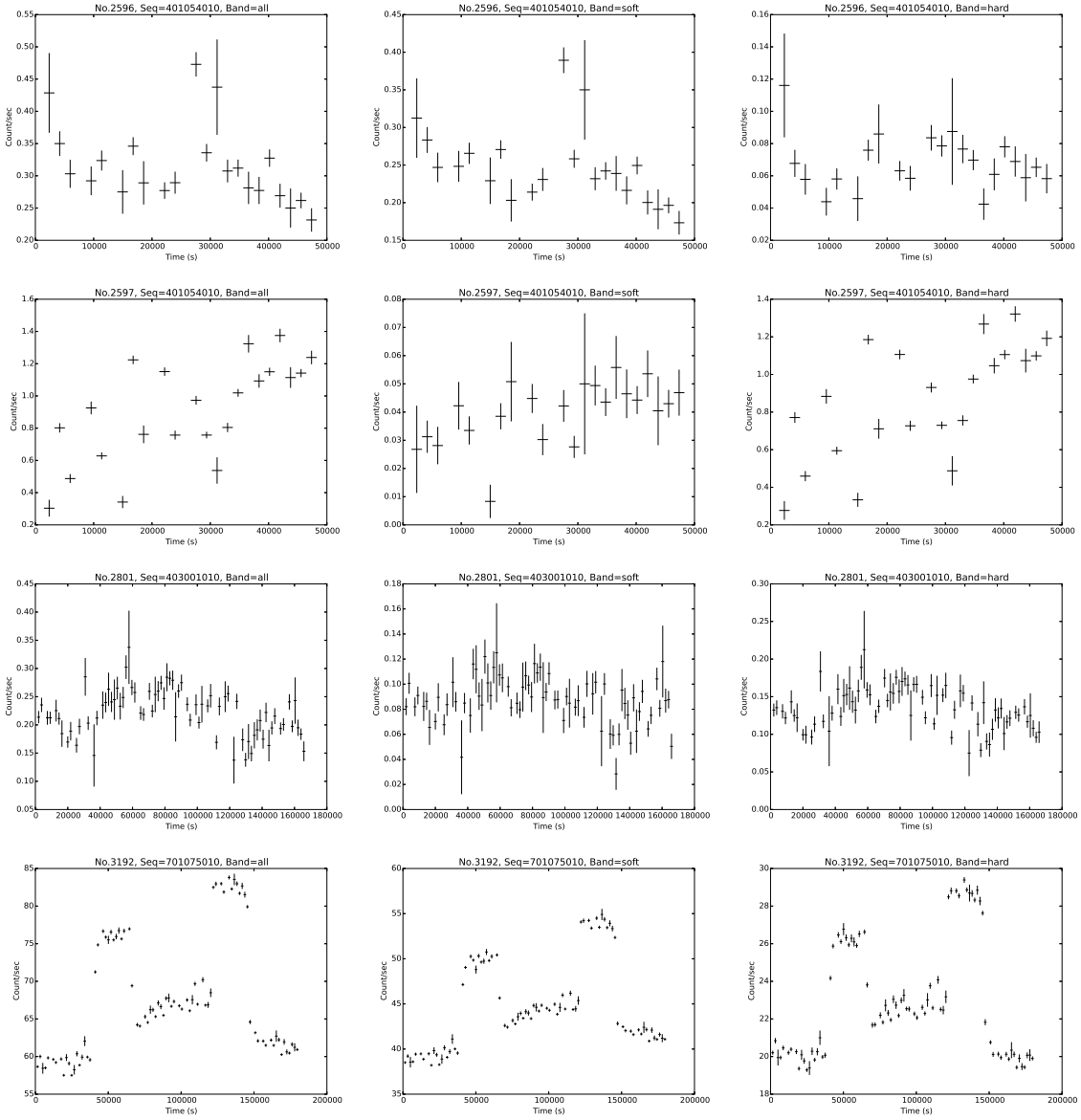

図 8.3: *continue.*

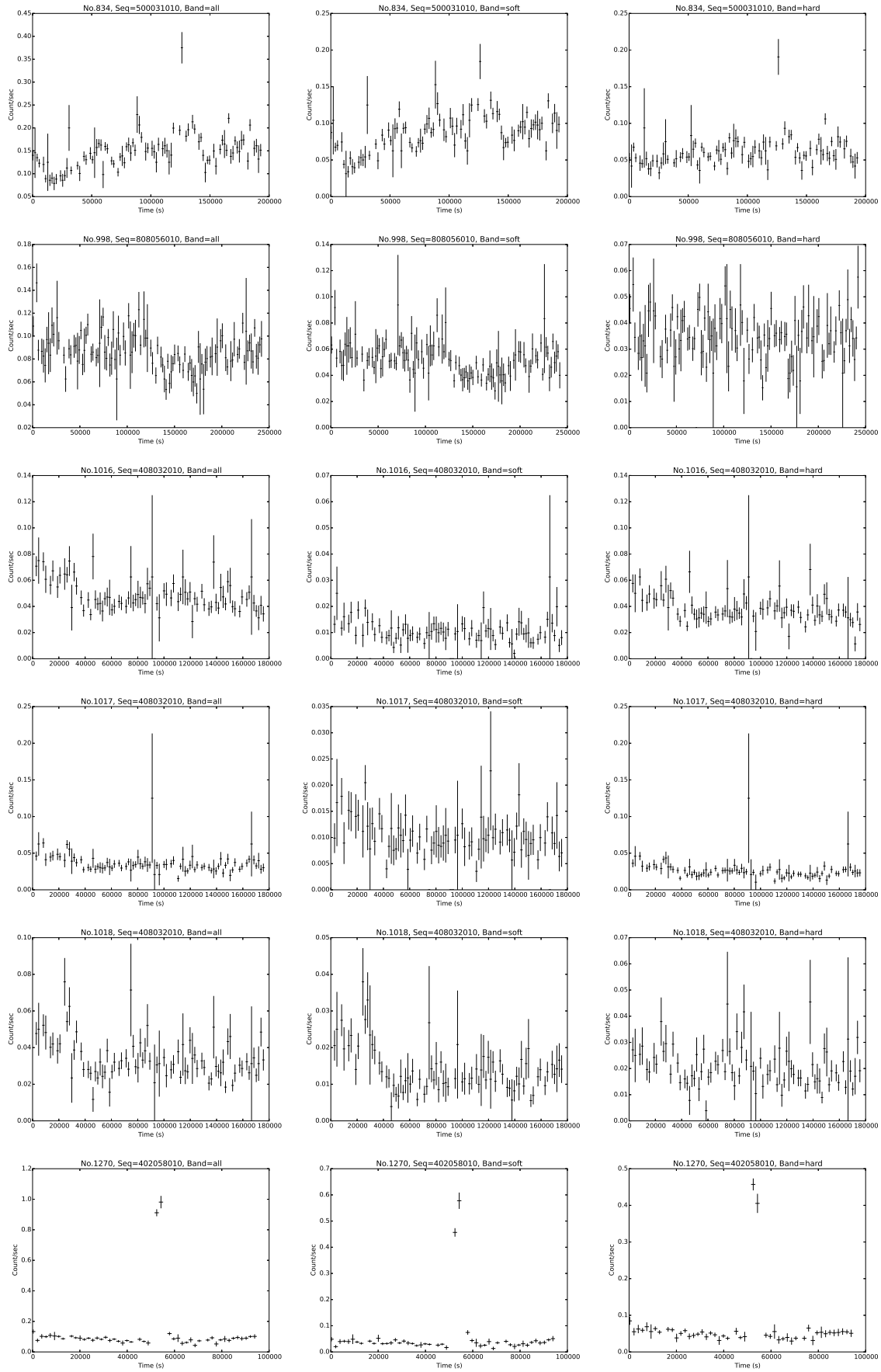

図 8.4: すざくの観測目的天体でなく、詳しい分類もされていない興味深い天体のライトカーブ。

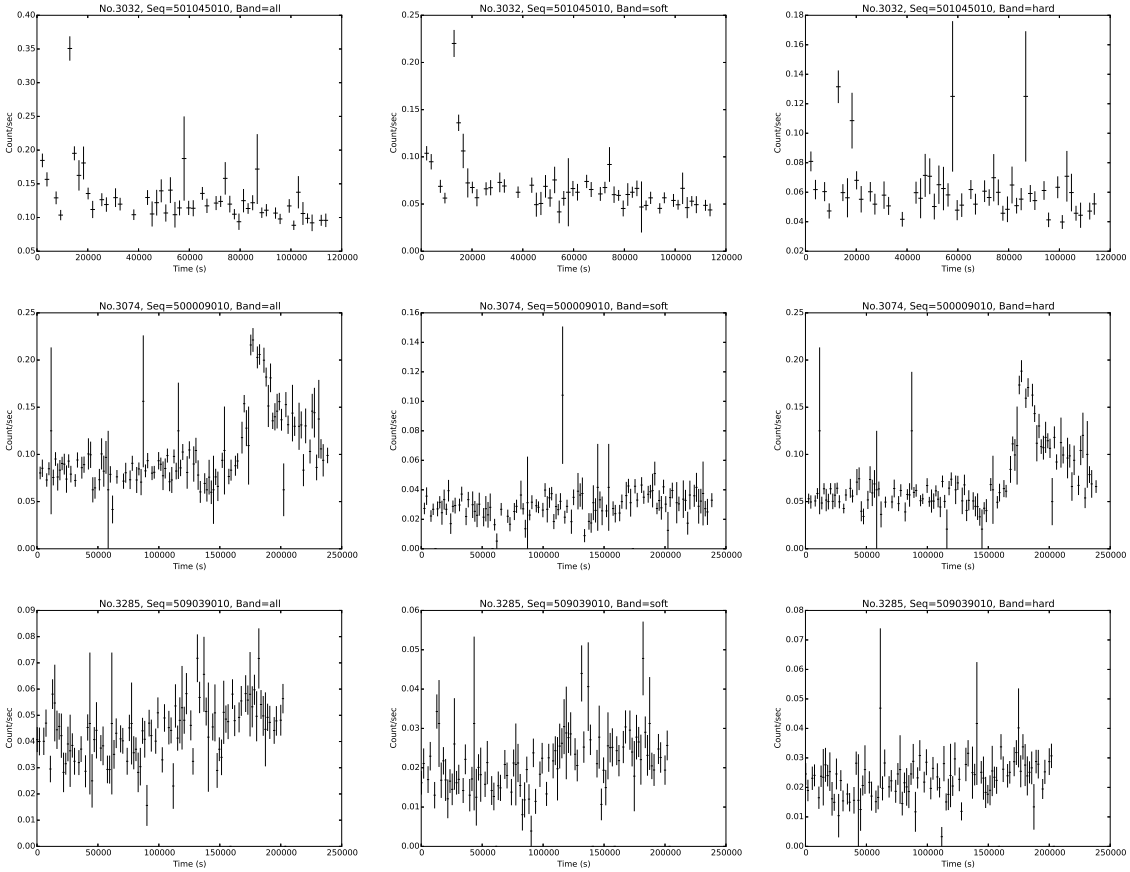

図 8.4: *continue.*

8.1.3 対応 X 線天体を持たず、興味深いライトカーブを示すもの

最後に、対応 X 線天体を持たない 22 天体について、40 秒角以内にある他波長の天体との対応を NED と SIMBAD から調べた。また、興味深い時間変動を示しているかを考察した。図 8.5 に 22 天体のライトカーブを示す。

No.61

すべてのバンドでフレアが 3 回見える。40 秒角以内に SDSS (Sloan Digital Sky Survey) で検出された銀河と銀河団が 6 天体、星が 5 天体ある。銀河と銀河団は短時間変動を示さないことが知られているので、銀河と銀河団と対応している可能性は低い。また、星のスペクトル型は分かっていない。

No.67

すべてのバンドでフレアが数回見える。40 秒角以内に SDSS などで検出された銀河と銀河団が 10 天体、星が 3 天体、GALEX (Galaxy Evolution Explorer) 衛星で検出された紫外線天体が 1 天体ある。銀河、銀河団は短時間変動示さないことが知られているので、銀河、銀河団と対応している可能性は低い。星のスペクトル型は分かっていない。

No.319

すべてのバンドでフレアが見える。8.4 秒角離れた位置に GALEX 衛星 (Galaxy Evolution Explorer) で検出された紫外線天体がある。

No.324

観測のはじめにフレアが見える。11.4 秒角離れた位置に UGC 01385 という銀河がある。38.1 秒角離れた位置に GALEX 衛星で検出された紫外線天体がある。銀河は短時間変動を示さないことが知られているので、銀河と対応している可能性は低い。

No.373

10 ks に hard バンドでフレアが見える。また、25 ks にすべてのバンドでフレアが見える。対応天体は見つかっていない。

No.374

20 ks あたりに hard バンドでフレアが見える。また、60 ks あたりに soft バンドでフレアが見える。対応天体は見つかっていない。

No.501

16 ks あたりからすべてのバンドでフレアが見える。対応天体は見つかっていない。

No.742

観測のはじめにフレアが見える。対応天体は見つかってない。

No.836

125 ks あたりに、すべてのバンドでフレアが見える。ただし、8.1.2 節で考察した No.834 と変動が類似している。これは、No.834 との距離が 2.4 分角と近いので、ソース領域が重なっていることによる可能性がある。しかし、No.834 と No.836 ともに未同定天体なので、興味深い。40 秒角以内に GALEX 衛星で検出された紫外線天体が 4 天体ある。

No.1019

30 ks あたりに、星のフレアのような変動が見えるが、No.1018 の変動と類似している。これは、No.1018 との距離が 4 分角なので、ソース領域が重なっていることによる可能性がある。しかし、No.1018 と No.1019 ともに未同定天体なので、興味深い。対応天体は見つかっていない。

No.1081

10 ks あたりにすべてのバンドでフレアが見える。対応天体は見つかっていない。

No.1093

40 ks あたりにすべてのバンドでフレアが見える。40 秒角以内に SDSS で検出された銀河が 2 天体、星が 6 天体ある。銀河は短時間の時間変動を示さないので、銀河と対応している可能性は低い。星のスペクトル型は分かっていない。

No.1125

6 ks あたりで soft バンドでフレアが見え、その後すぐに hard バンドでもフレアが見える。また、22 ks ではディップが見える。連星による掩蔽が起きており、フレアも起こしている可能性がある。対応天体は見つかっていない。

No.1158

14 ks あたりにすべてのバンドでフレアが見える。対応天体は見つかっていない。

No.1203

観測の始めに、フレアが見える。対応天体は見つかっていない。

No.1554

soft バンドでフレアが数回見える。40 秒角以内に SDSS で検出された銀河が 5 天体、星が 2 天体ある。銀河は短時間の時間変動を示さないので、銀河と対応している可能性は低い。また、GALEX 衛星で検出された紫外線天体が 1 天体ある。

No.1730

25 ks あたりにフレアが見える。対応天体は見つかっていない。

No.2478

45 ks あたりにフレアが見える。40 秒角以内に SDSS で検出された銀河が 4 天体、星が 3 天体ある。銀河は短時間変動を示さないことが知られているので、銀河である可能性は低い。

No.2871

120 ks あたりにすべてのバンドでフレアが見える。対応天体は見つかっていない。

No.3011

18 ks あたりに、hard バンドでフレアが見える。対応天体は見つかっていない。

No.3252

60 ks ですべてのバンドでフレアのような変動が見える。対応天体は見つかっていない。

No.3310 シークエンス番号 105007010 では、16 ks あたりに 1 ビン急激に減光している。連星によるディップである可能性がある。シークエンス番号 109004010 の hard バンドの変動が見えないが、連星の掩蔽の周期内に観測がされていない可能性がある。対応天体は見つかっていない。

上記のすべての天体でフレアが起こっており、星のスペクトル型の詳細も分かっていないので、非常に興味深い天体である。詳しい星のスペクトル型が分かっていないが、対応天体を持つものは 8 天体ある。対応天体を持たないものは、14 天体ある。これら新 X 線天体である可能性が高い 22 天体について、今後、角分解能がよい Chandra 衛星や他の波長での追観測を行い、天体の性質を詳しく調べる。

表 8.3: 他波長の天体と対応している可能性があるもの。

No.	Counterpart Name[a]	Position (J2000) R.A. (deg)	Position (J2000) Decl. (deg)	Type[b]	Distance[c] (arcsec)	Spectral type[d]	Note[e]
61	SDSS J004216.66−095918.2	10.5694	−9.9884	*	16.9	–	A
	SDSS J004214.80–095915.7	10.5617	−9.9877	G	17.0	–	A
	SDSS J004214.30–095914.3	10.5596	–9.9873	*	23.3	–	A
	SDSS J004217.56–095916.2	10.5732	–9.9878	G	27.5	–	A
	2MASS J00421775−0959037	10.5740	−9.9844	Star	29.0	–	B
	SDSS J004217.76–095903.8	10.5740	–9.9844	*	29.2	–	A
	SDSS J004214.90–095937.3	10.5621	–9.9937	G	32.9	–	A
	SDSS J004215.24–095832.1	10.5635	–9.9756	G	36.0	–	A
	[DFL98] J004218.31–095902.14	10.5763	–9.9839	**	37.4	–	A
	[SDG98] 1−2390	10.5766	−9.9839	GinCl	38.6	–	B
	SDSS J004213.51–095846.2	10.5563	–9.9795	G	39.8	–	A
67	SDSS J004225.40–100339.1	10.6059	–10.0609	G	2.8	–	A
	SDSS J004225.55–100346.5	10.6065	–10.0629	*	5.5	–	A
	SDSS J004226.01–100334.7	10.6084	–10.0597	G	11.9	–	A
	SDSS J004225.88–100356.0	10.6078	–10.0656	G	16.2	–	A
	SDSS J004226.94–100328.0	10.6123	–10.0578	G	27.1	–	A
	2MASX J00422732−1003392	10.6138	−10.0609	GinCl	29.1	–	B
	SDSS J004223.68–100323.4	10.5987	–10.0565	G	30.8	–	A
	GALEXASC J004227.52–100342.2	10.6147	–10.0617	UvS	32.0	–	A
	SDSS J004226.23–100311.1	10.6093	–10.0531	G	33.3	–	A
	SDSS J004227.53–100330.1	10.6147	–10.0584	G	34.1	–	A
	SDSS J004223.49–100402.7	10.5979	–10.0674	*	34.6	–	A
	SDSS J004227.61–100352.3	10.6151	–10.0645	*	34.9	–	A
	SDSS J004226.73–100412.4	10.6114	–10.0701	G	36.7	–	A
319	GALEXASC J015438.56+370016.7	28.6607	37.0046	UvS	8.4	–	A
324	UGC 01385	28.7241	36.9179	G	11.4	–	A
	GALEXASC J015450.87+365440.4	28.7120	36.9112	UvS	38.1	–	A

[a] 対応 X 線天体名。

[b] 対応 X 線天体の分類。

[c] 対応 X 線天体との距離。

[d] スペクトル型。

[e] A:NED から調べたもの。B:SIMBAD から調べたもの。

表 8.3: 他波長の天体と対応している可能性があるもの。

No.	Counterpart Name[a]	Position (J2000) R.A. (deg)	Position (J2000) Decl. (deg)	Type[b]	Distance[c] (arcsec)	Spectral type[d]	Note[e]
373	–	–	–	–	–	–	–
374	–	–	–	–	–	–	–
501	–	–	–	–	–	–	–
742	–	–	–	–	–	–	–
836	GALEXMSC J053415.48−635614.2	83.5645	−63.9372	UvS	16.6	–	A
	GALEXASC J053419.50−635645.1	83.5813	−63.9459	UvS	26.9	–	A
	GALEXASC J053413.57−635607.6	83.5565	−63.9355	UvS	28.1	–	A
	GALEXMSC J053411.68−635637.3	83.5487	−63.9437	UvS	39.9	–	A
1019	–	–	–	–	–	–	–
1081	–	–	–	–	–	–	–
1093	SDSS J075516.54+215527.6	118.8189	21.9243	*	3.6	–	A
	SDSS J075517.47+215531.4	118.8228	21.9254	*	15.5	–	A
	SDSS J075517.87+215539.4	118.8244	21.9276	*	22.9	–	A
	SDSS J075515.64+215552.0	118.8151	21.9311	*	23.9	–	A
	SDSS J075515.71+215505.4	118.8155	21.9182	*	26.4	–	A
	SDSS J075513.83+215537.5	118.8076	21.9271	G	35.9	–	A
	SDSS J075515.84+215608.2	118.8160	21.9356	*	38.7	–	A
	SDSS J075514.48+215558.9	118.8103	21.9331	G	38.9	–	A
1125	–	–	–	–	–	–	–
1158	–	–	–	–	–	–	–
1203	–	–	–	–	–	–	–
1554	SDSS J111504.53+323623.4	168.7688	32.6065	G	10.0	–	A
	SDSS J111505.09+323641.0	168.7712	32.6114	G	13.7	–	A
	GALEXASC J111503.06+323626.3	168.7627	32.6073	UvS	27.8	–	A
	SDSS J111504.13+323602.8	168.7672	32.6008	G	28.4	–	A
	SDSS J111504.62+323559.4	168.7693	32.5999	G	29.1	–	A
	SDSS J111505.79+323551.7	168.7741	32.5977	*	36.2	–	A
	SDSS J111502.83+323648.5	168.7618	32.6135	G	37.3	–	A

[a] 対応 X 線天体名。

[b] 対応 X 線天体の分類。

[c] 対応 X 線天体との距離。

[d] スペクトル型。

[e] A:NED から調べたもの。B:SIMBAD から調べたもの。

表 8.3: 他波長の天体と対応している可能性があるもの。

No.	Counterpart Name[a]	Position (J2000)		Type[b]	Distance[c]	Spectral type[d]	Note[e]
		R.A. (deg)	Decl. (deg)		(arcsec)		
	SDSS J111504.37+323705.3	168.7682	32.6181	*	39.5	–	A
1730	–	–	–	–	–	–	–
2478	SDSS J161530.48+591408.2	243.8770	59.2356	G	12.4	–	A
	SDSS J161532.11+591348.7	243.8838	59.2302	G	15.4	–	A
	SDSS J161529.31+591356.5	243.8721	59.2324	G	24.8	–	A
	SDSS J161528.92+591401.1	243.8705	59.2334	*	26.9	–	A
	SDSS J161533.79+591433.7	243.8908	59.2427	G	31.6	–	A
	SDSS J161529.17+591423.7	243.8716	59.2399	*	31.7	–	A
	SDSS J161536.20+591428.1	243.9008	59.2412	*	37.9	–	A
2871	–	–	–	–	–	–	–
3011	–	–	–	–	–	–	–
3252	–	–	–	–	–	–	–
3310	–	–	–	–	–	–	–

[a] 対応 X 線天体名。

[b] 対応 X 線天体の分類。

[c] 対応 X 線天体との距離。

[d] スペクトル型。

[e] A:NED から調べたもの。B:SIMBAD から調べたもの。

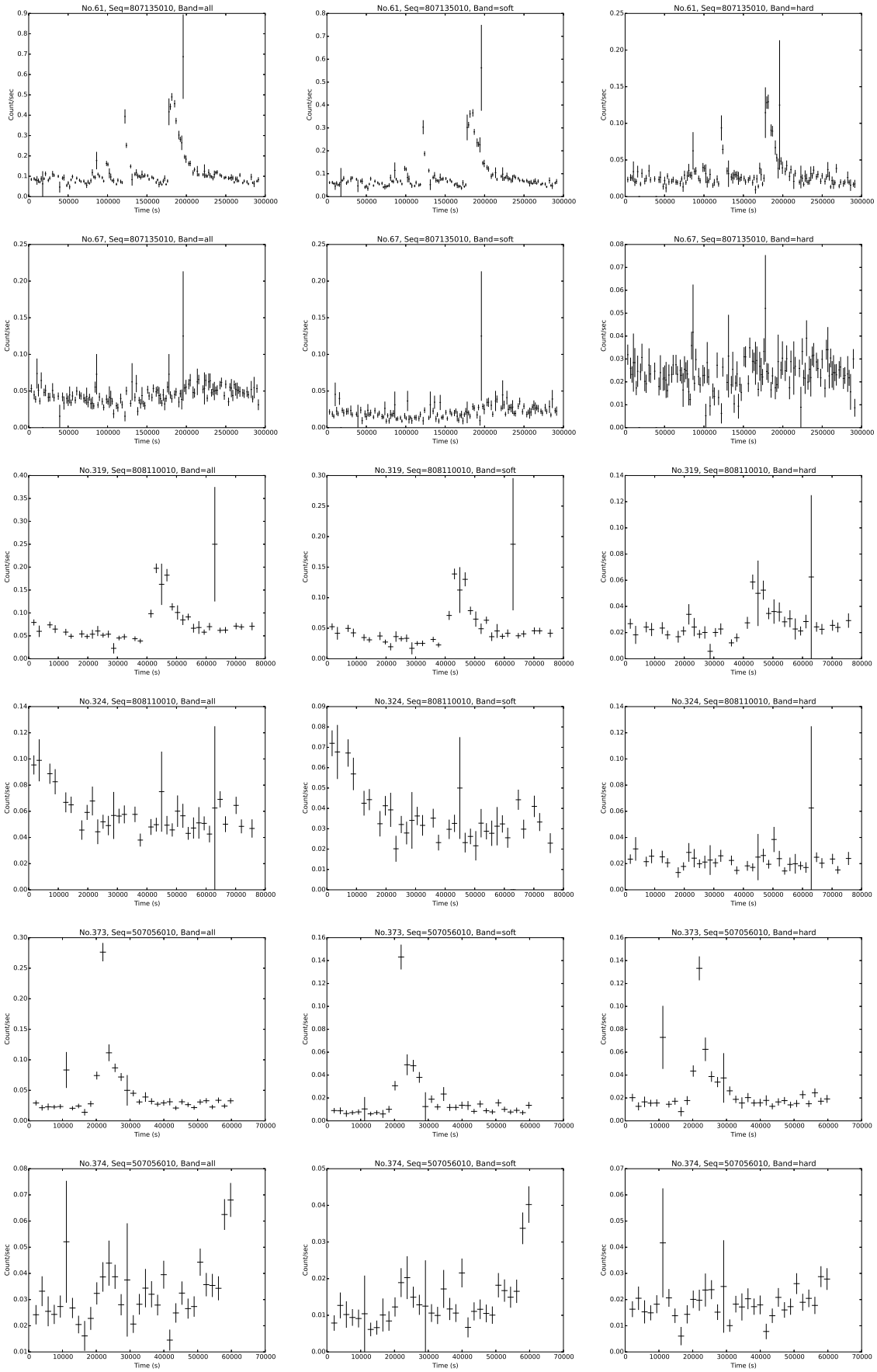

図 8.5: 興味深い変動を示す天体のライトカーブ。

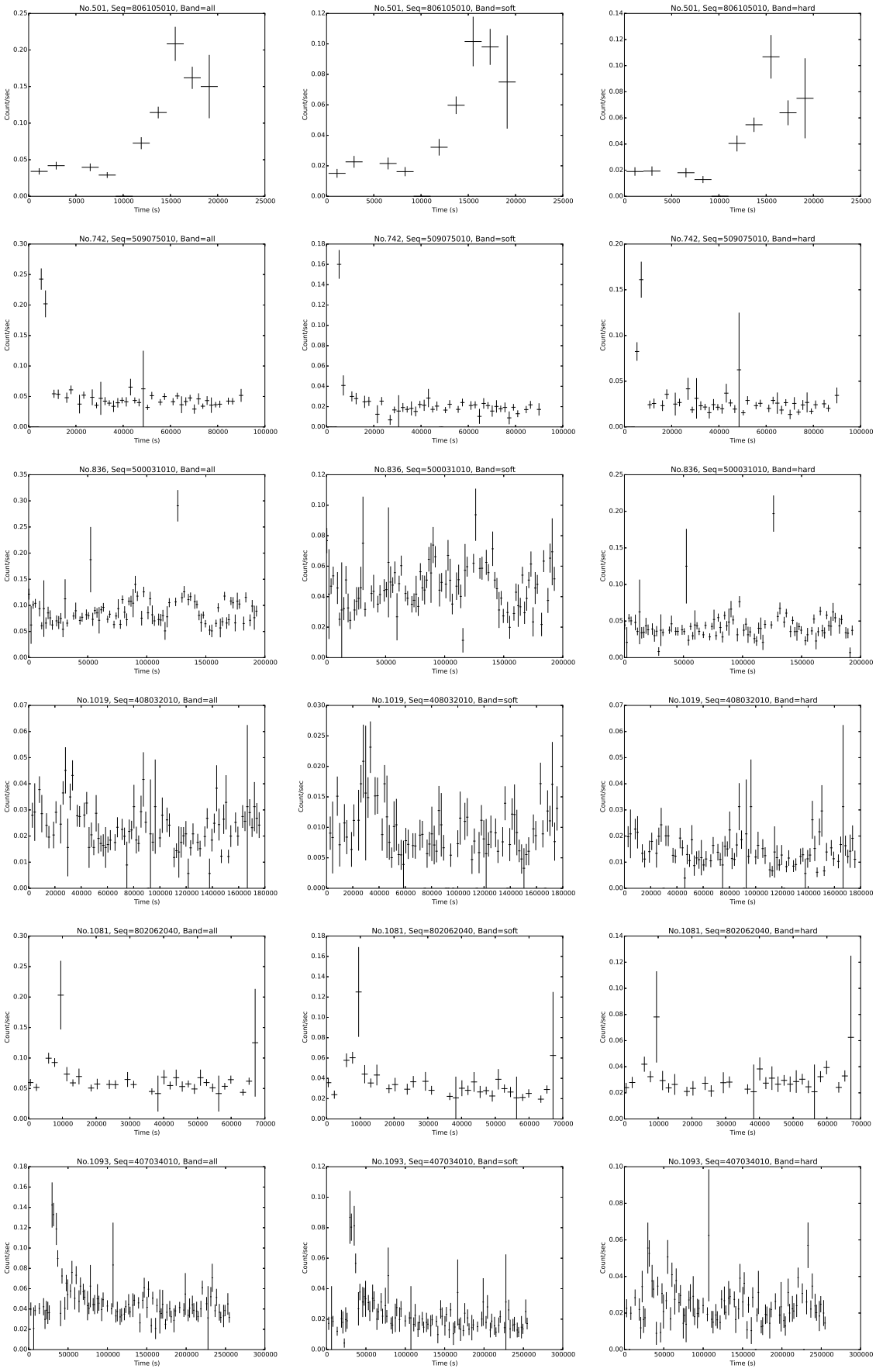

図 8.5: *continue.*

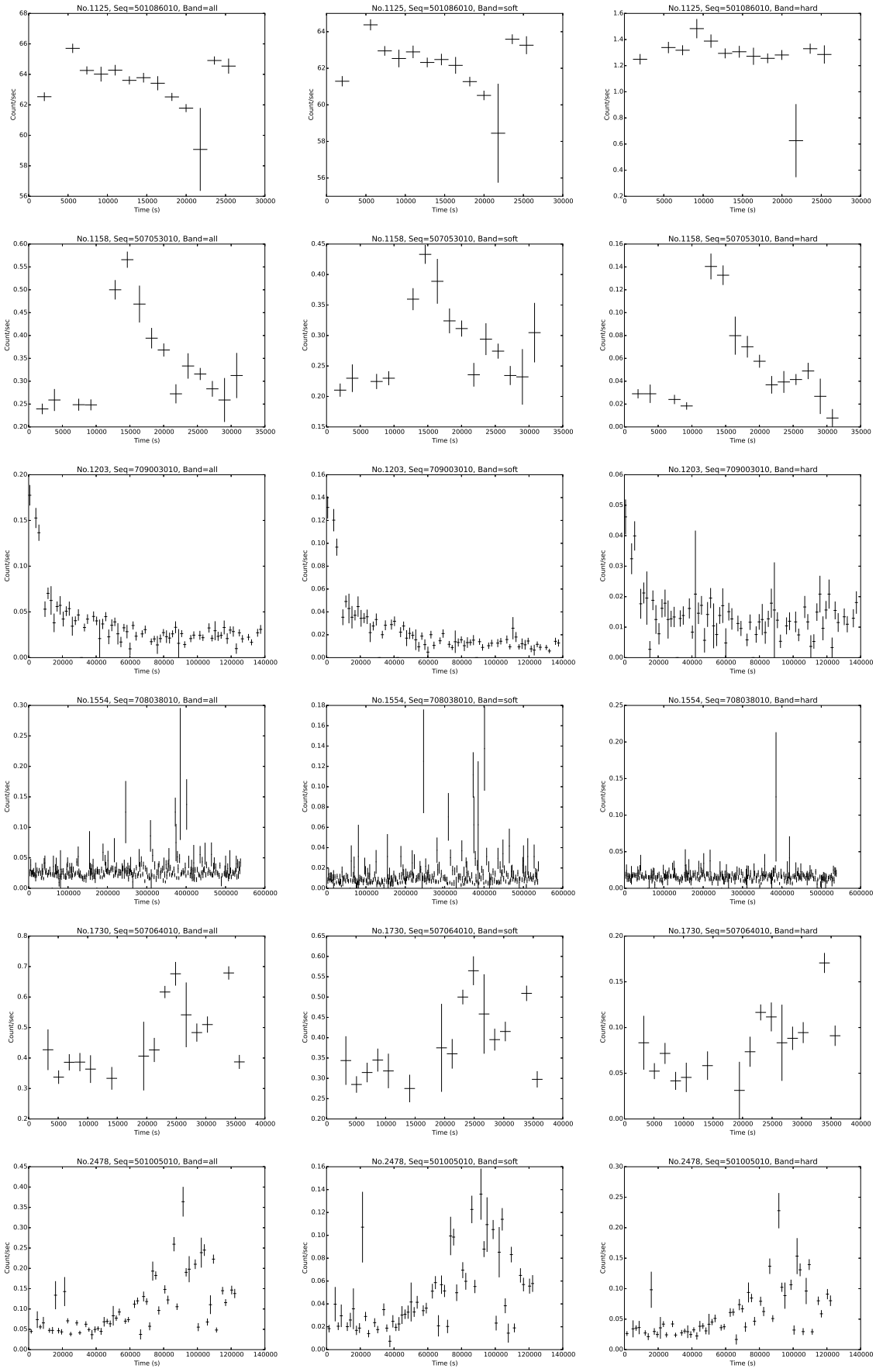

図 8.5: *continue.*

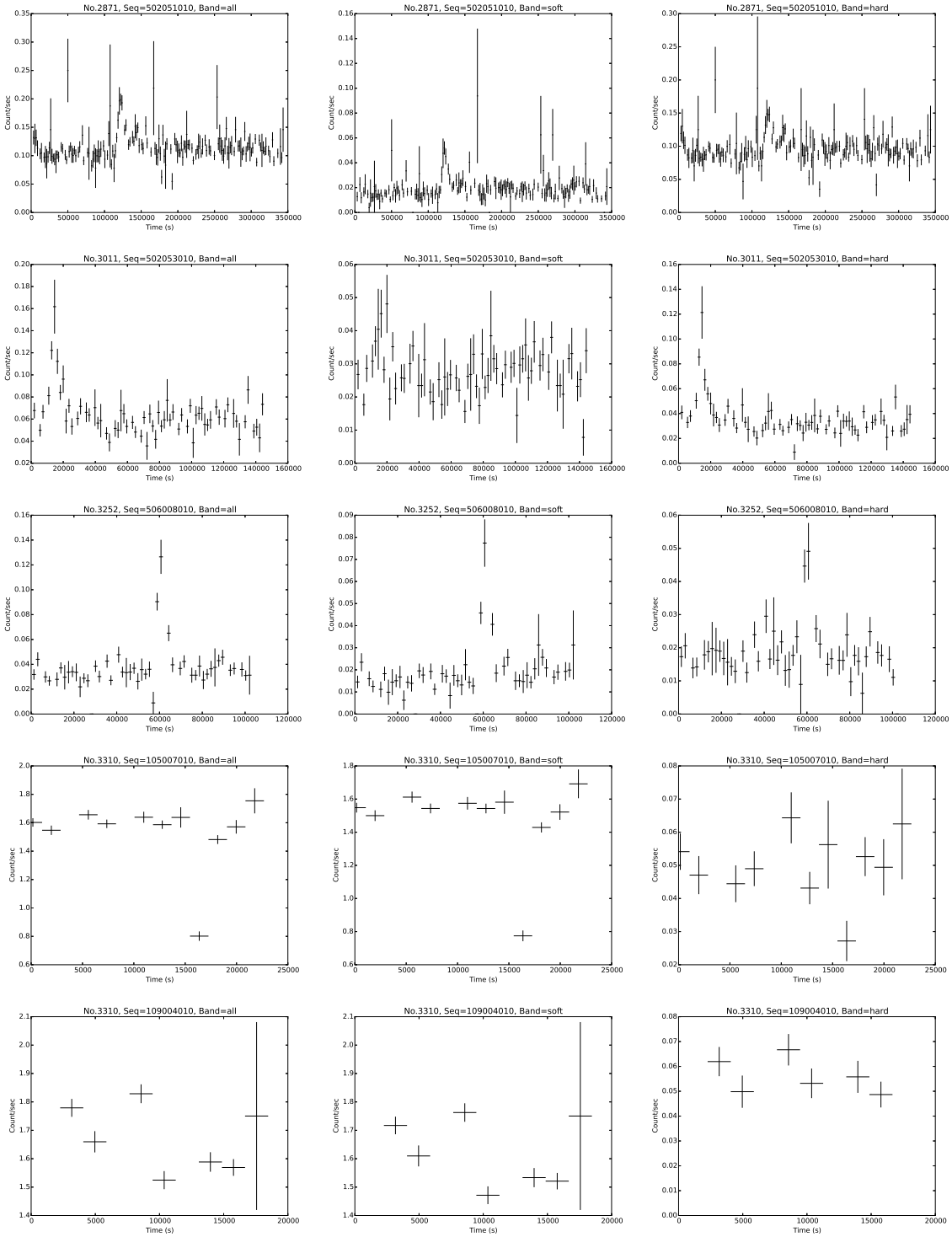

図 8.5: *continue.*

第9章　まとめ

本論文の結果を以下にまとめる。

1. 2015 年 10 月までに公開されており、全ての XIS において Normal mode で観測されている 2516 観測 (全天の 0.4 %) に対して、ウェーブレット変換を用いた天体検出を行う XMM 衛星の標準ツールである ewavelet を、0.5–10 keV、0.5–2.0 keV、2.0–10 keV の各エネルギーバンドで適用した。続けて、「すざく」衛星の応答関数を考慮し、検出されたカウントレートから物理的なフラックスを計算した。

2. 検出結果をまとめるにあたり、装置のキャリブレーションのために 50 回観測されている超新星残骸 E0102–72 の近くにある高質量 X 線連星 RX J0103.6–7201 を用いて、すざくの位置決定精度を調べた。その結果、90 %の観測が入る半径が 26 秒角であることが分かった。

3. 各エネルギーバンドでの検出結果をすざくの位置決定精度を考慮してまとめると、有意度が 5σ 以上の X 線源が 5531 個検出された。5σ 検出感度が、すざくの典型的な観測時間 134 ks で、5.0×10^{-14} erg cm^{-2} s^{-1} (0.5–10 keV) である。

4. 同じ天域の複数観測がある場合、位置決定精度を考慮して、個別の天体である確度の高い同一天体を判定した。5531 個の X 線源から同一天体にまとめると 3549 天体になった。また、これらの観測間の時間変動も調べた。

5. 3549 天体のライトカーブとスペクトルを抽出した。各天体の各観測ごとに抽出したライトカーブに KS 検定を行い、もっとも変動しているときの確率を求めた。

6. 3549 天体に対応する他の X 線天文衛星 (XMM や Chandra など) で検出された天体を NED、SIMBAD、3XMM カタログ、1SXPS カタログから調べた。その結果、対応 X 線天体を持たないものは 1156 天体であった。

7. 1156 天体の時間変動に注目すると、これまでに観測されていない星のフレアが新たに見つかる可能性が高いことが分かった。今日の議論で、最終的に新たな X 線天体である可能性が高く面

白い変動を示す 22 天体選び出した。これらについて考察を行った。今後、Chandra 衛星等を用いて追観測を行う。

参考文献

Arnaud, K. A. 1996, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 101, Astronomical Data Analysis Software and Systems V, ed. G. H. Jacoby & J. Barnes, 17

Baumgartner, W. H., Tueller, J., Markwardt, C. B., et al. 2013, *Astrophysical Journal Supplement*, 207, 19

Blackburn, J. K. 1995, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 77, Astronomical Data Analysis Software and Systems IV, ed. R. A. Shaw, H. E. Payne, & J. J. E. Hayes, 367

Boller, T., Freyberg, M., & Truemper, J. 2014, in The X-ray Universe 2014, 40

Cash, W. 1979, *Astrophysical Journal*, 228, 939

Edelson, R., Turner, T. J., Pounds, K., et al. 2002, *Astrophysical Journal*, 568, 610

Evans, I. N., Primini, F. A., Glotfelty, K. J., et al. 2010, *Astrophysical Journal Supplement*, 189, 37

Evans, P. A., Osborne, J. P., Beardmore, A. P., et al. 2014, *Astrophysical Journal Supplement*, 210, 8

Forman, W., Jones, C., Cominsky, L., et al. 1978, *Astrophysical Journal Supplement*, 38, 357

Freeman, P. E., Kashyap, V., Rosner, R., & Lamb, D. Q. 2002, *Astrophysical Journal Supplement*, 138, 185

Harris, D. E., Forman, W., Gioia, I. M., et al., eds. 1993, The Einstein Observatory catalog of IPC X ray sources. Volume 1E: Documentation, Vol. 1

Hiroi, K., Ueda, Y., Hayashida, M., et al. 2013, *Astrophysical Journal Supplement*, 207, 36

Koyama, K., Tsunemi, H., Dotani, T., et al. 2007, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 59, 23

McHardy, I. M., Lawrence, A., Pye, J. P., & Pounds, K. A. 1981, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 197, 893

Merloni, A., Predehl, P., Becker, W., et al. 2012, ArXiv e-prints

Mitsuda, K., Bautz, M., Inoue, H., et al. 2007, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 59, 1

Morrison, R. & McCammon, D. 1983, *Astrophysical Journal*, 270, 119

Predehl, P. & Pavlinsky, M. 2014, in The X-ray Universe 2014, 20

Priedhorsky, W. C. & Holt, S. S. 1987, *Space Science Reviews*, 45, 291

Pye, J. P., Rosen, S., Fyfe, D., & Schröder, A. C. 2015, *Astronomy & Astrophysics*, 581, A28

Rosen, S. R., Webb, N. A., Watson, M. G., et al. 2015, ArXiv e-prints

Serlemitsos, P. J., Soong, Y., Chan, K.-W., et al. 2007, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 59, 9

Sugizaki, M., Kamae, T., & Maeda, Y. 2009, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 61, 55

Sugizaki, M., Mitsuda, K., Kaneda, H., et al. 2001, *Astrophysical Journal Supplement*, 134, 77

Ueda, Y., Ishisaki, Y., Takahashi, T., Makishima, K., & Ohashi, T. 2001, *Astrophysical Journal Supplement*, 133, 1

Ueda, Y., Ishisaki, Y., Takahashi, T., Makishima, K., & Ohashi, T. 2005, *Astrophysical Journal Supplement*, 161, 185

Voges, W., Aschenbach, B., Boller, T., et al. 1999, *Astronomy & Astrophysics*, 349, 389

Warwick, R. S., Marshall, N., Fraser, G. W., et al. 1981, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 197, 865

Weisskopf, M. C. 2012, Optical Engineering, 51, 011013

Wood, K. S., Meekins, J. F., Yentis, D. J., et al. 1984, *Astrophysical Journal Supplement*, 56, 507

井上一、小山勝二、高橋忠幸、水本好彦編「シリーズ現代の天文学 17　宇宙の観測 III —高エネルギー天文学」2008 年 (日本評論社)

大橋隆哉 、「進化する X 線天文衛星」1993 年 天文月報 (6 月号)、 86、 244

鶴 剛、松本 浩典、「Astro-E2 XIS Science FITS 確認書」2005 年 9 月 24 日 Ver.3e

すざくヘルプデスク、「すざく」ファーストステップガイド第 4.0.3 版
(http://cosmic.riken.jp/suzaku/help/guide/fstep/suzaku_fstep090717.pdf)

付 録A　wavdetectによる天体検出

Contents

A.1 wavdetect 124

A.1 wavdetect

ここでは、wavdetetect (5.1 節) をすざくデータに適用して天体検出を行う方法を示す。天体検出を行うために必要な天体のイメージ (xisa_cl_calmask.img)、exposure 補正をするための Exposure Map (sum_expmap_8_calmask.img) の作成の仕方は 5.2 節と同じである。これらのファイル以外に、天体の広がり (PSF) の検出器上の位置依存性を評価した PSF Map が必要である。PSF Map を作成するために、我々は Sugizaki et al. (2009) が作成した XIS1 の Crab Nebula の PSF モデルを用いて、PSF の広がりの位置依存性を調べた。その結果を、図 A.1 に光軸から 1 分角ごとに離れた位置での Encicled Energy Fraction (EEF) として表す。図 A.1 を見ると、すざく PSF の広がりの位置依存性は検出器の中心部と外側ではあまり変わらない。そこで、XRT の EFF (図 3.3) から、約 6 割の光量が入る半径として 100 秒角のフラットな PSF Map を作成する。PSF Map を作成する CIAO の mkpsfmap コマンドはすざくに対して使えないので、そのかわりに、5.2.6 で作成した “xisa_cl_calmask.img” を用いて、

```
dmimgcalc xisa_cl_calmask.img none suzaku_psf.fits op="imgout=((img1*0)+100.0)"
```

を実行すると、“suzaku_psf.fits” というフラットな PSF Map ができる。ここで、PSF Map の半径をすざくの PSF の広がりとして妥当な 10 秒角以上でいろいろな値に変えても、検出結果は変わらないことを確認した。また、“xisa_cl_calmask.img” のヘッダーに BUNIT “arcsec” を追加する。

```
dmhedit xisa_cl_calmask.img none add BUNIT "arcsec"
```

とすれば良い。

最後に、wavdetect を実行して天体の検出を行う。

```
punlearn wavdetect
pset wavdetect infile=xisa_cl_calmask.img
pset wavdetect psffile=suzaku_psfmap.fits
pset wavdetect scales="2,4,8,16"
pset wavdetect expfile=sum_expmap_8_calmask.img
pset wavdetect outfile=xisa_src.fits
pset wavdetect scellfile=xisa_scell.fits
pset wavdetect imagefile=xisa_imgfile.fits
pset wavdetect defnbkgfile=xisa_nbgd.fits
```

```
pset wavdetect regfile=xisa_src.reg
wavdetect
```

を実行すると、図 A.2 のように天体検出ができる。この図 A.2 を見ると、Eta Carinae は検出されているが、その Eta Carinae の右上と右下にある天体が検出されていないことが分かる。Chandra スレッド [1] には、複数のウェーブレットスケールを用いることで、小さいスケールで暗い天体、大きいスケールで広がった天体を検出できると書かれているが、scales=”2,4,8,16”で実行した結果をみると複数のウェーブレットスケールがうまく機能していない可能性がある。試しに、scales=“16”で実行した結果を図 A.3 に示す。この結果では、図 A.2 と同じように Eta Carinae だけしか検出されていない。scales=“2,4,8,16”で実行しても、その複数のスケールの最大値 (“16”) の結果と変わらないので、wavdetect のアルゴリズムでは、原因は不明であるが、複数のウェーブレットスケールがすざくのデータに対して機能していないということが分かった。

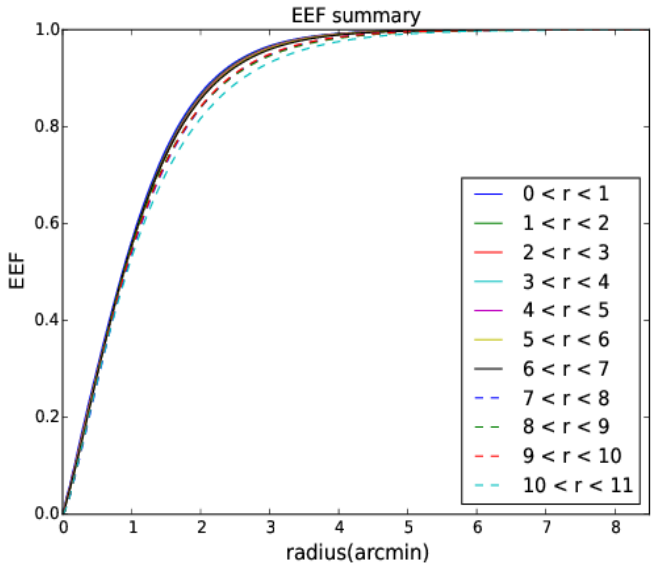

図 A.1: PSF の広がりの位置依存性を調べた結果。検出器の光軸から 1 分角ごとに離れた位置での EEF として表している。

[1] http://cxc.harvard.edu/ciao/ahelp/wavdetect.html

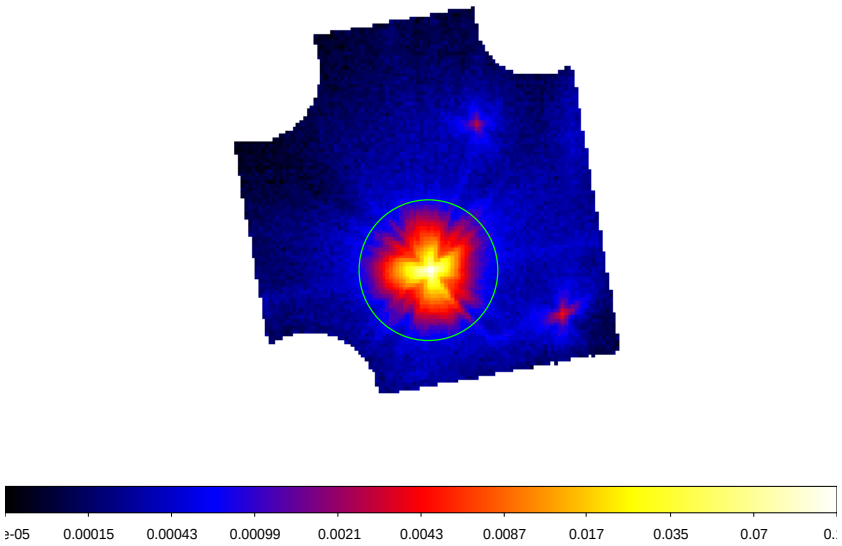

図 A.2: Eta Carinae(ID; 403036010) の観測で 0.5−10 keV のイメージにおいて、wavdetect の scale を “2,4,8,16”にしたときの検出結果 (xisa_cl_expcorr.img)。緑の円が検出された天体 (xisa_src.reg) で、円の大きさは PSF をガウシアンと仮定したときに、3σ のカウントが入ることを意味している。

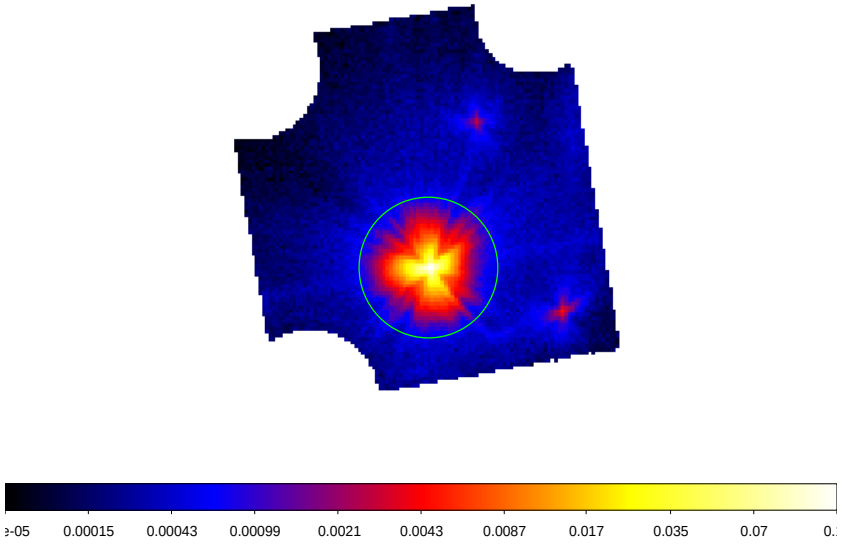

図 A.3: Eta Carinae(ID; 403036010) の観測で 0.5−10 keV のイメージにおいて、wavdetect の scale を “16”にしたときの検出結果 (xisa_cl_expcorr.img)。緑の円が検出された天体 (xisa_src.reg) で、円の大きさは PSF をガウシアンと仮定したときに、3σ のカウントが入ることを意味している。

謝辞

本論文を完成させるために、多くの方々にご支援を賜りました。この場を借りて厚く感謝致します。

指導教員である海老沢研教授には、宇宙研での研究環境と多くのご指導をいただきました。宇宙研の辻本匡弘助教には、研究室ミーティングの論文紹介のときに、鋭いご指摘を賜りました。JAXA プロジェクト研究員の中川友進さんには、研究のために解析環境を整えていただきました。京都産業大の研究員である鮫島寛明さんには、宇宙研在籍時に活動銀河核の解析について多くの助言をいただきました。研究室の先輩である和田師也さんには、研究の進め方やすざくの検出器の知識をはじめ、大学院での研究生活に関して面倒を見ていただきました。同じく先輩の水本岬希さんには、研究の議論から世間話まで、貴重な時間を割いて、相談相手になっていただきました。研究室の後輩である楠絵莉子さんの規則正しい生活には、いつも脱帽で、見習わなければならないといつも思っていました。また、後輩の Sean Pike さんの日本語の巧さには驚かされ、私自身ももっと日本語を磨き、英語も磨いていかなければと決意する次第でありました。

明星大学の井上一教授には、ゼミを通じて X 線天文学に関する様々な知識を教えていただきました。理化学研究所の研究員の杉崎睦さんには、本論文の PSF モデルをご提供していただきました。京都大学の上田佳宏准教授には、愛媛大学での研究に引き続きお世話になり、カタログ作成を始める際に多くの助言をいただきました。宇宙研 X 線グループの同期の方々には、酒席で大変お世話になりました。天文学専攻の同期には、学会や夏の学校などの場では近況報告をしたり、よく酒席にご招待していただきました。また、ここには書ききれない多くの方々の支えていただきました。 みなさまに厚くお礼を申し上げます。

最後に、私の良き理解者であった母と弟には、言葉で言い表せないほどのご支援を賜り、私が学生生活に集中できるようにしていただきました。また、天国の父にはいつも勇気と気力をもらい、父の自慢の息子になるように日々精進してまいりました。これからも天国から温かく見守っていただければと思います。