

## 論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 ( 理 学 )	氏名	中 岡 竜 也
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 ①・② 項該当		
論文題目			
Study on the Progenitors of Type II Supernovae based on Extensive Observations ( 長期観測に基づいた II 型超新星の親星に関する研究 )			
論文審査担当者			
主 査	教 授	川端 弘治	(宇宙科学センター)
審査委員	教 授	小 嶋 康史	
審査委員	教 授	杉立 徹	
審査委員	教 授	深澤 泰司	
〔論文審査の要旨〕			
<p>宇宙には様々な質量を持つ恒星が存在し、それぞれが異なる進化を示す。太陽質量の約 8・10 倍以上の初期質量を持つ大質量星は、その短い寿命 (1 億年程度) の間にも強い紫外線放射や恒星風で周辺の星間空間に大きな影響を及ぼすほか、進化の最終段階において重力崩壊型超新星爆発を引き起こし、太陽質量の数倍以上のガスを秒速最大 1 万キロメートル超の速度で放出、銀河スケールの宇宙進化にも顕著な影響を及ぼす天体である。しかしながら、大質量星がどのように生成され、どのような進化形態を経るのかといった恒星進化の観点においても依然、議論は収束しておらず、またどのようにして超新星爆発が誘起されるのか、どのような親星がどのような特徴を持った重力崩壊型超新星に至るのかといった事柄も依然不明である。これには大質量星の寿命が短く星間雲に隠されたまま進化が進む場合が多いことや、発見される超新星の多くは遠方にあり暗いため、詳細な観測が難しいことが少なからず影響している。近年、突発天体のサーベイが精力的に行われるようになり、重力崩壊型超新星の観測サンプルも増えてきている。本論文は、近傍で発生する重力崩壊型超新星の中でも主要な割合を占める II 型超新星に対し、近紫外線・可視光・近赤外線領域における長期に亘る観測に基づいた考察を扱ったものであり、重力崩壊型超新星の研究を通じて、大質量星の進化に関する新たな知見を見出している。</p> <p>論文提出者は、2015-2018 年に北半球に現れた II 型超新星を精力的に観測し、その中でも特異な傾向を示した二つの超新星に対して詳細な解析を行い、本論文にまとめている。本論文は 5 章で構成される。第 1 章は序章であり、恒星進化のほか、前述のような II 型超新星に関する研究の背景や本論文に至る研究動機がまとめられている。</p> <p>第 2 章では、観測とデータ整約について記述されている。観測には主として広島大学の口径 1.5m かなた望遠鏡とその観測装置が用いられているが、一部に NASA の Swift 衛星に搭載された紫外線可視望遠鏡により得られたデータも含まれる。データの整約法や波長・フラックス較正について解説されている。</p> <p>第 3 章では、本論文で扱われた二つの超新星、SN 2016bkv および SN 2017czd に関する観測結果が報告されている。SN 2016bkv は、II 型の中でも主要な IIP 型と比べて約 2 等級かそれ以上暗く、爆発エネルギーや膨張速度が半分程度しかない低光度 IIP 型に分</p>			

類される超新星である。低光度 IIP 型の爆発シナリオとして、重力崩壊型の中でも小さめの質量を持つ親星の爆発と、大きめの質量を持つ親星がブラックホールを生成して超新星放射のエネルギー源である  $^{56}\text{Ni}$  の相当な割合がブラックホールへ落ち込む爆発、といった相反する 2 つのモデルが提唱されているが、過去の観測例が少ないため、議論は収束していなかった。論文提出者は、SN 2016bkv に対して、爆発直後から約 200 日にかけて、密に観測を実施している。低光度 IIP 型超新星で爆発直後からこれだけ長期に亘って観測が得られた例はなく、良質の新たなデータを提供した点は高く評価できる。そして、SN 2016bkv の光度曲線が、初期に特異な増減光を示し、増光期のスペクトルは高温の光球からの連続光と水素由来の幅の狭い輝線で特徴づけられることや、その後のプラトーと呼ばれる可視光の光度曲線がほぼ一定を保つ期間が過去に観測されたあらゆる IIP 型と比べて長いこと、プラトー期の放出速度が他の低光度 IIP 型よりもさらに遅いことを見出している。もう一つの超新星である SN 2017czd においては、爆発直後の増光段階から可視光・近赤外線が多バンドで観測を実施し、スペクトルに II 型の特徴である水素の吸収線が見られ、可視光の光度曲線にはプラトーに似た光度がほぼ一定となる傾向を示したものの、爆発からわずか約 20 日後に 4 等におよぶ急減光を示した。これだけの急な減光がこの早い段階で見られたのは初めてである。爆発直後は IIP 型に似たスペクトルを示した一方で、急減光直前は IIb 型超新星に似ていることも見出したことも重要な成果である。

第 4 章では、観測結果に基づいた考察がなされている。まず、SN 2016bkv の光度曲線や放出速度から導かれる放出物質の質量は、過去によく研究がなされた低光度 IIP 型超新星 SN 2003Z よりも 2 倍程度大きいことを示している。また、初期に見られた特異な増減光は、親星が爆発前に低速で放出した物質に今回の放出物質が衝突して生じたものと結論し、その爆発直前の質量放出率は典型的な赤色超巨星で観測されている値より 2 桁以上大きいと推定している。これらの結果から、重力崩壊型超新星の中でも親星の質量が大きめであり、大気の相当な割合がブラックホールへ落ち込むモデルを支持すると結論している。SN 2017erp においては、その早い光度進化から、水素外層が通常の恒星進化では考えられないほど薄く、親星が近接連星系をなしており伴星との質量交換によって爆発前に水素外層の大部分を失ったと結論している。実際に、連星進化のシミュレーションと超新星爆発の放射コードの計算を適用して、観測された光度曲線や、超新星本体が IIb 型となることが再現できること、ごく初期の放射に見られた超過成分は星周物質との相互作用由来と考えられることを示している。これら二つの II 型超新星で得られた結論は、大質量星の末期の進化や超新星の爆発機構に対して、信頼性の高い新たな知見を与えるものである。

第 5 章は本論文のまとめである。

本論文で扱われた II 型超新星は、初期宇宙や銀河進化に大きな影響を及ぼす重要な天体であり、新たな観測に基づいて得られた結論の学術的価値は高い。公表論文は 25 名の共著であるが、観測やデータ整約、その解析の多くが論文提出者によって行われており、寄与は充分である。

以上、審査の結果、本論文の著者は博士（理学）の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

公表論文

“The Low-luminosity Type IIP Supernova 2016bkv with Early-phase Circumstellar Interaction”

Tatsuya Nakaoka, Koji S. Kawabata, Keiichi Maeda, Masaomi Tanaka, Masayuki Yamanaka, Takashi J. Moriya, Nozomu Tominaga, Tomoki Morokuma, Katsutoshi Takaki, ほか 16 名, The Astrophysical Journal, 859, 78 (2018)

参考論文

“Broad-lined Supernova 2016coi with a Helium Envelope”

Yamanaka, Masayuki, Nakaoka, Tatsuya, Tanaka, Masaomi, Maeda, Keiichi, Honda, Satoshi, Hanayama, Hidekazu, Morokuma, Tomoki, ほか 34 名, The Astrophysical Journal, 837, 1 (2017)

“Type IIb Supernova 2013df Entering into an Interaction Phase: A Link between the Progenitor and the Mass Loss”

Maeda, K., Hattori, T., Milisavljevic, D., Folatelli, G., Drout, M. R., Kuncarayakti, H., Margutti, R., Nakaoka, T., ほか 18 名, The Astrophysical Journal, 807, 35 (2015)

“Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger”

Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Acernese, F., Ackley, K., Adams, C., Adams, T., Addesso, P., Adhikari, R. X., Adya, V. B., Affeldt, C., Afrough, M., Agarwal, B., T. Nakaoka, ほか 3663 名, The Astrophysical Journal, 848, 12 (2017)

“Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A”

The IceCube, Fermi-LAT, MAGIC, AGILE, ASAS-SN, HAWC, H.E.S.S, INTEGRAL, Kanata (including T. Nakaoka), Kiso, Kapteyn, Liverpool telescope, Subaru, Swift/NuSTAR, VERITAS, VLA/17B-403 teams, Science, 361, 1378 (2018)

“Kilonova from post-merger ejecta as an optical and near-Infrared counterpart of GW170817”

Tanaka Masaomi, Utsumi Yousuke, Mazzali Paolo A., Tominaga Nozomu, Yoshida Michitoshi, Sekiguchi Yuichiro, Nakaoka Tatsuya, N, ほか 38 名, Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, 102 (2017)

“J-GEM observations of an electromagnetic counterpart to the neutron star merger GW170817”

Utsumi Yousuke, Tanaka Masaomi, Tominaga Nozomu, Yoshida Michitoshi, Nakaoka Tatsuya, ほか 53 名, , Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, 101 (2017)