

# せいめい・かなたによる観測で見えてきた 超新星の新たな側面

川 端 美 穂<sup>1</sup>・前 田 啓 一<sup>2</sup>・山 中 雅 之<sup>3</sup>・  
中 岡 竜 也<sup>4</sup>・川 端 弘 治<sup>5</sup>

〈<sup>1,3</sup> 京都大学大学院理学研究科 〒719-0232 岡山県浅口市鴨方町本庄 3037-5〉

〈<sup>2</sup> 京都大学大学院理学研究科 〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町〉

〈<sup>4,5</sup> 広島大学宇宙科学センター 〒181-8588 広島県東広島市鏡山 1-3-1〉

e-mail: <sup>1</sup>kawabata@kusastro.kyoto-u.ac.jp, <sup>2</sup>keiichi.maeda@kusastro.kyoto-u.ac.jp, <sup>3</sup>yamanaka@kwasan.kyoto-u.ac.jp,

<sup>4</sup>nakaokat@hiroshima-u.ac.jp, <sup>5</sup>kawabtkj@hiroshima-u.ac.jp

せいめい望遠鏡・かなた望遠鏡を主力とした中小口径望遠鏡によって、近傍に現れた超新星観測を精力的に行っています。このプログラムにおいては、(1) 爆発直後からの観測により超新星の親星や爆発機構に新たな知見を得ること、(2) 近傍超新星のほぼコンプリートなサンプルを構築することにより、既存の分類に当てはまらないような特殊な爆発現象を判別し、その詳細な追観測から超新星爆発に至る進化の多様性とその起源を明らかにすること、を目標としています。せいめい望遠鏡を用いて観測されたいくつかの超新星の研究から、超新星に至る恒星進化や爆発機構にはこれまで考えられてきたよりも大きな多様性があることが明らかになりつつあります。本稿では、これらの研究成果について解説します。

## 1. 突発的な天体現象

超新星爆発をはじめとする突発天体現象（以下、単に突発現象とします）は一過性の事象であり、一度観測を逃すと二度とデータを手に入れることができません。時々刻々その明るさや色といった情報は変化していきます。分光観測で得られるスペクトルには組成の速度や密度といった物理情報が多く眠っています。これらを組み合わせることで超新星の性質（爆発の規模など）を引き出すことができます。

現在、Zwicky Transient Facility (ZTF) をはじめ、夜空の広い領域を深く掃くサーベイにより、従来知られていなかった特異な天体が発見されるようになりました。近年では、高頻度でのサーベイも行われるようになりました。数日おきに同じ

領域を見ていたものを、より短いタイムスケール（～1日）で変動天体がないか検索することで、これまで見過ごされてきた継続時間が短い変動現象や爆発直後の変動を捉えることができます。また従来知られていなかったような特異な天体も発見されるようになりました。せいめい望遠鏡はその集光力と高い機動力を生かし、突発的に明るくなった天体のフォローアップ観測に最適な望遠鏡となっています。変動天体現象は数多くありますが、本稿では超新星について紹介します。

## 2. 超新星と分類

超新星とは星が突如、銀河の明るさに匹敵するほど明るく輝きだす現象です。これは恒星進化の最終段階における爆発的現象と考えられています（図1）。超新星には様々な種類があり、最も明る

い時期におけるスペクトルにより分類されます [1]。水素の吸収線が見られないものをI型、水素の吸収線が見られるものをII型と分類します。I型の中でケイ素の吸収線が強いものをIa型、ケイ素の吸収線が弱いものうちヘリウムの吸収線が見られるものをIb型、ヘリウムの吸収線が見られないものをIc型と分類します。またこれ以外にも、初期には水素の吸収線が見られるものの、時間が経つにつれ水素の吸収線が見られなくなるもの、つまりII型からIb型に変化するものをIIB型と分類します。重要なこととして、これらの分類はその爆発する元の星（親星）や爆発メカニズムと関係していることが明らかになっていきます。Ia型は核暴走型爆発、それ以外は重力崩壊型爆発であると考えられています。

Ia型超新星は白色矮星の爆発であると広く考えられています。連星進化の結果、白色矮星が自身の重力を電子の縮退圧で支えられなくなるチャンドラセカール限界質量（約1.4太陽質量）付近に達すると、中心付近で爆発的な核反応が起こります。その核燃焼波により白色矮星の大部分が短時間に燃焼することで爆発現象を引き起こします。

II型超新星は大質量星の重力崩壊による超新星爆発であることが分かっています。星の最も外側に水素の層があり、これがスペクトルに見られる水素の吸収を作っています。Ib、Ic型超新星も、これらはII型超新星と同じく大質量星によって引き起こされると考えられています。ウォルフ-ライエ星と呼ばれる、外層の水素を失った大質量星が有力な親星候補ですが、明確な根拠は示されていません。これらの超新星は、大質量星が爆発前に何らかの機構で水素層（Ib型超新星）、または水素層とその内側のヘリウム層を失い（Ic型超新星）、爆発したものだと考えられています。

### 3. Ia型超新星：親星と爆発機構の謎

白色矮星は特定の限界質量を持つため、爆発時の性質は似通っており、Ia型超新星の性質も同様

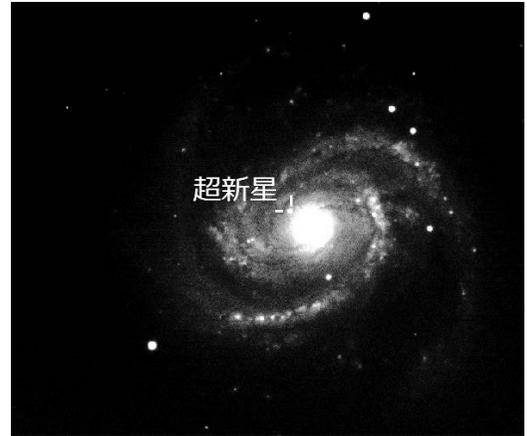


図1 M100に現れた超新星SN 2019ehk。広島大学かなた望遠鏡により、2019年5月25日にRバンドで取得されました。

となることが予想されます。実際に、極大時の光度と光度変化のタイムスケールに強い相関関係があることがよく知られており [2]、光度が明るいものほど、光度変化は緩やかです。これを遠方宇宙で出現したIa型超新星の観測データに応用することで、宇宙の加速膨張の発見という研究成果がもたらされました [3, 4]。

それにも関わらず、Ia型超新星の親星について、伴星（主系列星あるいは赤色巨星）からの白色矮星への質量降着を起こしている連星系なのか、二つの白色矮星の合体なのかという大問題の決着はついていません。爆発メカニズムに関しても、核燃焼波の伝わり方はよく分からないままです。核燃焼波が音速を超えるか否か、燃焼波がどこまで到達するかによって生成される元素が異なります。超新星により爆発した星の残骸は宇宙空間に飛び散っていくため、時間経過とともに、より高速で飛び散る外側から希薄になっていきます。つまり、爆発直後の分光観測により、最外層に存在する物質の組成等を調べることができ、これは爆発メカニズム解明の鍵になると期待されます。爆発直後はまだ超新星は暗いため、より大きい口径の望遠鏡での観測が必須となります。

## 4. 重力崩壊型超新星：親星と恒星進化の謎

大質量星は進化の最終段階で巨大な質量放出を経験すると考えられていますが、いつ、どのようなメカニズムで質量放出するかよく分かっていません。最近になって、爆発から数日後の分光観測の報告がなされるようになってきました。そのスペクトルには星周物質由来の輝線が見られることがあります。これは爆発直前に大規模な質量放出があったことを示唆します。中でも2013年に発見された超新星 iPTF 13dqy の場合、爆発直前のたった1年ほどの間に  $10^{-3}$  太陽質量/年という高い質量放出率を示したことが分かりました [5]。星周物質の兆候が見られたスペクトルの例はまだ数少ないため、爆発直前の大量の質量放出が普遍的な現象であるのかサンプルを増やして検証する必要があります。

また、爆発直後は典型的な超新星だと考えられていた例であっても、時間変化を追っていくことで、新たな発見につながる可能性があります。例えば、広島大学が所有する口径1.5メートルのかなた望遠鏡で観測した SN 2017czd は初期に水素の吸収が見られる典型的なII型超新星でしたが、わずか20日ほどで約5等も暗くなり、あっという間に観測できなくなりました。この天体は、水素層をわずかにだけ持った星が超新星として爆発し、さらに放射源の質量が異常に小さいという性質を持つ奇妙な天体でした [6]。このように時間進化を調べることも超新星の理解の鍵になります。超新星は時間経過とともに暗くなるため、初期にかなた望遠鏡、後期にせいめい望遠鏡を用いるといったリレー観測も重要となります。

ここまでは分光によって解かれると期待される問題を列挙しました。特に、爆発直後の分光観測はこれまで例も少なく、未解明問題を解くうえで

新たな情報を与えると期待されます。以下では、発見後間もない時期から観測を始めるための体制作りに関して述べていきます。

## 5. せいめい望遠鏡と超新星

大規模サーベイの発展によって、超新星の候補天体の報告が年間1万天体を超えるようになりました。2016年から超新星の候補天体の発見報告は主に Transient Name Server (TNS) [7] というシステムで行われています\*1。母銀河の距離を確認し、せいめい望遠鏡で十分フォローできる明るさになるかどうか確認します。その後、残った候補天体について、他の観測者によって発見前の等級が報告されているかどうかを調べていきます。これにより、爆発直後だと思われる超新星候補に絞ることができ、年間で約100例程度になります。

せいめい望遠鏡では、これまで約50天体ほどの超新星など突発現象の分光観測を実施してきました。これらの中から、初期のスペクトルにおいて、(1) 爆発後非常に間もない段階と考えられる (2) これまでに見られないような特徴を示す (3) 非常に近傍で明るく、より詳細な調査のための観測が実現できると明らかになった10天体程度を、長期に亘ってモニター観測しました。現在せいめい望遠鏡に搭載されている唯一の観測装置 KOOLS-IFU を用いて分光観測を実施しています。さらに、光度や色の変化を追うために広島大学かなた望遠鏡でも観測を行っています。かなた望遠鏡では測光だけでなく、赤外線や偏光といった特殊なモードでも観測を実施していて、多角的に超新星の謎に迫ります。それらの中でも特にユニークで、かつ研究結果としてまとまった超新星について以下に詳細を述べます。

### 5.1 膨張速度が速い Ia 型超新星

Ia 型超新星の中には、スペクトルを調べるとケ

\*1 以前は CBAT “Transient Objects Confirmation Page” [8] に報告されていました。こちらは現在では主に新星の発見報告に用いられています。

イ素の速度の異なるものが存在することが知られています [9]. 速度変化の統計的な調査により, Ia型超新星は三つのサブクラスに分類されています [10]. その中に, 速い膨張速度を持ち, 速度進化が速いグループがあります. 極大時では $\sim 12,000 \text{ km s}^{-1}$ を超える速度を持つケイ素の吸収線が見られます. このグループに属するIa型超新星は典型的な速度 ( $\sim 10,000 \text{ km s}^{-1}$ ) を持つIa型超新星と比べて異なる性質があることが知られています. 天体固有の色 ( $B-V$ ) が赤いこと [11], 爆発から極大を迎えるタイムスケールが短めであること [12] などが挙げられます. しかしながら, この分光学的なサブクラスの起源については理解されていません.

SN 2019einは, 世界時2019年5月15日に Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System という小惑星の接近を知らせるプロジェクトによって, 近傍銀河 NGC5352 の中に発見されました [13]. 報告を受けて, せいめいとかなたでフォローアップ観測を開始しました. 発見から約16時間後にせいめい望遠鏡での分光が始まったものの, 残念ながらこの時点ではまだ暗く, 天体の検出に至りませんでした. その後, 別グループから爆発直後速い膨張速度を持つIa型超新星であることが報告されました [14]. しかしながら, 発見から2.2日後にあたる5月3.7日にはせいめい望遠鏡でもついに分光観測で明瞭なスペクトルを得ることに成功しました. 後の検証から, 爆発後わずか3.7日のスペクトルであることが判明しました. これほど初期に得られたスペクトルはたいへん希少であり, 爆発メカニズムに強い制限を与えることができるかと期待されました.

前述のとおり, 爆発メカニズム解明の鍵となる超新星の最外層組成を明らかにするためには, 爆発直後からの分光観測が重要です. そこで, このような希少なスペクトルを得ることのできた超新星の性質を徹底的に調べ上げるため, せいめい望遠鏡に加えて光赤外線大学間連携の枠組みにおい

ても早期からの Target of Opportunity (ToO) 観測を要請しました. ToO観測とは, 予めスケジュールされた観測ではなく, 突発的な事象等に対する緊急の観測を随時受け付けるという観測形態です.

ここで光赤外線大学間連携について簡潔に紹介します. 2011年度に発足した中小口径望遠鏡を持つ大学によって結ばれた教育と研究に関する協力事業です. 突発現象・変動現象を可視近赤外線波長域において多モード・多バンドで同時的に観測することが可能となり, 悪天候によるデータ欠損を避けることができます. 超新星観測においては, 可視と同時に近赤外線データを欠損なく取得できる点が強みとなります. 赤外線や偏光などの多様な機能を同時に使えることは, 国際的にもユニークと言え, 高い競争力を持つことを意味します. 光赤外線大学間連携のこれまでの活動や成果については天文月報2016年2月号・3月号を参照してください.

話を超新星に戻します. 5月3日のせいめい望遠鏡で得られたスペクトルは,  $20,000 \text{ km s}^{-1}$ を超えるケイ素の吸収線を示しました. その後, 極大を迎えるまでの速度進化は速く, 極大時では $\sim 12,000 \text{ km s}^{-1}$ まで減衰しました (図2, 3). SN 2019einのケイ素の速度の減衰はこれまで観測されていたIa型超新星の中でも最も大きいものとなります. さらに, これまで観測されていた膨張速度が速いIa型超新星と比べて光度変化のタイムスケールも短いことが明らかになりました.

爆発直後の超新星を分光することにより, より外層の組成を知ることができ, どこまで燃焼波がどのように伝わっていったのかを特定する鍵となります. 膨張速度が速いサブクラスにおいては爆発直後からの観測例が少なく, これまで最外層の組成については知られていませんでした. 膨張速度が速いサブクラスでこれほど初期に分光観測に成功した初めてのケースとなりました. 最外層の組成を調べるうえで, たいへん重要なデータです.

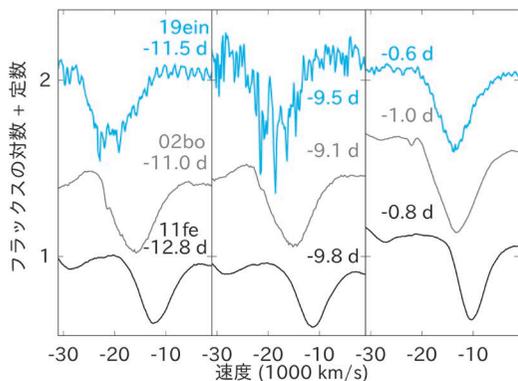


図2 ケイ素の吸収線の拡大図. 一般的な超新星 (SN 2011fe) とこれまでに観測された膨張速度が速いタイプの超新星 (SN 2002bo) と比較しています. 日数は極大からの時期を示しています ([15] より改変).

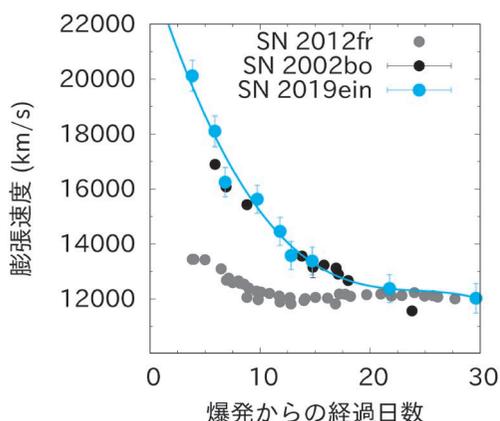


図3 ケイ素の吸収線に見られるドップラー効果から求めた超新星SN 2019einの膨張速度. 初期ほど, 一般的な超新星 (SN 2012fr) との速度の差が大きくなります. また, 膨張速度が速いタイプの超新星のこれまでの観測例 (SN 2002bo) に比べ, さらに初期から観測でき, 爆発直後に非常に高速の吸収線を示したことが分かります ([15] より改変).

今回, 一次元の (球対称) スペクトル計算を行いました. モデルのセットアップは以下のとおりです. 炭素と酸素からなる白色矮星の中心付近で核反応が点火した後, 燃焼波が外に広がり, 元素合成を進めます. 最も外側では, 炭素がわずかに燃え残るとともに, ケイ素が合成されます. これ

によって計算されたスペクトルの6,000 Å付近にはケイ素による吸収線が見られます.

燃焼波面がどこまで進むかをパラメータとしてスペクトル計算を行い, せいめい望遠鏡で得られたスペクトルの再現を行いました. この計算結果より, 白色矮星の燃焼波は $\sim 30,000 \text{ km s}^{-1}$ で高速膨張する最外層まで広がっているという結果が得られました. これは遅い速度進化を示すIa型超新星で知られている最外層の組成とは異なっており, Ia型超新星の爆発メカニズムの制限への手がかりになったと考えています. 今後, 初期のスペクトルを用いたさらなる系統的な研究を行う予定です.

## 5.2 極めて暗いIa型超新星

最近になり, 極大光度が光度変化から期待される値よりも1等以上暗い特異なIa型超新星の存在が知られるようになりました. この特異なIa型超新星はIax型超新星と呼ばれています [16]. Iax型超新星は暗いだけでなく, 放出物質の速度も遅いという特徴が知られています. 一方で, 極大付近のスペクトルはむしろ明るいIa型超新星と似ています. もし, 宇宙論的パラメータへの制限に使われるデータとして混入されれば, 誤った結果を導くものとなりかねません. 観測的特徴を明らかにすることが求められます.

Iax型超新星は, まだ観測例が限られていることもあり, 爆発メカニズムについてよく分かっていません. Ia型超新星と類似しつつも極大光度は非常に暗いことから, Iax型超新星を説明するモデルとして, 通常のIa型超新星で検討されている標準的なモデルより規模の小さい「爆燃波」モデルが提唱されています. Iax型超新星が暗いことや爆発エネルギーが小さいことをうまく説明できると考えられていましたが, 全てのIax型超新星の明るさを説明するには依然として不十分であるとされています. 近年では, これに加えてさらに規模の小さい「失敗した爆燃波」モデルが提案されています.

SN 2019muj は世界時 2019 年 8 月 7.4 日に All Sky Automated Survey for SuperNovae グループによって発見されました [17]. その後, 8 月 7.8 日に Las Cumbres Observatory Global SN project によって分光観測がなされ, 非常に初期の Iax 型超新星によく類似していることが示されました [18]. 増光中での Iax 型超新星の発見は依然として希少であり, 初期からの観測で多くの未解決問題にアプローチできると期待できます. 私たちは, 8 月 8 日にせいめい望遠鏡での ToO 観測を依頼しました. このスペクトルはこれまでに非常によく観測されている Iax 型超新星のプロトタイプと言える SN 2005hk によく類似していますが, 吸収線の幅は比較的に狭いことを確かめました. 吸収線速度も遅く, Iax 型超新星の中でもやや暗いタイプであると推定されました. 一方で, 絶対光度は明るく, これまで観測されている Iax 型超新星の中でも平均的な明るさであることが分かりました (図 4). これまで観測されている Iax 型超新星の中で, 最も明るいものは  $\sim -18$  等 (例えば SN 2005hk), 最も暗いものは  $\sim -14$  等程度 (例えば SN 2008 ha) でしたが, 今回私たちが観測を実施した SN 2019muj は  $\sim -16$  mag でした (図 5). 暗い Iax 型超新星 SN 2008 ha と同程度の遅い速度 ( $\sim 4,000 \text{ km s}^{-1}$ ) を持つにも関わらず, 中間的な明るさを持つ Iax 型超新星の増光期からの多バンドによる観測例はこれまでありませんでした.

この特異な Iax 型超新星の放出物質の質量や構造を調査すべく, さらなる解析に着手しました. 私たちは, 光赤外線大学間連携を通じて多バンドでの欠損がほぼない, 連続的な光度変化を取得し, これらを用いて総放射光度<sup>\*2</sup>を推定しました. Iax 型超新星の中でも減光は速かったものの, 極大後 30 日には緩やかな光度変動を示すようになりました. この緩やかな光度変化は内側に非常に高密度の領域があることを示唆します. このよ

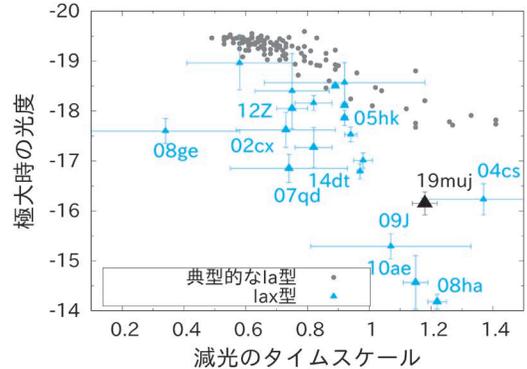


図4 典型的な Ia 型超新星及び Iax 型超新星の極大等級と減光のタイムスケール (V バンド).

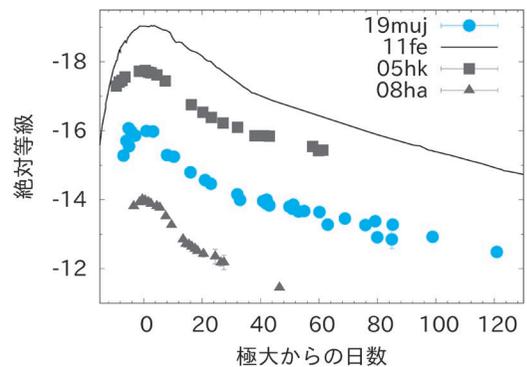


図5 典型的な Ia 型超新星 (SN 2011fe) 及び Iax 型超新星 (SN 2005hk, SN 2008 ha) の光度変化 (V バンド).

うな特徴は, 弱い爆燃波モデルで期待される特徴をよく再現しています. 弱い爆燃波モデルでは, 核燃焼波が亜音速で白色矮星の中を伝播し爆発しますが, 爆発エネルギーが小さく, 白色矮星の大部分 ( $\sim 1.0$  太陽質量) は吹き飛ばずに残骸として残り, その残骸そのものあるいはその周辺が高密度領域としてふるまうと考えられます. このような特徴はこれまで明るい Iax 型超新星で調べられています. 今回, 中間的な性質を示す SN 2019muj でも同じ傾向がみられることから, 異なるサブクラスの Iax 型超新星でも共通した爆発機

\*2 これまで, 衛星観測によって丁寧に広い波長域で研究された Iax 型超新星はなく, 紫外より短波長側, 赤外より長波長側は, よく観測されている Ia 型超新星を参照しています.

構が働いていることが考えられます。

また近年、暗いIax型超新星において爆発後4年後に超新星で期待されるより優位に明るい天体が検出されています [19]。これが白色矮星に質量を供給した伴星であるのか、吹き飛ばずに残された白色矮星の残骸であるのか決着はついていません。もし、これが残された残骸であるならば今回の私たちの観測結果と一致します。今後、SN 2019mujにおいても残骸が存在するかどうか、長期の観測で明らかにされることが期待されます。

### 5.3 カルシウム超過超新星

高頻度サーベイ観測が発達するにともない、近年になって非常にレアで奇妙な現象が発見されています。これから紹介するカルシウム超過超新星はその一例です。その正体は全く不明で、多くが謎に包まれたままです。

一般に、超新星は爆発後数週間程度の早期では光学的に厚く、そのスペクトルにおいて吸収線が卓越しています。1年近く経過して密度が下がると、輝線が見られるようになります。しかしながら、近年発見されたカルシウム超過超新星は、極大期付近では吸収線が卓越するものの、わずかその後50日程度で強いカルシウム輝線を示すことが知られています [20, 21]。通常の超新星に比べてあっという間に密度が下がってしまうのです。

この謎の多い突発現象ですが、実は多くが楕円銀河で発見されています。楕円銀河は星がほとんど新しく生まれにくいような環境です。質量の大きな恒星は重力崩壊型超新星としてその一生をすでに終えていると考えられます。しかも、いくつかは母銀河から遥か遠く、数十キロパーセク程度の位置に見られます。

今日に至るまで、この特異な突発現象を完全に説明できる爆発シナリオはなく、また決定的な根拠を与える観測もなされていません。では、どのような観測が求められるのでしょうか？ 一つは

爆発直後の短い時間の増光を捉えることです。超新星では、爆発直後にその外層を突き破る瞬間、短時間に光り輝く現象が知られています。ショックブレイクアウトと呼ばれます。あるいは、超新星爆発で膨張する物質と星の周囲に漂うガスが衝突することで明るく輝くことも期待されます。この放射を捉え、明るさや色を知ることができれば、親星の周囲に漂うガスの性質<sup>\*3</sup>を知ることができます。このことから、どのような星が超新星爆発を引き起こしたのか、推定することができます。

そのような状況の中、ついに待望の超新星が発見されました。SN 2019ehkは美しい渦巻き構造を持つことで知られる有名な近傍銀河M100で発生しました(図1)。世界時2019年4月30.2日にアマチュア天文家のJaroslaw Grzegorzec氏によって発見されたのです [22]。ちょうどこの時、私たちのグループではこの記事の前半部分で取り上げたSN 2019einをせいめい望遠鏡を使って観測する予定になっていました。そして、同じ晩にSN 2019ehkも分光観測を実行しました。その結果、得られたSN 2019ehkのスペクトルはIb型超新星と似ており、ヘリウム、ケイ素、酸素、そしてカルシウムを持つことが分かりました。ところが、一ヶ月も経過した頃、その観測的な特徴は一変しました。強いカルシウムによる輝線放射が捉えられたのです。このような特徴はカルシウム超過超新星に一致します(図6)。そして、今度はかなた望遠鏡で得られていた明るさの変化を精査し直しました。最初の数日で、短期間の増光を示していたことが分かりました。すぐに、取得された全てのデータを洗い直しました。その結果、この超新星は爆発初期に短時間の増光を示したカルシウム超過超新星であったことが明らかとなりました。

現在、カルシウム超過超新星を説明する爆発シナリオはいくつか提唱されています。一つ目は特

\*3 質量放出率と呼ばれる、星がガスを放出する年当たり換算の質量。

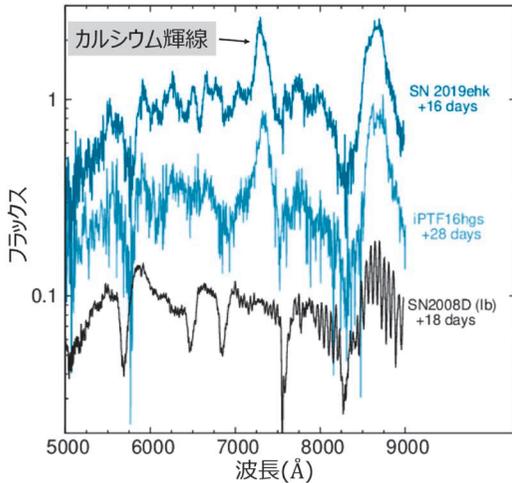


図6 上二つがカルシウム超過超新星 (SN 2019ehk, iPTF16hgs), 下が典型的なIb型超新星 (SN 2008D) のスペクトル。日数は極大からの時期を示しています。典型的なIb型超新星SN 2008Dでは7,200 Å付近に輝線が見えないのに対し、カルシウム超過超新星は同時期のスペクトルにカルシウムの禁制線が見えています ([23] より改変)。

殊なIa型超新星というシナリオです。ヘリウムを外層に持つ伴星から降着によって、白色矮星の表面にヘリウム層が形成され限界密度に到達して引き起こされるというものです [24]。その一方で、重力崩壊型超新星によって引き起こされるというシナリオが提唱されています。このシナリオでは8-10太陽質量程度の比較的軽い質量のヘリウムもしくは炭素と酸素からなる星が重力崩壊を起こし、爆発すると考えられています [21]。

私たちは、カルシウム超過超新星の爆発シナリオに決着をつけるため、この初期の放射について検討を始めました。まずその明るさの変化は、過去に重力崩壊型超新星で観測されているものによく似ていることを突き止めました。この放射の性質を理論的に解釈したところ、1,000-10,000太陽半径程度のサイズを持ち、0.001-0.05太陽質量程度の質量を持つ物質が超新星親星の周囲に存在していたことが示唆されました。これは、4章で述

べたような、大質量星の爆発直前の質量放出によるものと考えられます。つまり、SN 2019ehkは大質量星の外層がすっかり剥げてしまったヘリウム星が爆発したものである可能性が大きいと結論づけました。

どのような過程を経てヘリウムを持つ大質量星へと進化したのか、いくつかのシナリオを検討しました。まず、大質量星がその輻射圧 (光による圧力と考えてください) によって、自身の外層を吹き飛ばしてしまった、という説です。SN 2019ehkの親星と考えられる比較的小質量のヘリウム星は、このシナリオには合致しません。次に、連星進化過程で剥ぎ取られたシナリオを検討し、このシナリオが有力であると結論づけました。このような大質量起源の (比較的低質量の) ヘリウム星からなる連星系はやがて、両者の星とも超新星爆発を起こし、中性子星と呼ばれる極めて密度が高いコンパクトな星に至ると考えられています [25]。近年、重力波の観測によって注目を浴びつつある中性子星合体現象もこのような過程を経て、中性子星の連星に至ったという指摘がなされています。今回観測に成功したSN 2019ehkは、このような連星に比べるとやや軌道半径が大きいものと考えられますが、中性子星連星を作る進化シナリオに重要なヒントを与えるものと考えています。

## 6. 今後の展望

これまでせいめい望遠鏡を主力として、近傍に現れた超新星について系統的に観測的研究を行ってきました。それによって超新星の新たな多様性が見えてきました。今後、東京大学・木曾シュミット望遠鏡の新装置Tomo-e Gozenによる高頻度広視野サーベイの本格稼働により、爆発直後の突発現象が捉えられると期待されています。爆発直後の超新星の発見が当たり前となれば、それに対応して、より暗いものの明るさや色、スペクトルを得る必要があります。京都大学では東京大学と協力して、可視3色高速撮像分光装置TriCCS

(Tricolor CMOS Camera and Spectrograph) を開発しています。現在、撮像機能の試験観測が進んでいます。分光機能の搭載も進行中であり、爆発直後の超新星のスペクトルを得ることができるかと期待されます。例えばIa型超新星では増光時期の明るさと色を同時に捉えることができます。これによって、親星や爆発機構について強い制限を与えることができると期待されます。また、重力崩壊型超新星においても、同様の現象を多く捉え、星周物質がいつどのような段階でどの程度放出されるか、親星との関係性を明らかにすることができるかと期待されます。さらに、カルシウム超過超新星のように発生頻度が低く依然、起源が不明瞭な天体を多くフォローアップすることができるようになり、統計的な議論が可能になると期待されます。光赤外線大学間連携の枠組みを使えば、従来の測光や分光だけでなく、赤外や偏光といった多様な観測を同時にかつ長期に実施することができ、さらなる未解決問題に迫れるものと期待されます。

## 謝辞

本研究は、せいめい望遠鏡及び、光赤外線大学間連携を通じたToO観測で取得されたデータに基づいています。共同研究者の田中雅臣氏、守屋堯氏、富永望氏、諸隈智貴氏、長尾崇史氏、大塚雅昭氏をはじめ、観測及び解析に携わった全ての方に深く感謝を申し上げます。本研究はJSPS科研費(JP20H00174, JP20H04737, JP19K23461, JP18H04585, JP18H05223, JP17H02864)からの助成を受けています。

## 参考文献

- [1] Filippenko, A. V., 1997, ARA&A, 35, 309
- [2] Phillips, M. M., 1993, ApJ, 413, L105
- [3] Riess, A. G., et al., 1998, AJ, 116, 1009
- [4] Perlmutter, S., et al., 1999, ApJ, 517, 565
- [5] Yaron, O., et al., 2017, Nat. Phys., 13, 510
- [6] Nakaoka, T., et al., 2019, ApJ, 875, 76
- [7] <https://www.wis-tns.org/> (2021.02.09)
- [8] <http://www.cbat.eps.harvard.edu/unconf/tocp.html>

(2021.02.09)

- [9] Blondin, S., et al., 2012, AJ, 143, 126
- [10] Branch, D., et al., 2006, PASP, 118, 560
- [11] Pignata, G., et al., 2008, MNRAS, 388, 971
- [12] Ganesalingam, M., et al., 2011, MNRAS, 416, 2607
- [13] Tonry, J., et al., 2019, Transient Name Server Discovery Report, 2019–678, 1
- [14] Burke, J., et al., 2019, Transient Name Server Astro-Note, 8, 1
- [15] Kawabata, M., et al., 2020, ApJ, 893, 143
- [16] Foley, R. J., et al., 2013, ApJ, 767, 57
- [17] Brimacombe, J., et al., 2019, The Astronomer's Telegram, 13004, 1
- [18] Hiramatsu, D., et al., 2019, Transient Name Server Classification Report, 2019–1442, 1
- [19] Foley, R. J., et al., 2014, ApJ, 792, 29
- [20] Perets, H. B., et al., 2010, Nature, 465, 322
- [21] Kawabata, K. S., et al., 2010, Nature, 465, 326
- [22] Grzegorzec, J., 2019, Transient Name Server Discovery Report, 2019–666, 1
- [23] Nakaoka, T., et al., 2020, arXiv e-prints, arXiv:2005.02992
- [24] Shen, Ken J., et al., 2010, ApJ, 715, 767
- [25] Lyman, J. D., et al., 2014, MNRAS, 444, 2157

## New Aspects of Supernovae Revealed by Seimei and Kanata Telescopes

Miho KAWABATA<sup>1</sup>, Keiichi MAEDA<sup>2</sup>,  
Masayuki YAMANAKA<sup>3</sup>, Tatsuya NAKAOKA<sup>4</sup>,  
Koji KAWABATA<sup>5</sup>

<sup>1,3</sup>Graduate School of Science, Kyoto University,  
3037-5 Kamogatachohonjo, Asakuchi, Okayama  
719-0232, Japan

<sup>2</sup>Graduate School of Science, Kyoto University,  
Kitashirakawa-Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto  
606-8502, Japan

<sup>4,5</sup>Hiroshima Astrophysical Science Center,  
Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama,  
Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan

Abstract: We have been actively observing supernovae with the small- and medium-aperture telescopes, including the Seimei telescope as a main player. We have been working on the following main objectives: (i) to obtain new insights into the progenitor and the explosion mechanism of supernovae by observing supernovae soon after the explosion, (ii) to understand a nearly complete sample of supernovae in nearby galaxies, by constructing a nearly complete sample of supernovae in the local universe. We summarize new insights obtained by our observation program.