2020年度 卒業論文

# 母銀河に埋もれたIIn型超新星SN 2018hfgの測光学的研究

広島大学理学部物理学科 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

B174055 星岡駿志

主查 川端弘治 副查 栗木雅夫

2021年2月8日

#### 概 要

太陽質量の40倍以上の大質量星は、重力崩壊型超新星となる前に、強い放射圧で大量の恒星大気 を放出する、あるいはLBV(高光度青色変光星)アウトバーストと呼ばれる小爆発現象を生じるこ とで、豊富な星周物質を伴うことが想定される。この場合、超新星爆発による放出物質が星周物 質と衝突することにより幅の狭いスペクトル輝線を伴う IIn 型超新星となることが考えられ、超新 星の観測を通じて親星の進化過程、特に質量放出の履歴を探ることが期待されている。

SN 2018hfg は、当初 IIn 型超新星と同定されたものの、LBV アウトバーストの疑いもあるとされ た超新星である。この超新星は母銀河成分が明るく、背景光のコンタミネーションが大きいため、 爆発後期までの正確な測光解析が困難である。本研究では、かなた望遠鏡で得られた SN 2018hfg の撮像データにおいて、母銀河成分を過不足なく差し引き、超新星成分のみを正しく測光する手 法を確立し、多バンドの光度曲線の導出とその解析を試みた (図 1)。その結果、母銀河成分の差し 引きを安定して行うための、波長バンドや観測時の大気条件に応じたパラメータの設定方法を割 り出すことに成功した。一方で、測光解析によって SN 2018hfg が LBV アウトバーストではなく やや明るい IIn 型超新星であると同定し、星周物質の分布についての手がかりを得た。



図 1. 銀河のテンプレート差し引きの一例。左からインプット画像 (2018 年 10 月 12 日 B バンド)、テンプ レート画像 (2019 年 11 月 2 日 B バンド)、差し引き後の画像。超新星の背後の銀河成分がうまく差し引け ていることがわかる。

# 目 次

第1章	序論	4
1.1	恒星の進化	4
1.2	超新星	7
	1.2.1 超新星の分類	7
	1.2.2 IIn 型超新星	10
	1.2.3 Supernova Impostor	12
1.3	本研究の目的	15
第2章	観測	16
2.1	観測天体	16
	2.1.1 SN 2018hfg	16
	2.1.2 母銀河	16
2.2	かなた望遠鏡	17
	2.2.1 HOWPol	18
2.3	観測ログ	19
第3章	データリダクションと結果	20
3.1	1次処理	20
3.2	測光処理	23
3.3	銀河のテンプレート差し引き	24
3.4	絶対等級における多バンド光度曲線.............................	29
第4章	議論	31
4.1	SN 2018hfg と IIn 型超新星と Supernova Impostor の光度曲線	31
4.2	総輻射光度	33
4.3	色進化	35
第5章	まとめと今後	36
補遺 A	観測ログ	37
補遺 B	HOTPANTS のコマンド集	39
補遺 C	銀河のテンプレート差し引きのパラメータと結果	42

# 図目次

1	銀河のテンプレート差し引きの一例	1
1.1	p-p chain	4
1.2	<b>CNO</b> サイクル	5
1.3	恒星の表面温度と光度の分布図 (HR 図) における恒星の進化	6
1.4	p-p chain	7
1.5	超新星の分類	8
1.6	極大等級付近の Ia 型、Ib 型、Ic 型、II 型のスペクトル比較 .........	8
1.7	爆発直前の親星の構造.................................	9
1.8	II-P 型超新星と II-L 型超新星の様々な星のライトカーブの比較	9
1.9	様々な IIn 型超新星のスペクトル	11
1.10	星周物質と超新星 ejecta による相互作用のイメージ図	12
1.11	様々な IIn 型超新星の可視 R バンド光度曲線	12
1.12	SN 2009ipの 2009 年から 2012 年のライトカーブ (M.L.Graham, et al. 2014)	13
1.13	SN 2009ip の 2012 年のライトカーブ	14
1.14	SN 2009ip の 2009 年から 2011 年のスペクトル	14
2.1	SN2018hfgとUGC4642(2018年10月12日Bバンド)	16
2.1 2.2	SN2018hfg と UGC4642(2018 年 10 月 12 日 B バンド) かなた望遠鏡	16 17
<ul><li>2.1</li><li>2.2</li><li>2.3</li></ul>	SN2018hfg と UGC4642(2018 年 10 月 12 日 B バンド)	16 17 18
<ol> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> </ol>	SN2018hfg と UGC4642(2018 年 10 月 12 日 B バンド)	16 17 18 19
<ul> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>3.1</li> </ul>	SN2018hfg と UGC4642(2018 年 10 月 12 日 B バンド)	16 17 18 19 21
<ol> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>3.1</li> <li>3.2</li> </ol>	SN2018hfg と UGC4642(2018 年 10 月 12 日 B バンド)	16 17 18 19 21 21
<ul> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>3.3</li> </ul>	SN2018hfg と UGC4642(2018 年 10 月 12 日 B バンド)	<ol> <li>16</li> <li>17</li> <li>18</li> <li>19</li> <li>21</li> <li>21</li> <li>22</li> </ol>
<ol> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>3.3</li> <li>3.4</li> </ol>	SN2018hfg と UGC4642(2018 年 10 月 12 日 B バンド)	<ol> <li>16</li> <li>17</li> <li>18</li> <li>19</li> <li>21</li> <li>21</li> <li>21</li> <li>22</li> <li>22</li> </ol>
<ol> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>3.3</li> <li>3.4</li> <li>3.5</li> </ol>	SN2018hfg と UGC4642(2018 年 10 月 12 日 B バンド)	<ol> <li>16</li> <li>17</li> <li>18</li> <li>19</li> <li>21</li> <li>21</li> <li>21</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>23</li> </ol>
<ul> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>3.3</li> <li>3.4</li> <li>3.5</li> <li>3.6</li> </ul>	SN2018hfg と UGC4642(2018 年 10 月 12 日 B バンド)	<ol> <li>16</li> <li>17</li> <li>18</li> <li>19</li> <li>21</li> <li>21</li> <li>21</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>23</li> <li>23</li> </ol>
<ul> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>3.3</li> <li>3.4</li> <li>3.5</li> <li>3.6</li> <li>3.7</li> </ul>	SN2018hfg と UGC4642(2018 年 10 月 12 日 B バンド)	<ol> <li>16</li> <li>17</li> <li>18</li> <li>19</li> <li>21</li> <li>21</li> <li>21</li> <li>22</li> <li>23</li> <li>23</li> <li>24</li> </ol>
<ul> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>3.3</li> <li>3.4</li> <li>3.5</li> <li>3.6</li> <li>3.7</li> <li>3.8</li> </ul>	SN2018hfg と UGC4642(2018 年 10 月 12 日 B バンド)	<ol> <li>16</li> <li>17</li> <li>18</li> <li>19</li> <li>21</li> <li>21</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>23</li> <li>24</li> <li>24</li> </ol>
<ul> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>3.3</li> <li>3.4</li> <li>3.5</li> <li>3.6</li> <li>3.7</li> <li>3.8</li> <li>3.9</li> </ul>	SN2018hfg と UGC4642(2018 年 10 月 12 日 B バンド)	<ol> <li>16</li> <li>17</li> <li>18</li> <li>19</li> <li>21</li> <li>21</li> <li>22</li> <li>23</li> <li>23</li> <li>24</li> <li>24</li> <li>25</li> </ol>
2.1 2.2 2.3 2.4 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9 3.10	SN2018hfg と UGC4642(2018 年 10 月 12 日 B バンド)	16 17 18 19 21 21 22 22 23 23 23 24 24 25 27

3.12	銀河のテンプレート差し引きの一例	28
3.13	銀河成分の差し引き前と差し引き後の B バンドの光度曲線の比較	29
3.14	絶対等級における SN 2018hfg の多バンド光度曲線	30
4.1	SN 2018hfg と他の IIn 型超新星及び Supernova Impostor の B バンドの光度曲線の比較	31
4.2	SN 2018hfg と他の IIn 型超新星及び Supernova Impostor の V バンドの光度曲線の比較	32
4.3	SN 2018hfg と他の IIn 型超新星及び Supernova Impostor の R バンドの光度曲線の比較	32
4.4	SN 2018hfg と他の IIn 型超新星及び Supernova Impostor の I バンドの光度曲線の比較	33
4.5	SN 2018hfg と IIn 型超新星と Supernova Impostor の総輻射光度の比較	34
4.6	SN 2018hfg と IIn 型超新星の総輻射光度の比較	34
4.7	時間に対する色指数の変化	35

### 第1章 序論

#### 1.1 恒星の進化

夜空を見上げると、いつもほぼ同じ明るさで輝いている多数の星が存在する。これらを恒星と呼ぶ。恒星のうち多くは主系列星と呼ばれる進化段階にあり、水素からヘリウムが合成される核融 合反応によりエネルギーを手に入れ、そのエネルギーを光として放出することで一定の明るさを 保っている。ここで、水素の核融合反応には主に2つの反応プロセスがある。1つ目は p-p chain と呼ばれる反応で、温度が  $10^7$  K 程度である星の中心部で起こり、質量が 1.5 M<sub>☉</sub> 以下の主系列星 で優勢となる。この反応は2つの水素の原子核、すなわち2つの陽子が結合して重水素になり、で きた重水素がさらに1つの陽子と結合する反応 (pp 反応)を起点として、最終的にヘリウム原子核 ができる連鎖反応である (図 1.1)。2つ目は CNO サイクルと呼ばれる反応で、温度が  $10^7$  K 程度か それよりやや高い温度の星の中心部で起こり、質量が 1.5 M<sub>☉</sub> 以上の主系列星で優勢となる。ここ で 1 M<sub>☉</sub> は太陽質量を 1 とした単位を表す。この反応は水素原子核が炭素・窒素・酸素の原子核を 触媒として次々に反応し、その結果 1 サイクルで4 個の水素原子核から 1 つのヘリウム原子核が 生成される反応である (図 1.2)。これらの反応により、主系列星は一定の明るさを維持している。



図 1.1. 2 つの陽子が反応して最終的にヘリウムが生成される核融合反応 (p-p chain)[1]。温度が 10<sup>7</sup> K 程度 である星の中心部で起こり、質量が 1.5 M<sub>☉</sub> 以下の主系列星で支配的となる。

図 1.2. CNO サイクル [1]。炭素、窒素、酸素を触媒として 4 つの陽子からをヘリウムを生成する連鎖反応。 温度が 10<sup>7</sup> K 程度である星の中心部で起こり、質量が 1.5 M<sub>☉</sub> 以上の主系列星で支配的となる。

中心部の水素が尽きると星の構造は中心部のヘリウムコアと水素外層の複合構造となる。この 時コアと外層で別々な動きを始める。コアではまだヘリウムが燃焼する温度に達していないため 核融合を始めず、重力収縮せざるを得ない。重力崩壊をしながら、中心部は徐々に高温・高圧に なっていく。一方、水素外層の底にある球殻の部分では水素は核反応を続けていて温度と圧力は ほぼ一定の状態を保っているため、水素とヘリウムの境界付近の圧力勾配はきつくなり、非常に 高圧のコアが外層全体を押し出すことになる。この結果、星は赤色巨星となる。図 1.3 は質量が 0.5  $M_{\odot}$ -9  $M_{\odot}$ の星の HR 図上での星の進化を表していて、主系列星時代を終えると、HR 図上を大 きく右上へ移動して赤色巨星へ進化することがわかる。一方、質量が 40  $M_{\odot}$  以上の星は赤色超巨 星になる前に強烈な放射圧に関係したメカニズムによって星から大量のガスを放出すると考えら れている。そのため重元素が豊富な星では、初期に 100  $M_{\odot}$  以上の質量を持っていたとしても数 +  $M_{\odot}$  にまで質量が減ってしまうと考えられている [2]。しかし、どのような星でどのように質量 放出を起こすのか、どのような星がどれくらい質量を放出をするのか等は未だにわかっておらず、 観測・理論の両面で精力的に研究が進められている。

赤色巨星のヘリウムコアが重力収縮を続けて中心の温度が2億Kに達すると、ヘリウムが核融 合をし、炭素と酸素が生成される。その結果、星の中心部にはC+Oコアが生成される。ここから は星の質量によって進化が異なる。まず、質量が8M<sub>☉</sub>よりも小さい場合、C+Oコアの質量が炭 素燃焼が起こる臨界質量よりも小さいため、コアは炭素が燃焼する温度まで上昇せず電子が縮退 する。また、外層は大きく薄く広がっているため重力の結合が弱く、何かしらのメカニズムで外 層は星間空間に放出されると考えられている。この結果外層のほとんどが失われ C+O コアが剥き 出しとなる。この時中心に残された星は白色矮星と呼ばれる。このように質量が 8 M<sub>☉</sub> よりも小さ い星は白色矮星となって一生を終える。次に、質量が 8 M<sub>☉</sub>-10 M<sub>☉</sub> よりも大きい場合、C+O コア の質量が炭素燃焼の臨界質量よりも大きいため C+O コアの中心部では核融合反応によって様々な 元素が合成される。まず、中心部で炭素燃焼により酸素・ネオン・アルミニウムが作られ、炭素 が燃え尽きるとコアは O+Ne+Mg コアとなる。コアはさらに重力崩壊を続け、温度がさらに上昇 するとネオンや酸素が核反応を起こしケイ素や硫黄やカルシウムが生成される。温度が  $10^9$  K に 達するとコアでは鉄原子核が作られる。鉄は原子核の中で最も結合エネルギーが小さいのでこれ 以上は核融合は行われない。こうして中心部に鉄コア、その外側にケイ素、酸素、マグネシウム、 炭素、ヘリウム、水素の層が取り巻く"たまねぎ構造"が出来上がる (図 1.4)。鉄コアがさらに重力 収縮して高温となると鉄の光分解反応が起こる。

$$^{56}$$
Fe  $\rightarrow 13^{4}$ He + 4n - 122.4[MeV] (1.1)

この反応は吸熱反応なのでコアは支えを失い一気に重力崩壊を起こす。このときに開放された重 カエネルギーが衝撃波となって星の表面まで伝わると、大爆発が始まる。この爆発が超新星爆発 である。



図 1.3. 恒星の表面温度と光度の分布図 (HR 図) における恒星の進化 [3]。縦軸は恒星の光度に log をとった もの、横軸は恒星の表面温度に log を取ったものである。この分布図を HR 図と呼ぶ。また、図の矢印は主 系列星の HR 図上での進化を表しており、主系列星から巨星になると HR 図上で右上方向に移動していくこ とがわかる。



図 1.4. 爆発直前の大質量星の"たまねぎ構造"[4]。爆発直前の大質量星内部では、中心部に近いほど温度が 高いため中心部ほど元素合成が進み、中心部に鉄コア、その外側にケイ素、酸素、マグネシウム、炭素、ヘ リウム、水素の層が取り巻く"たまねぎ構造"になっている。

#### 1.2 超新星

超新星とは、歴史的には夜空に突然新たな星が明るく輝き出す天体現象を指す。この現象は、質量の重い恒星が進化の最終段階に引き起こす宇宙最大規模の爆発現象であると現在では理解されており、そのエネルギーは 10<sup>51</sup> erg にも及ぶ。超新星はその明るさが数百億の星が集まってできる 銀河と同程度にも及ぶため、我々の銀河系の外の超新星でも観測できる [3]。実際、銀河系内での 超新星はここ 400 年間は発見されておらず、現代天文学で観測対象になっている超新星はすべて 系外銀河のものである。

#### 1.2.1 超新星の分類

超新星にはいくつか種類があり、分光観測によって得られるスペクトルによって分類される。ま ず、水素の吸収線がないものがI型超新星、水素の吸収線があるものがII型超新星と分類される。 また、I型超新星の中でも、ケイ素の吸収線が強いものがIa型、ケイ素の吸収線は弱いがヘリウム の吸収線が強いものがIb型、ケイ素・ヘリウムのどちらの吸収線も弱いものがIc型と分類されて いる(図1.5)。図1.6は極大等級付近の典型的な(a)Ia型、(b)II型、(c)Ic型、(d)Ib型のスペクト ルである。超新星の型によって先程述べた特徴がはっきりと現れていることがわかる。このスペ クトルの違いは爆発直前の親星の構造の違いによって生じるものだと推定されている。II型超新 星は親星が水素外層を持ったまま爆発したのに対し、Ib型、Ic型超新星は何らかのメカニズムで それぞれ水素外層、ヘリウム外層が親星から剥ぎ取られた状態で爆発したと考えられている(図 1.7)。また、Ia型超新星とIb型、Ic型、II型超新星では爆発メカニズムが異なることがわかって いる。まず、前者は楕円銀河を含むあらゆる銀河で発見される。大質量星は寿命が短く、星形成 がほとんど行われていない楕円銀河には大質量星は残っていないと考えられているため、小質量 星が進化したものである白色矮星の核反応による爆発が起源であると考えられている。一方、後 者は星形成の活発な渦巻銀河や不規則銀河でしか発見されておらず、星形成をしていない楕円銀 河では発見されていない。これは、爆発起源が大質量星の重力崩壊であることと無矛盾である。



図 1.5. 超新星の分類



図 1.6. 極大等級付近の Ia 型、Ib 型、Ic 型、II 型のスペクトル比較 [5]。(a),(b),(c),(d) はそれぞれ Ia 型、II 型、Ic 型、Ib 型超新星のスペクトルであり、赤丸で囲った部分は各型の特徴となる吸収線である。II 型は 水素の吸収線が見えているのに対し、I 型は見えていない。また、Ia 型はケイ素の吸収線が強く、Ib はヘリ ウムの吸収線が強いことがわかる。



図 1.7. 爆発直前の親星の構造。Ib 型は水素外層、Ic 型は水素外層・ヘリウム外層が剥ぎ取られた状態で爆発したと推定されている。図の大きさは実際の縮尺と異なる。

また、II 型超新星もさらにいくつかに分類されている。まず光度曲線において極大後 100 日程 度光度が一定の状態(プラトー)を保つものを II-P 型、そうではなく日数に応じて光度が直線的 (リニア)に落ちるものを II-L 型と呼ぶ(図 1.8)。次に、典型的な II 型分光タイプに属さないものと して IIb 型と IIn 型が存在する。IIb 型は爆発直後は幅の広い水素輝線が見られるが(つまり II 型)、 極大前後からそれが弱まり、後期では Ib 型に酷似したスペクトルを示す。また、IIn 型は幅の狭い 水素の輝線を持つという特徴を持つ。IIn 型超新星については §1.2.2 で詳しく説明する。



図 1.8. II-P 型超新星と II-L 型超新星の様々な星のライトカーブの比較 [6]。縦軸は極大等級からの等級差、 横軸は爆発からの日付を表している。II-P 型は光度が 100 日程度一定になっているが、II-L 型は光度が直線 的に落ちていることがわかる。

#### 1.2.2 IIn 型超新星

IIn 型超新星はスペクトル中に幅の狭い ("n"arrow) 水素の輝線を持つ。図 1.9 は様々な IIn 型超 新星のスペクトルである。この Hα 輝線のプロファイルは 100 km/s 程度の速度幅の狭い成分と、 1000 km/s 程度の中間的な成分と、10000 km/s 程度の速度幅の非常に大きい成分の3 つの成分で構 成されると考えられている [5]。この特徴的なプロファイルは、超新星が親星時代に放出した星周 物質と超新星の ejecta の相互作用によって作り出されるとされている。具体的には、まず IIn 型超 新星の親星が超新星爆発を起こす前に、10年以上にわたって10<sup>-4</sup>M<sub>☉</sub>/yr以上もの大量の質量放出 を100 km/s オーダーの速度で行うことで、星の周りに密度の大きい星周物質が広がる。この状態 で親星が超新星爆発を起こすと、速度の速い超新星の ejecta(約 10000 km/s) が速度の遅い星周物質 (約 100 km/s) に追いつき相互作用を起こす [5]。このようにして IIn 型超新星の特徴的な Hα 輝線 のプロファイルが説明できる (図 1.10)。また、図 1.11 は様々な IIn 型超新星の可視 R バンド (波長 0.66 µm) 光度曲線である。また、赤い線は光度が時間に対して早く落ちていく IIn 型超新星の典 型的な光度曲線、緑の線は光度が時間に対して平均的に落ちていく IIn 型超新星の典型的な光度曲 線、青い線は光度が時間に対してゆっくり落ちていく IIn 型超新星の典型的な光度曲線を表してい る。この図から、各 IIn 型超新星によって光度の落ち方に多様性が見てとれる。IIn 型超新星は星 周物質の質量や密度や速度、親星時代の質量放出の割合、超新星の ejecta の速度等によって光度 や光度の落ち方が変わってくるため、それらのパラメータの違いによって各 IIn 型超新星ごとに多 様な光度曲線が生まれると考えられている[7][8]。しかし、近傍で発生する IIn 型超新星のサンプ ルは依然少なく、爆発後期まで含め IIn 型超新星の多様性を詳細に理解するために近傍の観測サン プルを増やしていくことが期待されている。



図 1.9. 様々な IIn 型超新星のスペクトル [5]。一般的な II 型超新星では水素の吸収線 (凹になっている部分) と水素の輝線 (凸になっている部分) が見られる (図 1.6 の (b) のスペクトル参照) のに対し、IIn 型超新星は 爆発から 40 日後でも水素の吸収線は見られず、極端に幅の狭い水素の輝線のみが見られる。



図 1.10. 星周物質と超新星 ejecta による相互作用のイメージ図 [9]。黄色の部分が超新星 ejecta、灰色の部分 が親星時代に放出された星周物質を表している。親星時代に放出された星周物質は速度 100 km/s 程度 で運 動しており、これに追いついた 10000 km/s 程度の超新星 ejecta と相互作用をおこす。



図 1.11. 様々な IIn 型超新星の可視 R バンド光度曲線 [6]。縦軸は極大等級からの等級差、横軸は爆発から の日付を表している。赤い線は光度が時間に対して早く落ちていく IIn 型超新星の典型的な光度曲線、緑の 線は光度が時間に対して平均的に落ちていく IIn 型超新星の典型的な光度曲線、青い線は光度が時間に対し てゆっくり落ちていく IIn 型超新星の典型的な光度曲線である。

#### 1.2.3 Supernova Impostor

Supernova Impostor とは超新星爆発に匹敵するアウトバーストの一種であり、青色高光度変光星 (LBV 星)の間欠的な質量放出によって引き起こされると推定されている。LBV 星とは観測され

る恒星のうち HR 図上で最も青く明るいところに位置し、誕生時の質量が 50 M<sub>☉</sub> 以上の特に重い 星が主系列星の段階を終えた姿だと考えられている。LBV 星は非常に光度が大きく、太陽の 100 万倍程度の光度であり、非常に高い放射圧を持つ。この高い放射圧に関係したメカニズムにより LBV 星はアウトバーストを起こすと考えられていて、そのときの絶対等級は -11 ~ -14 等級程度 である。また、Supernova Impostor のスペクトルは H $\alpha$  輝線が狭く、一見 IIn 型超新星のスペクト ルによく似た特徴を持つ。そのため、Supernova Impostor が暗めの IIn 型超新星だと誤って同定さ れることがある。

Supernova Impostor の一例として SN 2009ip がある。図 1.12 は SN 2009ip の R バンドのライト カーブである。2009 年と 2011 年付近に大きく光度が上昇しているが、これが LBV の質量放出に よるアウトバーストによるものであると考えられている [12]。また、2012 年にも光度が急激に上 昇しているが、この時の光度上昇はアウトバーストによるものではなく、本物の超新星爆発を起こ したことによるものだと推定されている (図 1.13)[12]。図 1.14 は SN2009ip の 2009 年から 2011 年 のスペクトルである。IIn 型超新星によく似た非常に幅の狭い Hα 輝線が見られることがわかる。



図 1.12. SN 2009ip の 2009 年から 2012 年のライトカーブ [10]。2009Eruptipon、2011Eruption と図に書かれ ているところで急激に光度が上昇している。これは、LBV の激しい質量放出によるアウトバーストと推定 されている。



図 1.13. SN 2009ip の 2012 年のライトカーブ [12]。2009 年や 2011 年の LBV アウトバーストのときと比べ て極大等級が4 等級ほど明るい。この爆発は LBV アウトバーストではなく超新星爆発だと考えられている。



図 1.14. SN 2009ip の 2009 年から 2011 年のスペクトル [11]。上から下に向かって時間変化をしている。IIn 型によく似た非常に幅の狭い Ha 輝線が見られる。(赤線で囲まれた部分)

#### **1.3** 本研究の目的

\$1.1で先述した通り、質量が40M<sub>☉</sub>以上の星は進化の途中の過程で、その強い放射圧のため激しい質量放出を行い、その後超新星爆発をすると考えられているが、観測的には未だにはっきりしていない。そのメカニズムを解き明かす鍵となるのが、このような大質量星の成れの果てと考えられている IIn 型超新星や、Supernova Imposter である。IIn 型超新星は超新星爆発を起こす前に質量放出を行い、親星の周りに広がった星周物質と超新星の ejecta が相互作用をすることで輝いていると考えられている。また、Supernova Impostor とは、超新星になる前の段階で激しい質量放出により引き起こされる、LBV アウトバーストと呼ばれる激しい爆発現象を指す。そのため、IIn 型超新星や supernova impostor を詳しく調べることは、進化の過程で質量放出を伴う大質量星の進化についての理解を深めることにつながる。

SN 2018hfg は IIn 型超新星と同定されたが Supernova Impostor の疑いもあるとされた超新星である(§2.1)。この超新星に対し測光学的な立場から親星の質量放出の手がかりを得ることが本研究の目的となる。

### 第2章 観測

#### 2.1 観測天体

#### 2.1.1 SN 2018hfg

本研究の観測対象は SN 2018hfg である。この超新星は 2018 年 10 月 9 日に超新星探査プロジェ クト All-Sky Automated Survey for Surpernovae (ASAS-SN)<sup>1</sup> によって棒渦巻銀河 UGC4642 にて発 見された。発見直後のスペクトルから IIn 型超新星であると同定されたが、TRANSIENT NAME SARVER <sup>2</sup>において超新星グループ Padova-Asiago <sup>3</sup> の classification report によると、この超新星 は SN 2009ip のような Supernova Impostor である疑いもあるとされた。我々は広島大学が所有す るかなた望遠鏡を用いて、2018 年 10 月 12 日から測光観測を行った。図 2.1 は HOWPol で 2018 年 10 月 12 日に B バンドで撮像された SN 2018hfg と UGC 4642 のイメージである。UGC4642 のバ ルジから近く、さらに銀河の腕に超新星が乗っているため、特に爆発から日数が経ち暗くなった 段階では背景光のコンタミネーションが懸念される。測光処理は注意深く行う必要がある。



図 2.1. SN2018hfg と UGC4642(2018 年 10 月 12 日 B バンド)

#### 2.1.2 母銀河

超新星が生まれた銀河のことを母銀河という。つまり、SN2018hfgの母銀河はUGC 4642 である。表 2.2.1 に UGC 4642 の概要を示している。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>http://www.astronomy.ohio-state.edu/asassn/index.shtml

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>https://www.wis-tns.org/

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>http://graspa.oapd.inaf.it/about.html

項目	値	出典
R.A.	08 h52 m56.629 s	SIMBAD[13]
Decl.	+42 d24 m54.38 s	SIMBAD[13]
分類	棒渦巻銀河	SIMBAD[13]
距離	108.4±7.6 Mpc	NED[14]
赤方偏移	0.02386	NED[14]
距離指数 m-M	35.18±0.11 mag	NED[14]
見かけの等級 (R バンド)	13.3 mag	SIMBAD[13]
星間赤化 E(B-V)	0.0235 mag	IRSA[15]

表 2.1: SN2018hfg の母銀河 UGC 4642 の概要

#### 2.2 かなた望遠鏡

かなた望遠鏡は広島大学宇宙科学センター付属東広島天文台に設置されている光学望遠鏡であ る(図 2.2)。望遠鏡の主鏡の有効径は 1.5 m であり、国内に存在する望遠鏡として最大級で、国内 の大学が所有する望遠鏡の中では4番目の大きさをほこる。また、かなた望遠鏡は経緯台の方位 軸周りの最大角速度は5度/秒、高度軸周りの最大角速度は2度/秒と非常に機動力が高い。この特 徴を活かして超新星やガンマ線バーストなどの突発天体の観測をいち早くおこなっている。かな た望遠鏡のその他の仕様を表 2.2 に示す。



図 2.2. かなた望遠鏡

|--|

項目	仕様
光学系	Ritchey-Chretien 光学系
主鏡の有効径	1500 mm
主鏡材	ULE(Ultra Low Expansion; 超低膨張) ガラス
合成 F 値と焦点距離 f	F/12.3 f=18,501.7 mm
視野	直径 15 分角 (=0.25 度)
焦点面スケール	11.148 秒角/mm
架台	経緯台 最大角速度 方位軸まわり 5 度/秒 高度軸まわり 2 度/秒
総重量	約17トン
搭載可能重量	カセグレン焦点 500 kg ナスミス焦点 1000 kg

#### 2.2.1 HOWPol

ー露出広視野変更撮像装置"HOWPol"(Hiroshima One-shot Wide-field Polarimeter) はかなた望遠 鏡のナスミス焦点の一つに取り付けられている装置であり、主に可視光域の観測を目的とした検 出器である (図 2.3)。広視野撮像モードのほかに、偏光撮像(広視野型と狭視野型)、および分光 のモードを搭載している。HOWPol の仕様を表 2.3 に示す。



図 2.3. HOWPol

波長域	0.45-1.0 μm
	撮像 15 分角
扫明	広視野偏光撮像7分×7分
1元王/	狭視野偏光撮像 15 分×1分
	分光 2.3 秒×15 分
フィルター	B,V,R,I,z
グリズム	420 /mm ,R=400
CCD	完全空欠乏型 CCD
阳田华如	撮像 19.2 mag(R バンド 10 分露出)
胶介守拟	偏光撮像 16.0 mag(R バンド 10 分露出)

表 2.3: HOWPol の仕様 [17]

#### 2.3 観測ログ

SN2018hfgの測光観測の概要を表 2.4 に示す。かなた望遠鏡の HOWPol にて 2018 年 10 月 12 日 から 2019 年 2 月 23 日まで 40 夜観測を行ったのち、これ以降は太陽方向と重なり、観測できない 期間となった。この期間が終わった 11 月にもう一度観測を行ったが、既に SN 2018hfg は望遠鏡 の限界等級以下まで減光し見えなくなっていた (図 2.4)。そのため観測夜数は、先述した 40 夜に 11 月 2 日の 1 夜分を加えた 41 夜数となっている。詳細な観測ログは補遺に示している。

表 2.4: 観測の概要

望遠鏡	かなた望遠鏡
検出器	HOWPol
観測バンド	B,V,R,I
観測期間	2018/10/12-2019/02/23 , 2019/11/02
観測夜数	41



図 2.4. SN2018hfg があった場所のイメージ (2019 年 11 月 2 日 B バンド)。左側が超新星が写っているイメー ジで右側が 2019 年 11 月 2 日 B バンドのイメージである。2019 年 11 月 2 日にはもうすでに超新星が見え なくなっていることがわかる。

# 第3章 データリダクションと結果

#### 3.1 1次処理

観測を行って得られたデータ(生データ)をそのまま天文学的な解析に用いることはできない。 それは、検出器の性質によるノイズやピクセルごとの感度ムラがあるからである。データの解析 を行うにはそれらを除去・補正する必要がある。この処理を1次処理という。具体的にはオーバー スキャン領域処理、バイアス処理、フラット処理を行う。

#### オーバースキャン領域処理

HOWPol で取得されたデータにはイメージを縦方向に貫通している黒線の領域がある (図 3.1)。こ れは、検出器から電荷を読み出す際に実際のピクセル数よりも超過して電化輸送し読み出して画 像化している領域であり、オーバースキャン領域という。この領域を切り取りつつ、そのカウン トから読み出し時のローカルなバイアス成分を見積もって同じピクセル列のカウントから差し引 きし、画像を合成する処理がオーバースキャン領域処理である。この処理を IRAF で howossub コ マンドを用い行なった。図 3.2 はオーバースキャン領域処理後のデータである。分割されていた画 像がつながっていることがわかる。



図 3.1. 生データ (2018/10/12 B バンド)



図 3.2. オーバースキャン領域処理後のデータ

バイアス差し引き

検出器から電荷を読み出す際にかけられる電圧により、検出器に光を当てなくてもカウントが生 じる。このとき生じるカウントをバイアスという。バイアスは読み出し方式に応じた固定パター ンを持ち、このパターンを天体画像から差し引く必要がある。バイアスパターンは大きく変化し ないため、同日に取得した画像のバイアスパターンは一定だと考えて良い。そのため、同日に取 得した0秒読み出しの画像をバイアス画像(図 3.3)とし、IRAFの imarith コマンドでバイアスの差 し引きを行なった(図 3.4)。





図 3.3. バイアス画像 (オーバースキャン処理済み)

図 3.4. バイアス差し引き後のデータ

#### フラット化処理

望遠鏡装置に一様な光を当てたときでも、検出器のピクセル毎に感度の違いがあったり、フィル ターの汚れなどによって感度ムラが生じている。そのため、それを補正する必要がある。補正に は、フラットボードと呼ばれる平らな板にハロゲンランプで光をあて、それを撮像することで得 られるフラットフレームを用いる(図 3.5)。このフラット画像を規格化し、IRAFの imarith コマン ドで割り算を行うことによってフラット化処理を行なった(図 3.6)。



図 3.5. フラットフレーム



図 3.6. フラット化処理後のデータ

#### 3.2 測光処理

天体の明るさを測ることを測光という。測光には開口測光と PSF 測光の2種類の手法が用いられる。

#### 開口測光

開口測光では、設定した半径の園内に含まれるピクセルのカウントの積分値で星の明るさを測る (図 3.7)。また、このとき天体の明るさにはスカイの明るさも含まれてしまっているので、その外 側にドーナツ状となるような領域を作り、その領域でのカウントの平均値をスカイの値として差 し引く。こうすることで、背景光の寄与を差し引くことができる。



図 3.7. 開口測光の概念図 [1]。

#### PSF 測光

PSF 測光では、撮像データにおいて視野内の任意の複数の星から PSF モデルを作り、測光したい 天体にフィッティングすることにより測光を行う。開口測光では、 星団、星雲、銀河など込み入っ た領域に分布する星を測光する際、背景光のコンタミネーションから星の明るさを過大評価して しまうことが多いが、PSF 測光ではモデルを作成しフィッティングしているため、混み入った領域 でも比較的精度の高い測光結果が得られる。

#### 3.3 銀河のテンプレート差し引き

PSF 測光を行うと、PSF モデルによって実際の星をうまくフィッティングできているかを確認す るための、元の画像から PSF モデルを差し引いた画像が生成される。つまり、この画像において、 フィッティングを行った星が綺麗に差し引けていればうまく PSF 測光が成功したといえる。しか し、研究天体 SN 2018hfg の PSF 測光の結果を確認すると、銀河成分まで差し引いてしまい、うま く測光することができていなかった (図 3.8)。



図 3.8. PSF モデルを元の画像から差し引いた画像 (右)。穴のように見えるのは銀河成分まで差し引いてしまっていることを差し、超新星のカウントを過大評価していることから、うまく測光できていない。

そのため本研究では、観測最終日に撮像された、もうすでに超新星が見えなくなり銀河のみが 写っている画像 (テンプレート画像:図 2.4 参照) を用いて、撮像データから銀河成分を差し引き、 超新星のみの画像に対し測光処理を行うことにした。銀河のテンプレート差し引きは以下の手順 で行なった。

#### 1. 画像の位置・向き・縮尺合わせ

撮像データによって画像の位置や向きや縮尺が異なっている場合があるため、差し引きをしたい画像(以下、インプット画像)とテンプレート画像でこれらを合わせる必要がある。この作業は、まず solve-field というソフトウェアで撮像データとテンプレート画像の座標系を世界座標系 (WCS) に変換した後、それらの画像に対して WCSremap というソフトウェアで位置合わせを行うことで処理した。

2. テンプレート差し引き

手順1を行なったインプット画像とテンプレート画像を用いて画像の差し引きを行う(図 3.9)。こ の差し引きには HOTPANTS というソフトウェアを用いる。HOTPANTS には多様なコマンドが存 在し、画像ごとにパラメータを設定できるようになっている。HOTPANTS の全コマンドの概要は 補遺に記載している。



図 3.9. 銀河のテンプレート差し引きの一例。左からインプット画像 (2018 年 10 月 12 日 B バンド)、テン プレート画像 (2019 年 11 月 2 日 B バンド)、差し引き後の画像。超新星の背後の銀河成分がうまく差し引 けていることがわかる。

本研究では、HOTPANTSのコマンドのパラメータを様々に変えてテンプレート差し引きの具合 を確かめてみることで、HOWPol で得られた撮像データでの銀河のテンプレート差し引きの最適 パラメータの導出を試みた。まず、観測装置ごとに決まる装置固有のパラメータを表 3.1 のように 設定した。

表 3.1: 銀河のテンプレート差し引きに用いた共通パラメータ

コマンド	パラメータ
ig	2.0
tg	2.0
ir	10.0
tr	10.0
n	i

コマンド ig,tg はそれぞれインプット画像、テンプレート画像のゲインであり、コマンド ir,tr はそれぞれインプット画像、テンプレート画像の電子数単位での読み出しノイズである。また、コ マンド n はインプット画像とテンプレート画像のどちらにスケールを合わせるかを設定するコマ ンドであり、今回はインプット画像の超新星本来のカウントを変えないようにするため、i と設定 した。次に、インプット画像の有効ピクセルを決めるカウントの上限を設定するコマンド iu のパ ラメータをバンドごとに 4 通り用意し、それぞれ差し引きを試みた。各バンドの iu のパラメータ は各バンドにおいておおまかに銀河カウントの最大値を少し超える程度を iu のパラメータの最低 値とし、そこから 1000,2000,3000 ずつ高い値に iu のパラメータを設定した。補遺に各バンドにお いて設定したパラメータとその結果を示している。〇 はうまく差し引きが成功したもの、+ は引 き残りがあったもの、- は銀河成分をを引きすぎてしまったもの、 × は全く差し引きができなかっ たものとなっている。判断基準としては、明らかに超新星の周囲がスカイと比べて明るくなって いたり、銀河付近が穴のようになっているものは目視で判断し、少し引き残りがあるが測光に影 響するか微妙なものは、iraf の imexamine コマンドで測光に影響が出るかを確認し判定した。

まず、銀河と超新星のカウントの最大値よりも iu のパラメータを高く設定しないと差し引くこ とができない。そのため、各インプット画像の銀河と超新星のカウントの最大値を確認する必要 がある。また、 iu のパラメータを銀河のカウントの最大値よりも数百カウント程度高い設定にし た場合、うまく差し引けないことが多かった (図 3.10)。一方で、 iu のパラメータが銀河のカウン トの最大値に比べて高すぎてもうまく差し引けないケースもあった (図 3.11)。これらを総合する と、 iu のパラメータを銀河のカウントの最大値よりも 1000-3000 ほど高い値に設定したものがう まく引けていることが多いことがわかった。 iu のパラメータをこの方針で設定することで全イン プット画像の 8 割ほどはうまく銀河成分を差し引くことができた。この iu のパラメータだけを変 更するだけではうまく差し引きができなかったものの日付を見ていくと、各バンドで差し引きが できなかった日が同じ場合が多いことがわかる。そのような日の撮像データを調べてみるとスカ イの値が他の日に比べて非常に高く、それにより銀河カウントの最大値も高くなっていることが 多い。また、B バンド、V バンドと比べて R バンドや I バンドはうまく差し引きができていないも のが多い。R バンドや I バンドや V バンドと比べて明るいため、銀河カウントの最大 値も高いことがいえる。これらの傾向から、空のコンディションやバンドの差で銀河のカウント が高いときは iu のパラメータを設定するだけではうまく差し引けないことが多いといえる。

26



図 3.10. 2019 年 2 月 13 日の R バンドにおける差し引きの結果。コマンド iu のパラメータは左上、右上、左下、右下でそれぞれ 4000,5000,6000,7000 であり、銀河カウントの最大値は 4400 である。銀河カウントの最大値よりも iu が小さいときはうまく差し引きできていない。また、iu のパラメータが 5000 のときより も 6000 や 7000 のほうが銀河成分をやや綺麗に差し引けていることがわかる。



図 3.11. 2018 年 11 月 4 日の B バンドにおける差し引きの結果。コマンド iu のパラメータは左上、右上、左下、右下でそれぞれ 2000,3000,4000,5000 であり、銀河成分の最大値は 600 である。パラメータが 2000,3000 のときはうまく差し引けているのに対し、パラメータが 4000,5000 のときは銀河成分を引きすぎてしまっていることがわかる。

次に、差し引きに失敗したデータに対して、iu を銀河・超新星のカウントの最大値よりも 2000-3000 ほど高い値に固定した状態でコマンド nsx, nsy のパラメータを変更することにより差し引き が成功するかを確認した。HOTPANTS では、まず画像を x,y 方向をスタンプとして領域分けを行 う処理が実行されている。nsx, nsy はスタンプを形成するための x,y 方向の分割数をいくらにする かを決めるコマンドであり、パラメータのデフォルト値はそれぞれ 10 である。この nsx, nsy のパ ラメータをそれぞれ 20 とそれぞれ 30 にすることでうまく差し引けるようになったかを確かめた ところ、コマンド iu のパラメータ設定だけでは失敗した画像の多くで銀河成分の差し引きに成功 した (図 3.12)。これは、分割数を大きくすることにより、デフォルト値よりも小さな領域でイン プット画像とテンプレート画像のシーイング、スケーリングを合わせることができるようになった 結果、うまく差し引けたものと考えられる。



図 3.12. 2018 年 10 月 25 日の R バンドにおける差し引きの結果。コマンド snx, sny のパラメータは画像左 から 10(デフォルト),20,30 である。snx, sny をデフォルト値から変更したものは銀河成分の引き過ぎを改善 できている。

以上の2つのコマンドのパラメータを設定することによって、全撮像データの95パーセントに 対して銀河のテンプレート差し引きを成功させることができた。特に B バンドはすべての画像で 差し引きに成功した。一方で、V バンド、R バンド、I バンドでは iu のパラメータ設定で差し引け なかった画像の6割程度しか snx, sny のパラメータ設定でうまく差し引くことができなかった。 これは、V,R,I バンドのテンプレート画像の質が悪かったことが原因だと考えられる。表 3.2 はテ ンプレート画像のバンドごとの銀河カウントの最大値を表している。これを見ると、B バンドは インプット画像の銀河カウントの最大値と近いものが多いのに対し、V,R,I バンドは明らかにイン プット画像に比べて銀河カウントの最大値が大きい。このテンプレート画像の差によって、B バ ンドと V,R,I バンドの差し引きに差が生じたと推定できる。

表 3.2:	テンプレー	ト画像のバン	ドごとの銀河カウン	トの最大値
--------	-------	--------	-----------	-------

バンド	銀河カウントの最大値
В	601
V	3367
R	7233
Ι	6402

また、銀河成分の差し引き後の撮像データと差し引き前の撮像データでそれぞれ開口測光を行い、Bバンドの光度曲線を比較した(図 3.13)。差し引きをしていないデータでは超新星の明るさを過大評価していることがわかる。特に爆発から日数が経ち、超新星が暗くなってからは差が顕著に表れている。



図 3.13. 銀河成分の差し引き前と差し引き後の B バンドの光度曲線の比較。青点が差し引き後に開口測光を 行ったもの、ピンク点が差し引き前に開口測光を行ったものである。差し引きをしていないデータでは超新 星の明るさを過大評価していることがわかる。

#### 3.4 絶対等級における多バンド光度曲線

銀河のテンプレート差し引きに成功した画像を用いて開口測光を行い、B,V,R,I バンドの多バン ド光度曲線を作成した (図 3.14)。まず、凡例の右に書かれている水色の誤差棒は距離における距 離の不定性による誤差であり、その大きさは±0.11 等級である。これをデータ点の誤差に含める と、この誤差が等級の誤差の主要因となっているためどの点もほぼ同じ誤差となり、データ点ごと の優越が見えづらい。そのためグラフのデータ点の誤差には含めていないが、実際の誤差はデー タ点の誤差よりも大きい。また、本来は見かけの等級と何らかの方法で推定された絶対等級の差 である距離指標 (Distance Modulus 。近傍の超新星では母銀河中の明るい変光星を用いて求められ ているケースが多い) から銀河との距離を決定するため、距離の不定性による誤差ではなく距離指 標の不定性による誤差がデータ点に乗るはずであるが、SN 2018hfg の母銀河 UGC 4642 は赤方偏 移以外の距離測定がなされていないため、赤方偏移から距離を求めて絶対等級に変換した。その ため、今回の系統誤差は距離の不定性による誤差が支配的である。

次に、天の川銀河の吸収による減光を補正する必要がある。表 3.3 は SN 2018hfg の母銀河 UGC 4642 方向における、天の川銀河内の星間物質による各バンドの減光量である。これらの値を用い て星間吸収の補正を行った。

このようにして得られた光度曲線が図 3.13 である。R バンドの極大等級は-19.3 等で IIn 型超新 星の中でも比較的明るい。この光度曲線から得られる情報を §4 で議論していく。



図 3.14. 絶対等級における SN 2018hfg の多バンド光度曲線

表 3.3: UGC 4642 方向における天の川銀河による各バンドの吸収量 [15]

バンド	吸収量 (mag)
В	0.100
V	0.074
R	0.058
Ι	0.042

## 第4章 議論

#### 4.1 SN 2018hfg と IIn 型超新星と Supernova Impostor の光度曲線

SN 2018hfg と過去によく研究された IIn 型超新星及び Supernova Impostor の B,V,R,I バンドの 光度曲線を比較した。比較に用いたのは非常に明るい IIn 型超新星 SN 2010jl、典型的な明るさの IIn 型超新星 SN 1998S、Supernova Impostor の SN 2009ip、SN 2008S で、図 4.1 - 4.4 はそれぞれ B,V,R,I バンドの光度曲線の比較図である。ここで、縦軸は縦軸は極大等級からの等級差、B バン ドが極大等級を取った日からの日数である。全体的な傾向として、SN 2018hfg は等級の減衰の速 度が SN 1998S や SN 2008S と比べると遅く、SN 2010jl に似たグラフの形状をしていることがわ かる。一方で、R バンド、I バンドでは SN 2018hfg は SN 2010jl とほとんど同じように等級が落ち ていくのに対して、B バンド、V バンドでは極大後 25 日付近までは同じような形状だが、その後 は SN 2018hfg のほうが早く等級が落ちていく。ここから、SN 2010jl と比べて SN 2018hfg がより 早く有効温度が下がっていることが考えられる。色進化については §4.3 で詳しく扱う。



図 4.1. SN 2018hfg と他の IIn 型超新星及び Supernova Impostor の B バンドの光度曲線の比較。縦軸は極大等級からの等級差、横軸は B バンドの極大等級を取った日からの日数を表している。(引用: Fransson et al.2014, Fassia et al.2000, Smith et al.2010, Botticella et al.2009)



図 4.2. SN 2018hfg と他の IIn 型超新星及び Supernova Impostor の V バンドの光度曲線の比較。他は図 4.1 と同じ。



図 4.3. SN 2018hfg と他の IIn 型超新星及び Supernova Impostor の R バンドの光度曲線の比較。他は図 4.1 と同じ。



図 4.4. SN 2018hfg と他の IIn 型超新星及び Supernova Impostor の I バンドの光度曲線の比較。他は図 4.1 と同じ。

#### 4.2 総輻射光度

総輻射光度とは、全波長にわたって足し合わせたフラックスから得られる光度のことをいう。つ まり、光で放出される総エネルギーを差す。しかし、本研究は可視の B,V,R,I バンドでの観測であ るため、直接には総輻射光度を求めることはできない。そこで、可視領域で放射される光度は総 輻射光度の 6 割であると仮定し [18]、SN 2018hfg の擬似的な総輻射光度を求めた。図 4.5 は SN 2018hfg と IIn 型超新星と Supernova Impostor の総輻射光度の比較である。

比較に用いたのは光度曲線でも比較した IIn 型超新星 SN 2010jl、SN 1998S、Supernova Impostor の SN 2009ip、SN 2008S の総輻射光度である。SN 2009ip は 2009 年の LBV アウトバーストの際 の総輻射光度を示してある。まず、SN 2018hfg は発見当初のスペクトルから Supernova Impostor である可能性が指摘されていたが、総輻射光度を見ると極大点で 10<sup>43</sup> erg を超えるほど大きく、 Supernova Impostor である SN 2009ip と SN 2008S 比べると桁違いに大きい。そのため、この超新星 は Supernova Impostor ではないと考えられる。また、図 4.6 は IIn 型超新星のみを抜き出し、拡大し て見やすくした図である。典型的な IIn 型超新星 SN 1998S と非常に明るい SN 2010jl と SN 2018hfg を比べると、SN 2018hfg の光度は SN 1998S と SN 2018hfg の中間程度であり、IIn 型超新星として もやや明るい部類であることがわかる。また、SN 1998S と比べて SN 2010jl と SN 2018hfg は光度 の減衰が緩やかである。これは、光度曲線を比較したときにも見られた傾向である。SN 2010jl は 一般的な IIn 型超新星と比べると光度の減衰が非常に遅く、遠くまで星周物質が分布していたこと が示唆されている [21]。そのため、SN 2010jl と似たような緩やかな光度の減衰を示す SN 2018hfg も同様に親星から遠くまで星周物質が分布していると推定される。



図 4.5. SN 2018hfg と IIn 型超新星と Supernova Impostor の総輻射光度の比較。可視 B,V,R,I バンドを総輻射 光度の 6 割だと仮定して擬似的な総輻射光度を算出した。



図 4.6. SN 2018hfg と IIn 型超新星の総輻射光度の比較

#### 4.3 色進化

波長が短いバンドの等級から波長が長いバンドの等級を差し引いたものを色指数という。色指数は表面温度が高い星ほど小さい値を取り、表面温度が低い星ほど大きい値を取るため、星の表面温度の尺度として用いられる。そのため、時間に対する色指数の変化を調べることで超新星の表面温度の変化を調べることができる。一方で、星間ガス中の微粒子によって吸収・散乱を受ける場合、吸収量は短波長側ほど大きく、そのままでは天体の色が本来の色よりも赤く見える星間赤化の影響を受けるため、その補正を行う必要がある。星間吸収量は B-V カラーの超過成分を示す、 E(B-V)で表される。本研究では天体ごとの E(B-V) 推定値に基づいた補正を行った後 [19][22][24]、 B バンドから V バンドの等級を引いた B-V の色進化を調査した。

図4.7はSN 2018hfgとIIn型超新星であるSN 2010jl、SN 1998S、Supernova ImpostorであるSN 2008Sの色進化を比較したものである。非常に明るいIIn型超新星であるSN 2010jlは時間に対してほとんどB-Vの値が変わらない、つまり表面温度が変化をしていない。一方で、SN 2018hfgは §4.1の光度曲線の短波長側の等級の減衰が大きいことから読み取れた通り、爆発後25日付近から B-Vの値が大きくなり、赤く進化していることがわかる。また、SN 2018hfgと典型的なIIn型超新 星 SN 1998Sは赤くなった後、一転して青くなっていく変化を示した一方で、Supernova Impostor であるSN 2008Sは最初わずかに青くなり、その後一方的な赤化に転じる進化を示した。このこと から、SN 2018hfgはSupernova ImpostorではなくIIn型超新星に近い色進化をしたと言える。



図 4.7. 時間に対する色指数の変化

# 第5章 まとめと今後

本研究では IIn 型超新星と同定されたものの、Supernova Impostor との類似性が指摘されていた SN 2018hfg に対して、広島大学かなた望遠鏡の撮像データを用いて測光解析を行った。また、こ の天体は母銀河 UGC 4642 のバルジから近く、さらに銀河の腕に超新星が載っているため、背景 光とコンタミネーションを起こし精度の高い測光が難しい。そのため、HOTPANTS というソフト ウェアを用い銀河成分の差し引きを行った。その結果、HOWPol で撮像されたデータでの、銀河 のテンプレート差し引きにおける HOTPANTS のコマンドの最適なパラメータを発見することに 成功した。解析では、総輻射光度や色進化から、SN 2018hfg は Supernova Impostor ではなくやや 明るい IIn 型超新星であると同定した。さらに SN 2010jl と光度の減衰が似ていることから、SN 2010jl と同様に爆発前の親星から遠くまで星周物質が分布していたと推定した。SN 2010jl は爆発 後1年以上が経過した後期において、可視光領域で減光し近赤外領域で増光を示す赤外超過を起 こし、超新星の周りにダストが生成されたと推定されている。そのため、SN 2010jl と同様に SN 2018hfg もダスト生成が行われたかもしれない。

SN 2018hfg は広島大学かなた望遠鏡に取り付けられているもう1つの観測装置"HONIR"で、近 赤外バンドである J,H,Ks バンドでの撮像が行われいる。また、それに加えて HOWPol による可視 スペクトル観測も行われている。今回は時間の都合上それらのデータ解析は行うことができなかっ たが、今後それらのデータを解析することで、近赤外領域での増光並びにダスト生成が起こった か、及び星周ガスの物理的状態についても調査していく。

# 補遺 A 観測ログ

観測日	MJD	観測バンド, モード	検出器
2018/10/12	58403.8	B,V,R,I	HOWPol
2018/10/17	58408.7	B,V,R,I,Spec	HOWPol
2018/10/18	58409.7	B,V,R,I	HOWPol
2018/10/19	58410.7	B,V,R,I	HOWPol
2018/10/20	58411.8	B,V,R,I,J,Ks	HOWPol,HONIR
2018/10/21	58412.7	B,V,R,I,Spec	HOWPol
2018/10/24	58415.8	B,V,R,I	HOWPol
2018/10/25	58416.7	B,V,R,I,J,H,Ks	HOWPol
2018/10/27	58418.8	B,V,R,I	HOWPol
2018/10/29	58420.8	B,V,R,I	HOWPol
2018/10/31	58422.7	B,V,R,I,Spec	HOWPol
2018/11/01	58423.8	J,Ks	HONIR
2018/11/03	58425.8	B,V,R,I	HOWPol
2018/11/04	58426.9	B,V,R,I	HOWPol
2018/11/06	58428.9	B,V,R,I	HOWPol
2018/11/13	58435.7	B,V,R,I,J,H,Ks	HOWPol,HONIR
2018/11/14	58436.8	B,V,R,I,J,H,Ks	HOWPol,HONIR
2018/11/15	58437.7	J,H,K	HONIR
2018/11/17	58439.8	B,V,R,I,Spec	HOWPol
2018/11/19	58441.7	B,V,R,I,J,H,Ks	HOWPol
2018/11/20	58442.7	B,V,R,I,Ks,Spec	HOWPol
2018/11/24	58446.7	B,V,R,I,Ks	HOWPol
2018/11/29	58451.7	B,V,R,I,J,H,Ks,Spec	HOWPol,HONIR
2018/11/30	58452.6	B,V,R,I	HOWPol
2018/12/10	58462.8	B,V,R,I,Spec	HOWPol
2018/12/15	58467.6	B,V,R,I,Spec	HOWPol
2018/12/18	58470.7	B,V,R,I	HOWPol

表 A.1: 観測ログ

観測日	MJD	観測バンド,モード	検出器
2019/01/06	58489.7	B,V,R,I	HOWPol
2019/01/08	58491.6	J,H,Ks	HONIR
2019/01/09	58492.8	B,V,R,I,J,H,Ks	HOWPol,HONIR
2019/01/12	58495.7	B,V,R,I,Spec	HOWPol
2019/01/13	58496.6	B,V,R,I	HOWPol
2019/01/14	58497.7	B,V,R,I	HOWPol
2019/01/15	58498.5	B,V,R,I	HOWPol
2019/01/21	58504.9	V,R,I	HOWPol
2019/01/27	58510.6	B,V,R,I	HOWPol
2019/01/29	58512.9	V,R,I	HOWPol
2019/02/01	58515.5	B,V,R,I	HOWPol
2019/02/04	58518.6	B,V,R,I	HOWPol
2019/02/07	58521.8	B,V,R	HOWPol
2019/02/13	58527.5	B,V,R,I	HOWPol
2019/02/17	58531.7	J,H,Ks	HONIR
2019/02/23	58537.5	B,V,R,I	HOWPol
2019/02/25	58539.4	J,H,Ks	HONIR
2019/10/30	58786.8	J,H,Ks	HONIR
2019/11/02	58789.7	B,V,R,I	HOWPol

表 A.2: 観測ログ (続き)

# 補遺 B HOTPANTSのコマンド集

HOTPANTS の全コマンドを表に示す。括弧は HOTPANTS のデフォルト値である。

表 B.1: HOTPANTS の必要なコマンド

コマンド	説明
-inmi fitsfile	インプット画像 (差分されるイメージ)
-tmplim fitsfile	テンプレート画像
-outim fitsfile	アウトプット画像 (差分を取ったイメージ)

表 B.2: HOTPANTS の追加コマンド(1)

コマンド	説明
-tu tuthresh	テンプレート画像における有効カウントの上限 (25000)
-tuk tucthresh	テンプレート画像におけるカーネルの有効カウントの上限 (tuthresh)
-tl tlthresh	テンプレート画像における有効カウントの下限 (0)
-tg tgain	テンプレート画像のゲイン (1)
-tr trdnoise	テンプレート画像の電子数単位での読み出しノイズ (0)
-tp tpedestal	テンプレート画像の ADU 単位でのペデスタル (0)
-tni fitsfile	テンプレート画像におけるノイズ成分画像 (undef)
-tmi fitsfile	テンプレート画像におけるマスクイメージ (undef)
-iu iuthresh	インプット画像における有効カウントの上限 (25000)
-iuk iucthresh	インプット画像におけるカーネルの有効カウントの上限 (iuthresh)
-il ilthresh	インプット画像における有効カウントの下限 (0)
-ig igain	インプット画像のゲイン (1)
-ir irdnoise	インプット画像の電子数単位での読み出しノイズ (0)
-ip ipedestal	インプット画像の ADU 単位でのペデスタル (0)
-ini fitsfile	インプット画像におけるノイズ成分画像 (undef)
-imi fitsfile	インプット画像におけるマスクイメージ (undef)
-ki fitsfile	イメージヘッダー中で使用すべきカーネルテーブル (undef)
-r rkernel	畳み込みカーネルの半値幅()
-kcs step	空間方向の畳み込みのステップのサイズ (2*rkernel+1)

#### 表 B.3: HOTPANTS の追加コマンド (2)

コマンド	
-ft fitthresh	カーネルフィットにおける良好重心の RMS しきい値
-sft scale	…の場合には fitthresh の値をスケール倍する (0.5)
-nft fraction	スタンプのこの割合を fill しない (0.1)
-omi fitsfile	良好でないピクセルマスクを出力する
-gd xmin xmax ymin ymax	フルイメージのこの部分だけを使用する (Full image)
-nrx xregion	x 方向の画像領域の数 (1)
-nry yregion	y 方向の画像領域の数 (1)
-rf regionfile	'xmin:xmax,ymin:ymax 'の領域の ascii file
-rkw keyword num	ヘッダーの 'keyword[0≥(num-1)]' で有効な領域を示す
-nsx xstamp	x 方向のそれぞれの領域のスタンプの数
-nsy ystamp	y 方向のそれぞれの領域のスタンプの数
-ssf stampfile	acii ファイルでサブスタンプの中心座標 (x,y) を示す
-cmp cmpfile	.cmp ファイルでサブスタンプの中心座標 (x,y) を示す
-afssc find	スタンプの中心を自動検出 =-nss when -ssf,-cmp (1)
-nss substamp	各スタンプに使用する重心の数(3)
-rss radius	各重心の周りを抽出するサブスタンプの半値幅(15)
-savexy file	畳み込みカーネルを決めるのに使った
	スタンプの x,y 位置のファイルを保存 (undef)
-c toconvolve	テンプレート画像 (t) またはインプット画像 (i) に畳み込みを強制 (undef)
-n normalize	テンプレート画像 (t) とインプット画像 (i) のどちらを正規化するか (t)
-fom figmerit	畳み込みの評価関数にどれを使うか (v)ariance,(s)igna,(h)istgram (v)
-sconv	全ての領域を同じ方向に畳み込むか?(0)
-ko kernelorder	領域内のカーネルの変化の空間オーダー (2)
-bgo bgorder	領域内のバックグラウンドの空間オーダー (1)
-ssig statsig	シグマクリップのしきい値 (3.0)
-ks badkernelsig	カーネルフィットにおいてバッドスタンプの
	high sigma rejection をする (2.0)

### 表 B.4: HOTPANTS の追加コマンド (3)

コマンド	
-kfm kerfracmask	良好なピクセルにおけるカーネルの合計の割合 (0.990)
-okn	良好なピクセルにおけるノイズを求めた後 rescale するか? (0)
-fi fill	有効でないピクセルの値をこの値で置き換える (1.0e-30)
-fin fill	ノイズイメージをこの値で置き換える (0.0e+00)
-convvar	ノイズでない分散を畳み込むか? (0)
-oni fitsfile	ノイズのイメージを出力 (undef)
-ond fitsfile	差分をとった画像のノイズスケールを出力 (undef)
-nim	サブイメージにレイヤーとしてノイズイメージを加えるか?(0)
-ndm	サブイメージにレイヤーとしてノイズをスケールした
	イメージを加えるか? (o)
-oci fitsfile	畳み込まれたイメージを出力 (undef)
-cim	畳み込みイメージをレイヤーとして出力するか?
-allm	全ての出力可能なイメージを出力する
-nc	アウトプット画像の上書きを禁止するか? (0)
-hki	アウトプット画像のヘッダーに対してカーネルの情報を書き込むか?(0)
-oki fitsfile	カーネルの情報がある新しい fitsfile を出力する (undef)
-sht	32bit のピクセルに対してアウトプット画像を 16bit で出力する (0)
-obs	もし -sht でアウトプット画像が BSCALE なら -inim を無視する (1.0)
-obz bscale	もし -sht でアウトプット画像が BZERO なら -inim を無視する (0.0)
-nsht bzero	32bit のピクセルに対してノイズイメージを 16bit で出力する
-nbs bscale	n ノイズのイメージが BSCALE だけなら -obs を無視する (1.0)
-nbz bzero	ノイズのイメージが BZERO だけなら -obz を無視する (0.0)
-ng ngauss degree0 sigma0	ngauss:カーネルを構成するガウス分布の数 (3)
	degree:ガウシアンに関連付いた多項式の次数 (6,4,2)
	siguma:ガウシアンのシグマ (0.70,1.50,3.00)
-pca nk k0.fits n(k-1).fits	nk:インプット基底関数の数
	基底関数を要する fitsfile の名前
-V	verbosity $\mathcal{O} \lor \check{\mathcal{V}} $ , 0-2 (1)

# 補遺 C 銀河のテンプレート差し引きのパラメー タと結果

銀河のテンプレート差し引きにおいて設定したパラメータとその結果を示す。表 C.1 - 表 C.12 は B,V,R,I バンドにおいて iu のパラメータを設定したものである。銀河カウント・超新星カウン トの最大値は 10の位以下を切り捨てたものである。表の○はうまく差し引きが成功したもの、+ は引き残りがあったもの、- は銀河成分をを引きすぎてしまったもの、× は全く差し引きができ なかったものとなっている。また、solve-field によって座標を WCS に変換できなかったものは省 いている。

		iu	iu	iu	iu		銀河カウント	超新星カウント
date	number	2000	3000	4000	5000	FWHM(秒角)	の最大値	の最大値
2018/10/12	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.4	600	1200
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.5	600	1100
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.4	600	1100
2018/10/17	4	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.7	400	700
	5	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.6	400	700
2018/10/19	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.9	600	800
2018/10/20	1	-	-	-	-	2.4	600	1400
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.4	600	1400
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.3	700	1400
2018/10/21	1	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.5	1900	2400
	2	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.4	1800	2400
	3	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.6	1800	2300
2018/10/24	1	$\times$	$\times$	-	-	2.4	3200	3900
2018/10/25	1	$\times$	$\times$	-	$\bigcirc$	3	3200	3500
	2	$\times$	×	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3	3100	3500
	3	$\times$	$\times$	-	$\bigcirc$	2.9	3100	3400
2018/10/27	1	$\times$	$\bigcirc$	-	-	5.3	2000	2100
2018/10/29	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	5.2	1800	2000
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.6	1700	1900
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.7	1700	1900

表 C.1: B バンドにおける iu のパラメータとその結果(1)

		iu	iu	iu	iu		銀河カウント	
date	number	2000	3000	4000	5000	FWHM(秒角)	の最大値	の最大値
2018/10/31	1	0	0	0	0	3.5	1000	1400
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.4	1000	1400
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.4	1000	1400
2018/11/03	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.7	600	1200
	2	-	-	-	-	2.6	600	1300
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.7	600	1100
2018/11/04	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.1	600	1200
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	-	-	3.4	600	1100
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.4	700	1200
2018/11/06	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.3	600	1400
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.6	600	1200
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.6	700	1400
2018/11/13	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.6	500	700
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.4	500	700
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.7	500	700
2018/11/14	1	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.3	600	1400
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.2	600	1400
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.5	500	1200
2018/11/17	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.2	400	600
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.2	400	700
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.5	400	600
2018/11/19	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.8	1400	1500
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.7	1400	1500
2018/11/20	1	×	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.2	1800	2100
	2	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.9	1700	2100
	3	×	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.2	1700	2000
2018/11/24	1	$\times$	$\times$	-	$\bigcirc$	3.6	3600	3900
	2	$\times$	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.1	3500	3900
	3	×	X	Х	$\bigcirc$	2.6	3500	3900
2018/11/29	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3	1200	1400
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3	1200	1400
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.2	1200	1400
2018/11/30	2	+	+	+	+	2.8	500	700
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.9	600	700
2018/12/10	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.8	500	700
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.8	400	600
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.9	400	600

表 C.2: B バンドにおける iu のパラメータとその結果 (2)

		iu	iu	iu	iu		銀河カウント	超新星カウント
date	number	2000	3000	4000	5000	FWHM(秒角)	の最大値	の最大値
2018/12/15	1	0	0	0	$\bigcirc$	2.2	800	1200
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.3	800	1100
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	-	-	2	800	1200
2018/12/18	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.8	600	800
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.4	500	700
	3	-	-	-	-	3.2	600	700
2019/01/06	1	+	+	+	+	4.2	600	700
	2	+	+	+	+	4.2	700	700
	3	+	+	+	+	3.8	700	700
2019/01/09	1	+	+	+	+	3.3	700	900
	2	+	+	+	+	3.4	700	900
	3	+	+	+	+	3.2	800	900
2019/01/12	1	+	+	+	+	4.3	700	700
	2	+	+	+	+	3.8	600	700
	3	+	+	+	+	3.7	700	800
2019/01/13	1	+	+	+	+	4.9	800	900
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.9	800	900
	3	+	+	+	+	4.6	800	900
2019/01/14	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	-	-	4.7	600	600
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.5	600	700
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.1	600	700
2019/01/15	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.1	1800	1900
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	-	-	3.1	1700	1800
2019/01/27	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4	600	700
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.6	700	700
2019/02/01	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.3	1000	1000
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	-	-	3.3	1000	1000
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.2	1000	1000
2019/02/04	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	5.3	700	700
	2	+	+	+	+	4.4	700	700
	3	+	+	+	+	3.9	700	700
2019/02/13	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.9	1700	1700
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	-	-	5.2	1700	1700
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	-	5.1	1700	1700
2019/02/23	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.4	800	800
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.7	800	800
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.4	800	800

表 C.3: B バンドにおける iu のパラメータとその結果 (3)

		iu	iu	iu	iu		銀河カウント	超新星カウント
date	number	4000	5000	6000	7000	FWHM(秒角)	の最大値	の最大値
2018/10/12	1	+	+	+	+	2.3	1600	2100
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.5	1500	1800
	3	+	+	+	+	2.3	1600	2100
2018/10/17	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.4	1500	1700
	2	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.2	1400	1700
	3	-	-	-	-	2.2	1400	1800
	4	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.8	1300	1600
	5	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.3	1400	1800
	6	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.5	1300	1600
2018/10/18	1	$\times$	$\times$	$\bigcirc$	$\times$	4.6	2800	2900
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.5	2600	2700
	3	-	$\times$	$\times$	$\times$	3.6	3400	3400
2018/10/19	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4	2300	2500
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.7	2200	2500
	4	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.9	2700	2800
	5	-	-	-	-	3.8	2300	2600
	6	-	-	-	-	4	2300	2600
2018/10/20	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.5	1600	2700
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.5	1600	2400
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.5	1700	2800
2018/10/21	1	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.5	2900	3500
	2	-	-	-	-	2.4	2900	3600
	3	-	-	-	-	2.5	2900	3700
2018/10/24	1	$\times$	-	$\bigcirc$	-	2.5	4000	4800
2018/10/25	1	$\times$	$\bigcirc$	-	$\times$	2.8	4000	4600
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.9	4000	4400
	3	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.9	3900	4400
2018/10/27	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.4	3600	3700
2018/10/29	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.6	2700	2700
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.4	2600	2700
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.1	2600	2900
2018/10/31	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.7	1900	2600
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.9	1900	2400
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.9	1900	2400
2018/11/03	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.6	1400	2400
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.5	1500	2700
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.5	1500	2700

表 C.4: V バンドにおける iu のパラメータとその結果 (1)

		iu	iu	iu	iu		銀河カウント	超新星カウント
date	number	4000	5000	6000	7000	FWHM(秒角)	の最大値	の最大値
2018/11/04	1	0	0	0	$\bigcirc$	3	1700	2800
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.1	1700	2400
	3	-	-	-	-	2.8	1900	2800
2018/11/06	1	-	-	-	-	2.9	1600	2700
	2	-	-	-	-	2.9	1600	2900
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.4	2000	2700
2018/11/13	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.7	1100	1400
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.2	1200	1400
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.9	1200	1600
2018/11/14	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.2	1400	2400
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.5	1500	2300
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.3	1500	2500
2018/11/17	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.6	1100	1200
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.1	1200	1500
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.2	1100	1400
2018/11/19	1	-	-	-	-	3.7	2100	2300
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.8	2100	2300
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.7	2100	2200
2018/11/20	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.2	2600	3000
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.3	2800	3000
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.4	3100	3400
2018/11/24	1	$\times$	×	-	-	2.6	4600	5100
	2	$\times$	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.7	4600	5000
	3	×	$\bigcirc$	-	-	2.8	4600	5000
2018/11/29	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.1	2400	2500
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.3	2300	2500
	3	$\bigcirc$	0	0	$\bigcirc$	3.1	2400	2600
2018/11/30	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.6	1500	1600
	2	-	-	-	$\bigcirc$	2.4	1500	1700
	3	-	0	0	$\bigcirc$	3.5	1500	1800
2018/12/10	1	$\bigcirc$	0	0	$\bigcirc$	2.9	1300	1400
	2	$\bigcirc$	0	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3	1300	1500
	3	$\bigcirc$	0	0	$\bigcirc$	2.9	1300	1500
2018/12/15	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.3	1800	2100
	2	-	-	-	-	2.5	1800	2200
	3	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.3	1800	2100

表 C.5: V バンドにおける iu のパラメータとその結果 (2)

		iu	iu	iu	iu		銀河カウント	超新星カウント
date	number	4000	5000	6000	7000	FWHM(秒角)	の最大値	の最大値
2018/12/18	1	0	0	0	$\bigcirc$	2.8	1500	1700
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.7	1600	1800
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.6	1600	1700
2019/01/06	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.2	1600	1600
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.4	1700	1600
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.4	1700	1700
2019/01/09	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.2	1900	1900
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.2	1900	1800
	3	-	-	-	-	3.1	1900	1900
2019/01/12	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.5	1500	1400
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.8	1600	1500
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.9	1700	1500
2019/01/13	1	-	-	-	-	4.4	1900	1900
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.4	1800	1700
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.4	1900	1700
2019/01/14	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.2	1900	1900
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.8	1900	1900
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.1	1900	1900
2019/01/15	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.3	3200	3100
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.1	3300	3200
	3	$\bigcirc$	-	-	-	2.8	3400	3400
2019/01/27	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.2	1900	1800
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.6	1900	1800
	3	-	-	-	-	3.1	2100	2000
2019/01/29	1	-	-	-	-	3.2	4200	4000
	2	$\times$	-	-	-	3	4300	4100
	3	$\times$	-	-	$\bigcirc$	2.9	4500	4300
2019/02/01	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.3	2500	2300
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.8	2600	2300
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.1	2500	2300
2019/02/04	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.4	2000	1800
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.2	2100	1900
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.6	2000	1800
2019/02/13	1	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.5	3900	3600
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.1	3700	3500
	3	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.9	3900	3800
2019/02/23	1	0	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.6	2500	2200
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.4	2400	2100
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.8	2400	2000

表 C.6: V バンドにおける iu のパラメータとその結果 (3)

		iu	iu	iu	iu		銀河カウント	超新星カウント
date	number	4000	5000	6000	7000	FWHM(秒角)	の最大値	の最大値
2018/10/12	1	-	-	-	-	2.5	1500	1600
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.2	1700	1700
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.1	1700	1900
2018/10/17	1	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	2.2	1100	1200
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.4	1100	1200
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.5	1100	1200
	4	-	-	-	-	2.2	1400	1600
	5	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.1	1500	1700
	6	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.2	1400	1700
2018/10/18	2	-	-	-	-	4	2300	2300
2018/10/19	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.7	2200	2100
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.9	1700	1600
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.2	1500	1500
	4	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.1	2200	2000
	5	+	+	+	+	4	2300	2200
	6	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.8	2300	2200
2018/10/20	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	+	+	2.3	1800	2200
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.3	1800	2200
	3	-	-	-	-	2.3	1800	2300
2018/10/21	1	-	-	-	-	2.3	2500	3100
	2	$\bigcirc$	+	+	+	2.3	2500	2900
	3	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.2	2500	3000
2018/10/24	1	-	-	-	-	2	3100	3700
	2	-	-	-	-	2.1	3100	3800
	3	+	-	-	-	2	3100	4000
2018/10/25	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.6	2900	3200
	2	-	-	-	+	2.5	3000	3300
	3	-	-	-	-	2.5	3000	3300
2018/10/27	1	+	+	+	+	3.5	2300	2400
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4	2100	2100
	3	0	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.8	2200	2200
2018/10/29	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.3	2000	2100
	2	0	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.8	2100	2100
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.7	2200	2300
2018/10/31	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.9	1700	2000
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.9	1800	2000
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.1	1800	2000

表 C.7: R バンドにおける iu のパラメータとその結果 (1)

		iu	iu	iu	iu		銀河カウント	超新星カウント
date	number	4000	5000	6000	7000	FWHM(秒角)	の最大値	の最大値
2018/11/03	1	0	0	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.3	1700	2400
	2	+	+	+	+	2.3	1600	2400
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.2	1700	2500
2018/11/04	1	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	3	2100	2700
	2	+	$\bigcirc$	+	+	2.6	2300	3100
	3	-	-	-	-	3	2300	3000
2018/11/06	1	+	+	+	+	2	2100	3300
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2	2100	3100
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2	2200	3200
2018/11/13	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.7	1300	1700
	2	-	-	-	-	2.9	1300	1500
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3	1300	1500
2018/11/14	1	+	+	+	+	2.3	1700	2400
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.4	1800	2600
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.4	1700	2300
2018/11/17	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.4	1200	1300
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.8	1300	1600
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.8	1300	1500
2018/11/19	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.9	1700	1700
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.8	1700	1600
	3	-	-	-	-	3.5	1700	1700
2018/11/20	1	-	-	-	-	2.6	2500	2700
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.8	2300	2600
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.8	2200	2500
2018/11/24	1	-	-	-	-	2.6	3600	3900
	2	$\times$	-	-	-	2.5	3700	4000
	3	$\times$	-	-	-	2.3	3800	4100
2018/11/29	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.9	2300	2400
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.9	2300	2500
	3	$\bigcirc$	-	-	-	3.1	2300	2400
2018/11/30	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.2	1300	1700
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.2	1400	1600
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.2	1300	1600
2018/12/10	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.8	1500	1600
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.6	1500	1700
	3	+	+	+	+	2.8	1500	1600
2018/12/15	1	0	0	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.2	1800	2000
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.2	1800	2100
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.2	1800	2100

表 C.8: R バンドにおける iu のパラメータとその結果 (2)

		iu	iu	iu	iu		銀河カウント	
date	number	4000	5000	6000	7000	FWHM(秒角)	の最大値	の最大値
2018/12/18	1	-	-	-	-	2.4	1600	1800
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.5	1600	1800
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.5	1600	1700
2019/01/06	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.1	1900	1800
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.1	2100	2000
	3	+	+	+	+	3.2	2000	1800
2019/01/09	1	-	-	-	-	3	2200	2100
	2	-	-	-	-	3.2	2000	1900
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.1	2200	2100
2019/01/12	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.3	2000	1800
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.4	1900	1700
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.6	1900	1700
2019/01/13	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.6	1900	1700
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.6	1900	1700
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.7	1900	1700
2019/01/14	1	+	+	+	+	3.1	1700	1600
	2	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.1	1700	1600
	3	-	-	-	-	3	1600	1600
2019/01/15	1	-	-	-	-	2.6	2900	2900
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	-	-	2.5	3000	3000
	3	-	-	-	-	2.3	3000	3100
2019/01/27	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	-	3.7	1600	1500
	2	$\times$	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.5	1600	1600
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.5	1600	1500
2019/01/29	1	-	+	+	+	3.1	3600	3200
	2	-	-	-	-	3	3800	3400
	3	-	-	+	+	2.9	3800	3500
2019/02/01	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.7	2800	2400
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.8	2800	2400
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.8	2800	2300
2019/02/04	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.4	2700	2200
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.4	2800	2300
	3	-	-	-	-	3.2	2800	2300
2019/02/13	1	+	-	-	-	2.8	4400	4000
	2	+	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.7	4400	4000
	3	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3	4100	3700
2019/02/23	1	0	0	$\bigcirc$	0	3.5	2900	2300
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.4	2800	2200
	3	-	-	-	-	3.4	2800	2300

表 C.9: R バンドにおける iu のパラメータとその結果 (3)

		iu	iu	iu	iu		銀河カウント	超新星カウント
date	number	4000	5000	6000	7000	FWHM(秒角)	の最大値	の最大値
2018/10/12	1	$\bigcirc$	0	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.3	2700	2100
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.5	2800	2100
	3	×	$\times$		$\bigcirc$	2.3	2800	2000
2018/10/17	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2	2100	1900
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.2	2500	2100
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.4	2400	2100
	4	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2	2400	2100
	5	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	1.9	2300	2200
	6	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2	2400	2100
2018/10/19	4	-	-	-	-	3.9	3700	2800
	5	+	+	+	+	3.9	3700	2900
	6	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.8	3900	3000
2018/10/20	1	*	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2	3100	3100
	2	-	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	1.9	3400	3400
	3	+	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	1.9	3600	3600
2018/10/21	1	-	-	-	-	2.1	3300	3400
	2	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.2	3300	3100
	3	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2	3400	3400
2018/10/24	1	$\times$	-	+	+	2	3800	3800
	2	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.2	3800	3700
	3	+	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2	3800	4000
2018/10/25	1	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.5	3500	3500
	2	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.6	3400	3200
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.6	3400	3300
2018/10/27	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.5	2800	2500
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.9	2700	2400
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.2	2700	2400
2018/10/29	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.9	2700	2400
	2	+	+	+	+	4.2	2600	2300
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4	2600	2400
2018/10/31	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.7	2500	2300
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.7	2500	2300
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.9	2500	2300
2018/11/03	1	+	+	+	+	2.6	2400	2400
	2	+	+	+	+	2.3	2600	2700
	3	+	+	+	+	2.6	2300	2300
2018/11/04	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.4	3500	3400
	2	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.1	3400	3500
	3	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3	3800	3800

表 C.10: I バンドにおける iu のパラメータとその結果 (1)

		iu	iu	iu	iu		銀河カウント	超新星カウント
date	number	4000	5000	6000	7000	FWHM(秒角)	の最大値	の最大値
2018/11/06	1	0	0	0	0	2.2	3200	3400
	2	+	-	-	$\bigcirc$	2	3600	3900
	3	-	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.1	3500	3700
2018/11/13	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.6	2100	2100
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.6	2100	2100
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.6	2100	2100
2018/11/14	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2	2700	3200
	2	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2	2700	3000
	3	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.1	2700	3000
2018/11/17	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.7	2100	2000
	2	+	+	+	+	3.1	2100	1900
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.9	2000	1900
2018/11/19	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.3	1900	1700
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.2	2200	2000
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.4	2200	2000
2018/11/20	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.7	3000	2900
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.9	3100	2900
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.8	3000	2900
2018/11/24	1	+	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.4	3900	3800
	2	-	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.3	3900	4000
	3	+	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.2	4000	3900
2018/11/29	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.8	2900	2700
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.8	2900	2700
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.2	2800	2500
2018/11/30	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.2	1900	1900
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.1	2100	2000
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.1	2000	1900
2018/12/10	1	+	+	+	+	2.7	2100	1800
	2	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.9	2100	1700
	3	+	+	+	+	2.7	2200	1800
2018/12/15	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.1	2600	2400
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.1	2600	2400
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.2	2500	2200
2018/12/18	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.4	2400	2100
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.5	2300	1900
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.4	2400	2000
2019/01/06	1	+	+	+	+	2.9	3600	2700
	2	+	+	+	+	3.2	3100	2400
	3	+	+	+	+	2.9	3200	2400

表 C.11: I バンドにおける iu のパラメータとその結果 (2)

		iu	iu	iu	iu		銀河カウント	超新星カウント
date	number	4000	5000	6000	7000	FWHM(秒角)	の最大値	の最大値
2019/01/09	1	+	0	0	0	3.2	3300	2300
	2	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3	3300	2100
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.1	3200	2200
2019/01/12	1	-	+	+	+	3.1	3300	2300
	2	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.7	3500	2500
	3	+	+	+	+	3	3300	2400
2019/01/13	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4.5	2800	2000
	2	+	+	+	+	4.4	2800	2100
	3	+	+	+	+	4.6	2900	1900
2019/01/14	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.7	2000	1700
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.8	2100	1700
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.8	2100	1700
2019/01/15	1	+	+	+	+	2.5	3900	3200
	2	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.6	3900	3100
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	2.7	3800	3000
2019/01/27	1	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.8	1700	1500
	2	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.5	1700	1500
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.6	1700	1500
2019/01/29	1	-	+	+	$\bigcirc$	2.9	5000	3600
	2	-	+	+	$\bigcirc$	2.8	5100	3600
	3	-	+	+	$\bigcirc$	2.9	5100	3600
2019/02/01	1	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	+	3.2	4100	2700
	2	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	+	3.2	3900	2500
	3	+	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.7	3600	2400
2019/02/04	1	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.2	4000	2400
	2	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.1	4000	2400
	3	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.1	3900	2400
2019/02/13	1	$\times$	+	+	$\bigcirc$	2.9	5500	4000
	2	$\times$	+	+	$\bigcirc$	2.8	5500	4000
	3	×	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3	5400	3900
2019/02/23	1	-	-	-	-	3.1	3900	2400
	2	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	+	2.9	3800	2300
	3	-	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$	3.4	4300	2500

表 C.12: I バンドにおける iu のパラメータとその結果 (3)

iu のパラメータ設定ではうまく差し引きができなかったものに対して、snx, sny のパラメータ 設定を行った。表 C.13 - 表 C.17 は snx, sny のパラメータとその結果である。

		snx,sny	snx,sny	snx,sny
date	number	10,10	20,20	30,30
2018/10/20	1	-	0	0
2018/10/24	1	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/11/03	2	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/11/30	2	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/12/18	3	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2019/01/06	1	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	2	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	3	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2019/01/09	1	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	2	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	3	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2019/01/12	1	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	2	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	3	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2019/01/13	1	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	3	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2019/02/04	2	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	3	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$

表 C.13: B バンドにおける snx, sny パラメータとその結果

		snx,sny	snx,sny	snx,sny
date	number	10,10	20,20	30,30
2018/10/12	1	+	0	0
	3	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/10/17	3	-	-	-
2018/10/18	3	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/10/19	5	-	+	+
	6	-	+	+
2018/10/21	2	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	3	-	-	-
2018/11/04	3	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/11/06	1	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	2	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/11/19	1	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/11/24	1	-	+	+
2018/12/15	2	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2019/01/09	3	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2019/01/13	1	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2019/01/27	3	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2019/01/29	1	-	+	+
	2	-	+	+

表 C.14: V バンドにおける snx,sny パラメータとその結果

		snx,sny	snx,sny	snx,sny
date	number	10,10	20,20	30,30
2018/10/12	1	-	0	0
2018/10/17	1	×	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	4	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/10/18	2	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/10/19	5	+	-	-
2018/10/20	3	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/10/24	1	-	-	-
	2	-	-	-
	3	-	-	-
2018/10/25	2	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	3	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/10/27	1	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/11/03	2	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/11/04	1	×	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	3	-	-	-
2018/11/13	2	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/11/14	1	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/11/19	3	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/11/20	1	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/11/24	1	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	2	-	-	-
	3	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/12/10	3	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/12/18	1	-	+	+
2019/01/06	3	+	+	+
2019/01/09	1	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	2	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2019/01/14	1	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	3	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2019/01/15	1	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	3	-	+	+

表 C.15: R バンドにおける snx, sny パラメータとその結果 (1)

		snx,sny	snx,sny	snx,sny
date	number	10,10	20,20	30,30
2019/01/29	1	+	+	+
	2	-	+	+
	3	+	+	+
2019/02/04	3	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2019/02/13	1	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2019/02/23	3	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
-				

表 C.16: R バンドにおける snx, sny パラメータとその結果 (2)

\_\_\_\_

表 C.17: I バンドにおける snx, sny パラメータとその結果

		snx,sny	snx,sny	snx,sny
date	number	10,10	20,20	30,30
2018/10/19	4	-	0	0
	5	+	+	+
2018/10/21	1	-	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/10/24	1	+	+	+
2018/10/29	2	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2018/11/03	1	+	+	+
	2	+	+	+
	3	+	+	+
2018/11/17	2	+	-	-
2018/12/10	1	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	3	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2019/01/06	1	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	2	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	3	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2019/01/12	1	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	3	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2019/01/13	2	+	+	+
	3	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$
2019/01/15	1	+	+	+
2019/02/23	1	-	$\bigcirc$	0

謝辞

この研究を行うにあたり、様々な人に支えられました。まずは川端先生。ご指導していただき ありがとうございました。お忙しい中すぐに添削していただいて、とても助かりました。質問に 行った際も、今思えば超基本的で恥ずかしいようなものでも優しく教えていただきました。本当 に感謝しています。そして中岡さん。毎週の超新星勉強会では、本で学んだだけではわからない実 際の超新星の研究がどのようなものかを深く教えていただきました。また、コロキウム前には私 が曖昧な部分を丁寧に教えていただいたり、とても助かりました。本当にありがとうございます。 最後に小部屋の皆様。朝行っても夜行っても誰かしら研究室にいてびっくりすると同時に尊敬し ています。このままじゃやばいと脅してくれたおかげで直前に焦らなくてすみました。ありがと うございました。先輩方目指してこれからも頑張っていきたいと思います。

## 参考文献

- [1] 岡村定矩編 「天文学辞典」(日本評論社)
- [2] シリーズ現代の天文学7野本憲一・定金晃三・佐藤勝彦編 「恒星」 2009. 日本評論社
- [3] 物理の世界地球と宇宙の物理3野本憲一編「元素はいかにつくられたか」2007. 岩波書店
- [4] NASA Goddard Space Flight Center https://imagine.gsfc.nasa.gov/educators/elements/imagine/05.html
- [5] A.V.Filippenko,1997,ARA&A,35,309
- [6] Li,et al.2011,MNRAS,412,1441
- [7] Marle, et al. 2010, MNRAS, 407, 2305
- [8] Moriya, et al. 2014, MNRAS, 439, 2917
- [9] COSMOS The SAO Encyclopedia of Astronomy https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/T/Type+IIn+Supernova
- [10] M.L.Graham, et al. 2014, ApJ, 787, 163
- [11] Pattorello, et al. 2013, ApJ, 767, 1
- [12] Mauerhan, et al. 2013, MNRAS, 430, 1801
- [13] SIMBAD Astronomical Database http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/
- [14] NASA/IPAC Extragalactic Database https://ned.ipac.caltech.edu/
- [15] IRSA NASA/IPAC INFRARED SCIENCE ARCHIVE https://irsa.ipac.caltech.edu/frontpage/
- [16] 広島大学 HP 宇宙科学センター https://www.hiroshima-u.ac.jp/hasc/institution\_jp/telescope/abstract

- [17] HOWPol http://hasc.hiroshima-u.ac.jp/instruments/howpol/
- [18] Drout, et al. 2014, ApJ, 794, 23
- [19] Fransson, et al. 2014, ApJ, 797, 118
- [20] Gall,et al.2014,Natur.511,326
- [21] Zhang, et al. 2012, ApJ, 144, 131
- [22] Fassia, et al. 2000, MNRAS, 318, 1093
- [23] Smith,et al.2010,ApJ,139,1451
- [24] Botticella, et al. 2009, MNRAS. 398, 1041