

2021 年度 卒業論文

かなた望遠鏡を用いた自動観測による激変星の増光初期の研究

広島大学 理学部 物理科学科

高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

B165794

佐崎 凌佑

主査 植村 誠

副査 野中 千穂

2022 年 2 月 8 日

## 概要

宇宙には様々なタイムスケールの現象が存在する。その中でも突発現象である矮新星アウトバースト、特に WZ Sge 型矮新星のアウトバーストには増光初期の数日でしか見られない明るさの変動がある。これを捉えるためにはすばやく、適切な判断・観測が必要であるが、夜間の観測作業中に専門家がいなければ見逃されることも多い。つまり貴重なデータを取り逃がさないためには突発現象の情報収集、判断、観測を自動化する必要がある。

本研究ではこの自動観測システムの試運転及び改良を行った。2021 年 10 月から試運転を開始し、2022 年 1 月までに 4 天体の観測を行った。そのうち 2 天体で、WZ Sge 型矮新星特有の初期変動を検出することに成功し、システムの判断が適切であったことを確認した。

# 目次

第 1 章	矮新星と突発現象の自動観測	7
1.1	矮新星	7
1.1.1	SU UMa 型	8
1.1.2	WZ Sge 型	9
1.2	追跡観測の必要性和現状	11
1.3	自動観測システム Smart Kanata	12
1.4	研究目的	13
第 2 章	研究方法	14
2.1	観測手法	14
2.1.1	かなた望遠鏡	14
2.1.2	HOWPol	15
2.1.3	HONIR	15
2.2	観測データ	16
2.3	解析手法	16
2.3.1	一次処理	16
2.3.2	WCS 貼り付け	17
2.3.3	測光	18
第 3 章	結果	19
3.1	TCP J17242302+3258109	19
3.2	PNV J03022732+1917552	20
3.3	TCP J07094936+1412280	22
3.4	TCP J02280150+2956365	23
3.5	SmartK システムの改良	25
第 4 章	考察	27
4.1	TCPJ1724	27
4.2	PNVJ0302	27
4.3	TCPJ0709	29
4.4	TCPJ0228	29

目次	3
4.5 SmartK に追加すべき機能 . . . . .	30
第 5 章 まとめと今後	32
謝辞	33

## 目次

1.1	はくちょう座 ss 変光星の光度曲線 (aavso) . . . . .	7
1.2	SU UMa 型矮新星のスーパーサイクルの降着円盤の時間発展モデル。上から順に光度曲線、連星間距離 $A$ を単位とする円盤半径、円盤質量を潮汐不安定の臨界点で正規化したものとなっている (Osaki and Kato 2013) . . . . .	8
1.3	J013701.06-091234.9 の平坦期におけるスーパーハンプの平均。縦軸は相対的な明るさ、横軸は位相 (Imada et al. 2006) . . . . .	9
1.4	ESH の光度曲線。縦軸が相対的な明るさ、横軸は位相である (Wakamatsu et al. 2017) . . . . .	9
1.5	ESH 中の光度曲線と色の時間変化。四角が V バンドでの等級の時間変動で丸が V-J の色を表している。左が発見後 3 日目、右が 5 日目のデータである (Matsui et al. 2009) . . . . .	10
1.6	V455And のアウトバースト 5 日目の降着円盤の高さ構造の再構成図。図中の曲線は $h/r=0.00-0.25$ の等高線 (0.02 間隔)(Uemura et al. 2012) . . . . .	11
1.7	SmartK が行った型判別結果。天体がその型である確率 (左) と、天体の型を確定するためにより適した観測方法 (右)。 . . . .	13
1.8	輝線の等価幅の定義 (Nomoto et al. 2009) . . . . .	13
2.1	かなた望遠鏡 (広島大学宇宙科学センター 2021) . . . . .	14
2.2	一次処理前の生画像 (左) と一次処理後の画像 (右) . . . . .	17
2.3	開口測光のイメージ図 (Tomita 2007) . . . . .	18
3.1	TCPJ1724 発見時のタイプ別の確率 (左) と相互情報量 (右) . . . . .	20
3.2	TCPJ1724 の光度曲線。左が可視光 (R バンド) で右が近赤外線 (J バンド)、黒点が TCPJ1724 で青点が比較星。 . . . .	20
3.3	PNVJ0302 発見時のタイプ別の確率 (左) と相互情報量 (右) . . . . .	21
3.4	PNVJ0302 の光度曲線。黒点が PNVJ0302、青点が比較星 . . . . .	21
3.5	TCPJ0709 発見時のタイプ別の確率 (左) と相互情報量 (右) . . . . .	22
3.6	2022 年 12 月 29 日に観測した TCPJ0709 の光度曲線。左が可視光 (V バンド) で右が近赤外線 (J バンド)、そして黒点が目的天体で青点が比較星。 . . . .	23
3.7	2022 年 01 月 02 日に観測した TCPJ0709 の光度曲線。左が可視光 (V バンド) で右が近赤外線 (J バンド)、そして黒点が目的天体で青点が比較星。 . . . .	23
3.8	TCPJ0228 発見時のタイプ別の確率 (左) と相互情報量 (右) . . . . .	24

---

3.9	2022 年 01 月 07 日に観測した TCPJ0228 の光度曲線。左が可視光 (V バンド) で右が近赤外線 (J バンド)、そして黒点が目的天体で青点が比較星。 . . . . .	25
4.1	磯貝らが ATel に報告したスペクトル。水素のバルマー線とヘリウムの輝線がダブルピークをもつ (下の拡大図)。 (Isogai et al. 2021) . . . . .	28
4.2	PNVJ0302 の光度曲線。黒点が PNVJ0302、青点が比較星 . . . . .	28
4.3	TCPJ0709 の光度曲線。図 3.7 と同じ。 . . . . .	29
4.4	2022 年 01 月 07 日に観測した TCPJ0228 の光度曲線。3.3 の光度曲線と同様 . . . . .	30

## 表目次

2.1	かなた望遠鏡の主な諸元 (広島大学宇宙科学センター 2021) . . . . .	15
2.2	HOWPol の諸元 (広島大学宇宙科学センター 2021) . . . . .	15
2.3	HONIR の諸元 (広島大学宇宙科学センター 2021) . . . . .	16
2.4	観測ログ . . . . .	16
3.1	TCPJ1724 基本情報 . . . . .	19
3.2	PNVJ0302 基本情報 . . . . .	21
3.3	TCPJ0709 基本情報 . . . . .	22
3.4	TCPJ0228 基本情報 . . . . .	24

# 第 1 章

## 矮新星と突発現象の自動観測

### 1.1 矮新星

矮新星は通常の恒星と白色矮星から成る連星系である。ロッシュローブを満たす恒星から白色矮星に向かってガスが降着する際に円盤を形成するという特徴をもつ。降着円盤に溜まったガスは臨界点となる密度で粘性が大きくなり角運動量を失う。それによって白色矮星にガスが一気に落ち込むことで重力エネルギーが開放され、2-5 等の増光を示す。この増光は矮新星アウトバーストと呼ばれ、矮新星は 10 日から数 100 日程度の間隔で繰り返しアウトバーストを起こす。図 1.1 ははくちょう座 ss 変光星の光度曲線である。縦軸が等級、横軸が時間 (ユリウス日) となっている。ユリウス日とは紀元前 4713 年 1 月 1 日正午から経過した日数のことである。はくちょう座 ss 変光星は約 50 日に一度の頻度で急な増光と減光、すなわち矮新星アウトバーストを繰り返している。

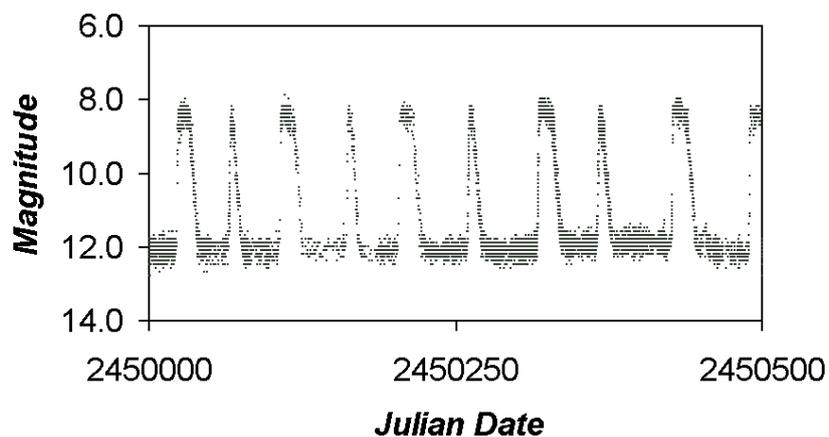


図 1.1 はくちょう座 ss 変光星の光度曲線 (aavso)

### 1.1.1 SU UMa 型

矮新星の中には通常のアウトバーストに加えて、振幅が約一等大きく増光期間も長いスーパーアウトバーストと呼ばれる現象を起こす SU UMa 型矮新星が存在する。スーパーアウトバーストは潮汐不安定性に由来する。円盤内部の物質の周期と連星の起動周期が 1:3 の臨界点に達すると、潮汐力により円盤が変形し、白色矮星に向かってガスが落下する。図 1.2 は SU UMa 型矮新星の降着円盤の時間発展モデルである。モデルのパラメータには天体 VW Hyi が使用されている (Osaki and Kato 2013)。上の図が光度曲線で、通常のアウトバーストに加えて、振幅が大きく、平坦期が 20 日程度の増光が見られる。これがスーパーアウトバーストである。スーパーアウトバーストを起こす周期はスーパーサイクルとよばれる。二番目は円盤半径の時間変化でアウトバーストを起こすと半径が小さくなり、特にスーパーアウトバースト時は半径の縮小幅が大きい。下は潮汐不安定の臨界質量で規格化された円盤の質量である。アウトバーストのたびに質量が減っているが、徐々に臨界に近づきスーパーアウトバースト時に大きく質量を失う。

SU UMa 型矮新星はスーパーアウトバースト期間中に、スーパーハンプと呼ばれる周期が連星の公転周期よりも数%長く、振幅 0.1-0.5 等の振動現象が見られる。図 1.3 は J013701.06-091234.9 のスーパーアウトバースト期間中のスーパーハンプである (Imada et al. 2006)。スーパーハンプは楕円に変形した円盤の歳差運動と、伴星の公転運動のうなりでその周期が説明される。

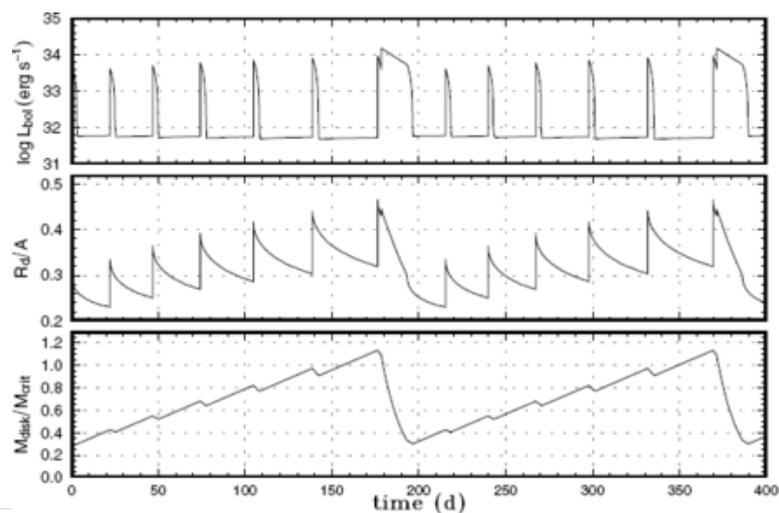


図 1.2 SU UMa 型矮新星のスーパーサイクルの降着円盤の時間発展モデル。上から順に光度曲線、連星間距離  $A$  を単位とする円盤半径、円盤質量を潮汐不安定の臨界点で正規化したものとなっている (Osaki and Kato 2013)

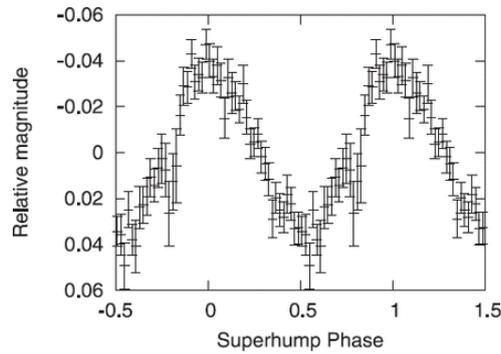


図 1.3 J013701.06-091234.9 の平坦期におけるスーパーハンプの平均。縦軸は相対的な明るさ、横軸は位相 (Imada et al. 2006)

### 1.1.2 WZ Sge 型

SU UMa 型矮新星の中にはスーパーアウトバーストだけを起こし、通常のアウトバーストを起こさない天体が存在する。この天体は WZ Sge 型と呼ばれる。WZ Sge 型矮新星のスーパーアウトバーストは増光期間が特に長く、平坦期が 20 日以上あり、静穏時に戻るまでに二ヶ月以上の期間がある。また、WZ Sge 型のスーパーアウトバーストの初期の数日は早期スーパーハンプ (Early Superhumps; ESH) と呼ばれる明るさの短時間変動が見られる。図 1.4 は ASASSN-16eg の ESH の様子である。ESH は周期が伴星の公転周期にほぼ等しく、ダブルピークをもつという特徴がある。

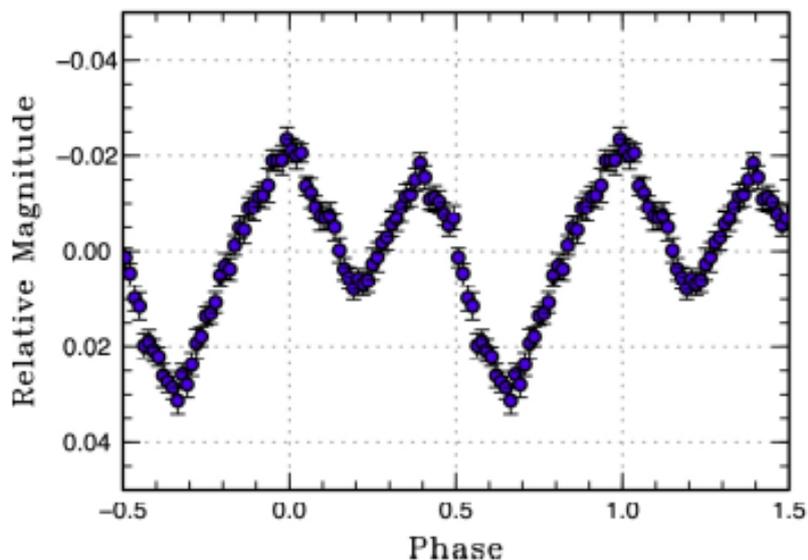


図 1.4 ESH の光度曲線。縦軸が相対的な明るさ、横軸は位相である (Wakamatsu et al. 2017)

図 1.5 は ESH の時間変動で、四角が V バンドでの光度曲線、丸が V-J の色指数を表している。ここで、色指数 V-J とは可視光 (V バンド) と近赤外線 (J バンド) の等級差であり、スペクトルの傾きに相当する。色指数の変化は温度に対応しているのでこの図は明るさと温度の関係と見ることができる。この図からは天体が明るくなっている時に温度が低くなっている、すなわち赤くなっていることが示唆されている (Matsui et al. 2009)。一般に、天体が明るくなる時は何かしらのエネルギー開放現象がおきて、温度が上がる人が多い。ESH のように明るくなる時に温度が低くなる特徴は、温度の低い降着円盤外側が膨張していることを示唆する。このように、明るさと温度の変動関係を調べることで円盤構造を探ることができると考えられているが、ESH はアウトバースト初期の数日でしか見られず、観測機会が逃されることも多い。また、温度を測定するためには複数のバンドで時間変動を観測する必要があることも、研究の難易度を上げている。

この温度と明るさの関係から、降着円盤の高さ構造を再構成したものが図 1.6 である (Uemura et al. 2012)。右下と左上の部分が盛り上がって ESH の 2 つの極大がこれに対応する。植村らの計算では ESH 時に降着円盤が円盤半径の 20 % 程度まで盛り上がっているが、矮新星アウトバーストの円盤モデルでは高さは半径の 1 % 程度にしかならない。そのため、現段階では円盤構造が解明されたとは言い難い状態である。降着円盤の幾何構造をより詳しく調べるために、より多くの爆発初期の観測が求められている。

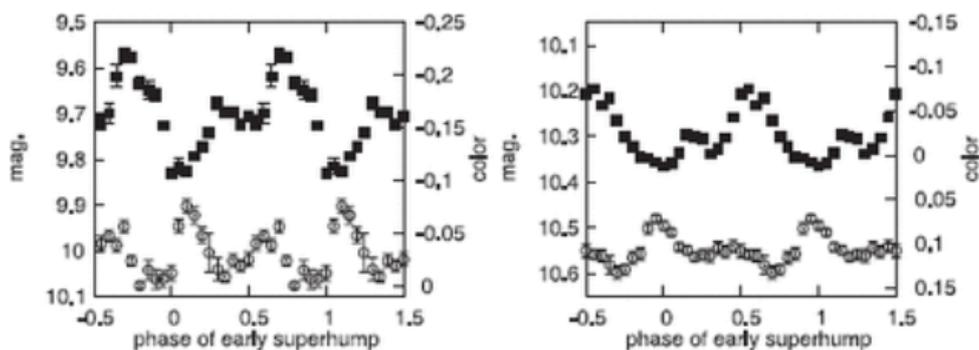


図 1.5 ESH 中の光度曲線と色の時間変化。四角が V バンドでの等級の時間変動で丸が V-J の色を表している。左が発見後 3 日目、右が 5 日目のデータである (Matsui et al. 2009)

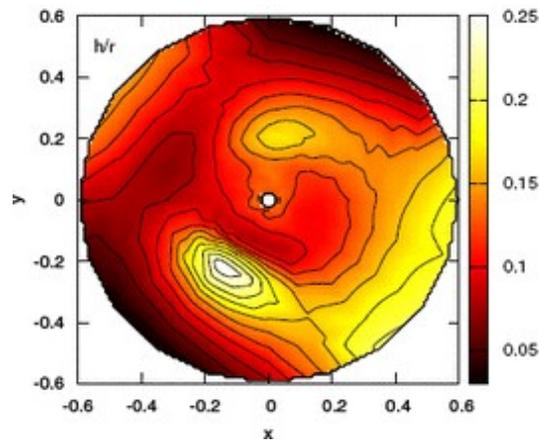


図 1.6 V455And のアウトバースト 5 日目の降着円盤の高さ構造の再構成図。図中の曲線は  $h/r=0.00-0.25$  の等高線 (0.02 間隔)(Uemura et al. 2012)

## 1.2 追跡観測の必要性と現状

現在、複数の全天サーベイを行っているプロジェクトが突発現象を日々報告している。しかし、突発現象が報告された段階では、天体の正体は判明しているわけではない。WZ Sge 型矮新星が増光した際に多色での連続撮像を行いたくても、天体の正体が分からず適切な観測を行うことができないことが多い。

実際に WZ Sge 型矮新星と混同されやすい天体は複数ある。例えば、新星、通常の矮新星、ミラ型変光星、フレア星などは WZ Sge 型と間違えられやすい。新星は通常の恒星と白色矮星から成る連星系で、恒星からのガスが白色矮星に降り積もり、表面に溜まった水素ガスが核反応を起こし新星爆発を引き起こす。新星爆発の初期段階にも未解明な物理が存在し、観測を行いたいが、矮新星とはまた違った手法の観測 (分光観測) を行う必要がある。ミラ型変光星とは星全体がほぼ球対象を保ったまま、膨張収縮し明るさが変動する天体である。数ヶ月から一年あまりの周期で振動していて、変動が 2.5 等以上と大きいため未知のミラ型変光星は突発現象と誤認されることがある。フレアを起こす恒星はフレア星と呼ばれる。フレアとは数分から数時間の間に  $10^{29}$  erg から  $10^{32}$  erg の巨大な磁気エネルギーが熱エネルギーや運動エネルギーなどに変換され、増光を示す現象である。UV Cet 型星とも呼ばれ、フレアが突発現象として報告されることもあるが、報告後に観測するとすでに暗くなっていることも多い。

これらの天体を判別し、WZ Sge 型矮新星だった場合には多色連続撮像、新星ならば分光観測といったように適切な追跡観測を発見後速やかに行うには、専門家の知見に基づいた判断が必要となる。しかし、突発現象の報告時、特に夜間の観測時に専門家が不在で判断できず突発現象が見逃されることが往々にしてある。つまり、貴重な機会を逃さないためには専門家の判断を代替する自動判別・観測システムが必要になる。次節では本研究で利用した、自動システムについて記載する。

### 1.3 自動観測システム Smart Kanata

現在開発中の自動観測システム「Smart Kanata(SmartK)」について紹介する。SmartK は新天体がどんな天体か判別し、追跡観測を行うのか、行うならどのような追跡観測を行うべきかを決定し、自動で観測を行う。SmartK の全体像は以下のようになっている。

1. 10分に1度オンラインデータベースから新天体情報を収集する
2. 収集した情報(座標、振幅、距離等)をもとに天体の型を判別し、追跡観測の手法(連続観測、分光観測、多色観測)を決定する
3. 時刻、天気、天体位置といったステータスを確認し、観測可能であれば望遠鏡を駆動、観測する

SmartK はデータベースとして Transient Name Server(TNS)、Central Bureau for Astronomical Telegrams "Transient Objects Confirmation Page"(TOCP)、All-Sky Automated Survey for Supernovae(ASAS-SN) を利用している。各プロジェクトについて簡単に説明する。TNS<sup>\*1</sup>は様々なプロジェクトが発見する突発現象に共通の名前をつけて管理することを主目的にするサービスで、国際天文連合(International Astronomical Union: IAU) が運営している。TNS は各プロジェクトが発見した突発現象が報告されるため、各プロジェクトの web サイトに比べ速報性が低い可能性がある。TOCP<sup>\*2</sup>は IAU が管轄する旧式サービスで、突発現象を発見した人が手動で情報を登録できる。手動で登録することから大量の情報処理に適したサービスではないが、アマチュア天文家の利用率が高く、TNS にはない情報が登録されることもある。ASAS-SN<sup>\*3</sup>は小型で視野の広い望遠鏡を用いた超新星の探索を主目的とするプロジェクトで、オハイオ州立大学などが運営している。超新星以外の突発現象も検出され、独自サイトで情報を即時公開している。速報性の高さから、SmartK は ASAS-SN も利用している。

SmartK は追跡観測の手法を決定するにあたって、情報エントロピーと、情報エントロピーから求められる相互情報量を使用している。情報エントロピーとは不確実性を数値化したもので、その値が大きいほど天体の型判別の不確実性が高い。相互情報量とは追跡観測前後の情報エントロピーの差を取ったもので、相互情報量が大きいほど不確実性が減少する、すなわち型の判別精度が上がることを意味する。現在 SmartK は連続撮像、分光観測、多色撮像の3種類の追跡観測の方法を想定している。3種類の観測方法について相互情報量を計算し、その値が最も大きくなる観測手法を用いることで天体の型判別を行う(古賀 2021)。

図 1.7 は実際に SmartK が行った型判別の結果である。左は発見時情報から判定した天体の型の確率である。1.2 節で述べた混同されやすい型を含めた5つの型について、その天体である可能性がどの程度高いのかを示している。天体は左から Nova が新星、DN が通常の矮新星、WZ が WZ Sge 型矮新星、Mira がミラ型変光星、そして UV がフレア星を意味している。なお、DN には SU UMa 型矮新星も含まれている。右の図は天体の型判別の精度を高めるためにはどのような情報を獲得するべきかの判断結果を示している。BV が色指数、logEW が輝線の等価幅、dmdt が明るさの時間変化である。輝線の等価幅とはスペクトル線の強度を連続光強度との比較で表す量で、連続スペクトルの上(輝線)または下(吸収線)にあるスペクトル線の面積を連続光で割った値、すなわちスペクトル線の面積と等しい面積をもつ連続光の幅が等価幅である。図 1.8 のように定義される。

\*1 <https://www.wis-tns.org>

\*2 <http://www.cbat.eps.harvard.edu/unconf/tocp.html>

\*3 <https://asas-sn.osu.edu>

色指数を求めるためには多色撮像を、等価幅を求めるためには分光観測を、明るさの時間変動を求めるためには連続撮像を行う必要がある。SmartK はこれら 3 種類のパラメータを獲得した場合の相互情報量に基づいて追跡観測の方法を決定する。

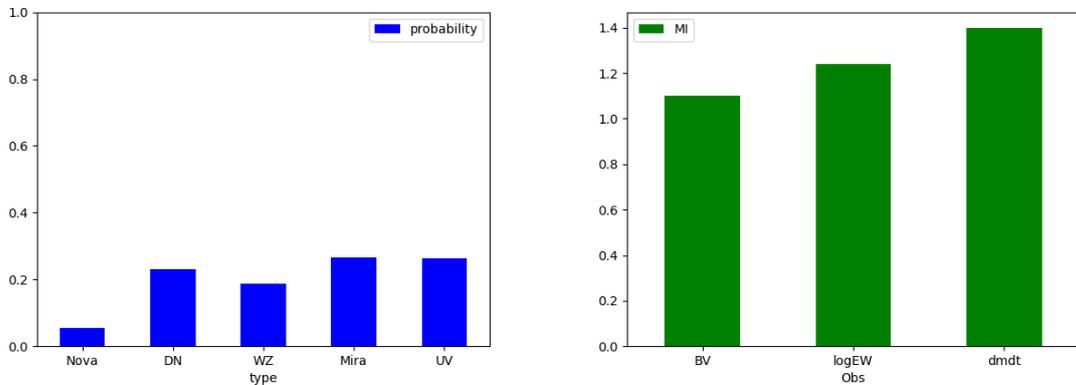


図 1.7 SmartK が行った型判別結果。天体がその型である確率 (左) と、天体の型を確定するためにより適した観測方法 (右)。

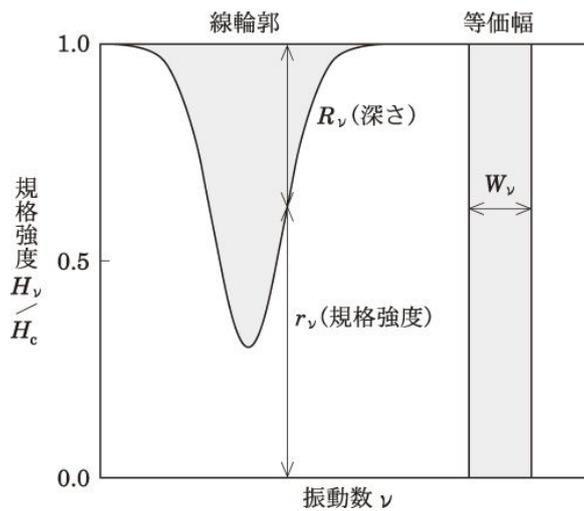


図 1.8 輝線の等価幅の定義 (Nomoto et al. 2009)

## 1.4 研究目的

SmartK は開発中であり、追跡観測は連続撮像しか実装されていないが、自動観測の試運転を行える段階に来ている。そこで本研究では SmartK を実際に使用して観測を行うことで、その有用性を探り、同時に利用時に発生した問題の解決を目的とする。

## 第 2 章

# 研究方法

### 2.1 観測手法

観測に利用したかなた望遠鏡及び望遠鏡に搭載されている検出器について記載する。

#### 2.1.1 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附属東広島天文台に据えられた、有効口径 1.5 m の可視近赤外望遠鏡である。国内に設置されている望遠鏡では最大級の有効口径と駆動の速さを特徴としている。望遠鏡は第 3 鏡 (平面鏡) の着脱によりナスミス焦点かカセグレン焦点に像を結ぶ。それぞれの焦点に検出器 HOWPol、検出器 HONIR が取り付けられている。図 2.1 はかなた望遠鏡、表 2.1 はかなた望遠鏡の主な諸元である。

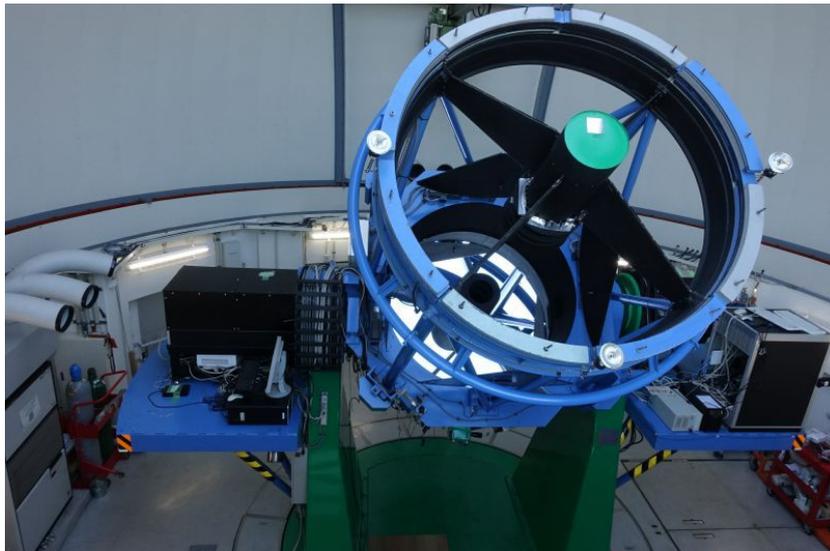


図 2.1 かなた望遠鏡 (広島大学宇宙科学センター 2021)

表 2.1 かなた望遠鏡の主な諸元 (広島大学宇宙科学センター 2021)

光学系	Ritchey-Chretien 光学系
主鏡の有効径	1500 mm
主鏡材	UEL(Ultra Low Expansion; 超低膨張) ガラス
合成 F 値と焦点距離 f	F/12.2 f=18300 mm (F/12.3 f=18501.7 mm)
視野	直径 15 分角 (=0.25 度)
焦点面スケール	11.271 秒角/mm(11.148 秒角/mm)
架台	経緯台 最大角速度 方位角まわり 6 度/秒 高度軸まわり 3 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

表中の括弧内の値は、新セラミック副鏡を用いた場合のもの

### 2.1.2 HOWPol

HOWPol(Hiroshima One-shot Wide-field Polarimeter) は一回の露出で直線偏光パラメータを導出できる偏光系を搭載した可視広視野カメラである。かなた望遠鏡のナスミス焦点に取り付けられている。広視野撮像モードの他に、偏光撮像、分光のモードがある。フィルターは主に可視光で、近赤外領域を高めるため完全空乏型 CCD を採用している。表 2.2 に主な諸元を示す。

表 2.2 HOWPol の諸元 (広島大学宇宙科学センター 2021)

波長	0.45 - 1.03 $\mu$ m
視野	撮像 15 分角 広視野偏光撮像 7 分 $\times$ 7 分 狭視野偏光撮像 15 分 $\times$ 1 分 分光 2.3 秒 $\times$ 15 分
フィルター	B,V,R,I,z
CCD	完全空乏型 CCD
限界等級	撮像 19.2 mag(R バンド 10 分露光) 偏光撮像 16.0 mag(R バンド 10 分露光)

### 2.1.3 HONIR

HONIR(Hiroshima Optical and Near-InfraRed camera) は最大で可視 1 チャンネル、近赤外線 2 チャンネルの 3 チャンネルで同時に観測ができる、世界的にも珍しい機能を有する検出器である。かなた望遠鏡のカセグレン焦点に取り付けられている。バンドごとの明るさの時間変動を検出できることは、WZ Sge 型矮新星の円盤構造を探るのに適している。HONIR の主な諸元を表 2.2 に示す。

表 2.3 HONIR の諸元 (広島大学宇宙科学センター 2021)

	可視光	近赤外線
検出器	CCD 2k×2k	MCT 2k×2k
視野	10 分 × 10 分	10 分 × 10 分
ピクセルサイズ	0.3 秒/ピクセル	0.3 秒/ピクセル

## 2.2 観測データ

観測した際の条件を表 2.4 に示す。積分時間、フィルターについては左が可視光について、右が近赤外線についての情報である。また、HOWPol 使用時は可視光のみでの撮像なので積分時間、フィルターは可視光のものである。

表 2.4 観測ログ

観測日時	観測天体	積分時間 [s]	フィルター	観測装置
2021 年 11 月 17 日 18:51-20:00	TCP J17242302+3258109	45, 30	R, J	HONIR
2021 年 11 月 29 日 20:25-22:56	PNV J03022732+1917552	5	R	HOWPol
2021 年 12 月 29 日 00:47-03:43	TCP J07094936+1412280	35, 20	V, J	HONIR
2022 年 01 月 03 日 01:51-04:17	TCP J07094936+1412280	60, 45	V, J	HONIR
2022 年 01 月 02 日 19:17-21:46	TCP J02280150+2956365	60, 45	V, J	HONIR

## 2.3 解析手法

かなた望遠鏡で得た画像から、目的天体の明るさ (等級) を測定するために必要な解析の手法を紹介する。

### 2.3.1 一次処理

一次処理とは生画像に対し、補正・較正を加えることで詳細なデータ解析が可能なイメージを作成することである。図 2.2 は一次処理を行う前後の画像である。

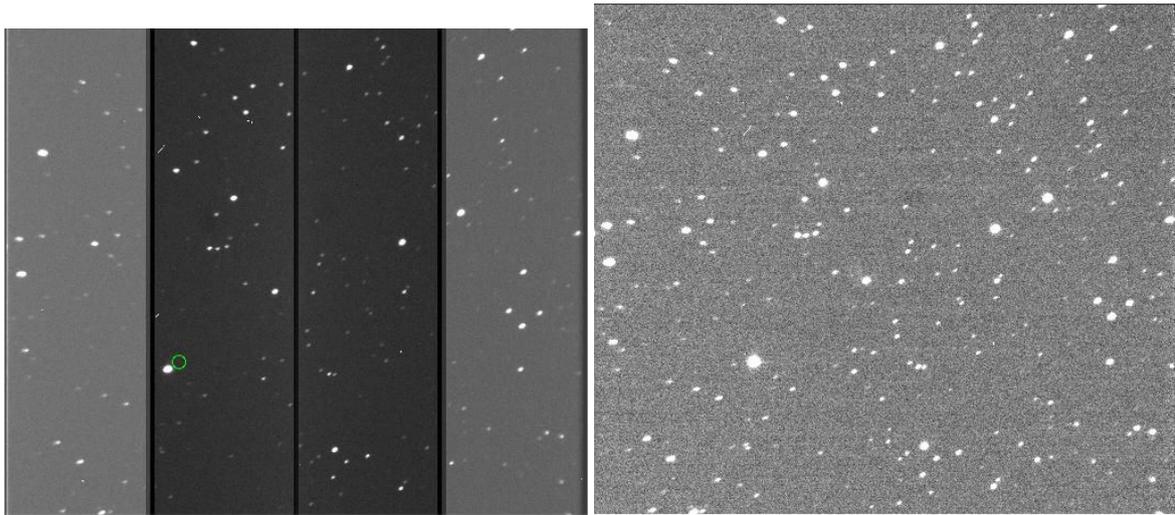


図 2.2 一次処理前の生画像 (左) と一次処理後の画像 (右)

### バイアスとオーバースキャン領域

バイアスとは露出時間ゼロで露光せずに CCD を読み出した際のデータである。露出 0 秒なので読み出したデータも本来は 0 になるはずだが、読み出した値が負にならないように一定のバイアス電圧をかけている。オーバースキャン領域の平均などからバイアス値を推定し、その推定値を減算することでバイアスの処理を行う。オーバースキャン領域とは観測データを読み出す前か後に 0 秒露出を行ったことに相当するデータで図 2.2 の左の縦に入っている黒い線の領域を指す。これを取り除くことで画像をつなげる。(Ie et al. 2007)

### フラット

通常、検出器は 1 画素ごとに感度が異なる。さらに光学系や内部でのケラレ、フィルターの汚れなども影響し、CCD 読み取り感度に非一様なムラができる。これを解決するために以下の操作を行う。一様光源からの光を望遠鏡を通して検出器にあて、「フラットフレーム」と呼ばれる画像を作成する。このフラットフレームは最大値のカウントが約 1 になるように規格化されている。生画像からバイアスを減算したものをフラットフレームで割り規格化する。(Ie et al. 2007)

## 2.3.2 WCS 貼り付け

天体の天球上の位置などの物理的な測定値からなるパラメータ空間の座標を世界座標 (world coordinate) と呼び、世界座標と FITS 形式のデータを対応させたものを世界座標システム (world coordinate system; WCS) と呼ぶ。WCS 貼り付けとは観測で撮った画像を WCS と対応させることで、画像内の全天体の位置などの情報を取得する操作である。

### 2.3.3 測光

#### 開口測光

開口測光とは天体の中心から一定の大きさのアーチャーと呼ばれる円内の天体からの信号を積分し、天体の明るさを見積もる方法である。天体の中心は明るさの分布の重心で定義される。円の大きさはカウント分布が十分小さくなるまでの領域、すなわち半値幅の2-3倍で評価される。本研究では HONIR で観測した際は半値幅の3倍で、HOWPol で観測した際は半値幅の2倍でアーチャーを設定した。図2.3に開口測光のイメージ図を載せる。また、無視できない大きさの背景光が天体の光に混ざっている場合は、天体の光が来ていない周囲の円環領域の光のカウント数から背景光のカウントを求め、天体光から引く。

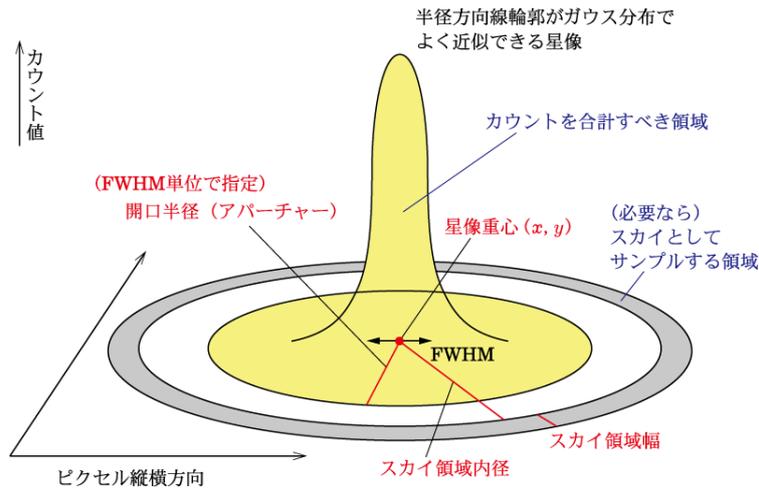


図 2.3 開口測光のイメージ図 (Tomita 2007)

#### 等級のゼロ点決定

観測で取得した等級は機械等級と呼ばれる。機械等級はスカイ (夜空) などの影響により、本来の値から一定量ずれている。これを補正するために等級の原点を決定し、それを基準とすることで目的天体の正しい等級を求めることができる。

まず WCS 貼り付けで検出された画像内のすべての天体を測光し、Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System) カタログの等級と比較する。縦軸を機械等級、横軸を Pan-STARRS 等級として図を描くと、各天体のデータは切片をもち、傾きが1の直線上に乗る。ここから切片を差引くと機械等級とカタログ等級が一致する。これを基準に目的天体の等級を求める。

## 第 3 章

### 結果

#### 3.1 TCP J17242302+3258109

2021 年 11 月 13 日 21 時 52 分 (日本時間) の SmartK によるデータベース検索時に TCP J17242302+3258109(以下、TCPJ1724) の情報が発見された。表 3.1、図 3.1 は発見時情報である。高い銀緯と大きな振幅から、WZ Sge 型矮新星の可能性が高く、連続撮像を行うことで型の不確かさが最も小さくなると SmartK は判断した。

発見時、かなた望遠鏡は他の課題で利用中だったので使用できなかった。そのため 2021 年 11 月 17 日に連続撮像を行った。図 3.2 はその観測時の光度曲線である。左図が可視光 (R バンド)、右図が近赤外線 (J バンド) となっている。また、黒点が TCPJ1724、青点が比較星で、横軸が修正ユリウス日 (Modified Julian date; MJD)、縦軸が観測された等級である。MJD はユリウス日から 2,400,000.5 を差し引いたものである。

TCPJ1724 は 20 時 30 分頃には高度が 10 度を下回ったため、天体の型判別に十分な時間である ESH の 2 周期分の時間を撮像することができなかった。観測時間は 18 時 51 分から 20 時 00 分 (日本時間) の、1 時間 10 分である。可視光の光度曲線では前半の 30 分で 0.03 等を超える変動は検出されなかった。また、後半 40 分は曇ったため十分な精度で撮像できず、変動の有無は議論できないデータとなった。

表 3.1 TCPJ1724 基本情報

データベース	TOCP
RA	17:24:23.02
Dec	+32:58:10.9
発見時刻 (UTC)	2021-11-13 09:06:46.080
発見時等級	13.300
銀経	56.660222
銀緯	31.667568
振幅	8.079200

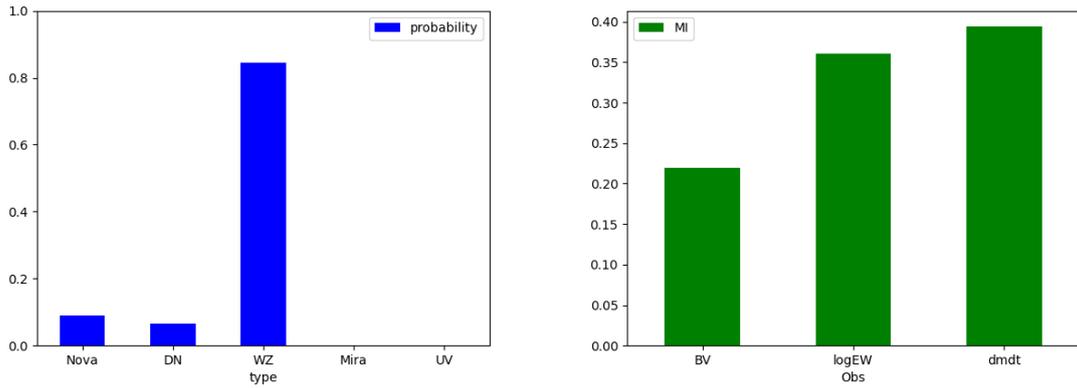


図 3.1 TCPJ1724 発見時のタイプ別の確率 (左) と相互情報量 (右)

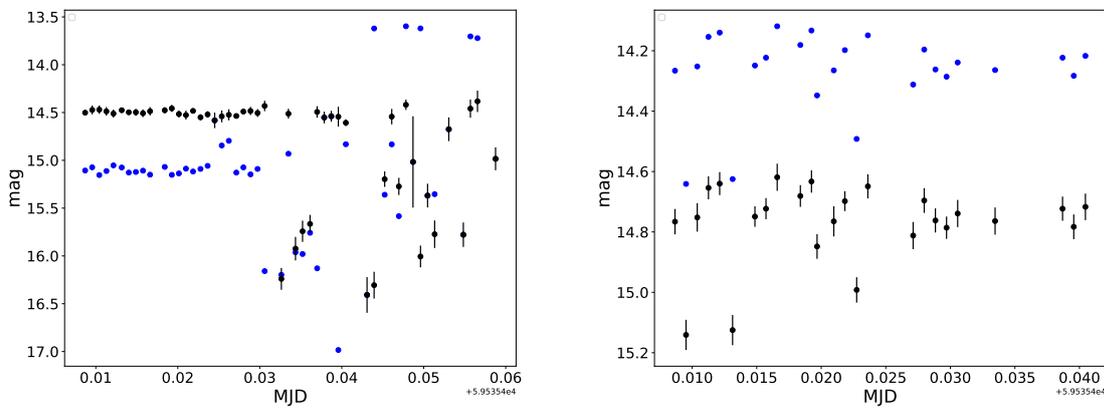


図 3.2 TCPJ1724 の光度曲線。左が可視光 (R バンド) で右が近赤外線 (J バンド)、黒点が TCPJ1724 で青点が比較星。

### 3.2 PNV J03022732+1917552

2021 年 11 月 28 日 23 時 57 分 (日本時間) の SmartK によるデータベース検索時に PNV J03022732+1917552(以下、PNVJ0302) の情報が発見された。表 3.2、図 3.3 は発見時の天体情報である。天体との距離が近かったことから新星、ミラ型変光星の可能性は低く、連続撮像を行うことで天体の型の不確実性が最も小さくなると SmartK は判断した。

発見時に検出器 HONIR のシャッターが開かないという問題が発生していた。そのため検出器 HOWPol による連続撮像を、11 月 29 日の 20 時 25 分から 22 時 56 分 (日本時間) の 2 時間 30 分、R バンドで行った。

図 3.4 は PNVJ0302 の光度曲線で、黒点が PNVJ0302、青点が比較星を表している。MJD 59547.48-59547.52 の間に 0.1 等程度の変動が見える。また、MJD 59547.55-59547.57 の間でも約 0.1 等明るくなっている様子が見え、数十分のタイムスケールで明るさの変動が検出された。ただし、前半と後半で比較星

の等級に系統差があるので、PNVJ0302 のこの間の変動は信頼できない。

表 3.2 PNVJ0302 基本情報

データベース	TOCP
RA	3:2:27.32
Dec	+19:17:55.2
発見時刻 (UTC)	2021-11-28 11:15:12.960
発見時等級	11.700
銀経	160.826606
銀緯	-33.760382

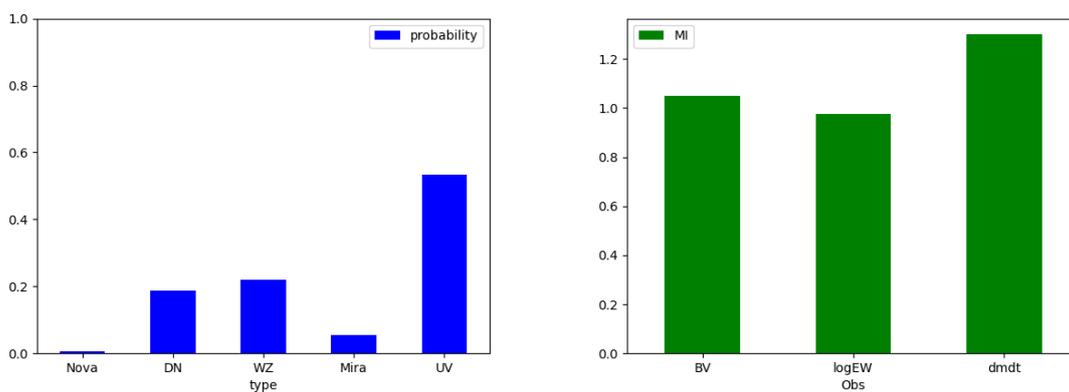


図 3.3 PNVJ0302 発見時のタイプ別の確率 (左) と相互情報量 (右)

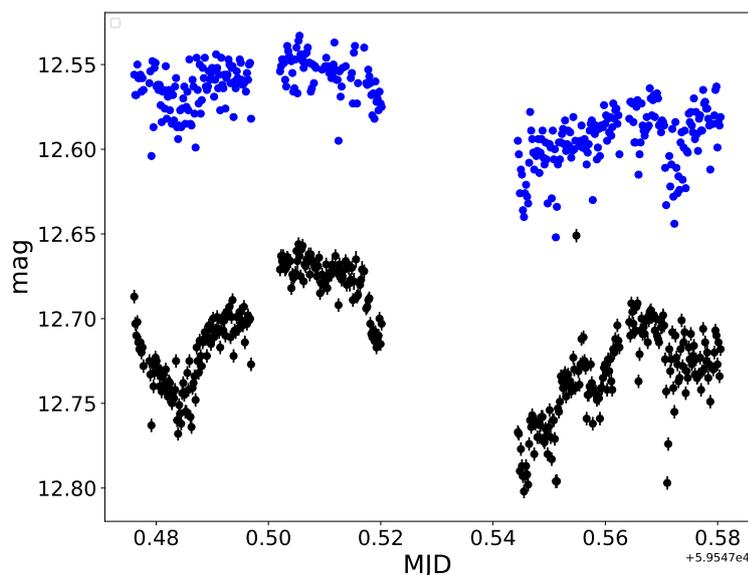


図 3.4 PNVJ0302 の光度曲線。黒点が PNVJ0302、青点が比較星

### 3.3 TCP J07094936+1412280

2021年12月29日00時39分(日本時間)、SmartKによるデータベース検索時にTCP J07094936+1412280(以下、TCPJ0709)の情報が発見された。表3.3、図3.5は発見時情報である。天体の銀緯が低く座標以外の情報がなかったため、型判別段階では突出して可能性の高い型はなかった。連続撮像によって天体の型の不確定さが最も小さくなるとSmartKは判断した。SmartKがTCPJ0709の情報を検出した直後と2022年01月02日に連続撮像を行った。

新天体情報の検索後、自動観測に移行する際にSmartKがエラーを起こしたため、手動で観測を行った。エラーについては「3.5 SmartKシステムの改良」に詳細を記載している。

表 3.3 TCPJ0709 基本情報

データベース	TOCP
RA	7:9:49.36
Dec	+14:12:28
発見時刻 (UTC)	2021-12-29 12:46:13.440
発見時等級	13.600
銀経	202.207139
銀緯	10.431032

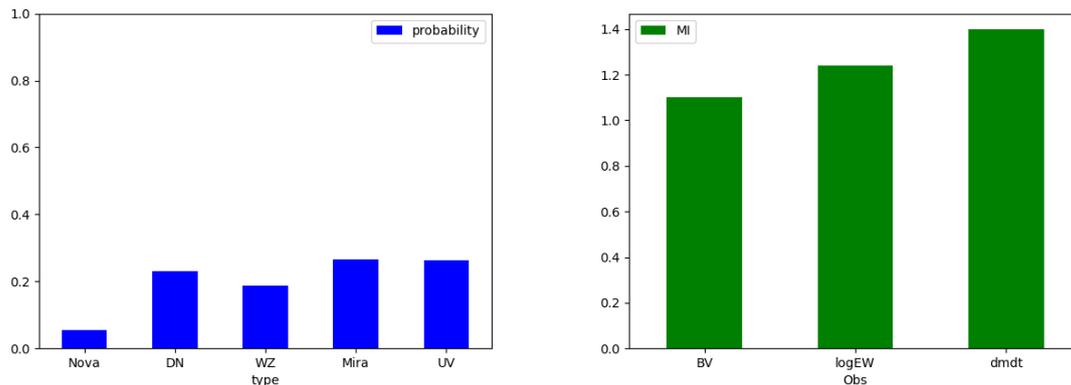


図 3.5 TCPJ0709 発見時のタイプ別の確率(左)と相互情報量(右)

図3.6は2021年12月29日にアラートの直後に行った手動観測の光度曲線である。左が可視光(Vバンド)で右が近赤外線(Jバンド)、黒点がTCPJ0709で青点が比較星となっている。変動を見やすくするために比較星の等級を近赤外線で2.0等暗くしてある。アラートの直後から約三時間、00時47分から03時43分(日本時間)まで撮像した。曇っていたためTCPJ0709が映らない画像が複数あった。特に可視光では7つを除く、他全ての画像で目的天体を含め、十分な数の星が映らず測光解析に失敗した。

2022年01月03日、01時51分から04時17分(日本時間)に行った観測の光度曲線を図3.7に示す。左の図が可視光(Vバンド)での光度曲線、右が近赤外線(Jバンド)での光度曲線となっている。また、黒点がTCPJ0709、青点が比較星である。それぞれの図で変動を見やすくするため、比較星の等級を可視光で1.0等、近赤外線2.8等暗くしてある。可視光、近赤外線両方の光度曲線でMJD 59581.73-59581.79の

間に2山構造の変動が確認できる。それぞれ可視光で約0.03等、近赤外線では約0.07等の振幅で検出されている。2山の特徴から、これはESHであると考えられる。また、全体として緩やかな減光が見られ、0.2mag/day程度の速度で暗くなっている。これはWZ Sge型のスーパーアウトバースト初期の減光速度0.1 - 0.3mag/dayと一致する。

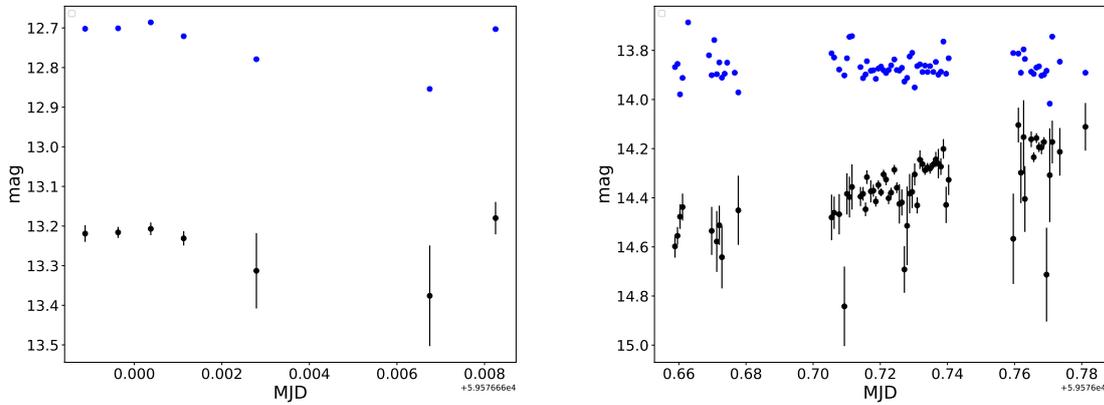


図3.6 2022年12月29日に観測したTCPJ0709の光度曲線。左が可視光(Vバンド)で右が近赤外線(Jバンド)、そして黒点が目的天体で青点が比較星。

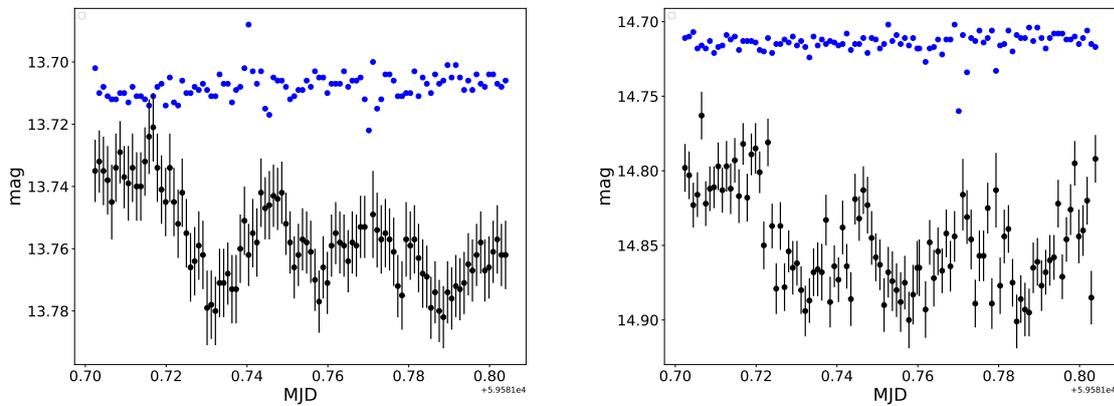


図3.7 2022年01月02日に観測したTCPJ0709の光度曲線。左が可視光(Vバンド)で右が近赤外線(Jバンド)、そして黒点が目的天体で青点が比較星。

### 3.4 TCP J02280150+2956365

2022年01月07日、05時31分、SmartKによるデータベース検索時にTCP J02280150+2956365(以下TCPJ0228)の情報が見つかった。その後18時55分の検索時に、TNSから同じ天体の情報が報告されているのを、SmartKが取得した。本観測は18時55分のTNSからの発見報告の取得後に行った。表3.4、図3.8は発見時の天体情報である。型判別時、銀緯が高く振幅も大きかったことから、WZ Sge型矮新星

の可能性が最も高いと判定された。そして連続撮像を行うことで天体の型の不確定度合いが最も小さくなると SmartK は判断した。

検索から約 15 分後、SmartK による自動観測を試みたが、TCPJ0709 の自動観測時と同様のエラーを表示した。そのため 19 時 17 分から 21 時 46 分 (日本時間) の 2 時間 30 分、可視光 (V バンド) と近赤外線 (J バンド) で手動観測を行った。エラーについては「3.5 SmartK の改良」に詳細を記載する。

図 3.9 は 2022 年 01 月 07 日に行った TCPJ0228 の光度曲線である。左図が可視光で右図が近赤外線、黒点が TCPJ0228 で青点が比較星となっている。変動を見やすくするために、比較星の等級を可視光で 0.2 等、近赤外線で 1.8 等暗くしている。可視光では MJD 59586.47-59586.51 の間に振幅 0.06 等の 2 山構造の変動を検出していて、これは ESH と考えられる。近赤外線でも MJD 59586.47-59586.51 の範囲で 0.2 等程度の変動を検出している。また、1 周期につき約 0.02 等、すなわち約 0.35 mag/day で減光しており、WZ Sge 型矮新星のスーパーアウトバースト初期の減光速度 0.1 - 0.3mag/day に近い。

表 3.4 TCPJ0228 基本情報

データベース	TOCP, TNS
RA	2:28:1.5
Dec	+29:56:36.5
発見時刻 (UTC)	2022-01-06 13:30:43.200
発見時等級	14.900
銀経	146.703402
銀緯	-28.431643
振幅	7.193600

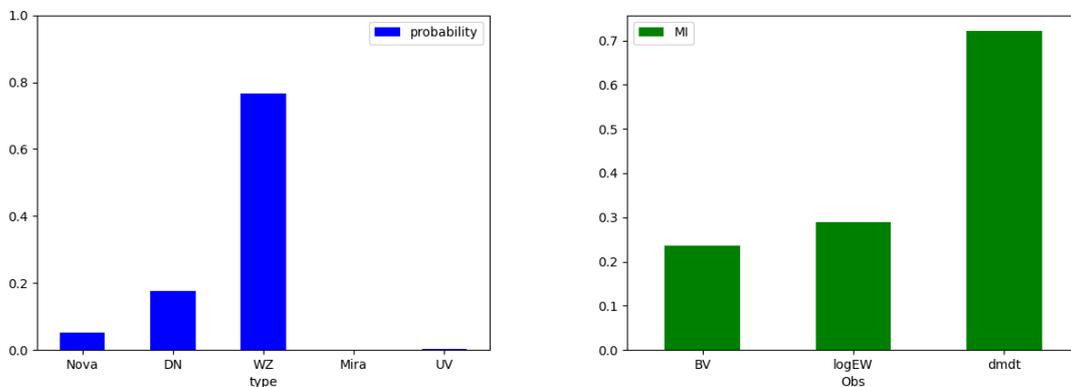


図 3.8 TCPJ0228 発見時のタイプ別の確率 (左) と相互情報量 (右)

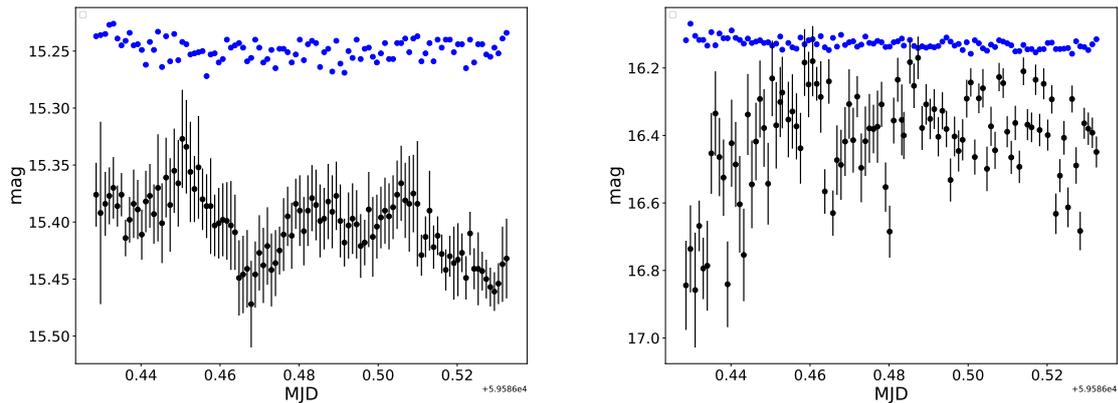


図 3.9 2022 年 01 月 07 日に観測した TCPJ0228 の光度曲線。左が可視光 (V バンド) で右が近赤外線 (J バンド)、そして黒点が目的天体で青点が比較星。

### 3.5 SmartK システムの改良

2021 年 11 月 25 日

自動観測に進む際に SmartK が音声を出さず、自動観測にも進まなかった。音声を出すモードにする命令文と自動観測に進む命令文に、不要なコメントマークが挿入されていたためである。そのため、これを削除した。自動観測には進まなかったが、その後通常の検索動作を再開した。これは天体の位置などにより自動観測が不可能だった場合の処理となっており、想定通りであった。

2021 年 12 月 29 日

SmartK による自動観測開始時にエラーが表示され自動観測が開始されなかった。SmartK によるデータベース検索では天体名に空白が含まれている。例えば本章の第一節の "TCP J17242302+3258109" は TCP と J17... の間に空白が存在する。SmartK から PC HONIR への命令文はこの天体名を使っていたので天体名が 2 つの引数として受け取られていたのがエラーの原因だと考えた。この問題は発見された天体名をそのまま入力せず、空白を消す処理をすることで解決を図った。2022 年 01 月 02 日、同天体の観測を手動で行った際、空白を含んだ命令文と削除した命令文を共に入力した。その結果、前者で 2021 年 12 月 29 日と同一のエラーを表示し、後者では観測を開始した。この操作によってエラーの原因が想定していたものであることを確認した。

2022 年 01 月 07 日

自動観測に移行する際に、12 月 29 日に行った観測時と同じエラーを表示した。12 月 29 と同様に天体名に不要なスペースが含まれていたことが原因であった。現在試運転しているシステムはテスト用のもので、本来の SmartK とは別に用意したものである。12 月 29 日のエラー発覚後に対処したのが、今回のテスト用システムではなく、本来のシステムだったことが今回のエラーの原因であった。そのため、改めてテスト用システムを修正した。

また、撮像した画像の上側が常に北を向くように、望遠鏡のカセグレン焦点用ローテータ位置にオフ

セットを加える操作を SmartK システムに追加した。これは普段手動で行なう操作だが、将来的な自動観測システムには必要な動作である。

## 第 4 章

### 考察

#### 4.1 TCPJ1724

2021 年 11 月 19 日に京都大学の反保雄介によって振幅約 0.2 等の通常のスーパーハンプのようなものが確認された。(Tampo 2021) 本観測は反保の観測よりも 2 日早かった。しかし、観測時間が限られていたこと、観測途中で天気が悪くなったことにより、変動を議論できるデータが取れなかった。SmartK の型判別では WZ Sge 型矮新星の可能性が 8 割を上回り最も高かったので、アウトバースト初期には ESH が検出できた可能性があった。しかし、本観測では可視光、近赤外線共に変動は検出されなかった。図 3.2 において可視光の前半 30 分では ESH 周期中の平穏部分が見えている可能性がある。もし天気がよければ、後半の 40 分で ESH かスーパーハンプ、あるいはその変動の一部が検出できたかもしれない。以上の要素により、今回の観測では TCPJ1724 を WZ Sge 型と同定するには至らなかった。

#### 4.2 PNVJ0302

PNVJ0302 は静穏時からの増光幅が非常に大きく、発見当初は新星の可能性も検討されていた。しかし、岡山天文台のせいめい望遠鏡で取得されたスペクトルの特徴からこの天体が矮新星であることが示された。図 4.1 は京都大学の磯貝桂介らが報告したせいめい望遠鏡で取得されたスペクトルである。水素のバルマー線とヘリウムの輝線がダブルピークを持っている。この特徴は輝線が降着円盤に由来し、この天体が新星ではなく矮新星であることを示す。(Isogai et al. 2021)

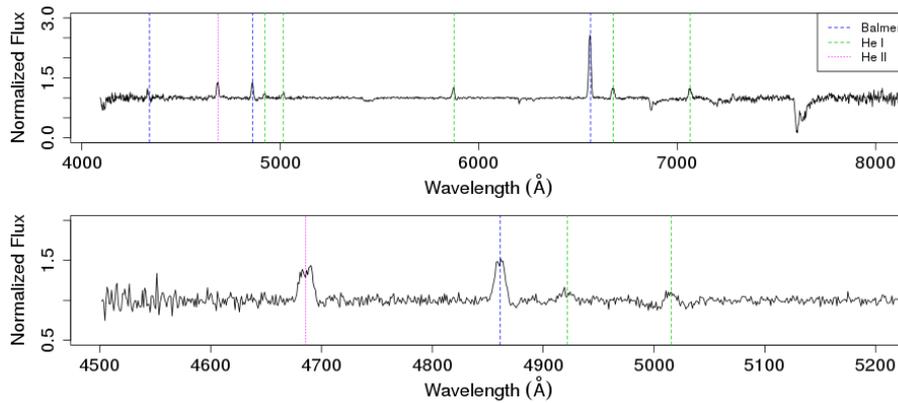


図 4.1 磯貝らが ATel に報告したスペクトル。水素のバルマー線とヘリウムの輝線がダブルピークをもつ(下の拡大図)。(Isogai et al. 2021)

図 4.2 に PNVJ0302 の光度曲線を改めて示す。MJD 59547.48-59547.52 及び 59547.55-59547.57 にかけてそれぞれ 0.1 等の明るさの増大が検出された。また、磯貝らが周期  $0.05935 \pm 0.0020$  day、振幅 0.05 等の ESH を検出したと 2021 年 11 月 30 日 01 時 59 分に報告し、PNVJ0302 を WZ Sge 型矮新星と結論している。その後、これらを含め 2021 年 12 月 03 日までに取得したデータを京都大学の加藤太一が解析し、VSNET alert に周期  $0.05985 \pm 0.00003$  day、振幅 0.03 等の ESH の検出を報告した。報告された周期と図 4.2 を比較すると、本観測で検出された 2 つのピークは 0.06 day に収まっていないことから、次の周期の ESH を捉えていることが示唆される。すなわち、MJD 59547.52-59547.54 の観測できていない空白部にピークがもう一つ存在すると考えられる。

更に磯貝らの報告と比べ、明らかに振幅が大きい変動が見られる。これは観測した日時が早かったからだと考えられる。すなわち本観測が行われた 11 月 29 日には振幅 0.1 等、磯貝らの報告があった 11 月 29 日時点で振幅 0.05 等、加藤が報告した 12 月 03 日時点で振幅 0.03 等と、ESH の振幅が減衰していると考えられる。

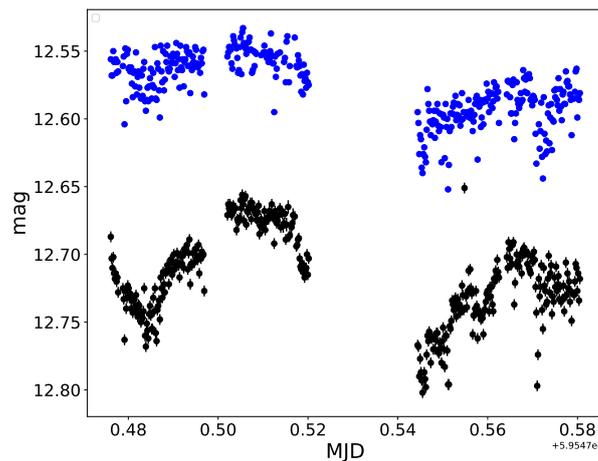


図 4.2 PNVJ0302 の光度曲線。黒点が PNVJ0302、青点が比較星

### 4.3 TCPJ0709

2021年12月31日にVSNET alertに最大振幅0.03等、周期0.0548日のESHが報告された。(Kato 2021) 図4.3で可視光、近赤外線で検出された2山構造はこの報告と周期及び可視光での振幅が一致する。よって、2022年01月02日の観測結果で見られるMJD 59581.73-59581.79での変動はESHを捉えていると考えられ、この天体をWZ Sge型矮新星と判断した。

可視光と近赤外線の変動の振幅を比較すると、可視光が0.03 mag、近赤外線が0.07 magと近赤外線の方が大きい。降着円盤の低温部分(外縁部)の方が高温部分(内縁部)より大きく盛り上がっているならば、低い温度、すなわち長波長で振幅がより大きくなることは十分に考えられる。可視光に比べ近赤外線のほうがESHの振幅が大きかったことは、WZ Sge型矮新星のスーパーアウトバースト時の円盤構造が外側の方がより大きく縦に盛り上がるという、再構成モデルを支持する。(Matsui et al. 2009)(Uemura et al. 2012)

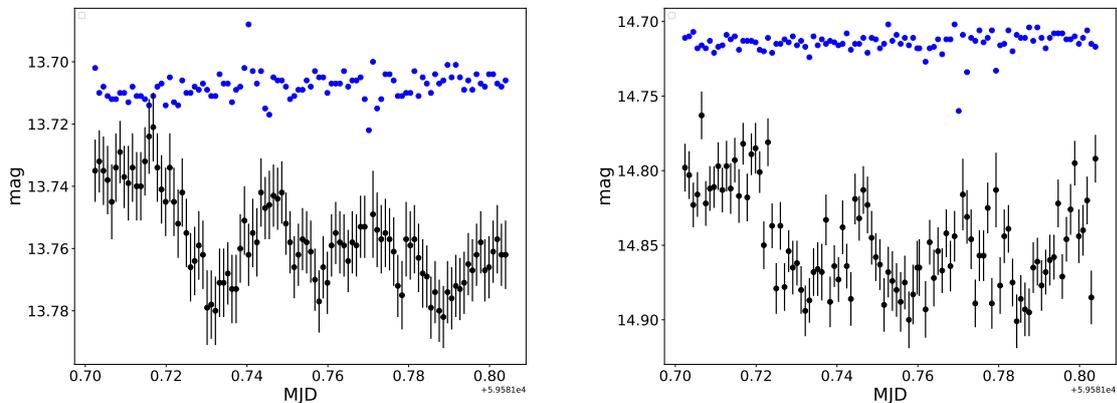


図4.3 TCPJ0709の光度曲線。図3.7と同じ。

### 4.4 TCPJ0228

図4.4の可視光のMJD 59586.47-59586.51で見られた振幅0.06等の2山構造をESHと判断し、TCPJ0228がWZ Sge型矮新星であると同定した。この天体は本観測によって初めてESHが検出され、WZ Sge型矮新星であることが判明した。近赤外線での観測でもESHの範囲で2つの盛り上がりを確認できることから、TCPJ0228がWZ Sge型矮新星であるという結論を支持する。

全体としてゆっくりと、約0.35 mag/dayで減光しているように見える。これはWZ Sge型矮新星のスーパーアウトバースト期間の減光速度0.1-0.3 mag/dayから大きく逸脱していないことから、一般的な減光と判断した。もし3周期を超える期間、すなわち5時間かそれ以上の連続撮像を行っていれば、減光速度も評価できただろう。今後の研究ではさらなる長時間観測を行いたい。

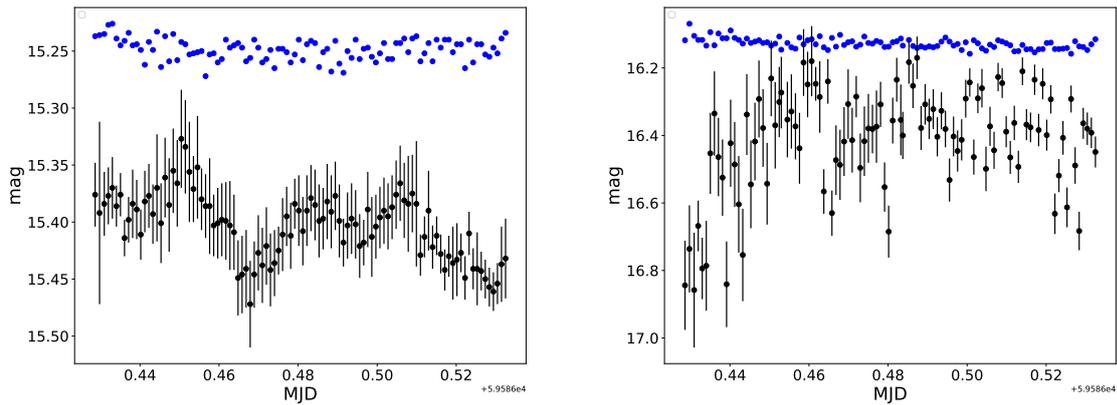


図4.4 2022年01月07日に観測したTCPJ0228の光度曲線。3.3の光度曲線と同様

## 4.5 SmartK に追加すべき機能

本節では実際に SmartK を試用して明らかになった、今後、開発すべき機能などを議論する。

### ・画像判定

SmartK が突発現象の情報を取得して自動観測を行った際に、目的の天体が写っているかどうかを判定する機能が必要だろうと考える。取得した情報が誤っていて実際は増光していない、天気が悪く写っていない、検出器が誤作動を起こすなど観測を続けても成果が得られず、意味のない画像データが貯まることは十分にあり得る。こういった事態を避けるため、最初の1枚ないしは数枚に目的の天体が写っていないときに観測を中止することができれば、望遠鏡を占有することも、不要なデータを取ることも減るだろう。

### ・即時解析システム

撮像した画像内の特定天体の等級を時間とともにその場でプロットする機能があれば非常に便利だろうと考える。仮にこのシステムを導入したとしても相対測光などを行っていないことから正確な等級は出ない。しかし、天体の型の判別補助のために用いるだけなら、かなた望遠鏡が捉えた突発天体の明るさの時間変化を見るだけで十分である。この機能が追加されれば、観測途中で天体の型判別、特に通常の矮新星と WZ Sge 型矮新星の判別が即時で行える。観測中に型が判明すれば、その後の追跡観測の判断を大きく助けるだろう。「4.4 TCPJ0228」で述べたようなさらなる長時間観測の必要性も即座に判断できるようになると考えられる。

### ・観測優先順位の決定

短時間で複数の新天体情報を検索にヒットした時に、その内どの突発天体を観測すべきかという判断を行う機能があるとよいだろう。SmartK は 10 分に一度の頻度でデータベースの検索を行っている。可能性は低いが見つけ時に 2 つ以上の突発現象を発見することは考えられる。その際にどの天体を優先すべきかという意味決定ができれば、僅かだがほしいデータが取得できる可能性が増加する。具体的には Nova や WZ Sge 型矮新星の可能性が高い天体の観測優先順位を上げるべきである。

また、現在の試運転では SmartK は観測開始時に起動し、観測終了時に停止している。そして起動の際、起動時刻から一定時間さかのぼって新天体情報を検索する仕様となっている。1日の間に複数の新天体情報が発見されることは試運転期間中だけでも何度かあったため、複数ある突発天体のどれを観測すべきかを決めるのは重要である。よって、現在のテスト用システムには搭載できれば便利だと考えている。

#### ・分光観測の自動化

現在は連続撮像の自動化完成を目指し、開発を進めているが、今後は分光観測の自動化も必要になる。現在までの試運転期間中に SmartK が分光観測を提案することはなかったが、今後分光観測を提案されることもあるだろう。分光観測は天体が新星か矮新星かが分からないときに提案されるが、このような状況は起こる。SmartK は連続撮像を提案したが、PNVJ0302 は発見当初は新星か矮新星か分からなかった一つの例である。将来的には分光観測の自動化にも取り掛かりたい。

## 第 5 章

### まとめと今後

本研究では SmartK が検索した 4 天体を観測した。TCPJ1724 は WZ Sge 型矮新星の可能性もあるが、増光初期に ESH を検出することはできなかった。PNVJ0302 は静穏時からの増光幅が非常に大きな WZ Sge 型矮新星であった。かなた望遠鏡での観測では ESH を直接検出することはできなかったが、明るさの変動は確認できた。他の観測データと照らし合わせると、かなた望遠鏡での観測にはダブルピークの片割れが存在している可能性が高い、観測していない時間が存在した。TCPJ0709 は VSNET alert の報告と周期が一致する ESH の検出に成功した。また、多波長で観測したことで波長の長い J バンドでより ESH の振幅が大きくなる様子も確認でき、円盤構造の理解への手がかりを得た。TCPJ0228 では SmartK の検索直後に観測を行ったことで、ESH を検出し、天体を WZ Sge 型矮新星と同定することに成功した。

SmartK を実際に利用したことで課題点も見つかった。特に撮像した画像に天体が写っているかどうかの判定システムと、即時解析を実装することができれば、今後さらなる観測をするにあたって大きな役割を果たすだろう。また、今回 SmartK を使用したことで発生したように、今後も様々なエラーと付き合いながら、その都度直していくことになるだろう。

今後は WZ Sge 型矮新星だと判明した天体に対するさらなる長時間観測、増光初期の新星に対する分光観測なども行っていきたい。それと並行しながら SmartK のバグを直し、アップデートを重ねていくことになる。

## 謝辞

この卒業論文を書くにあたって多くの方に助けていただきました。植村先生には研究を通して大変お世話になりました。研究に必要な事前知識をはじめとして、解析スクリプトの作成や統計力学を残して筆が遅い私の文章の添削など本研究のすべての行程で常に助けていただきました。古賀さんには SmartK のことをはじめとして、右も左もわかっていない留年生の私に根気強く付き合ってくださいました。中岡さん、今澤さん、浜田さんには観測や解析で大変お世話になりました。観測方法を一から教えていただいたり、松屋に連れて行っていただいたりと非常に助かりました。研究室の皆様は 2 留していて扱いにくい私を心優しく受け入れてくださりました。皆様のおかげでなんとか本論文を書くことができました。簡単ではございますが謝辞とさせていただきます。

## 引用文献

- aavso“SS Cygni Outbursts,” [https://www.aavso.org/vsots\\_sscyg](https://www.aavso.org/vsots_sscyg).
- Ie, Masanori, Norihide Iwamuro, Noritoshi Maihara, Yoshihiko Mizumoto, and Michitoshi Yoshida (2007) 『現代の天文学 15 宇宙の観測 I 光・赤外天文学』, 日本評論社.
- Imada, Akira, Taichi Kato, Kaori Kubota et al. (2006) “The 2003/2004 Superoutburst of SDSS J013701.06 – 091234.9,” *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 58, No. 1, pp. 143–152, 02, DOI: [10.1093/pasj/58.1.143](https://doi.org/10.1093/pasj/58.1.143).
- Isogai, Keisuke, Yusuke Tampo, Masayuki Yamanaka et al. (2021) “Spectroscopic and Photometric confirmation of MASTER OT J030227.28+191754.5 as a very large-amplitude WZ Sge-type dwarf nova,” *The Astronomer’s Telegram*, Vol. 15074, p. 1, November.
- Kato, T (2021) “vsnet-alert26497.”
- Matsui, Risako, Makoto Uemura, Akira Arai et al. (2009) “Optical and Near-Infrared Photometric Observation during the Superoutburst of the WZ Sge-Type Dwarf Nova, V455 Andromedae,” *PASJ*, Vol. 61, p. 1081, October, DOI: [10.1093/pasj/61.5.1081](https://doi.org/10.1093/pasj/61.5.1081).
- Nomoto, Kenichi, Kozou Sadakane, and Katsuhiko Sato (2009) 『現代の天文学 7 恒星』, 日本評論社.
- Osaki, Yoji and Taichi Kato (2013) “The Cause of the Superoutburst in SU UMa Stars is Finally Revealed by Kepler Light Curve of V1504 Cygni,” *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 65, No. 3, 06, DOI: [10.1093/pasj/65.3.50](https://doi.org/10.1093/pasj/65.3.50), 50.
- Tampo, Y (2021) “vsnet-alert 26449.”
- Tomita, Akihiko (2007) 「星の等級の算出」, <http://web.wakayama-u.ac.jp/~atomita/ccd/magnitude/>.
- Uemura, Makoto, Taichi Kato, Tomohito Ohshima, and Hiroyuki Maehara (2012) “Reconstruction of the Structure of Accretion Disks in Dwarf Novae from the Multi-Band Light Curves of Early Superhumps,” *PASJ*, Vol. 64, p. 92, October, DOI: [10.1093/pasj/64.5.92](https://doi.org/10.1093/pasj/64.5.92).
- Wakamatsu, Yasuyuki, Keisuke Isogai, Mariko Kimura et al. (2017) “ASASSN-16eg: New candidate for a long-period WZ Sge-type dwarf nova,” *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 69, No. 6, 10, DOI: [10.1093/pasj/psx094](https://doi.org/10.1093/pasj/psx094), 89.
- 古賀柚木 (2021) 「情報理論的な意思決定システムによる突発天体現象の研究」, 卒業論文, 広島大学.
- 広島大学宇宙科学センター (2021) 「かなた望遠鏡」, URL : <https://www.hiroshima-u.ac.jp/hasc/abstract>.