

# すざく衛星の観測中に偶然発見された X 線変動天体 の研究

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

seiya@ac.jaxa.jp

木下 聖也

学籍番号 35-166113

指導教員 海老沢 研 教授

平成 30 年 3 月 13 日



## 概要

2005年7月に打ち上げられたX線天文衛星「すざく」の、2015年10月までに公開された2516観測のアーカイブデータ(全天の0.4%をカバー)を解析することにより、1156の天体が発見された(Yamasaki 2016)。しかし、これらの天体の特性は不明であり、種別の同定も未だ為されていなかった。

そこで我々は、これらの新天体のうち、特に光度変動が顕著であった11天体を対象として、詳細な解析を実行した。X線ライトカーブにおいて、恒星フレアに特有の急激な増光と指数関数的な減衰が見られた天体については、これに合致する関数形でライトカーブフィッティングを行い減衰タイムスケールを求めた。変動に周期性の徴候が見られた天体については、詳細な周期解析を行い、周期を $2910 \pm 70$ 秒と確定した。また、全11天体について冪乗型および熱的モデルによるスペクトルフィッティングを行った。さらに、「すざく」より位置分解能にすぐれたX線天文衛星Swiftで追観測を行い、検出できた2天体については、「すざく」より正確な座標を算出した。また、SIMBAD、2MASS、DSS、SDSSのデータを利用して、可視赤外天体との照らし合わせを行った。また、典型的なフレアとは異なるライトカーブを示した天体のうち一つについては「なゆた」望遠鏡によって地上可視分光観測を行った。

これらの解析結果から、11天体の種別同定を試みた。9天体についてはX線ライトカーブの特徴が恒星フレアの場合に見られるものと一致し、X線光度などの各種パラメータが先行研究と一致したことから、アクティブな恒星であると考えられる。また、1天体についてはX線ライトカーブの特徴がフレアの場合に見られるものとは一致しなかったが、可視分光観測で得られたスペクトルの特徴から早期K型の恒星であると考えられる。また、1天体についてはX線光度に周期変動が存在したこと、およびエネルギースペクトルがハードであったことから、強い磁場を持つ白色矮星を含む連星系、中間ポーラーであると思われる。



# 目次

第1章 背景	13
第2章 機器及びカタログ	15
2.1 すざく	15
2.1.1 概要	15
2.1.2 観測機器	16
2.2 Swift	16
2.2.1 概要	16
2.2.2 観測機器詳細	17
2.3 なゆた	17
2.3.1 概要	17
2.4 既存のカタログなど	18
2.4.1 SIMBAD	18
2.4.2 2MASS	18
2.4.3 DSS	18
2.4.4 SDSS	19
第3章 観測	21
3.1 すざく	21
3.2 Swift	21

3.3	なゆた	25
<b>第4章</b>	<b>解析</b>	<b>27</b>
4.1	すぎく	27
4.1.1	ライトカーブ作成及びフィッティング	27
4.1.2	#2478 ライトカーブ周期解析	28
4.1.3	増光時のスペクトルフィッティング	35
4.1.4	定常時のフラックス計算	42
4.2	Swift	43
4.2.1	XRT イメージでの座標検出	43
4.2.2	XRT データのフラックス計算	43
4.3	なゆた	43
4.3.1	スペクトル解析	43
4.4	イメージ比較	44
<b>第5章</b>	<b>議論</b>	<b>53</b>
5.1	2MASS と SSDSS のカタログとの照合	53
5.2	各天体についてのまとめ	62
5.2.1	恒星フレアであると思われる9天体について	62
	#61 の対応天体候補	62
	#319 の対応天体候補	62
	#373 の対応天体候補	63
	#1081 の対応天体候補	63
	#1093 の対応天体候補	63
	#1158 の対応天体候補	64

#1203 の対応天体候補 . . . . .	64
#2871 の対応天体候補 . . . . .	64
#3011 の対応天体候補 . . . . .	64
5.2.2 これらの天体と典型的な恒星フレアの比較 . . . . .	65
5.2.3 周期性を示す 1 天体について . . . . .	67
#2478 の対応天体候補 . . . . .	67
5.2.4 早期 K 型恒星であると思われる 1 天体について . . . . .	67
#501 の対応天体候補 . . . . .	68
<b>第 6 章 結論</b>	<b>69</b>





## 目 次

4.1	ライトカーブと Hardness Ratio	29
4.2	#2478 ピリオドグラム	35
4.3	#2478 畳み込みライトカーブと畳み込み Hardness Ratio	36
4.4	cflux, TBabs, Powerlaw によるスペクトルフィッティング結果	38
4.5	cflux, TBabs, apec によるスペクトルフィッティングの結果	40
4.6	「なゆた」による#501 の可視光スペクトル	45
4.7	各天体の多波長観測イメージ比較	46
5.1	典型的な恒星フレアとの比較図	66



## 表 目 次

2.1	UVOT バンドパスフィルター	17
3.1	すざく観測概要	22
3.2	Swift 観測概要	23
3.4	なゆた観測概要	25
4.1	ライトカーブのフィッティング結果	28
4.2	スペクトルフィッティングに用いたモデル	36
4.3	cflux*TBabs*Powerlaw によるスペクトルフィッティング結果	37
4.4	cflux*TBabs*apec によるスペクトルフィッティングの結果	37
4.5	すざくによる定常時フラックス (0.2–10 keV)	42
4.6	XRT データのフラックス	44
5.1	#61 の対応天体候補 (26'' 以内に存在する SDSS カタログ天体)	54
5.2	#319 の対応天体候補 (26'' 以内に存在する 2MASS カタログ天体)	54
5.3	#373 の対応天体候補 (26'' 以内に存在する 2MASS カタログ天体, SIMBAD 天体)	55
5.4	#501 の対応天体候補 (26'' 以内に存在する SDSS, 2MASS カタログ天体)	56
5.5	#1081 の対応天体候補 (26'' 以内に存在する 2MASS カタログ天体)	57
5.6	#1093 の対応天体候補 (26'' 以内に存在する SDSS, 2MASS カタログ天体)	58
5.7	#1158 の対応天体候補 (26'' 以内に存在する 2MASS カタログ天体)	58
5.8	#2478 の対応天体候補 (26'' 以内に存在する SDSS カタログ天体)	59

5.9 #2871 の対応天体候補 (26'' 以内に存在する 2MASS カタログ天体) . . . . .	60
5.10 #3011 の対応天体候補 (26'' 以内に存在する 2MASS カタログ天体) . . . . .	61
5.11 9 つのフレア天体のパラメータまとめ . . . . .	65
6.1 Swift XRT による検出座標 . . . . .	69
6.2 まとめ . . . . .	71

## 第1章 背景

天体から放射された X 線は地球大気に阻まれて地上まで届かないため、X 線天体の観測は、ロケットや気球、人工衛星を用いて、大気圏外から行う必要がある。これには高い技術的ハードルが伴うため、X 線天文学の勃興は可視光線や赤外線のと比べると遅かった。しかしながら、1962 年にロケットに搭載した装置によって初めて太陽系外の X 線天体の観測に成功して以来、さまざまな X 線観測が実施され多くのデータが蓄積されており、現在では多様な研究が可能になっている。

そのような研究のひとつとして、X 線天文衛星「すざく」のアーカイブデータから新たな天体を見付け出した研究がある (Yamasaki 2016)。すざく衛星は、同時期に運用され数多くの指向観測を行っていた XMM-Newton や Chandra と比べて感度は低かったものの、これらの衛星が観測していない領域において新たな X 線天体が発見されることや、観測済みの領域においても増光した天体が発見されることが期待された。すざく衛星の  $17'.8$  四方の視野中には、観測対象とは別の天体が入り込む事がよくあったが、これら偶然入りこんだ天体のデータをまとめたものは存在しなかった。そこで、2005 年の観測開始から 2015 年 10 月までに公開された 2516 観測 (全天 0.4% をカバーする) のアーカイブデータを解析したところ、3549 の天体が発見された。また、このうち 1156 天体は他の X 線望遠鏡では未発見の新 X 線天体である事が明らかにされ、さらに 22 天体については、X 線光度変動が見られた (Yamasaki 2016)。

本研究は、このうち特に顕著な光度変動が見られた 11 の天体に対象を絞って詳細解析を行い、天体種別の同定を試みたものである。



## 第2章 機器及びカタログ

### Contents

<b>2.1</b>	<b>すぎく</b>	<b>15</b>
2.1.1	概要	15
2.1.2	観測機器	16
<b>2.2</b>	<b>Swift</b>	<b>16</b>
2.2.1	概要	16
2.2.2	観測機器詳細	17
<b>2.3</b>	<b>なゆた</b>	<b>17</b>
2.3.1	概要	17
<b>2.4</b>	<b>既存のカタログなど</b>	<b>18</b>
2.4.1	SIMBAD	18
2.4.2	2MASS	18
2.4.3	DSS	18
2.4.4	SDSS	19

本章では、本研究に用いた望遠鏡と機器、及びカタログについて述べる。

### 2.1 すぎく

#### 2.1.1 概要

すぎくは2005年7月10日に打ち上げられ、2015年8月26日まで運用された日本のX線天文衛星である (Mitsuda et al. 2007)。地上から約550km上空の略円軌道上を約96分で周回しながら数多くの指向観測が行われた。この高度は地球磁気圏の内側にあたるため、Chandra や XMM-Newton といった高軌道で運用された衛星と比べ地球外からの荷電粒子による雑音が少なく、広がった天体の観測に適していた。

観測装置として、X線撮像検出器 (X-ray Imaging Spectrometer, XIS)、硬X線検出装置 (Hard X-ray Detector, HXD)、X線マイクロカロリメーター (X-ray Spectrometer, XRS) の3つが搭載されていた。このうちXRSについては、軌道投入の約1ヶ月後に冷却剤であるヘリウムを消失し使用不可能となった。HXDのエネルギー帯は10–600 keVであり、超高エネルギー天体の特性を探ることに適しているものの、撮像能力を持たないため、HXDは解析に使用しなかった。すざくによる観測データは提案者に渡され1年間の占有期間が経過すると、アーカイブデータとして公開された。

### 2.1.2 観測機器

XISは4つのX線CCDカメラから構成され、各々がすざくに搭載された多重薄膜X線望遠鏡の焦点面に設置された検出器である (Koyama et al. 2007)。X線による撮像及び分光を可能とし、視野は17.8四方、エネルギー帯は0.2–12.0 keV、エネルギー分解能は6 keVにおいて130 eVであった。4つのCCDのうちXIS0, 2, 3は表面照射型 (Front Illuminated, FI) であり、XIS1は裏面照射型 (Back Illuminated, BI) である。電極側から光を入射するFIは、エネルギー分解能に優れるが、低エネルギーX線領域において検出効率が劣る。これに対して電極が存在しない背面から光を入射するBIは、低エネルギーX線の検出効率に優れるが、波長分解能に劣る。

XISの撮像データによる位置決定精度は、Chandra, XMM-Newton, Swiftなどと比べて低く、90%の確率で半径26''であった (Yamasaki 2016)。XIS2については、2006年11月に微小天体の衝突が原因と思われる破損が発生したため、これ以降は使用不可能となった。

## 2.2 Swift

### 2.2.1 概要

Swiftは2004年11月20日に打ち上げられ、現在でも運用が続けられているNASAの天文衛星である<sup>1</sup>。ガンマ線バーストを観測することを主目的とした衛星であり、バーストが発生すると即座に鏡筒の向きを変えて観測を実行している。これ以外にもTarget of Opportunity (ToO) 観測提案を常時受け付けており、ガンマ線バーストが発生していない空き時間は別の観測に利用されている。ToOのデータは観測後直ちに公開されるようになっている。

---

<sup>1</sup>[https://swift.gsfc.nasa.gov/about\\_swift/Sci\\_Fact\\_Sheet.pdf](https://swift.gsfc.nasa.gov/about_swift/Sci_Fact_Sheet.pdf), (2018.01.26 アクセス)



観測装置として、ガンマ線バーストを発見するための広視野の硬 X 線望遠鏡 (Burst Alert Telescope, BAT) 及び、発見されたガンマ線バーストをより詳しく観測するための X 線望遠鏡 (X-ray Telescope, XRT)、紫外可視望遠鏡 (UV/Optical Telescope, UVOT) が搭載されている。

### 2.2.2 観測機器詳細

XRT は多重薄膜 X 線望遠鏡の焦点面に設置された検出器である。X 線による撮像及び分光を可能とし、視野は  $23'.6$  四方、エネルギー帯は 0.2–10 keV、エネルギー分解能は 6 keV において 140 eV である。XRT の位置決定精度は「すざく」の XIS と比べて優れており、明るい天体であれば誤差  $1''$  以内で座標を決定することが可能である。

UVOT は修正リッチークレチアン式反射望遠鏡に設置された検出器であり、視野は  $17'.8$  四方、観測波長は 170–650 nm に対応している。さらに、複数のバンドパスフィルターを備えている。

天体番号	中心波長 (nm)
v	546.8
b	439.2
u	346.5
uvw1	260.0
uvm2	224.6
uvw2	192.8

表 2.1: UVOT バンドパスフィルター

## 2.3 なゆた

### 2.3.1 概要

「なゆた」は兵庫県にある有効径 2 m のリッチークレチアン式反射望遠鏡である<sup>2</sup>。北緯 35 度 01 分 31 秒、東経 134 度 20 分 08 秒、標高 449m に位置し、主に北天の天体が観測可能である。観測装置として、近赤外線撮像装置 (Nishi-harima Infrared Camera, NIC)、可視光多色撮像装置 (Multiband

<sup>2</sup>[http://www.nhao.jp/research/nayuta\\_telescope.html](http://www.nhao.jp/research/nayuta_telescope.html), (2018.01.26 アクセス)

Imager for Nayuta Telescope, MINT)、可視光中低分散分光器 (Medium And Low-dispersion Long Slit Spectrograph, MALLS) が設置されている。

このうち MALLS はナスミス焦点に設置されており、複数種のスリット幅やグレーティングを使い分けることによって波長分解能を変えることが可能である。また、オーダーカットフィルターを備えており、倍光の影響を低減するために用いることが可能である。

## 2.4 既存のカタログなど

### 2.4.1 SIMBAD

SIMBAD は天体の基本的情報がまとめられたデータベースである (Wenger et al. 2000)。天体名や座標を用いて天体を検索し、文献や測定の情報を確認することができる。

### 2.4.2 2MASS

2MASS (Two Micron All Sky Survey) は赤外線天体の掃天観測プロジェクトである (Skrutskie et al. 2006)。アメリカ (北半球) とチリ (南半球) に設置された望遠鏡により、J バンド (1235 nm)、H バンド (1662 nm)、Ks バンド (2159 nm) を用いて全天の掃天観測が実行され、カタログが作成された。7.8 秒の観測で J, H, Ks それぞれ 15.8, 15.1, 14.3 等級までの点源を  $10\sigma$  の精度で検出することが可能で、位置決定誤差は  $0''.5$  である。本論文ではマッチングに 2MASS All-Sky Point Source Catalog を用いた。

### 2.4.3 DSS

Digitized Sky Survey (DSS) は可視光天体撮像画像のデジタル化プロジェクトである<sup>3</sup>。アメリカとオーストラリアの天文台での観測で得られた全天のほぼ全ての領域をカバーする写真乾板データが、スキャンしてデジタル化することで fits データ化された。

---

<sup>3</sup><https://archive.stsci.edu/dss/acknowledging.html>, (2018.01.26 アクセス)

#### 2.4.4 SDSS

Sloan Digital Sky Survey (SDSS) は可視光天体の掃天観測プロジェクトである ([Gunn et al. 1998](#))。アメリカに設置された望遠鏡により掃天観測が実行され、uバンド (350 nm)、gバンド (477 nm)、rバンド (623 nm)、iバンド (762 nm)、zバンド (913 nm) のフィルターを用いて約 23 等級を限界等級とするデータが得られた。本研究でのマッチングには Data Release 14 を用いた ([Abolfathi et al. 2017](#))。



## 第3章 観測

### Contents

3.1	すざく	21
3.2	Swift	21
3.3	なゆた	25

本章では観測に使った望遠鏡とその機器、及びそれを用いて得たデータについて述べる。

### 3.1 すざく

すざくの観測データは、観測提案を提出した Principal Investigator (PI) に渡されてから 1 年後に一般公開された。本研究ではデータを公開している ISAS の DARTS<sup>1</sup> から、解析対象とした 11 天体の XIS データをダウンロードし解析を行った (表 3.1)。この際、XIS0, 1, 2, 3 のデータを用いることができたのは 2006 年 11 月の XIS2 停止以前に観測が行われた #2478<sup>2</sup> のみであり、それ以外の 10 天体については XIS0, 1, 3 のデータのみを用いた。

### 3.2 Swift

Swift においては、すべての観測データが即時公開される。本研究では、#1203, #2871, #3011 については既存のデータを利用できたためそれを用い、それ以外の 8 天体については観測提案を提出し新たに観測を行った (表 3.2)。観測データは UK Swift Science Data Centre<sup>3</sup> からダウンロードした。

<sup>1</sup><http://darts.isas.jaxa.jp/pub/suzaku>, (2018.01.26 アクセス)

<sup>2</sup>本論文では (Yamasaki 2016) のカタログに記載されているすざく天体を、そのカタログ番号 (XXX) を用いて #XXX と表す。

<sup>3</sup>[http://www.swift.ac.uk/swift\\_portal](http://www.swift.ac.uk/swift_portal), (2018.01.26 アクセス)

座標と観測日時				
天体番号	シーケンス番号	天体名 (座標)	観測日時	観測時間 (s)
61	807135010	Suzaku J004215-095907	2012.12.31-2013.01.03	$1.400 \times 10^5$
319	808110010	Suzaku J015437+370020	2014.02.15-2014.02.16	$4.051 \times 10^4$
373	507056010	Suzaku J022147+615638	2013.01.30-2013.01-31	$4.676 \times 10^4$
501	806105010	Suzaku J031427+404900	2011.08.28-2011.08.29	$1.076 \times 10^4$
1081	802062040	Suzaku J074827-192259	2007.05.13-2007.05.14	$3.291 \times 10^4$
1093	407034010	Suzaku J075516+215530	2012.04.24-2012.04.27	$1.191 \times 10^5$
1158	507053010	Suzaku J083519-433216	2012.11.27-2012.11.27	$1.535 \times 10^4$
1203	709003010	Suzaku J085638+782051	2014.05.12-2015.05.14	$7.684 \times 10^4$
2478	501005010	Suzaku J161532+591403	2006.03.22-2006.03.23	$6.164 \times 10^4$
2871	502051010	Suzaku J174727-280548	2008.03.11-2008.03.15	$1.388 \times 10^5$
3011	502053010	Suzaku J182235-153910	2007.10.07-2007.10.08	$7.152 \times 10^4$

表 3.1: すざく観測概要

座標と観測日時			
天体番号	観測 ID	観測日時	観測時間 (s)
61	34928	2017.02.06	1015
319	10178	2017.06.28	1980
373	10059	2017.04.18	2205
501	34762	2016.10.30	1770
		2016.11.07	1635
		2016.11.11	1890
		2016.11.15	1910
1081	10060	2017.04.19	2145
1093	10052	2017.04.15	1645
1158	10179	2017.07.01	2170
1203	81037	2016.11.02	2365
		2016.11.03	3930
2478	34860	2016.12.23	1925
		2017.01.15	7900

表 3.2: Swift 観測概要

2871	30938	2007.05.13	4490
		2007.05.17	1889
		2007.07.03	1460
		2007.08.08	2005
		2008.04.28	2005
		2009.05.15	1405
		2010.05.13	1090
		2010.05.17	3740
		2011.06.07	670
		2011.06.19	4690
		2011.06.23	1995
		2012.05.06	2120
		2014.03.01	285
		2014.03.07	580
		2014.03.09	535
		2014.03.11	135
		2014.03.20	435
		2015.02.17	1995
		2015.03.16	5765
		2015.03.17	3265
2015.04.13	1950		
2015.05.13	1850		
2015.06.12	2075		
	38003	2010.11.02	2200
		2013.04.21	1650
		2013.05.28	165
		2013.06.13	300
		2013.06.19	1550
		2013.06.24	1075
		2013.06.25	1135
	43660	2012.06.23	502
	93398	2017.06.01	65
		2017.06.15	45
	431582	2010.08.13	2210
3011	44134	2012.03.02	305
		2012.05.07	375

表 3.3: 続き。



天体番号	観測日時	波長分解能	フィルター	観測時間 (s)
501	2016.11.25	600	GG495	300
			WG320	1200

表 3.4: なゆた観測概要

### 3.3 なゆた

「なゆた」では、フレアではない特異な変光を示していた#501 を観測対象とし、倍光の影響を低減するために2種類のオーダーカットフィルターを利用して、分光観測を行った(表 3.4)。この際「すざく」および Swift XRT で検出された天体のエラーサークル内に存在している唯一の SDSS 天体である「SDSS J031428.02+404910.8」を、#501 の可視光対応天体と考えて観測を行なった。



## 第4章 解析

### Contents

4.1	すざく	27
4.1.1	ライトカーブ作成及びフィッティング	27
4.1.2	#2478 ライトカーブ周期解析	28
4.1.3	増光時のスペクトルフィッティング	35
4.1.4	定常時のフラックス計算	42
4.2	Swift	43
4.2.1	XRT イメージでの座標検出	43
4.2.2	XRT データのフラックス計算	43
4.3	なゆた	43
4.3.1	スペクトル解析	43
4.4	イメージ比較	44

以下では解析の結果を述べていく。断りがない限り、各種計算におけるエラーは $1\sigma$ を用いている。

### 4.1 すざく

#### 4.1.1 ライトカーブ作成及びフィッティング

11天体について、3つのエネルギーバンド (all:0.2–12.0 keV, soft:0.2–2.0 keV, hard:2.0–12.0 keV) におけるライトカーブを作成した。この結果、9天体 (#61, #319, #373, #1081, #1093, #1158, #1203, #2871, #3011) のライトカーブには、恒星フレアに特有の急激な上昇と指数関数的な減衰 (Pallavicini et al. 1977) が見られた。また、残りの2天体のうち#501には緩やかに増光し急激に減衰する変動が、#2478には周期的な振動が見られた。

さらに、より詳しい性質を調べるためにフレアらしき変動を示した9天体に対して、

$$\begin{aligned} y &= A && \text{for } x < C \\ y &= A + B \exp -(t - C)/D && \text{for } x > C \end{aligned} \quad (4.1)$$

という関数形でライトカーブをフィットした。ここで、 $t$  は時刻、 $y$  はカウントであり、 $A$  は定常時カウント、 $B$  はカウントのピーク値から静穏時のカウントを引いた値、 $C$  はフレアの開始時刻、 $D$  は e-folding time (減衰時間) である。

作成したライトカーブおよびフィッティング結果と Hardness Ratio を図 4.1 に、フィッティングによって算出された e-folding time を表 4.1 に示した。

天体番号	all の減衰時間 (s)	soft の減衰時間 (s)	hard の減衰時間 (s)
61 1 回目	4400±700	5200±800	2000±500
61 2 回目	12000±2000	13000±3000	9000±2000
319	7000±1000	7000±1000	7000±2000
373	3500±400	3400±600	3100±500
1081	2000±1000	5000±3000	-
1093	9000±4000	12000±6000	5000±2000
1158	4600±700	5200±1000	4000±800
1203	5200±800	4900±800	6400±2000
2871	6000±1000	5000±2000	6000±2000
3011	6000±2000	10000±20000	4000±800

表 4.1: ライトカーブのフィッティング結果

#### 4.1.2 #2478 ライトカーブ周期解析

#2478 のライトカーブには周期性らしきものが見られた。この周期性が見せかけのものでないかを確かめ、正確な周期を求めるために、efsearch<sup>1</sup> を用いて畳み込み解析を行った。このツールは仮の周期を  $n$  ビンに分け、 $n$  ビン毎にライトカーブを畳み込み、以下の式で表される  $\chi^2$  が最も大きくなる周期を探索するツールである。もし周期性が存在しないならば、この  $\chi^2$  は自由度  $n-1$  の  $\chi^2$  分布に従う。

<sup>1</sup><https://heasarc.gsfc.nasa.gov/ftools/fhelp/efsearch.txt>, (2018.01.26 アクセス)

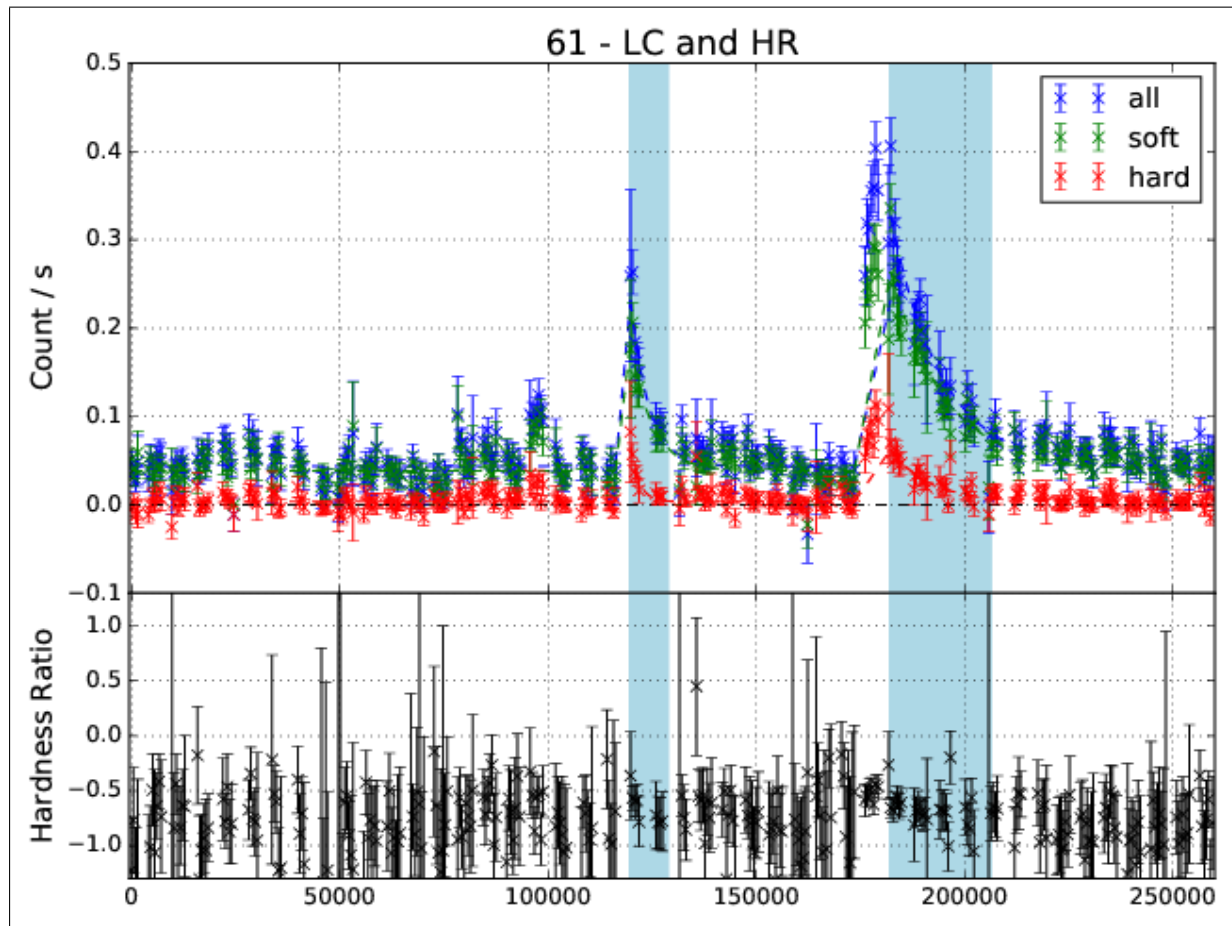


図 4.1: すざくライトカーブと Hardness Ratio。横軸は時間 (t)、縦軸は明るさ (count/s) を示し、エネルギーバンド別に all を青、soft を緑、hard を赤でプロットした。各ピンは 512 秒でピンまとめしている。青色で塗りつぶしているのは増光中の領域である。この際、フレアらしき変動が見られた 9 天体についてはフレアのピークから e-folding time の 2 倍の時間が経過するまで (あるいはデータの終わりまで) を増光中とした。また、#501 については時刻 11776 から 17920 までを、#2478 については時刻 61440 から 121344 までを増光中とした。

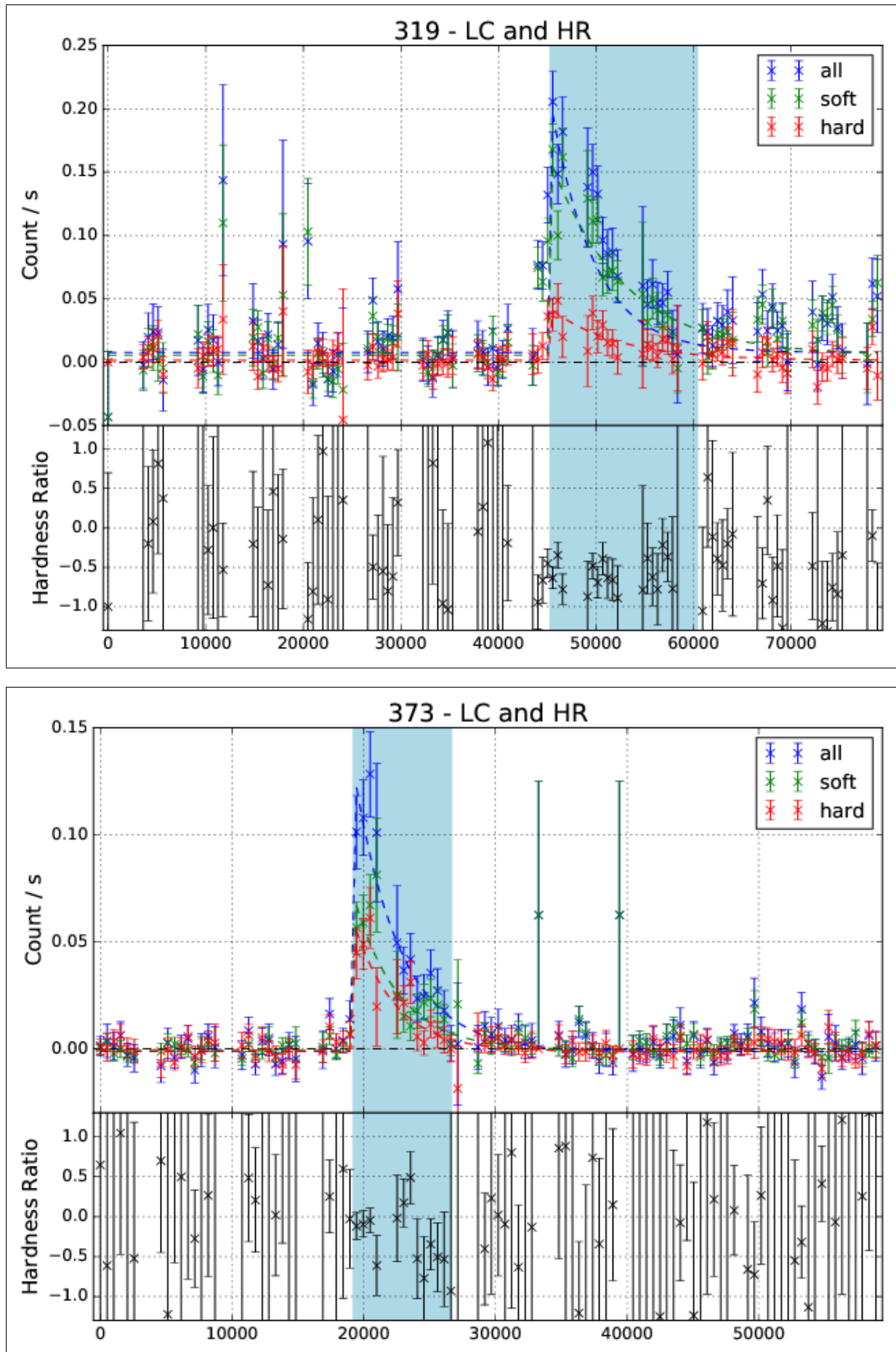


図 4.1: 続き。

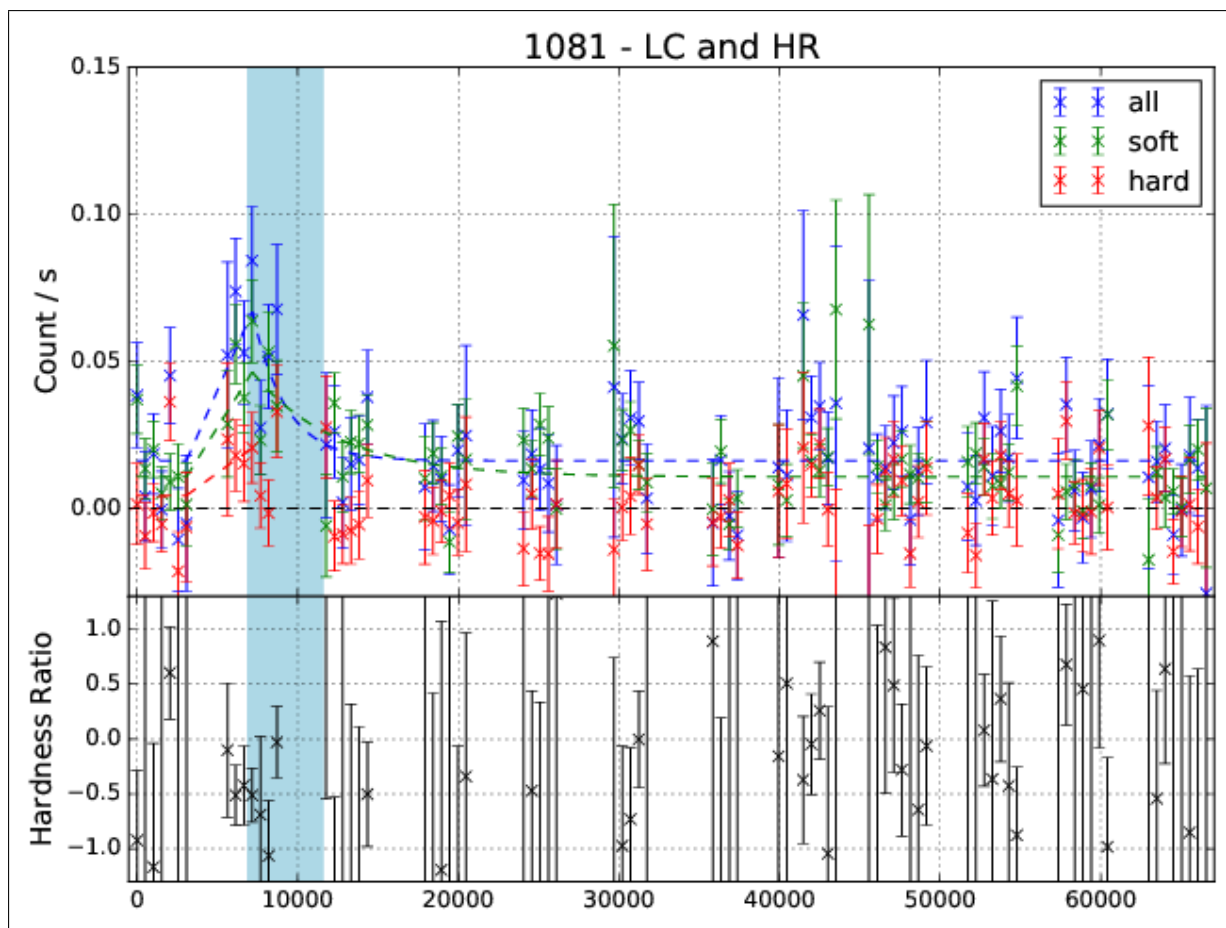
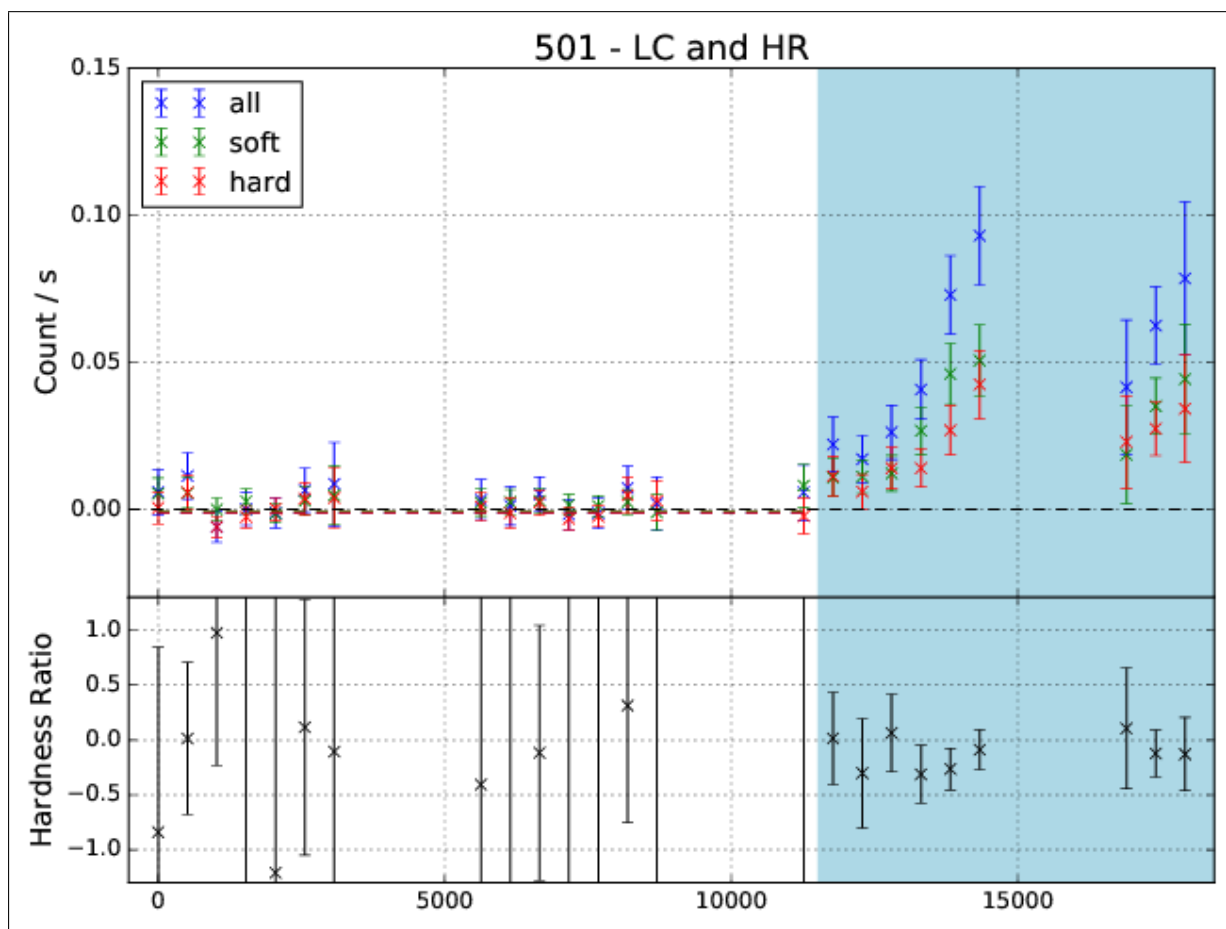


図 4.1: 続き。

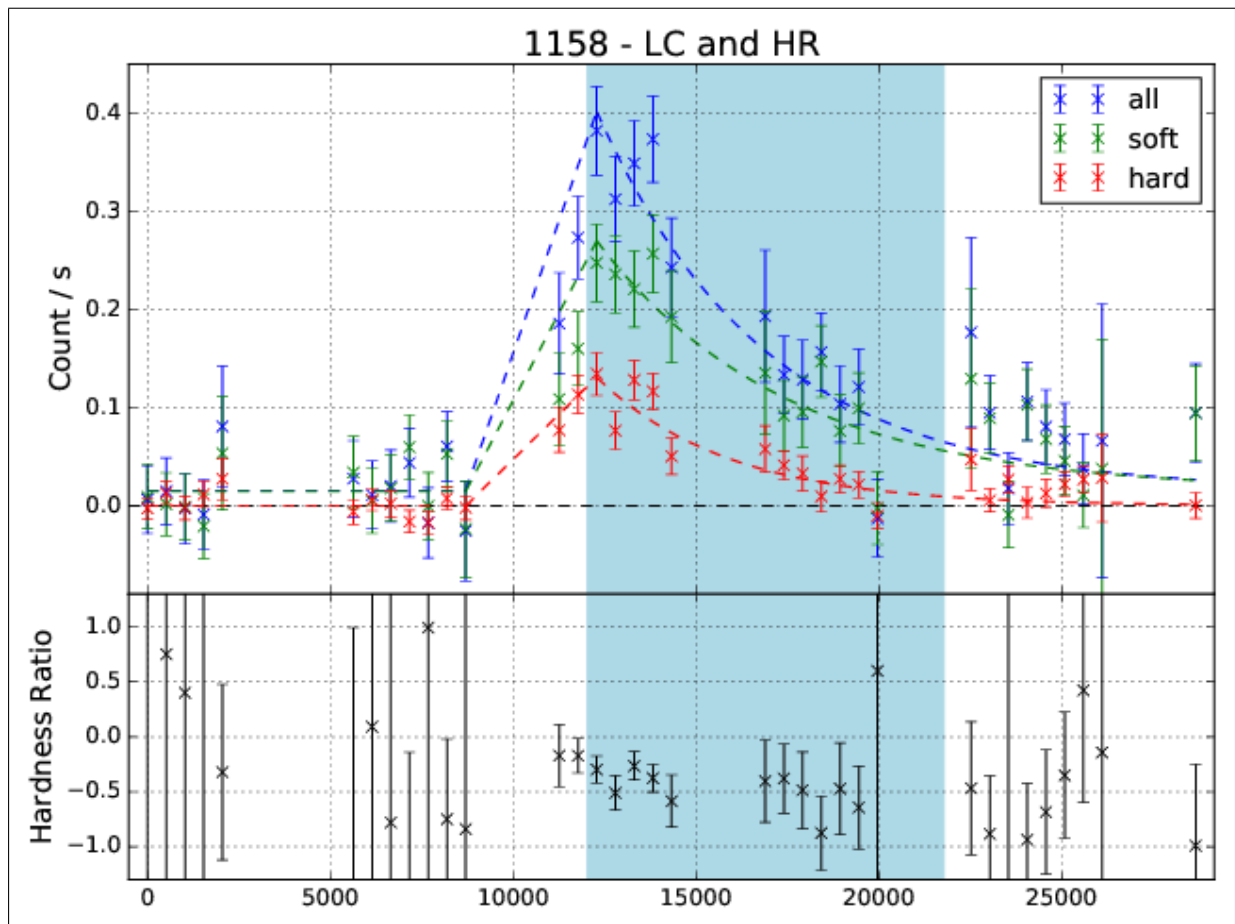
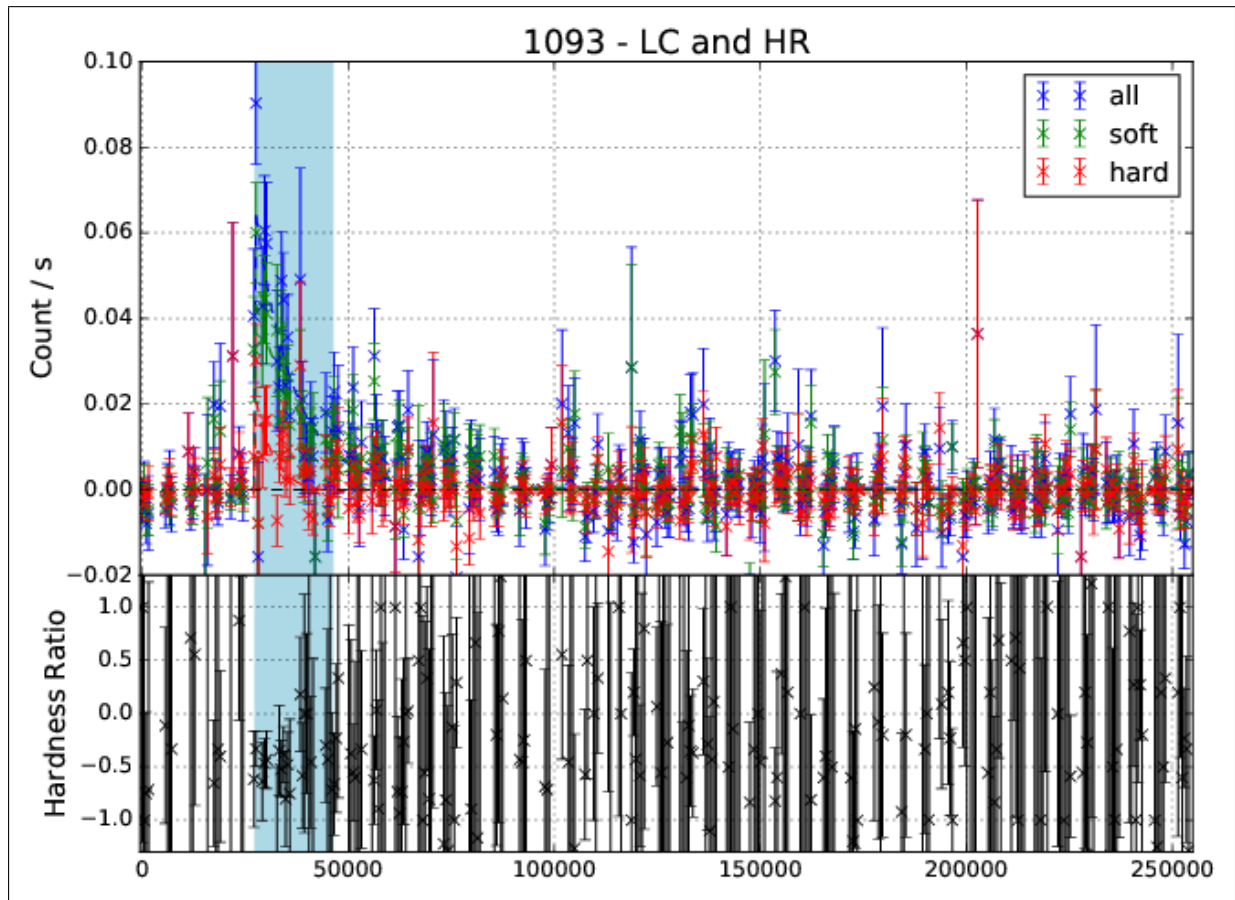


図 4.1: 続き。



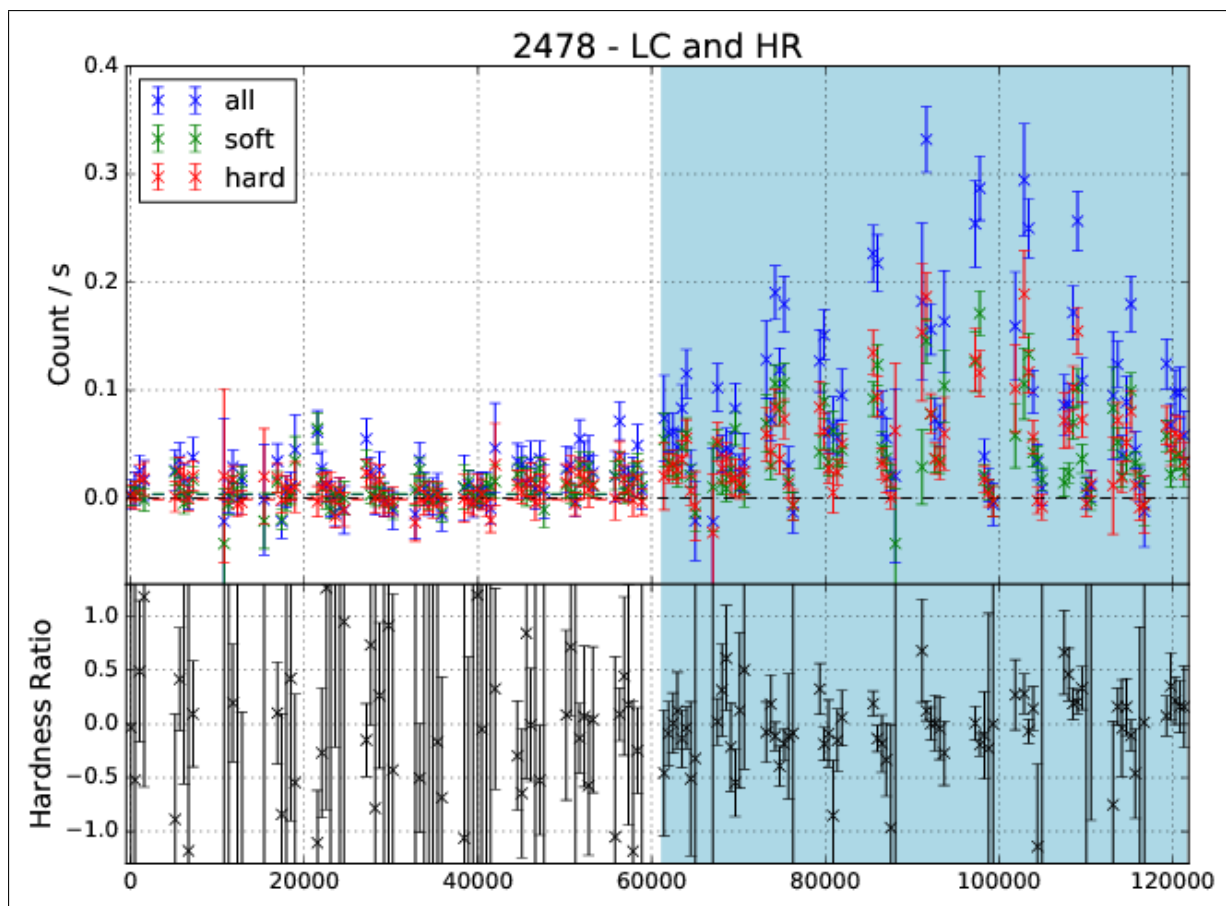
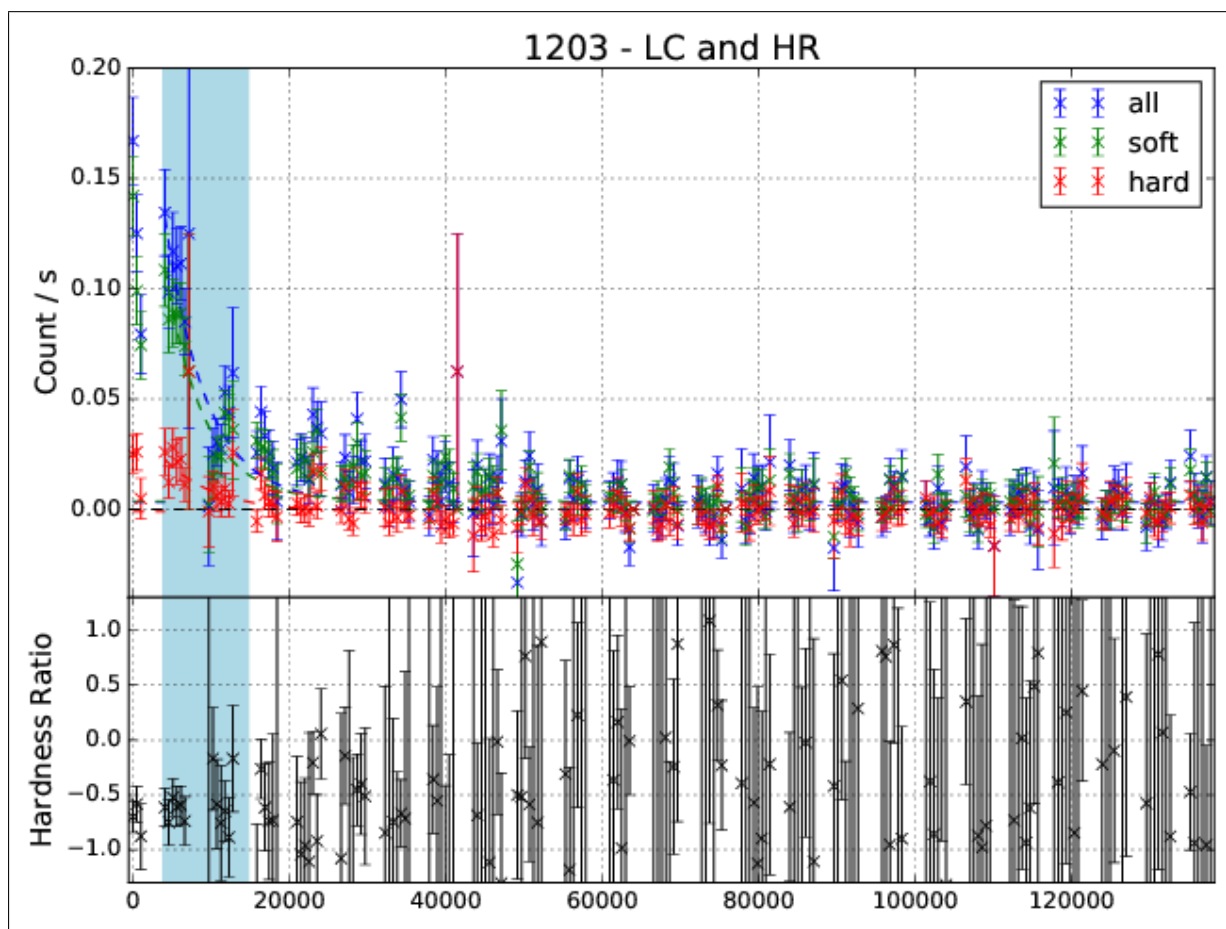


図 4.1: 続き。

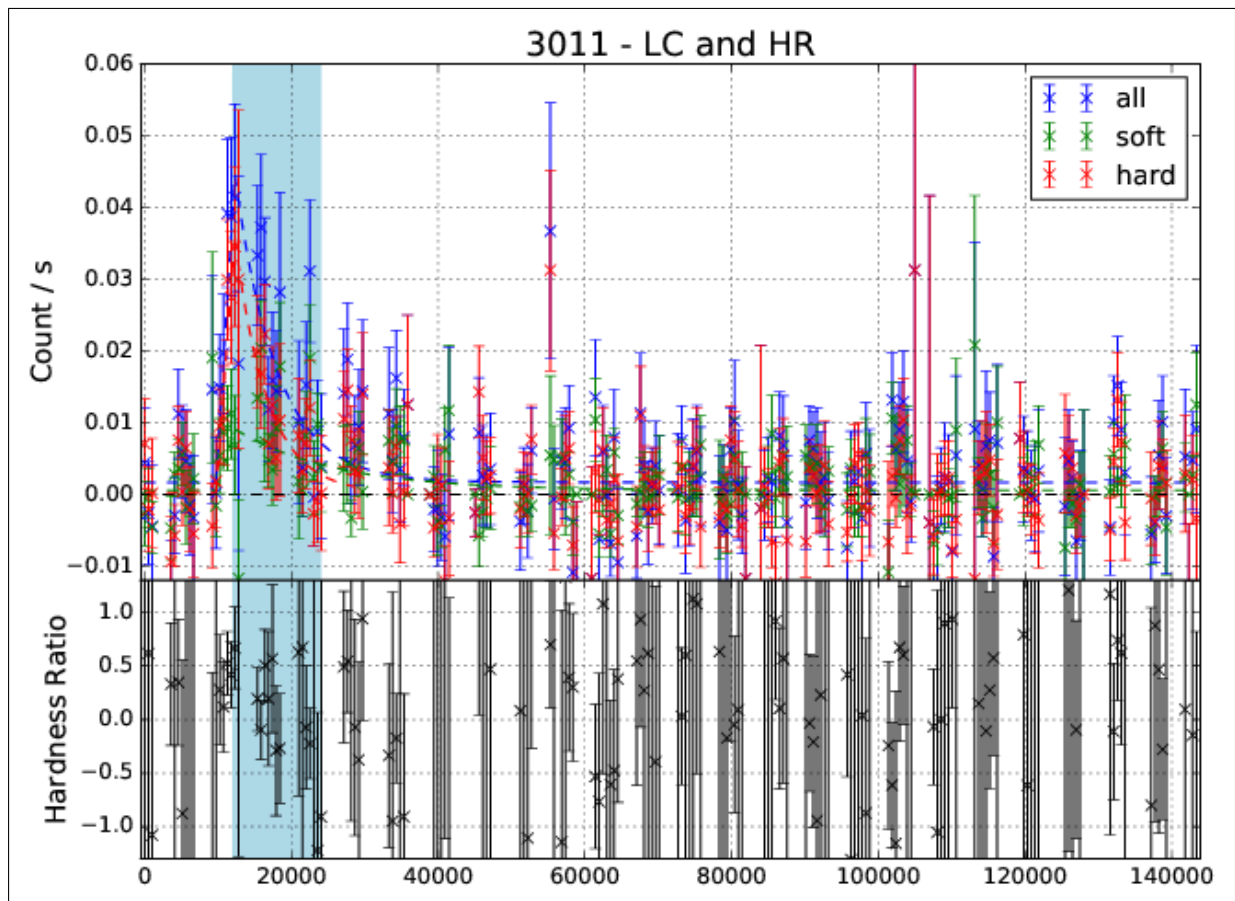
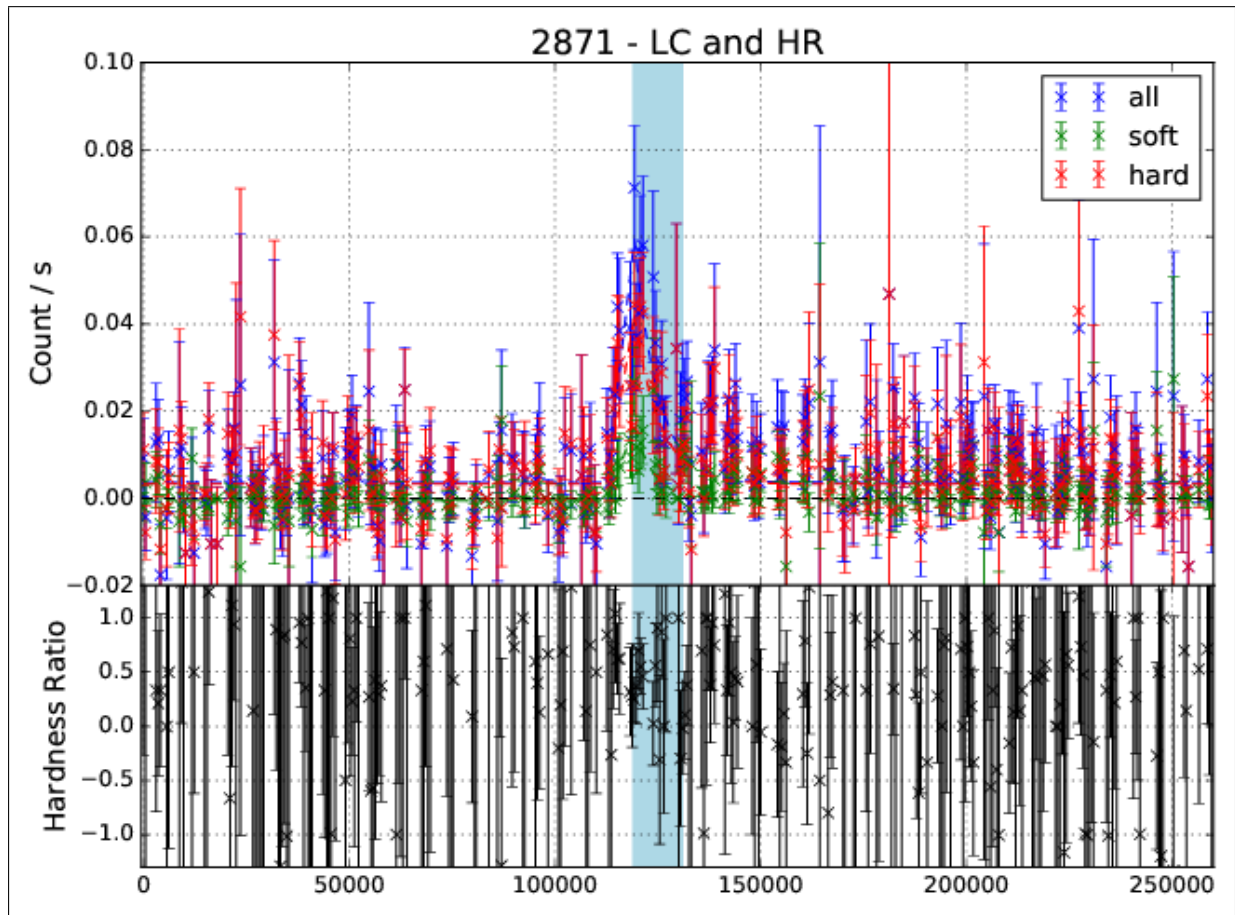


図 4.1: 続き。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_i} \right)^2 \quad (4.2)$$

本研究では  $n=8$  に設定し、図 4.1 上で示した増光中の時間帯の解析を実行した。その結果、 $2910 \pm 70$ s の周期性が確認できた。ここで  $\chi^2$  は 436 というピーク値を取っている。自由度が 7 の  $\chi^2$  分布において、例えば  $\chi^2=60.9$  のイベントが偶然起きる確率は  $10^{-10}$  である。よって、この周期の存在は間違いなく確からしいと言える。畳み込み周期とそれに対応する  $\chi^2$  を示すピリオドグラムを図 4.2 に示した。

また、同様の解析を soft バンド (0.2–2.0 keV) と hard バンド (2.0–12.0 keV) のライトカーブについて行った結果、同様の周期性の存在が確認できた。周期ごとに畳み込んだエネルギーバンド別のライトカーブと Hardness Ratio を図 4.3 に示した。この図からは hard バンドの変動幅が soft バンドの変動幅に比べて大きいことが確認できる。

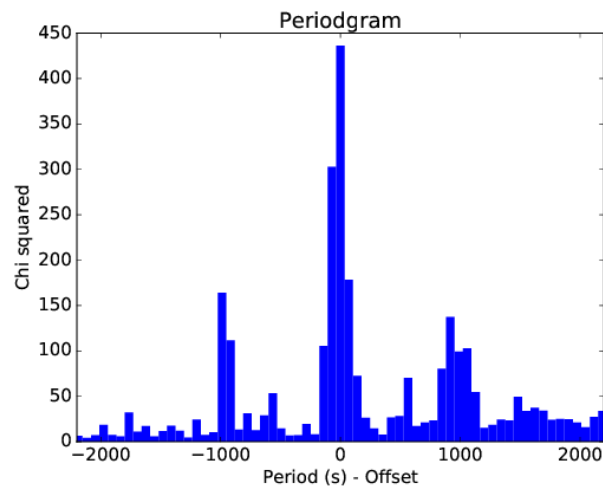


図 4.2: #2478 ピリオドグラム。横軸は 2910 秒からのオフセット (s)、縦軸はこの秒数で畳み込みライトカーブを作成した際の  $\chi^2$  の値。

#### 4.1.3 増光時のスペクトルフィッティング

#2478 については XIS0, 1, 2, 3 を、それ以外の天体については XIS0, 2, 3 のデータを用い、表面照射型 CCD(XIS0, XIS2, XIS3) と裏面照射型 CCD(XIS1) に分けてスペクトルを作成した。この

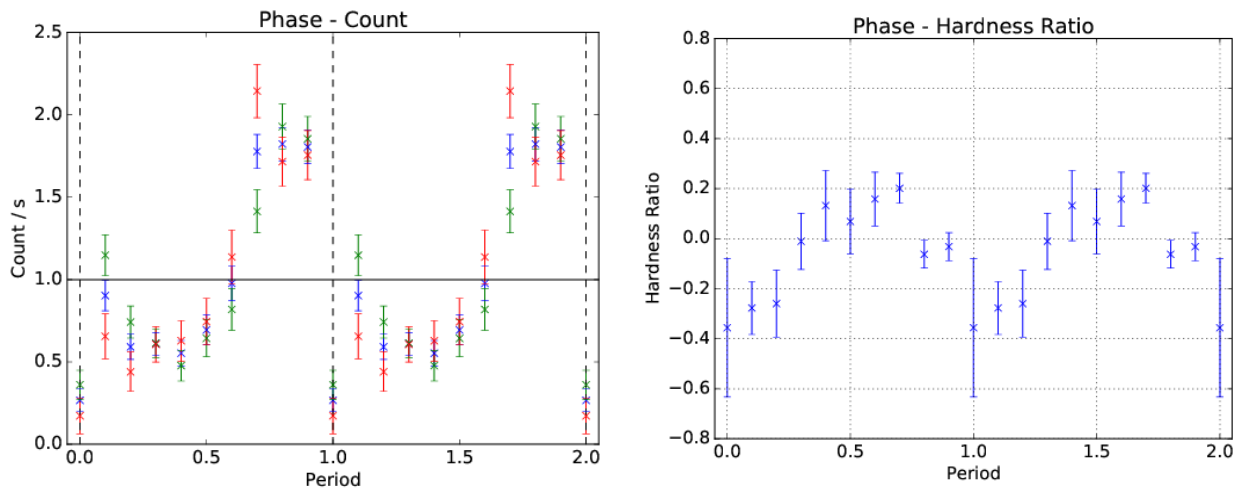


図 4.3: #2478 畳み込みライトカーブと畳み込み Hardness Ratio。ライトカーブにおいては、エネルギーバンド別に all を青、soft を緑、hard を赤でプロットした。

際、増光中の時間帯 (図 4.1 参照) を用いた。さらに、それらに対して `xspec`<sup>2</sup> を用いてモデルフィットを行った。エラーは 90% である。

フィットの対象は 0.2–12.0 keV として、「`cflux*tbabs*powerlaw`」および「`cflux*tbabs*apec`」の 2 種類の組み合わせで行った。(表 4.2 参照)。tbabs モデル (The Tuebingen-Boulder ISM absorption model)<sup>3</sup> は、星間物質による光電吸収を計算するもので、星間元素組成は wilm モデル (Wilms et al. 2000) を用いた。これらのデータを表 4.3、表 4.4 にまとめ、powerlaw を用いたフィッティング結果を図 4.4 に、apec を用いたフィッティング結果を図 4.5 に示した。

モデル名	説明
cflux	他のモデルと組み合わせでフラックスを計算する
tbabs	天体までの水素柱密度を計算する
powerlaw	冪関数 ( $\propto E^{-\alpha}$ )
apec <sup>4</sup>	熱的プラズマから放射されるスペクトルを計算する

表 4.2: スペクトルフィッティングに用いたモデル

<sup>2</sup><https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec>, (2018.01.26 アクセス)

<sup>3</sup><https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual/node251.html>, (2018.01.26 アクセス)

<sup>4</sup><http://www.atomdb.org>, (2018.01.26 アクセス)

天体番号	Flux ( $\log \text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	nH ( $10^{22} \text{cm}^{-2}$ )	Photon Index	Reduced $\chi^2$ (d.o.f.)
61	$-12.01 \pm 0.02$	$0.40 \pm 0.05$	$3.9 \pm 0.2$	1.84 (131)
319	$-12.22 \pm 0.04$	$0.17 \pm 0.06$	$2.8 \pm 0.2$	1.48 (51)
373	$-11.96 \pm 0.09$	$0.1 \pm 0.2$	$1.7 \pm 0.3$	0.895 (14)
501	$-12.12 \pm 0.08$	$0.9 \pm 0.6$	$2.5 \pm 0.5$	0.437 (5)
1081	$-12.4 \pm 0.2$	$0.3 \pm 0.6$	$2.6 \pm 0.8$	1.17 (5)
1093	$-12.28 \pm 0.06$	$0.04 \pm 0.04$	$2.3 \pm 0.2$	1.23 (13)
1158	$-11.68 \pm 0.07$	$0.02 \pm 0.03$	$2.0 \pm 0.1$	0.972 (134)
1203	$-11.99 \pm 0.05$	$0.13 \pm 0.06$	$2.7 \pm 0.2$	1.04 (21)
2478	$-12.19 \pm 0.03$	$0.14 \pm 0.06$	$1.44 \pm 0.09$	0.873 (226)
2871	$-12.01 \pm 0.07$	$1 \pm 1$	$1.5 \pm 0.5$	0.416 (10)
3011	$-12.3 \pm 0.1$	$1 \pm 1$	$1.7 \pm 0.7$	1.32 (4)

表 4.3: cflux, TBabs, Powerlaw によるスペクトルフィッティング結果。エラーは 90%である。Flux は X 線のフラックス、nH は水素柱密度である。

天体番号	Flux ( $\log \text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	nH ( $10^{22} \text{cm}^{-2}$ )	kT (keV)	Reduced $\chi^2$ (d.o.f.)
61	$-12.13 \pm 0.01$	$0.64 \pm 0.06$	$0.95 \pm 0.03$	2.21 (131)
319	$-12.45 \pm 0.02$	$0.9 \pm 0.1$	$0.92 \pm 0.06$	2.31 (51)
373	$-11.95 \pm 0.19$	$< 0.2$	$7 \pm 4$	0.881 (14)
501	$-12.14 \pm 0.09$	$0.5 \pm 0.5$	$3 \pm 1$	0.638 (5)
1081	$-12.5 \pm 0.1$	$0.5 \pm 0.8$	$2 \pm 1$	1.05 (5)
1093	$-12.61 \pm 0.03$	$1.1 \pm 0.2$	$0.9 \pm 0.1$	2.41 (13)
1158	$-11.77 \pm 0.08$	$< 0.05$	$3.4 \pm 0.3$	0.944 (134)
1203	$-12.25 \pm 0.03$	$1.1 \pm 0.1$	$0.91 \pm 0.09$	2.67 (21)
2478	$-12.19 \pm 0.03$	$0.08 \pm 0.05$	$25 \pm 11$	0.877 (226)
2871	$-12.05 \pm 0.08$	$1 \pm 1$	$10 \pm 10$	0.402 (10)
3011	$-12.3 \pm 0.1$	$1 \pm 1$	$6 \pm 6$	1.21 (4)

表 4.4: cflux, TBabs, apec によるスペクトルフィッティングの結果。エラーは 90%である。Flux と nH については表 4.3 と同じであり、kT はプラズマの温度である。

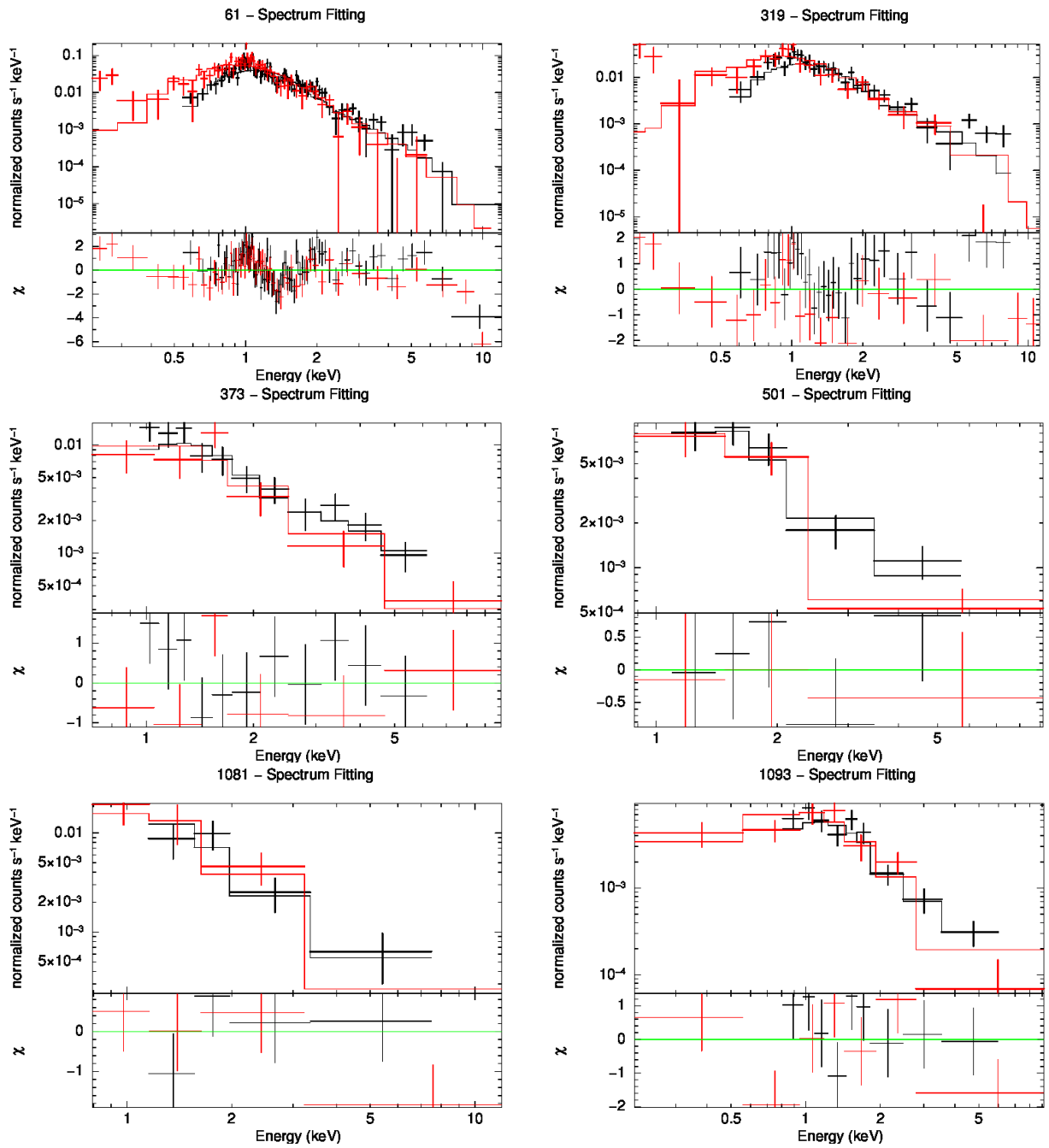


図 4.4: cflux, TBabs, Powerlaw によるスペクトルフィッティング結果。エラーは 90%である。前面照射型 CCD のデータは黒色で、背面照射型 CCD のデータは赤色で示した。

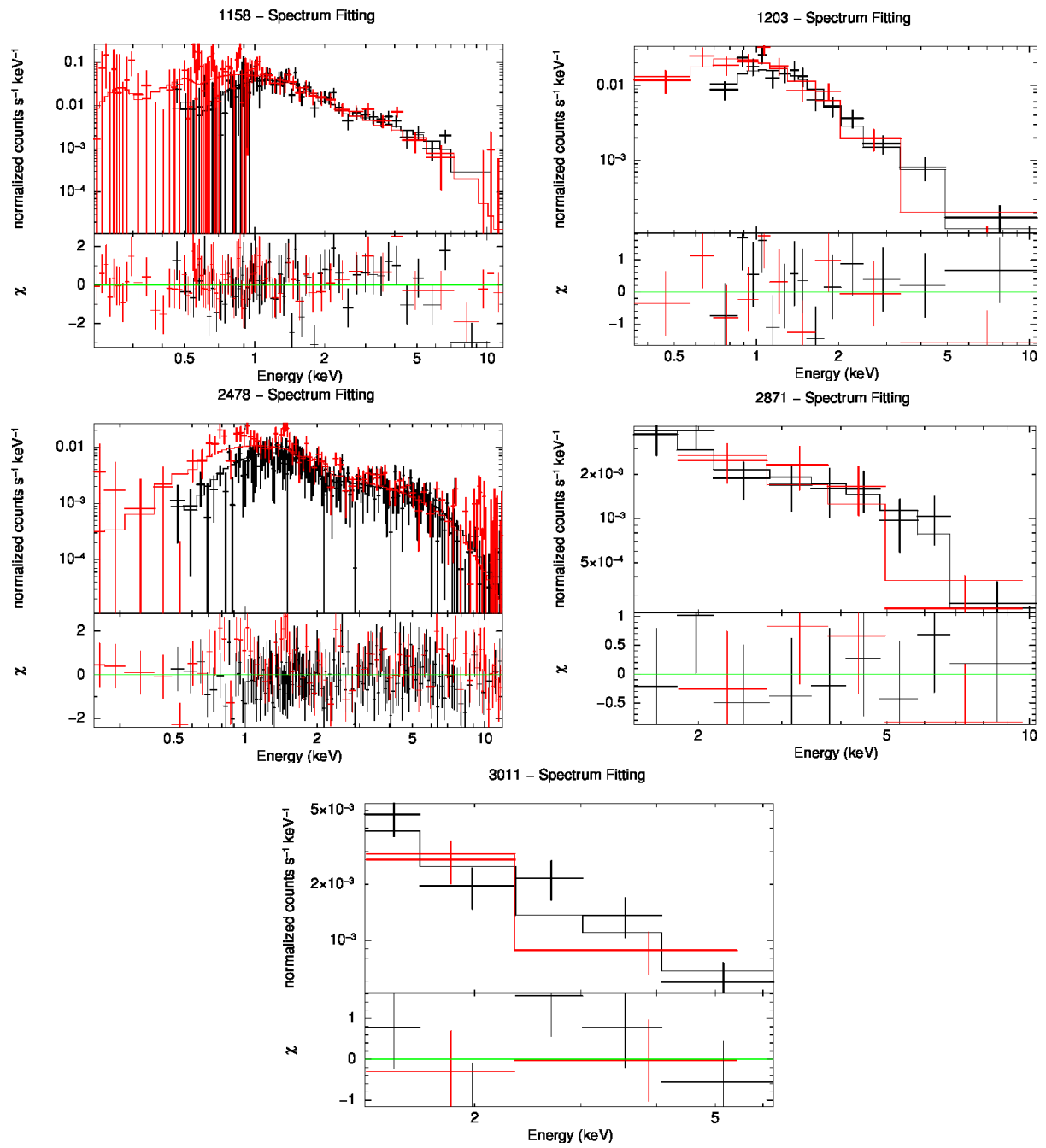


図 4.4: 続き。

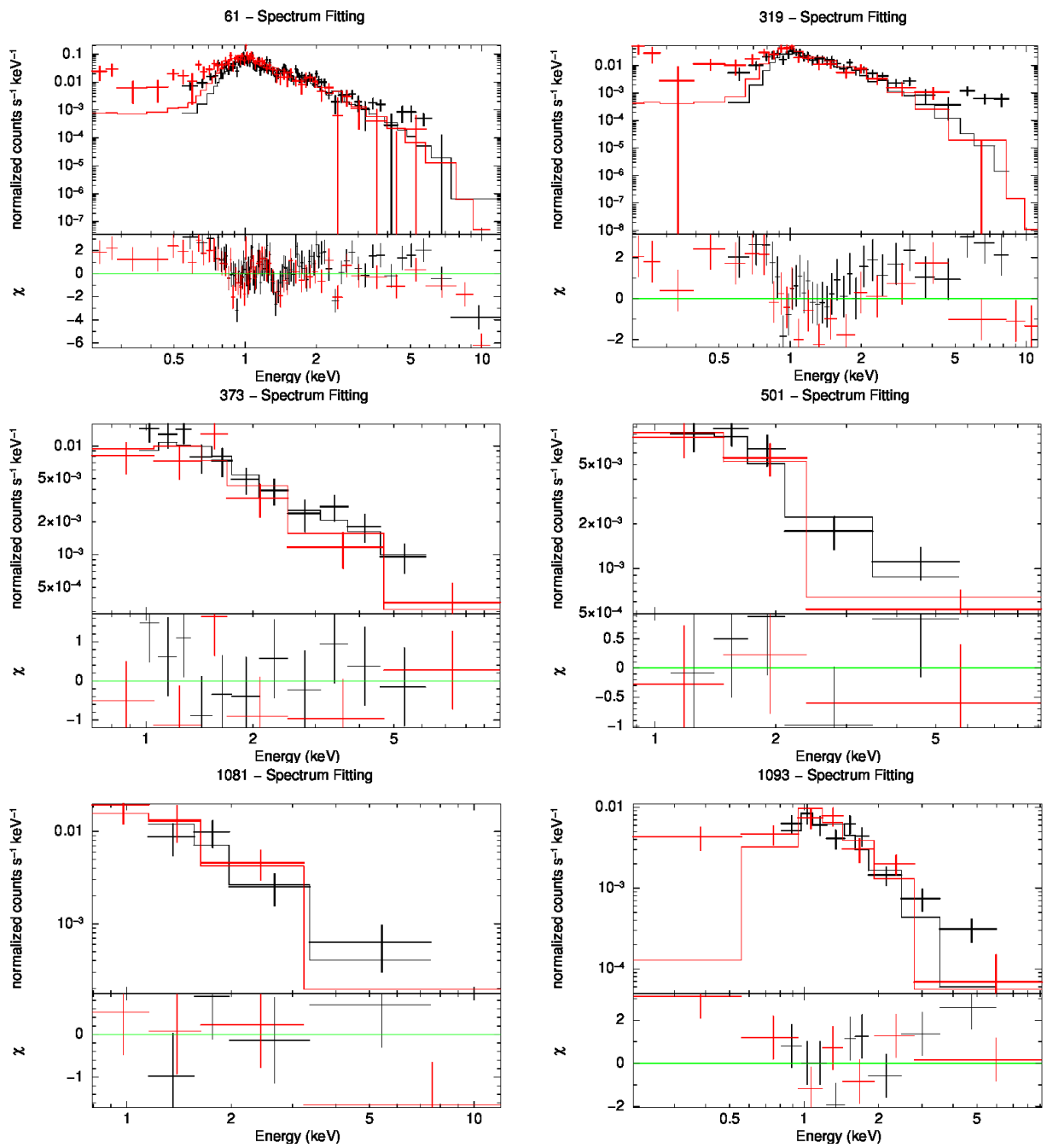


図 4.5: cflux, TBabs, apec によるスペクトルフィッティングの結果。エラーは 90%である。前面照射型 CCD のデータは黒色で、背面照射型 CCD のデータは黒色で示した。



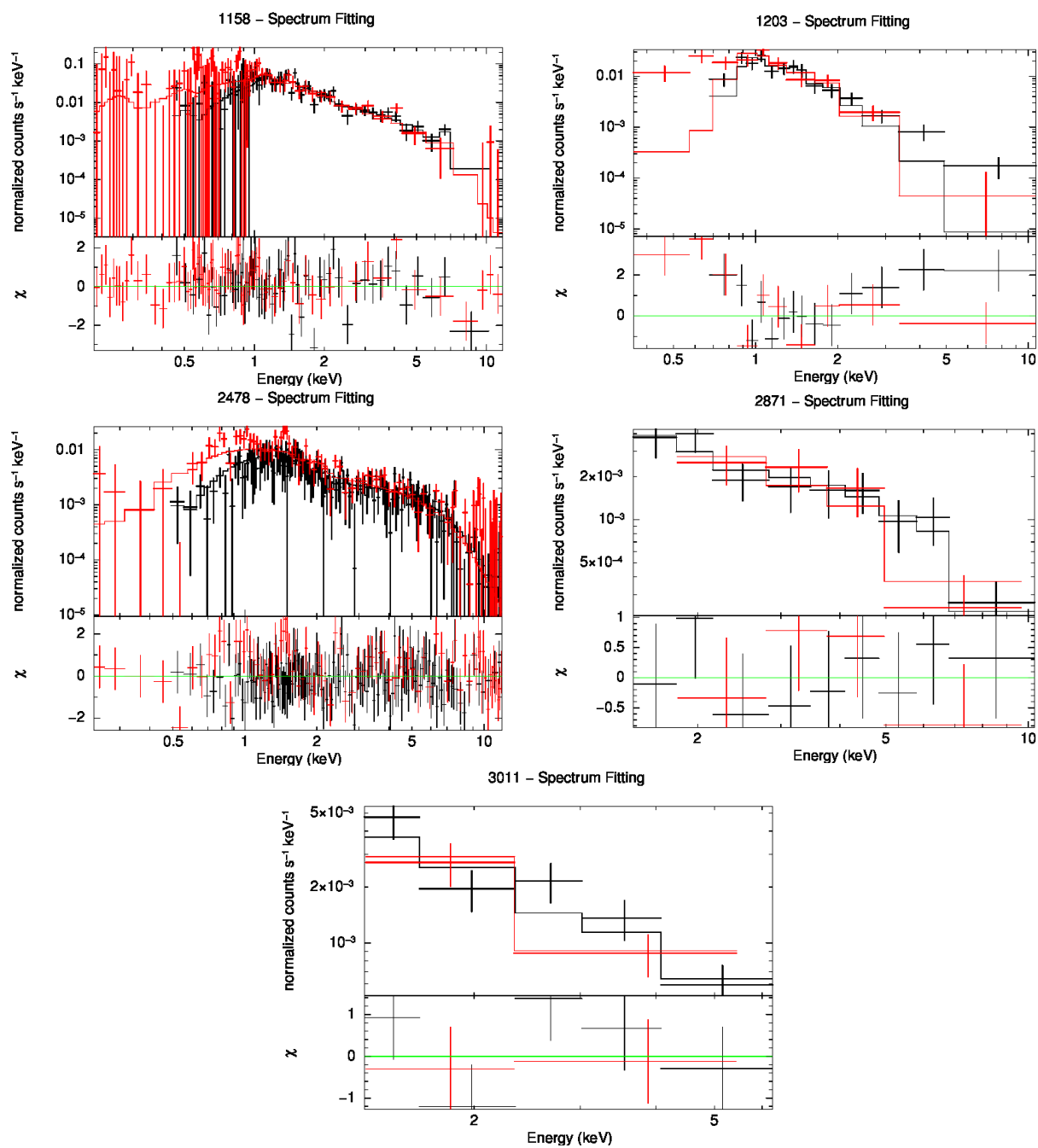


図 4.5: 続き。

#### 4.1.4 定常時のフラックス計算

11 天体に対して増光を起こしていない定常時のスペクトルを作成し、このデータをもとにフラックスを計算した。

#61 においては、ある程度のイベントが得られ、ソフトなスペクトルが確認できた。tbabs\*apec のモデルによるスペクトルフィッティングを行ったところ、温度は 0.83 keV、水素柱密度は  $3.4 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$  のモデルで表されるという結果が得られ、これを用いて 0.2–10 keV フラックスを計算した。

他の 10 天体については、非常に暗い、またはバックグラウンドが高いため、スペクトルモデルを制限することが難しいので、水素柱密度が  $10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 、Photon Index が 2 の tbabs\*powerlaw モデルを仮定した。このモデルを全天体に当てはめ、単位時間あたりのカウントから平均的なレスポンスを仮定して、フラックスの値を計算した。この際にエラーに当たるものとしてスペクトル抽出領域のバックグラウンドを用いた。ただし、天体のフラックスよりもバックグラウンドが大きい場合には、バックグラウンドの 3 倍をフラックスの上限値とした。その結果を表 4.5 に示した。

天体番号	Flux ( $\text{erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
61	$1.86 \pm 0.09 \times 10^{-13}$
319	$4 \pm 20 \times 10^{-13}$
373	$< 2 \times 10^{-11}$
501	$2 \pm 10 \times 10^{-13}$
1081	$< 1 \times 10^{-11}$
1093	$< 2 \times 10^{-11}$
1158	$4 \pm 60 \times 10^{-13}$
1203	$3 \pm 50 \times 10^{-13}$
2478	$4 \pm 10 \times 10^{-13}$
2871	$< 3 \times 10^{-11}$
3011	$< 2 \times 10^{-11}$

表 4.5: すざくによる定常時フラックス (0.2–10 keV)

## 4.2 Swift

### 4.2.1 XRT イメージでの座標検出

XRTによる観測データを解析したところ、#501のみ「すざく」のエラーサークル内に十分なイベントが存在した。座標検出ツール `xetcentroid`<sup>5</sup> で天体座標の重心検出を行ない座標計算を行ったところ、この天体の座標は (RA,Dec) = (48.6164, 40.8186) でエラーは 4".8 であった。すざく天体からの距離は 6".8 である。

また#2478については、すざくエラーサークルから外れるが、すざく天体から約 30" の位置に十分なイベントが存在した。同ツールで解析したところ、この天体の座標は (RA,Dec) = (243.8672, 59.2334) でエラーは 4".8 であった。すざく天体からの距離は 33".0 である。

### 4.2.2 XRT データのフラックス計算

XRTの観測データを用いて11天体のスペクトルを作成しこのデータをもとにフラックスを計算した。

ここでは11天体全てについて、水素柱密度が  $10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 、Photon Index が 2 の `tbabs*powerlaw` モデルを仮定し、すざくの定常時フラックス計算と同様の解析を行った。その結果を表 4.6 に示した。これは、表 4.5 に示したすざくのデータを用いて計算した定常時のフラックスと矛盾はない。すなわち、Swift XRT はこれら 11 天体の定常時を観測したと言える。すざくでは有意に検出できなかった #501, #2478 を XRT で検出できたのは、XRT のほうが感度が高いからである。

## 4.3 なゆた

### 4.3.1 スペクトル解析

なゆたによる#501の分光観測で得られたスペクトル(図 4.6)は以下のような特徴を有した。

- ・ Na (5176Å), Mg (5896Å) の吸収線が顕著に見られる
- ・ H $\alpha$  (6563Å) の吸収線が弱くほとんど見られない

---

<sup>5</sup><https://heasarc.gsfc.nasa.gov/ftools/caldb/help/xrtcentroid.html>, (2018.01.26 アクセス)

天体番号	Flux ( $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
61	$1.64 \pm 0.06 \times 10^{-13}$
319	$7.6 \pm 0.9 \times 10^{-14}$
373	$1.9 \pm 0.7 \times 10^{-14}$
501	$1.8 \pm 0.2 \times 10^{-13}$
1081	$1.23 \pm 0.09 \times 10^{-13}$
1093	$2.5 \pm 0.9 \times 10^{-13}$
1158	$2 \pm 10 \times 10^{-13}$
1203	$< 4 \times 10^{-14}$
2478	$1.6 \pm 0.8 \times 10^{-13}$
2871	$< 7 \times 10^{-14}$
3011	$< 4 \times 10^{-14}$

表 4.6: XRT データのフラックス

- ・分子吸収線 (TiO) が見られない

これらの特徴は、この天体が早期 K 型付近の主系列星であることと矛盾しない。比較用の K1.5 アークトゥルスのスペクトル<sup>6</sup>と比べると、似通った特徴を示していることが見て取れる。

#### 4.4 イメージ比較

全 11 の新天体について、「すざく」・Swift XRT・Swift UVOT で得られた観測データ、ならびに 2MASS、DSS、SDSS のデータからイメージを作成して比較した (図 4.7)。各イメージ中に示した、緑のクロスはすざく天体の中心位置を示し、円は半径  $26''$  である (すざくの 90% エラー)。上段左はすざく XIS (0.2–12.0 keV) のイメージであり、増光している時間帯 (図 4.1 参照) のみを抜き出した。上段中は Swift XRT (0.2–10.0 keV) イメージであり、座標検出を行なった #501 と #2478 のみ座標を赤のクロスで示した。上段右は Swift UVOT のイメージであり、Swift の観測が複数回ある場合はそれらを重ね合わせた (UVOT のフィルターの違いは無視した)。下段左は 2MASS のイメージである。下段中は DSS のイメージである。下段右は SDSS のイメージであり、観測データが存在する場合の

<sup>6</sup>[https://www.unitronitalia.com/prodotti/spectroscopic-atlas-3\\_0-english.pdf](https://www.unitronitalia.com/prodotti/spectroscopic-atlas-3_0-english.pdf), (2018.01.22 アクセス)

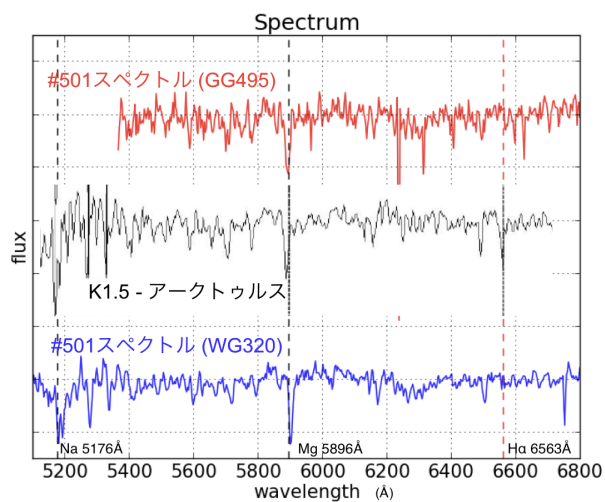
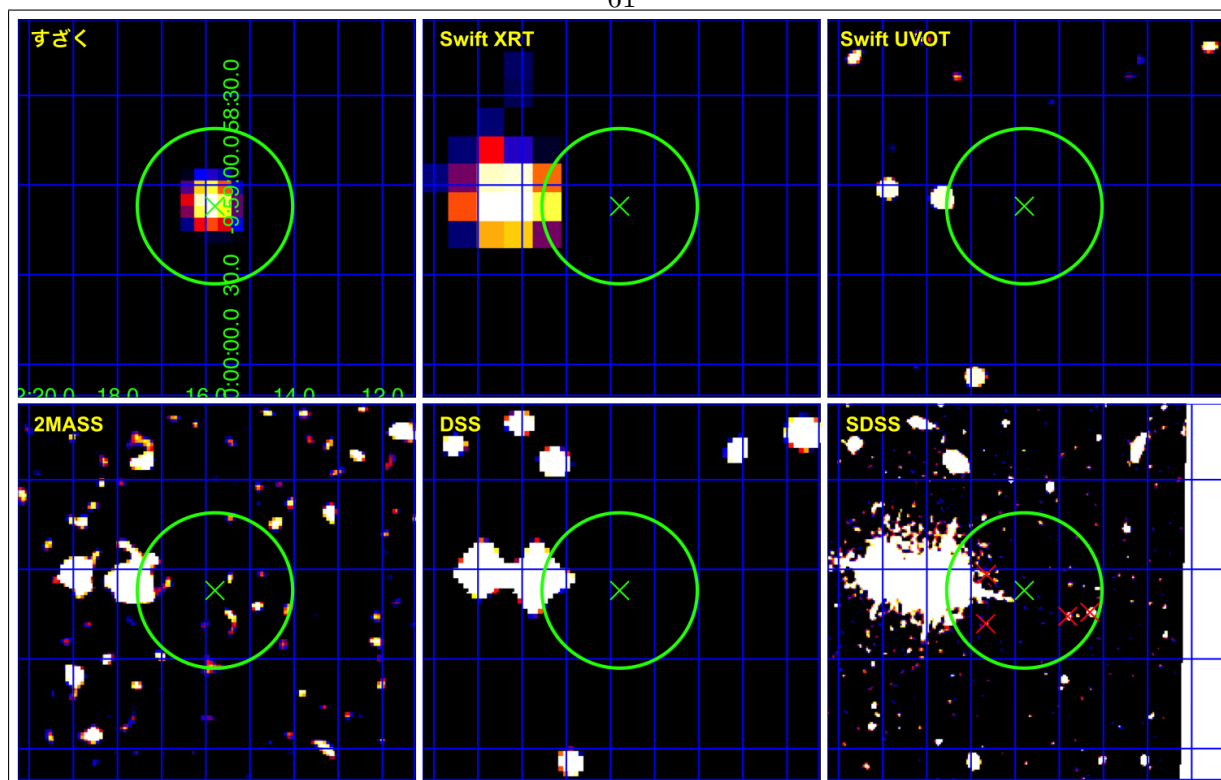


図 4.6: 「なゆた」による#501 の可視光スペクトル

み表示している。2MASS と SDSS のイメージについては、緑の円内においてカタログに記載がある天体を赤のクロスで示した。

61



319

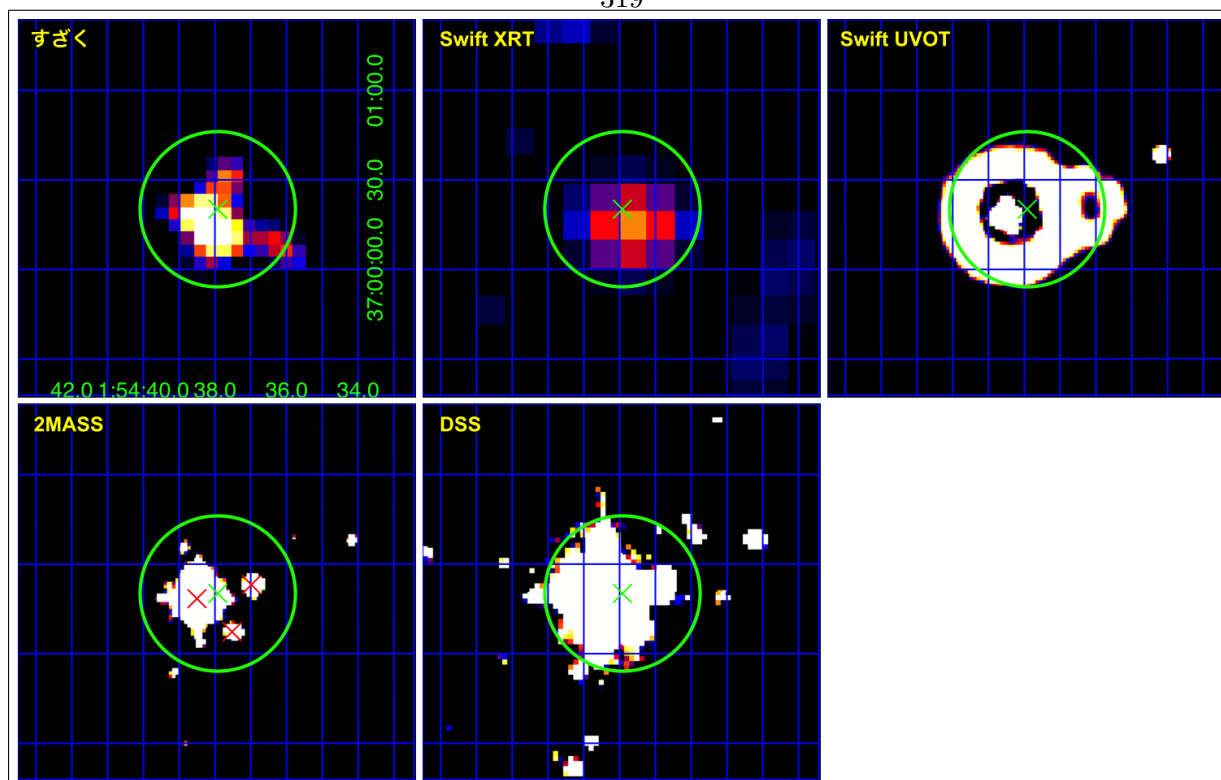
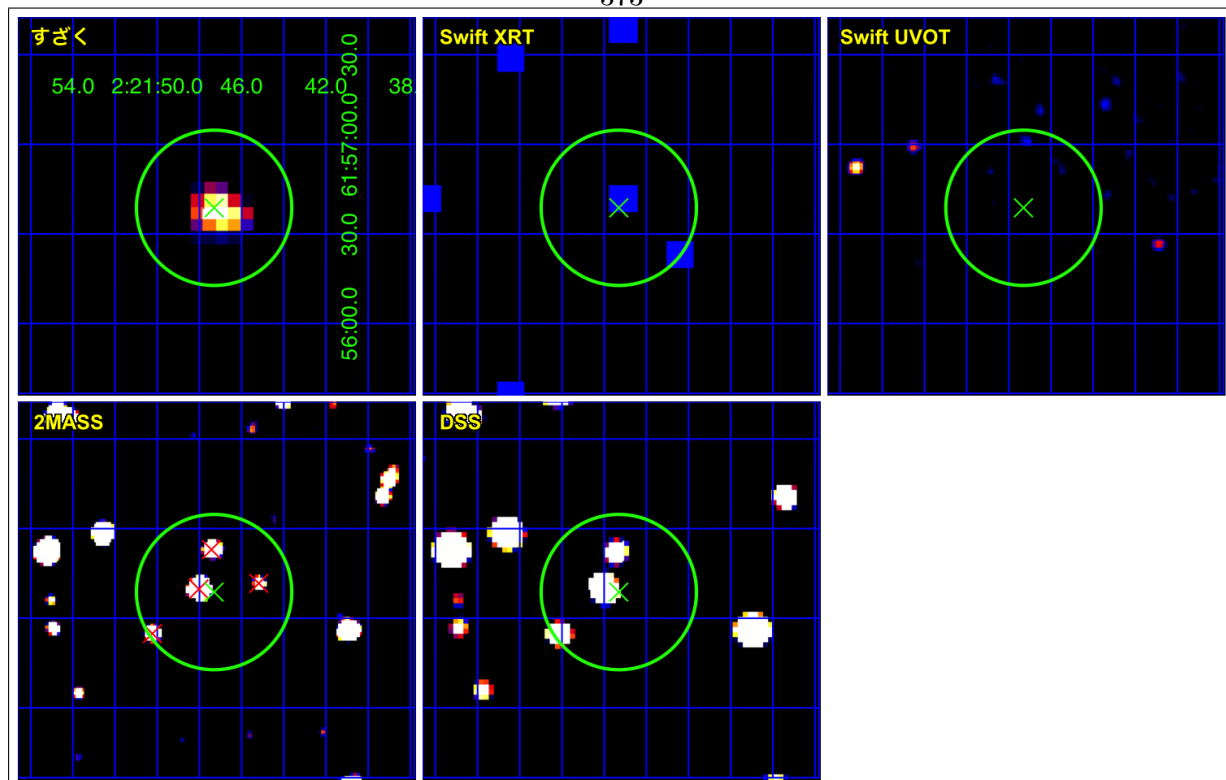


図 4.7: 各天体の多波長観測イメージ比較

373



501

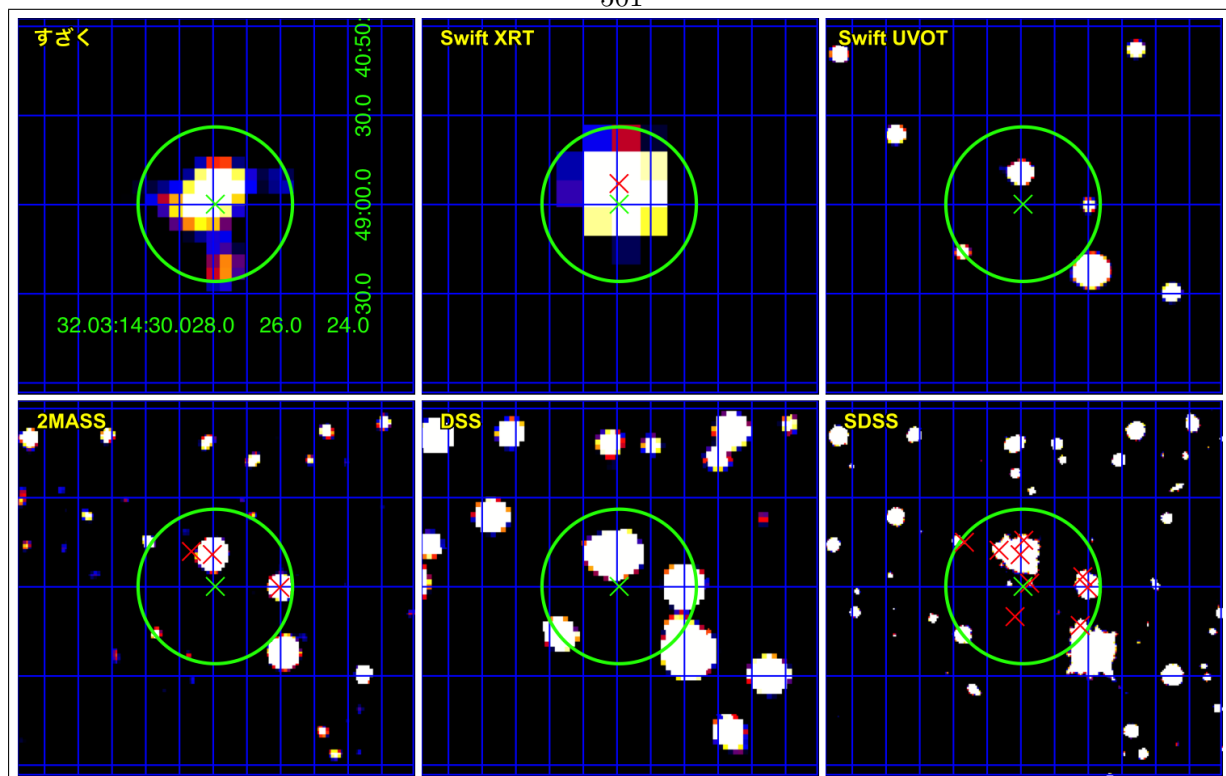
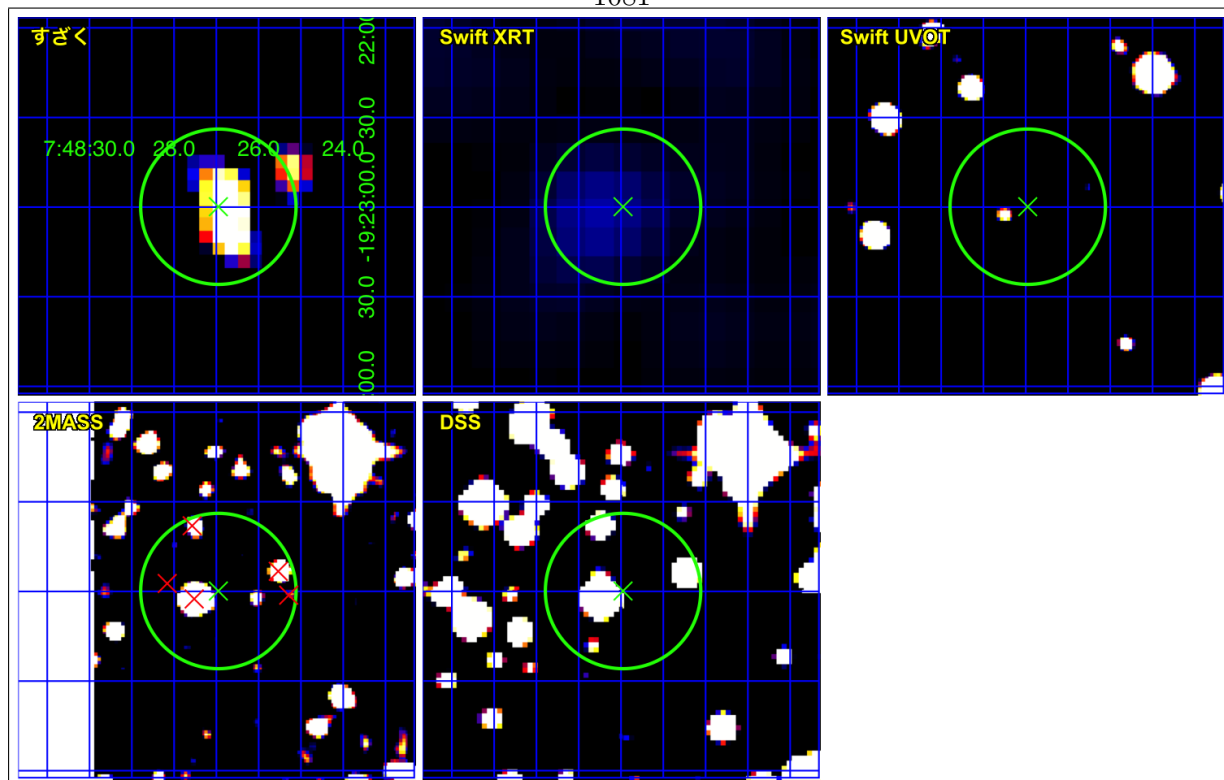


図 4.7: 続き。

1081



1093

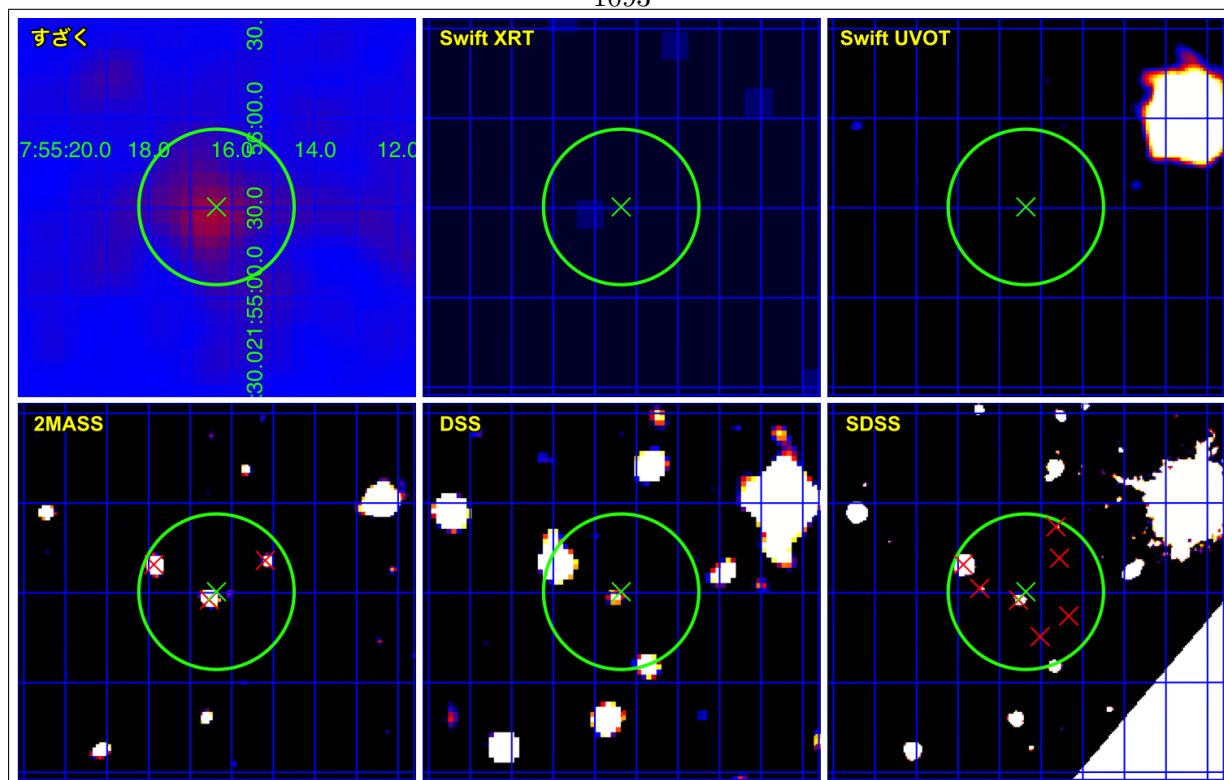
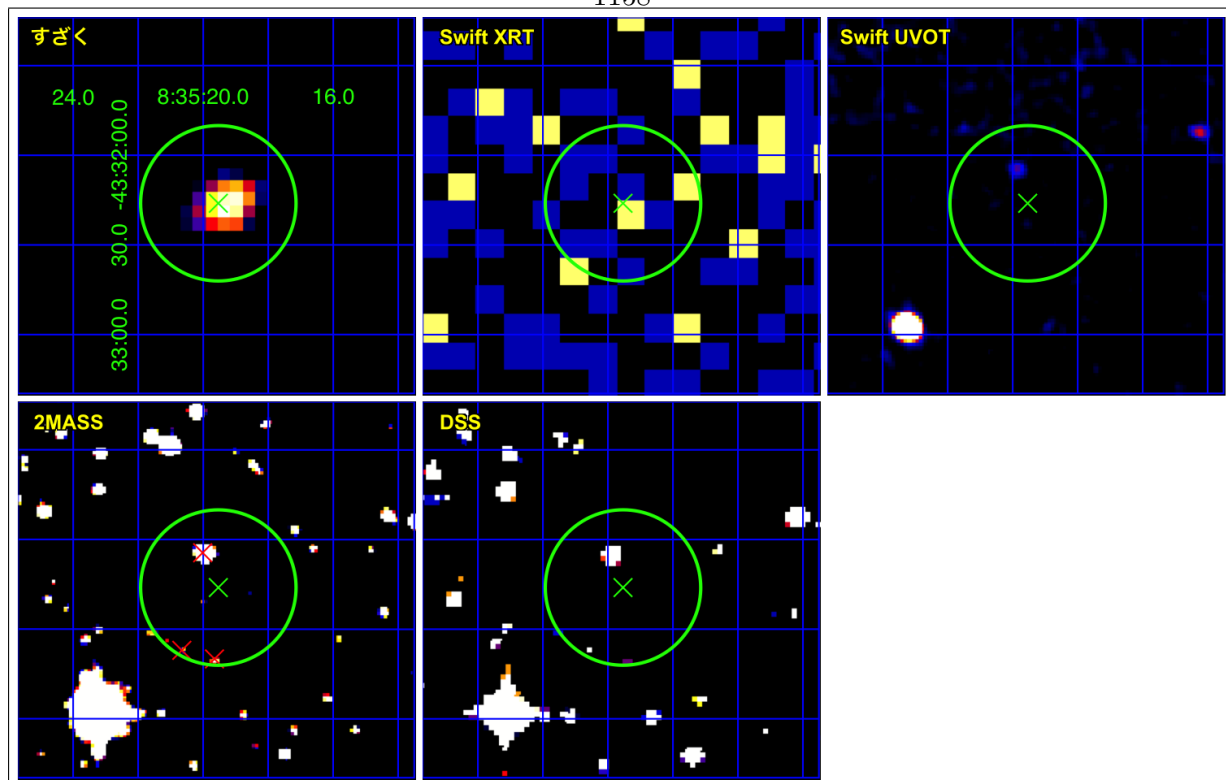


図 4.7: 続き。



1158



1203

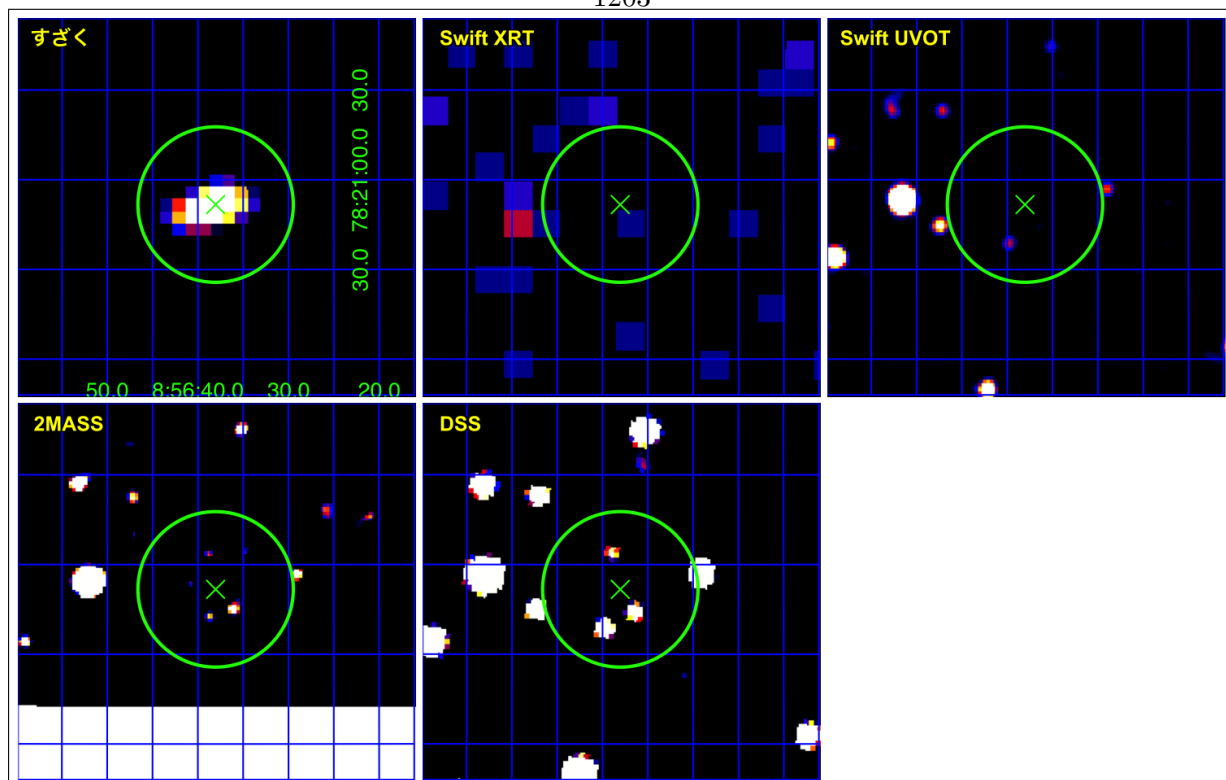
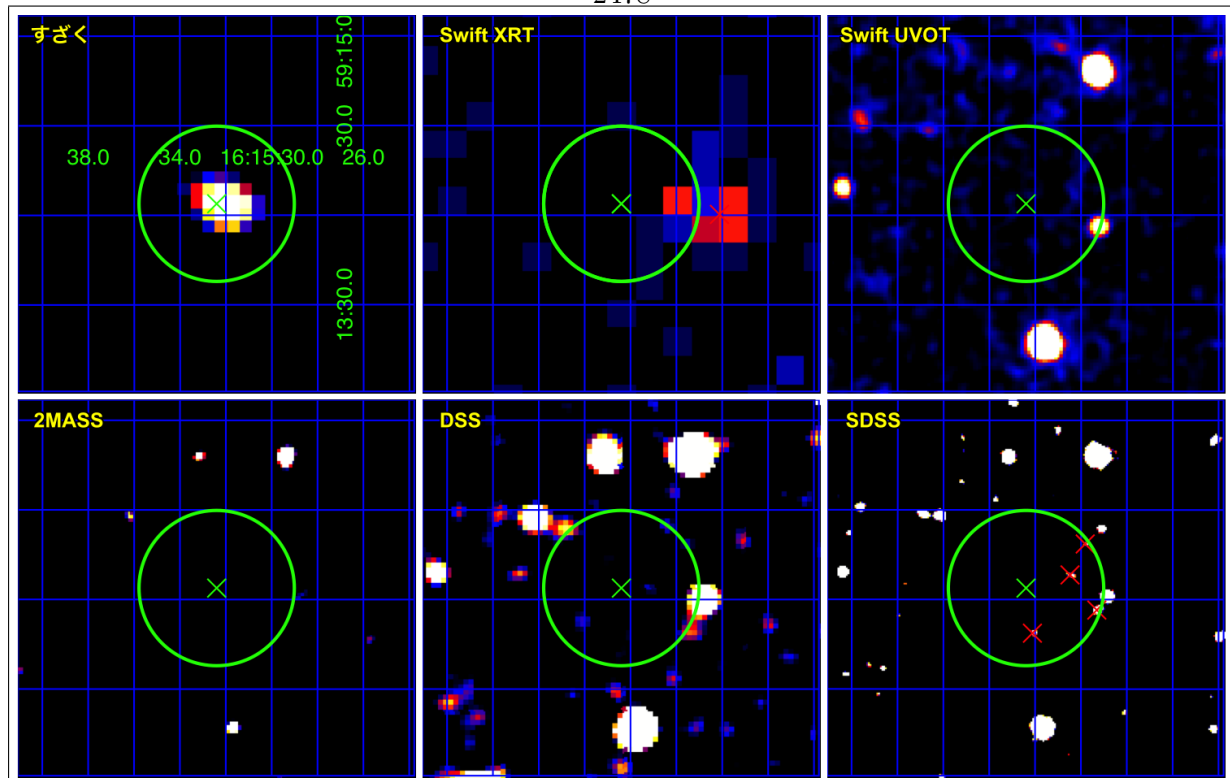


図 4.7: 続き。

2478



2871

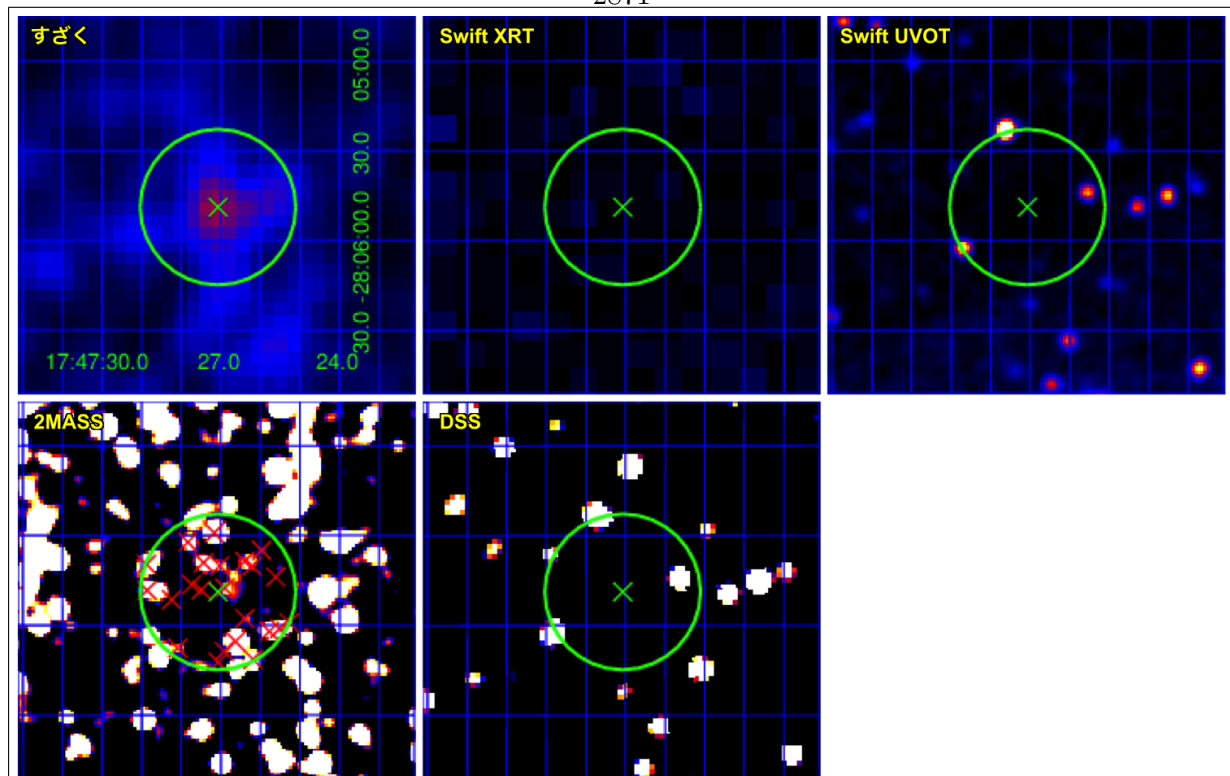


図 4.7: 続き。

3011

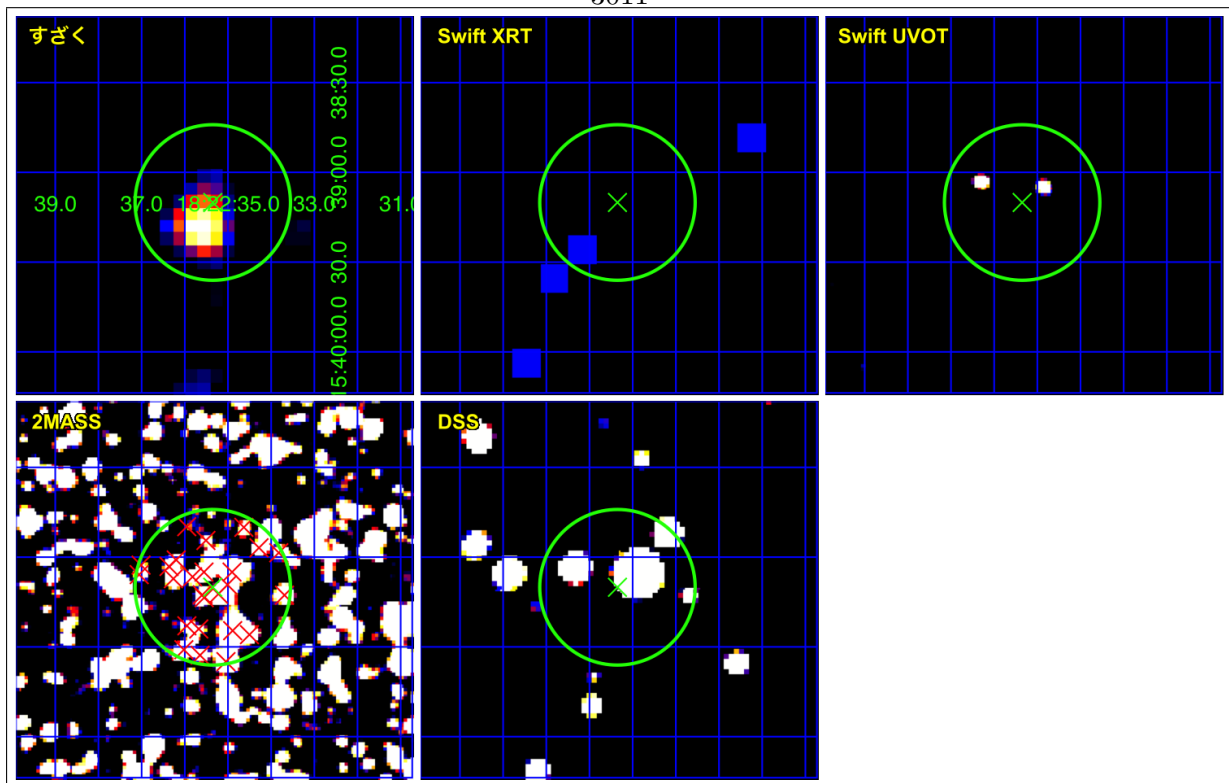


図 4.7: 続き。



## 第5章 議論

### Contents

5.1	2MASS と SSDSS のカタログとの照合	53
5.2	各天体についてのまとめ	62
5.2.1	恒星フレアであると思われる 9 天体について	62
5.2.2	これらの天体と典型的な恒星フレアの比較	65
5.2.3	周期性を示す 1 天体について	67
5.2.4	早期 K 型恒星であると思われる 1 天体について	67

以下では、得られたデータからこれら 11 天体の正体を考察する。

### 5.1 2MASS と SSDSS のカタログとの照合

11 のすざく天体のエラーサークル内にある、SDSS および 2MASS のカタログ天体と SIMBAD による検索で確認できた天体を以下にリストアップし、すざくによる検出位置からの距離を示した。ここでリストアップしたものが、11 天体の可視赤外領域での対応天体候補である。

SDSS							
天体名	distance (arcsec)	Type	u (mag)	g (mag)	r (mag)	i (mag)	z (mag)
J004216.64-095901.6	13.7	star	25±1	24.8±0.7	23.7±0.5	22.4±0.2	22.2±0.8
J004214.80-095915.7	16.9	galaxy	22.2±0.3	22.9±0.2	22.2±0.1	22.5±0.3	21.5±0.6
J004216.66-095918.2	17.1	star	25±1	23.2±0.2	22.8±0.2	22.5±0.3	23.4±0.8
J004214.30-095914.3	23.1	star	25.4±0.9	21.6±0.1	20.9±0.1	20.5±0.1	20.3±0.2

表 5.1: #61 の対応天体候補 (26'' 以内に存在する SDSS カタログ天体)

2MASS				
天体名	distance (arcsec)	J (mag)	H (mag)	Ks (mag)
J01543850+3700184	7.2	8.10±0.02	7.83±0.02	7.74±0.02
J01543698+3700230	11.6	13.05±0.02	12.41±0.02	12.17±0.02
J01543752+3700073	13.7	13.88±0.03	13.36±0.03	13.23±0.03

表 5.2: #319 の対応天体候補 (26'' 以内に存在する 2MASS カタログ天体)

2MASS						
天体名	distance (arcsec)	J (mag)	H (mag)	Ks (mag)		
J02214802+6156397	5.2	13.69±0.03	12.96±0.04	12.76±0.03		
J02214743+6156529	14.3	15.01±0.05	14.30±0.06	14.01±0.06		
J02214518+6156416	15.2	16.5±0.1	15.3±0.1	14.82±0.010		
J02215023+6156248	24.9	14.78±0.04	14.21±0.04	14.14±0.06		
天体名	distance (arcsec)	Type	B (mag)	V (mag)	G (mag)	
BD+36 344	5.2	Star in Cluster	9.66±0.02	9.14±0.02	8.976±0.001	

表 5.3: #373 の対応天体候補 (26'' 以内に存在する 2MASS カタログ天体, SIMBAD 天体)

SDSS									
天体名	distance (arcsec)	Type	u (mag)	g (mag)	r (mag)	i (mag)	z (mag)		
J031427.73+404901.2	2.5	star	25.6±0.6	24.1±0.4	22.3±0.1	21.11±0.07	20.4±0.1		
J031428.17+404849.9	10.5	star	25.1±0.9	25.1±0.6	23.3±0.3	21.9±0.1	20.6±0.2		
J031428.02+404910.8	10.7	star	16.889±0.008	14.42±0.004	13.991±0.009	13.750±0.002	13.217±0.004		
J031428.64+404912.2	14.6	star	20.14±0.05	18.728±0.009	18.173±0.007	17.941±0.007	17.871±0.02		
J031427.91+404915.6	15.5	galaxy	25±6	25±3	24±3	25±2	16.91±0.04		
J031426.16+404903.3	20.4	star	21.5±0.1	19.60±0.01	18.88±0.01	18.62±0.01	18.47±0.03		
J031426.02+404859.7	21.8	star	18.52±0.02	16.308±0.004	15.461±0.004	15.137±0.004	14.957±0.005		
J031426.24+404846.9	23.3	star	22.4±0.3	20.12±0.02	19.18±0.01	18.86±0.01	18.74±0.04		
J031429.67+404914.9	24.7	star	25.6±0.6	24.5±0.5	22.8±0.2	21.11±0.07	20.5±0.2		
2MASS									
天体名	distance (arcsec)	J (mag)	H (mag)	Ks (mag)					
J03142802+4049108	10.8	11.94±0.02	11.37±0.02	11.22±0.02					
J03142864+4049118	14.3	16.4±0.1	15.3	15.5					
J03142602+4048597	21.7	13.932±0.024	13.386±0.024	13.243±0.032					

表 5.4: #501 の対応天体候補 (26'' 以内に存在する SDSS, 2MASS カタログ天体)



2MASS				
天体名	distance (arcsec)	J (mag)	H (mag)	Ks (mag)
J07482752-1923025	8.5	11.33±0.03	10.83±0.03	10.66±0.02
J07482816-1922573	17.3	16.7±0.1	15.9±0.1	15.4±0.2
J07482553-1922532	21.1	13.84±0.02	13.51±0.02	13.40±0.03
J07482757-1922380	23.5	14.85±0.03	14.46±0.05	14.35±0.08
J07482528-1923012	23.6	17.0±0.2	16.030±0.1	15.3

表 5.5: #1081 の対応天体候補 (26" 以内に存在する 2MASS カタログ天体)

SDSS							
天体名	distance (arcsec)	Type	u (mag)	g (mag)	r (mag)	i (mag)	z (mag)
J075516.54+215527.5	3.7	star	24.2±0.8	21.21±0.04	19.64±0.02	17.939±0.007	16.91±0.01
J075517.47+215531.4	15.5	star	23.8±0.7	24.1±0.4	22.3±0.1	21.7±0.1	21.9±0.4
J075516.02+215515.3	15.8	star	24.5±0.9	25.1±0.7	23.2±0.3	22.2±0.2	21.4±0.3
J075515.55+215541.5	15.9	galaxy	23.1±0.4	23.6±0.3	23.1±0.3	22.1±0.2	22.2±0.6
J075515.33+215522.2	16.5	star	25.5±0.7	24.8±0.6	23.0±0.3	22.0±0.1	21.7±0.4
J075517.87+215539.4	22.8	star	20.06±0.03	17.507±0.005	16.452±0.004	16.081±0.004	15.881±0.006
J075515.64+215552.0	23.9	star	24.1±0.8	23.9±0.4	22.7±0.2	21.29±0.07	20.2±0.1

2MASS				
天体名	distance (arcsec)	J (mag)	H (mag)	Ks (mag)
J07551654+2155276	3.7	15.341±0.040	14.679±0.062	14.479±0.078
J07551519+2155408	19.4	18.578	16.619	15.353±0.153
J07551787+2155394	22.9	14.816±0.033	14.175±0.036	14.066±0.053

表 5.6: #1093 の対応天体候補 (26'' 以内に存在する SDSS, 2MASS カタログ天体)

2MASS				
天体名	distance (arcsec)	J (mag)	H (mag)	Ks (mag)
J08352001-4332044	12.8	12.32±0.02	11.70±0.02	11.4±0.02
J08351965-4332399	23.9	17.0±0.2	16.0±0.2	15.3±0.2
J08352065-4332370	24.3	16.4±0.2	15.6	15.5±0.2

表 5.7: #1158 の対応天体候補 (26'' 以内に存在する 2MASS カタログ天体)

SDSS							
天体名	distance (arcsec)	Type	u (mag)	g (mag)	r (mag)	i (mag)	z (mag)
J161532.11+591348.7	15.3	galaxy	26.7±0.3	23.5±0.3	21.8±0.1	21.24±0.10	21.4±0.4
J161530.48+591408.2	15.4	galaxy	22.3±0.4	22.8±0.2	21.6±0.1	21.4±0.2	21.4±0.7
J161529.81+591418.6	24.7	galaxy	25±1	24.2±0.5	22.1±0.2	21.3±0.1	21.8±0.7
J161529.31+591356.4	24.8	galaxy	20.9±0.1	20.78±0.03	20.95±0.06	21.03±0.09	20.9±0.3

表 5.8: #2478 の対応天体候補 (26'' 以内に存在する SDSS カタログ天体)

2MASS				
天体名	distance (arcsec)	J (mag)	H (mag)	Ks (mag)
J17472690-2805475	2.6	17.7	14.4	12.71±0.09
J17472749-2805481	5.6	15.56±0.06	14.1	14.1
J17472702-2805401	8.7	17.6	14.2	12.59±0.08
J17472773-2805463	9.1	15.18±0.05	14.1	14.1
J17472743-2805390	10.9	17.7	13.6	12.21±0.07
J17472639-2805577	12.7	17.7	14.9	12.69±0.08
J17472639-2805386	13.6	16.3	15.1	12.11±0.06
J17472620-2805402	14.4	16.3±0.1	15.6	12.5
J17472824-2805514	15.8	15.6±0.1	14.6	14.1
J17472662-2806054	17.6	16.0	12.77±0.04	10.11±0.03
J17472783-2805322	19.4	16.5	13.78±0.08	12.04±0.05
J17472716-2805291	19.7	16.3	12.4±0.03	10.39±0.03
J17472561-2805438	19.9	14.05±0.03	13.65±0.04	13.3
J17472691-2806087	20.0	15.08±0.09	13.4	11.6
J17472597-2805349	20.1	14.57±0.03	13.25±0.03	13.5
J17472577-2806020	21.6	16.4	13.60±0.04	11.57±0.06
J17472809-2806076	23.1	16.8	14.2	12.55±0.09
J17472706-2806123	23.5	15.28±0.08	13.8	12.7
J17472886-2805483	23.7	13.41±0.03	11.89±0.03	11.26±0.04
J17472551-2806010	23.9	14.7	13.47±0.08	11.1
J17472618-2806113	25.3	16.5	13.76±0.06	11.28±0.02
J17472887-2805396	25.6	13.73±0.05	12.01±0.04	11.20±0.05
J17472527-2805591	26.0	14.2	13.54±0.05	12.1

表 5.9: #2871 の対応天体候補 (26'' 以内に存在する 2MASS カタログ天体)

天体名	2MASS			
	distance (arcsec)	J (mag)	H (mag)	Ks (mag)
J18223522-1539123	2.9	13.8	12.58±0.06	11.55±0.06
J18223559-1539126	4.3	14.4	13.85±0.07	13.08±0.06
J18223555-1539135	4.5	15.16±0.06	12.9	12.2
J18223501-1539092	5.0	11.0	12.3±0.1	11.69±0.04
J18223555-1539049	5.9	13.92±0.07	12.21±0.07	11.49±0.05
J18223581-1539065	7.6	14.30±0.04	12.85±0.04	12.26±0.03
J18223490-1539050	8.2	9.75±0.02	9.15±0.03	8.96±0.02
J18223626-1539072	13.4	12.96±0.05	11.80±0.05	11.34±0.03
J18223567-1539240	14.7	15.34±0.07	13.6	13.3
J18223620-1539009	15.2	13.7	13.1	13.40±0.05
J18223595-1539229	15.5	14.53±0.06	13.2	12.9
J18223550-1538544	15.8	15.20±0.08	14.30±0.08	13.4
J18223489-1539245	15.9	12.02±0.03	9.57±0.03	8.45±0.02
J18223636-1539031	16.2	13.0	12.3	13.10±0.06
J18223450-1539259	20.0	15.6±0.2	13.5±0.2	12.59±0.09
J18223428-1538568	20.3	14.94±0.10	13.19±0.07	12.51±0.04
J18223595-1538498	22.0	15.83±0.09	15.1	14.6
J18223463-1538500	22.6	15.25±0.10	14.26±0.09	13.65±0.08
J18223602-1539309	23.0	12.79±0.03	11.66±0.03	11.21±0.03
J18223564-1539327	23.1	14.8	13.92±0.06	13.07±0.04
J18223369-1539127	24.1	13.28±0.02	12.65±0.02	12.15±0.03
J18223382-1538585	24.9	15.9±0.1	13.85±0.09	12.94±0.05
J18223705-1539058	25.0	15.4	14.2±0.1	13.30±0.06
J18223701-1539026	25.1	15.41±0.07	14.2	13.6
J18223504-1539349	25.2	13.28±0.03	11.24±0.03	10.37±0.02

表 5.10: #3011 の対応天体候補 (26'' 以内に存在する 2MASS カタログ天体)

## 5.2 各天体についてのまとめ

### 5.2.1 恒星フレアであると思われる9天体について

#61, #319, #373, #1081, #1093, #1158, #1203, #2871, #3011 の9天体はいずれもすざくのX線ライトカーブにおいて、「跳ね上がるような急激な増光」及び「指数関数的減衰」という、恒星フレアに典型的な光度変動が見られた。このことからこれら9天体は恒星フレアであると考えて良いだろう。以下ではこれら9天体の対応天体候補を挙げていく。

SIMBAD に情報が存在した#319以外の天体で、対応天体候補として2MASSのカatalog天体が挙げられるものについては、JバンドおよびKバンドの測光データを用いてスペクトル型を推測した。星間赤化の計算の際には、表4.4にある $n_H$ の値を利用し、この際#373, #1158については上限値を使用した。

#### #61の対応天体候補

すざくの90%エラーサークル内において、XRT, UVOTのイメージから天体を見つけ出すことはできなかった。2MASSカatalogでは天体は存在せず、SDSSカatalogでは4天体が存在した(表5.1)。

エラーサークル外ではあるが、すざく天体からある程度近い約 $30''$ の場所にXRT, UVOTで天体が見られ、これを対応天体候補に挙げられるだろう。さらに同一のところに2MASS天体 J00421775-0959037 とSDSS天体 J004217.76-095903.8が存在している。スペクトル型はA7である。

#### #319の対応天体候補

すざくの90%エラーサークル内において、XRTのイメージからは1天体、UVOTのイメージからは2天体を見つけ出すことができた。2MASSカatalogでは3天体が存在した(表5.2)。SDSSでは観測がない領域であったが、DSSのイメージから最低でも1天体は存在していることが確認できた。

XRTのイメージ中、すざくのエラーサークル中心から $10''$ 以内に目視で天体を確認されたが、イベント数が足りないため、正確な座標を算出することは不可能であった。また、2MASS天体のうち最もすざく天体に近いものはJ01543850+3700184であり、 $7''.2$ の距離に存在し、これと同一の場所にUVOTとDSSでも天体が見えている。そして、これらはSIMBADにデータが存在する「BD+36

344」と同一の天体である。BD+36 344 はクラスター中に存在する F6V の星であり、地球からの距離が 140pc である。

#### #373 の対応天体候補

すざくの 90%エラーサークル内において、XRT, UVOT のイメージから天体を見つけ出すことはできなかった。2MASS カタログでは 4 天体存在した (表 5.3)。SDSS では観測がない領域であったが、DSS イメージから 3 天体が確認できた。

すざくエラーサークル内に 4 天体存在する 2MASS 天体のうち最もすざくの座標から近いのは J02214802+6156397 (距離 5''.2) で、この位置に DSS で可視光天体が存在していることも確認できる。スペクトル型は K6 である。

#### #1081 の対応天体候補

すざくの 90%エラーサークル内において、XRT のイメージから天体を見つけ出すことはできなかったが、UVOT のイメージからは 1 天体を見つけ出すことができた。同じ位置に 2MASS J07482752-1923025 が存在し、DSS の可視光天体も存在しているため (表 5.5)、この天体がすざく天体に対応する可能性が高い。スペクトル型は F2 である。

#### #1093 の対応天体候補

すざくの 90%エラーサークル内において、XRT, UVOT のイメージから天体を見つけ出すことはできなかった。2MASS カタログでは 3 天体存在した。SDSS カタログでは 7 天体が存在した (表 5.6)。

すざくエラーサークル内に 3 天体存在する 2MASS 天体のうち、最もすざくの座標から近くに存在するのは J07551654+2155276 は (距離 3''.7) であり、同じ位置に SDSS 天体 J075516.54+215527.5 も存在している。スペクトル型は B1 である。

### #1158 の対応天体候補

すざくの90%エラーサークル内において、XRT, UVOT のイメージから天体を見つけ出すことはできなかった。2MASS カタログでは3天体存在した(表 5.7)。SDSS では観測がない領域であったが、DSS イメージから3天体が確認できた。

すざくエラーサークル内に存在する3つの2MASS天体のうち、最もすざくの座標から近いのは J02214802+6156397 (距離  $12''.8$ ) で、同じ位置に DSS で可視光天体が存在していることも確認できる。スペクトル型は M3 である。

### #1203 の対応天体候補

すざくの90%エラーサークル内において、XRT のイメージから天体を見つけ出すことはできなかったが、UVOT のイメージから1天体を確認できた(距離  $14''$ )。2MASS においてはカタログ天体は存在しなかったもののイメージから同じ位置に天体を確認することができた。SDSS では観測がない領域であったが、DSS イメージから同じ位置に天体が確認できた。

### #2871 の対応天体候補

すざくの90%エラーサークル内において、XRT のイメージから天体を見つけ出すことはできなかった。

すざく天体の近く、距離  $20''$  の位置に UVOT 天体が存在しており、同じ位置に 2MASS 天体 J17472561-2805438 や DSS の可視光天体が存在している(表 5.9)。スペクトル型は K3 である。

### #3011 の対応天体候補

すざくの90%エラーサークル内において、XRT のイメージから天体を見つけ出すことはできなかった。

すざく天体から  $8''$  と  $16''$  の位置に UVOT 天体が存在しており、いずれにおいても同じ位置に 2MASS や DSS のイメージから可視赤外の天体が確認できるが、2MASS についてはカタログ天体がひしめき合っており(表 5.10)、天体名を特定することは難しい。



## 5.2.2 これらの天体と典型的な恒星フレアの比較

多数の恒星フレアのデータ解析から「X線光度と減衰時間」、「恒星半径と Emission Measure」といったいくつかのパラメータ間の関係が判明している (Tsuboi et al. 2016)。そこで、本研究の9天体においてもこの関係が成立するかを調べた。

X線光度については、フィッティングパラメータを用いて計算を行った。この際、xspecのtbabsモデルでnHが0であると仮定し、吸収が無い場合のスペクトルモデルを作成し、このモデルを用いて0.1–100 keVのエネルギー帯でフラックスを計算した。次に、星間水素が1立方センチメートルあたりに1個存在し、一様に分布しているという仮定を置くことで、4.4にあるnHの値を用いて距離を求めた。この際、#373, #1158については上限値を使用した。また、#319についてはSIMBADにある年周視差の情報から距離を計算した。そして、最後にフラックスに距離の2乗と $4\pi$ を掛けることで、X線光度を算出した。減衰時間については、表4.1で示したallの減衰時間を用いた。ただし、#61については2つある減衰時間の平均をとった。恒星半径については、これらの天体が主系列星であると仮定して、スペクトル型に対応する典型的な値を利用した。Emission Measure (EM)については、スペクトルフィッティングのnormの値を用いて計算した。

これらのパラメータをまとめたのが表5.11である。本研究の9天体においても、既存のフレア天体で確認されていた関係が成立していることが確認できた (図5.1)。

天体番号	X線光度 ( $\text{erg s}^{-1}$ )	減衰時間 (s)	恒星半径 ( $R_{\odot}$ )	EM ( $\text{cm}^{-3}$ )
61	$1.4 \times 10^{33}$	8000	1.7	$6.0 \times 10^{55}$
319	$1.9 \times 10^{33}$	7000	1.3	$8.1 \times 10^{55}$
373	$4.8 \times 10^{31}$	3500	0.7	$2.0 \times 10^{54}$
1081	$2.1 \times 10^{32}$	2000	1.4	$1.4 \times 10^{55}$
1093	$2.7 \times 10^{33}$	9000	7	$1.1 \times 10^{56}$
1158	$6.0 \times 10^{30}$	4600	0.45	$3.4 \times 10^{53}$
1203	$7.2 \times 10^{33}$	5200	-	$2.8 \times 10^{56}$
2871	$4.4 \times 10^{33}$	6000	0.75	$1.6 \times 10^{56}$
3011	$5.3 \times 10^{32}$	6000	-	$2.3 \times 10^{55}$

表 5.11: 9つのフレア天体のパラメータまとめ

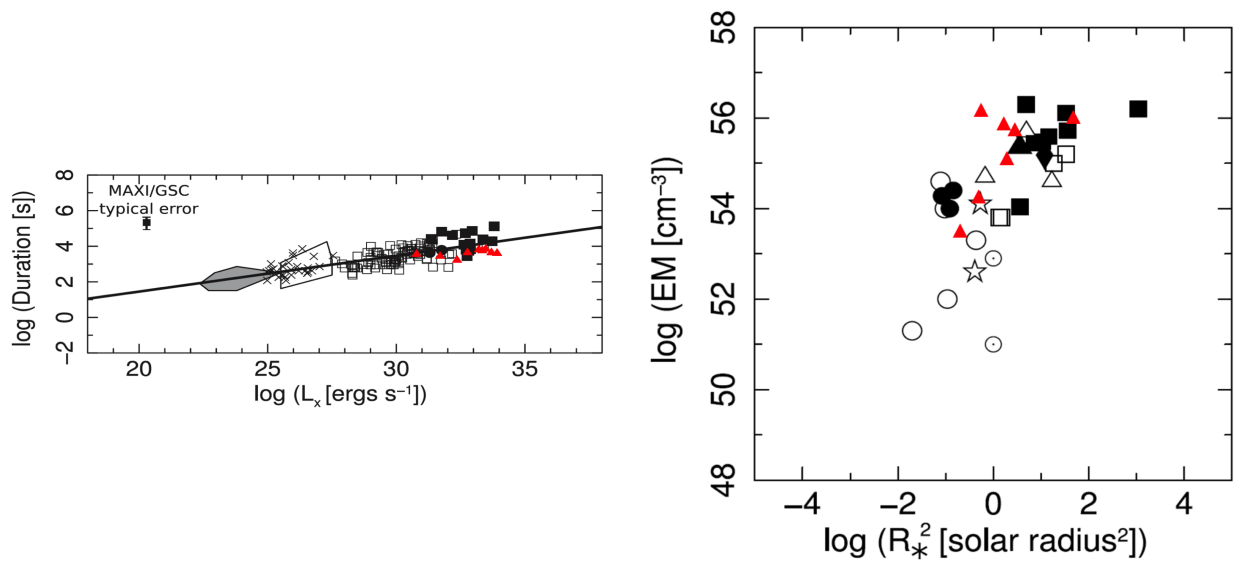


図 5.1: 典型的な恒星フレアとの比較図。(Tsuboi et al. 2016) における「X 線光度と減衰時間」および「恒星半径と Emission Measure」の関係を示した図上に、本研究のデータをプロットしたものである。左図の横軸は X 線光度、縦軸は減衰時間であり、モノクロのプロットが (Tsuboi et al. 2016) のデータ、赤色の三角形でのプロットが本研究の 9 つの恒星フレア候補天体のデータである。右図の横軸は太陽を基準とした恒星半径、縦軸は Emission Measure であり、モノクロのプロットについては左図と同様であり、赤色の三角形でのプロットは、9 つの恒星フレア天体候補から恒星半径が推定できなかった #1203, #3011 を除いた、7 天体のデータである。

### 5.2.3 周期性を示す 1 天体について

#2478 はすざくの X 線ライトカーブに、 $2910 \pm 70$  秒周期の変動が見られ、変動幅は高エネルギー側でより大きかった。さらに、X 線スペクトルが高エネルギーで Photon Index が 1.5 程度とかなり低い数値であった。これらのことから、この天体は中間ポーラーであると考えられる。中間ポーラーは白色矮星が強磁場を持つ激変星であり、磁力線に沿って磁極に流れ込むガスからの極めて強い放射が、自転に応じて見え隠れするために周期的な光度変動が観測される天体である。

また、中間ポーラーには矮新星の特徴を示すものも存在し (Yuasa et al. 2016)、本研究の天体もこれと同種のものであると考えれば、ライトカーブにおいて周期変動の他により大きな時間スケールでの増減光が見られたことも説明可能である。

#### #2478 の対応天体候補

すざくの 90% エラーサークル内において、XRT, UVOT のイメージから天体を見つけ出すことはできなかった。2MASS においては天体が存在しなかった。SDSS ではカタログ天体が 4 天体存在した (表 5.8) がいずれも銀河である。

エラーサークル外ではあるが、すざく天体からある程度近い場所に十分なイベントを持つ XRT 天体が存在しており、座標検出を行った結果、すざく天体から  $33''.0$  という位置に存在 (座標のエラーは  $4''.8$ ) していることが判明した。また、この位置に UVOT イメージで天体が確認された。すざくのエラー外ではあるが、XRT で多くのイベントが存在していることから考えて、この天体が対応天体である可能性は高い。

### 5.2.4 早期 K 型恒星であると思われる 1 天体について

#501 はすざくの X 線ライトカーブにおいて増光が見られる。しかし、増光が緩やかで、減光が指数関数的ではないことから、フレアではないように思われる。なゆたで得られた可視光スペクトル (図 4.6) からいくつかの特徴が見て取れた。これらの特徴のうち、 $H\alpha$  吸収線が弱いことはこの星が G 型より晩期であること、Na, Mg の吸収線が顕著であることは F 型より晩期であること、分子吸収線 (TiO) が存在しないことは M 型より早期であることを示しており、このことから K 型の星であることが推測できる。さらに、K1.5V のアークトゥルスと非常に似通ったスペクトルであったことから、この星は早期 K 型の恒星であると結論づけた。

K 型の恒星は通常時は X 線をほとんど放射しない。フレアを起こし X 線を放出することはあるが、先程も述べた通りこの天体のライトカーブは典型的なフレアとは異なる。よって、現時点ではこの天体の起源は未解明である。より詳細な追観測が期待される

#### #501 の対応天体候補

すざくの 90% エラーサークル内において、XRT のイメージから 1 天体、UVOT のイメージから 2 天体が確認できた。2MASS においてはカタログ天体が 3 天体存在した。DSS では 2 天体存在し、SDSS ではカタログ天体が 9 天体存在した (表 5.4)。

XRT 天体については十分なイベントが得られたため、座標検出を行なった結果、すざく天体から  $6''.8$  という位置に存在 (座標のエラーは  $4''.8$ ) していることが判明した。同じ位置に UVOT 天体と、2MASS 天体 J03142802+4049108 および SDSS 天体 J031428.02+404910.8, J031428.17+404849.9 が存在しており、この天体がすざく天体に対応していると考えてほぼ間違いない。

## 第6章 結論

X線天文衛星「すざく」によって発見された、顕著な光度変動を示した11天体を対象とした研究結果を以下にまとめる。また、これらの天体の性質を表6.2に示す。

1. すざくアーカイブデータを用いて時系列解析を実行した。ライトカーブにおいて急激な上昇と指数関数的減衰が見られた9天体については減衰時間を算出した。それとは別の1天体においては、 $2910 \pm 70$ sの周期を確認した。さらに、それらとは別の1天体において緩やかに増光し急激に減衰する変動を確認した。
2. すざくアーカイブデータを用いて増光時のスペクトルに対してフィッティングを行い、フラックス、水素柱密度、温度などを計算した。周期が見られた天体において、 $25 \pm 11$  keVという高温のスペクトルが確認できた。
3. すざくより位置決定精度が高いX線天文衛星Swiftの、既存のアーカイブデータや新たに取得したデータを解析した。その結果、2天体のより正確な座標決定に成功した(表6.1)。

天体名	天体番号	Swift XRTによる検出座標 RA (deg.), Dec (deg.)
Suzaku J161532+591403	2478	243.8672, 59.2334
Suzaku J031427+404900	501	48.6164, 40.8186

表 6.1: Swift XRT による検出座標

4. 緩やかに増光し急激に減衰する天体の可視分光観測をなゆた望遠鏡で行った。その結果、早期K型星に似通ったスペクトルを確認した。
5. 2MASSカタログ、SDSSカタログ、SIMBAD、DSSのデータを用いて、対応天体の候補となる既知の可視赤外天体を調査した。測光データが得られたものについてはスペクトル型を推定した。

6. 9天体はライトカーブの形状から、恒星フレアである可能性が高い。いずれの天体もフレアに典型的なパラメータを持っている。周期が見られた1天体は高温のスペクトルや  $2910 \pm 70$ s の周期から中間ポーラーであると見られる。残りの1天体は、早期 K 型主系列星のスペクトルが確認できたが、X 線の放射機構は解明できなかった。

天体名	天体番号	可視赤外対応天体候補	スペクトル型	特徴	種別
Suzaku J004215-095907	61	2MASS J00421775-0959037	A7	急激な増光 指数関数的減衰	アクティブな恒星
Suzaku J015437+370020	319	BD+36 344	F6		
Suzaku J022147+615638	373	2MASS J02214802+6156397	K6		
Suzaku J074827-192259	1081	2MASS J07482752-1923025	F2		
Suzaku J075516+215530	1093	2MASS J07551654+2155276	B1		
Suzaku J083519-433216	1158	2MASS J02214802+6156397	M3		
Suzaku J085638+782051	1203	-	-		
Suzaku J174727-280548	2871	2MASS J17472561-2805438	K3		
Suzaku J182235-153910	3011	複数の 2MASS 天体	-		
Suzaku J161532+591403	2478	SDSS J161528.91+591401.1	-		
Suzaku J031427+404900	501	2MASS J03142802+4049108	早期 K 型	緩やかな増光 急激な減衰	不明

表 6.2: まとめ





## 参考文献

- Abolfathi, B., Aguado, D. S., Aguilar, G., et al. 2017, ArXiv e-prints
- Gunn, J. E., Carr, M., Rockosi, C., et al. 1998, *Astronomical Journal*, 116, 3040
- Koyama, K., Tsunemi, H., Dotani, T., et al. 2007, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 59, 23
- Mitsuda, K., Bautz, M., Inoue, H., et al. 2007, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 59, 1
- Pallavicini, R., Serio, S., & Vaiana, G. S. 1977, *Astrophysical Journal*, 216, 108
- Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., et al. 2006, *Astronomical Journal*, 131, 1163
- Tsuboi, Y., Yamazaki, K., Sugawara, Y., et al. 2016, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 68, 90
- Wenger, M., Ochsenbein, F., Egret, D., et al. 2000, *Astronomy & Astrophysics Supplement*, 143, 9
- Wilms, J., Allen, A., & McCray, R. 2000, *Astrophysical Journal*, 542, 914
- Yamasaki, H. 2016, Master's thesis, 東京大学
- Yuasa, T., Hayashi, T., & Ishida, M. 2016, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 459, 779



## 謝辞

本研究においては、多くの方々から多岐に渡る支援をいただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

指導教員である海老沢研教授には、研究機会を与えてくださったこと、また天文学の知見から研究姿勢まで多岐に渡りご指導いただいたこと、深く感謝いたしております。研究室の辻本匡弘助教には、深い知見を感じられる数多くの助言をいただきました。研究員の菅原泰晴さんには、研究のための解析環境を整えていただきました。兵庫県立大学の森鼻久美子さんには、なゆた望遠鏡での観測にあたって数多くの助力をいただきました。

また、研究室の先輩である水本岬希さんには、研究の進め方や解析方法など多くのことを教えていただきました。同じく先輩である楠絵莉子さんの、研究に対するストイックな姿勢には刺激を受けました。同じく先輩の和田師也さんは、私のことを度々気にかけてくださいました。また、研究室の後輩である下向怜歩さんは、多くのことに一生懸命取り組んでおり、私も見習わなければならないと感じました。宇宙研 X 線グループや東大天文学専攻の同期、外部の研究者の方々とは、学会や夏の学校での交流を通して、多くの新たな知見を私に与えてくださり、このことは大きな刺激となりました。

最後に、これまで私を支えてくださった両親と祖父母に感謝の意を表します。

