

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740141

研究課題名(和文) 次世代宇宙論研究・将来観測計画に向けた超新星に至る進化・爆発機構の解明

研究課題名(英文) Understanding the stellar evolution toward supernovae and their explosion mechanisms  
: Toward the next generation cosmology and future observational projects

研究代表者

前田 啓一 (MAEDA, KEIICHI)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任准教授

研究者番号：00503880

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：天体物理学上の大きな未解明問題である超新星に至る親星進化や爆発機構を解明することを目的とし、超新星の電波、可視からガンマ線にいたる多波長における理論、観測研究を推進した。様々なタイプの超新星に対して、親星進化や爆発機構について新たな知見が得られるとともに、新しい観測手法や理論解析手法の提案を行った。超新星の宇宙論研究へのさらなる応用手法を開拓するとともに、ダスト形成など銀河進化へのフィードバック効果の基礎を構築した。

研究成果の概要(英文)：We have studied supernovae (SNe) both in theory and observations, in terms of the multi-wavelength astronomy from radio, optical through gamma-rays. The aim is to understand the stellar evolution toward SNe and their explosion mechanisms, and we have obtained new information and insight through this project, on these important unsolved questions in astrophysics. We have also proposed new ideas on observations and theory to solve the issues aiming at upcoming future observational projects. Also studied are the properties of SNe as standard candles for the cosmological study, and feedback processes of SNe to the Galactic and cosmological evolution as highlighted by dust formation in SNe.

研究分野：理論・観測天文学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：光学赤外線天文学 理論天文学 輻射輸送 超新星 宇宙論

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 超新星爆発は宇宙における重要なエネルギー・元素の供給源として、宇宙や銀河の進化に影響を与えてきた。しかしながら、超新星に至る星の進化、爆発機構について多くの未解明問題が存在する。

①チャンドラセカール質量に近づいた白色矮星の核暴走爆発と考えられている Ia 型超新星に関しては、どのような進化を経てチャンドラセカール質量近くまで質量を獲得するか、どのように核暴走が始まるか、などが大きな未解決問題である。

②大質量星についても、終末期の進化に多くの不定性がある。特に質量放出過程は大きな未解決問題であり、そのためどのような進化をたどった星がどのようなタイプの超新星になるかの関係など、理論・観測的に説明できていない。たとえば、進化過程において水素外層がはがれた程度により、II 型 (水素外層を残した星の爆発)、IIb 型 (水素外層を少量残す)、Ib/c 型 (水素外層がすべてなくなった星の爆発) に分けられると考えられているが、それが単独星進化理論により説明できるのか、連星進化による質量交換が重要であるのかなどが未解明である。

(2) Ia 型超新星は標準光源として用いられ、宇宙論においても重要な研究対象である。Ia 型超新星の理解を通し、その標準光源としての精度を現在より高めることができるかは、次世代の高精度宇宙論研究のカギとなる。

(3) 天文学におけるサーベイ研究は新たな時代を迎え、今後は超新星についても大規模な観測データが利用可能になると考えられる。可視や近赤外域での理論モデルを構築し、また大規模データを利用し理論に制限をつける手法を確立していくことが必要である。

(4) 天体現象を包括的に理解する上では、可視・近赤外域での情報だけでなく、様々な波長の情報を用いていく必要がある。一方、系外超新星の研究においては、まだその理論的枠組みが十分とは言えず、また国内においてその観測研究はほぼ皆無の状況である。

## 2. 研究の目的

上記背景に対応し、超新星の起源と爆発機構について、理論・観測双方から迫ることを目的とする。この際、可視・近赤外における大規模データの活用を念頭に理論的解釈の基礎を構築するとともに、電波・X線といった多波長における超新星放射の理論モデルを構築することで、超新星の包括的理解を目指す。以上により得られた知見をもとに、超新星の宇宙論的研究への応用手法の開拓、周辺環境へのフィードバックを明らかにしていく。

## 3. 研究の方法

### (1) 多次元輻射理論計算の基礎の構築：

可視・近赤外域の熱放射については、これまで単純化していた物理過程を取り入れ、約 100 万の束縛電子遷移をとりいれながら多次元空間上で輻射輸送を計算するコードを開発する。また、電波、X線、ガンマ線における熱的・非熱的放射の理論モデルを構築し、これまであまり考慮されてこなかった逆コンプトン過程などの物理過程の重要性を検討するとともに、これらの波長域での新たな観測提案につながるアイデアを模索する。これらの理論研究をもとに、種々の望遠鏡に観測提案を提出する。

### (2) 爆発理論への輻射計算の適用：

具体的な親星進化・爆発モデルをもとに、詳細な輻射計算を行う。これを既存の観測データと比較するとともに、理論モデルを区別する新たな手法を提案する。これらの理論計算は、可視・近赤外だけでなく、電波～ガンマ線にわたる広い波長域を対象とする。

### (3) 個々の超新星観測と理論研究：

非常に近傍の超新星などについて、共同研究を通し詳細な追観測を推進する。同時に、その質の高いデータとの比較に耐え得る詳細な理論モデルを構築し、観測データと比較することで親星・爆発機構に迫る。

### (4) 大規模データに適用可能な理論モデルの構築と予備研究：

理論研究をもとに大規模データを用いた場合の研究手法を模索する。同時に、これを既存のデータに当てはめることで、超新星の観測データの統計的理解のための足掛かりとする。これにより、超新星の多様性の起源に迫ることを目的とする。

## 4. 研究成果

### (1) 多次元輻射輸送コードの開発：

以前は単純化していた物理過程を取り入れ、約 100 万の束縛電子遷移をとりいれながら多次元空間上で輻射輸送を計算するコードを開発した。これは、以下に述べる様々な研究に用いられた。

### (2) Ia 型超新星の起源と爆発機構：

①Ia 型超新星の標準親星モデルである白色矮星一恒星の連星系において、超新星放出物質が伴星と衝突する効果をマックスプランク研究所の研究者と共同で調べた (Liu et al. 2013)。また、同様の系に対して本課題で開発した輻射輸送コードを用いて輻射計算を行い、これが Ia 型超新星の多様性の一因になり得ることを明らかにしたとともに、将来の可視・近赤外域での観測によりこのような

理論モデルを識別するための理論予測を提出した (Maeda et al. 投稿中)。

②Ia 型超新星の観測により、親星や爆発機構への新たな制限を付けた。Ia 型超新星の外層に炭素が含まれることを発見した (Folatelli et al. 2012)。これは、爆発の際に炭素の燃え残りがあることを意味するため、炭素をすべて核反応で消費してしまうような爆発モデルは棄却できる。また、Ia 型超新星 SN 2012ht について、爆発後非常に早い段階からの観測を行うことができた。巨星の伴星が存在した場合は初期に明るくなることが予想されているが、そのような現象は観測されなかったため、巨星伴星をとともう進化モデルに対し大きな制限となった (Yamanaka et al. 2014)。

③超新星爆発理論と超新星残骸研究をつなぐ試みとして、超新星残骸 G344.7-0.1 について X 線観測研究を行った (Yamaguchi et al. 2012)。これは重い星の超新星爆発の残骸と考えられていたが、組成解析からこれが Ia 型超新星残骸であることを示した。重元素の空間分布が偏っており、これは私たちが提案している非対称爆発モデルの予測とよく一致する。また、本結果は、元素分布から重力崩壊型と思われる超新星残骸の中に Ia 型超新星起源のものが混じっている可能性を示唆する。

④さらに、Ia 型超新星について、放射性元素の崩壊に伴う硬 X 線—軟ガンマ線放射の理論予測を提出した (Maeda et al. 2012; Summa et al. 2013)。2015 年打ち上げ予定の Astro-H での観測により、異なる理論モデルを区別できることを示した。この検出に向け、Astro-H の国内グループや INTEGRAL の国際グループと議論を重ねている。

### (3) 特異な Ia 型超新星の起源 :

①VLT 望遠鏡による観測により、特異で暗い Ia 型超新星において酸素の禁制線を発見した (Taubenberger et al. 2013)。これは中心部の燃え残りの酸素の存在を示し、通常の Ia 型超新星では発見されていない。暗いタイプの Ia 型超新星の親星と爆発機構、さらには通常の Ia 型超新星についても重要な示唆を与える結果である。

②Ia 型超新星の親星進化モデルからは、非常に濃い星周物質内で爆発する Ia 型超新星の存在が予測され、それに対応する候補天体が見つかっている。これらの候補天体について、統計的なサンプルに基づく観測研究を行い、これらが超新星としては明るいタイプの超新星に属することを明らかにした (Taddia et al. 2012; Leloudas et al. 投稿中)。

### (4) 超新星の宇宙論への応用 :

①標準光源としての Ia 型超新星の性質について理論・観測的研究を行った。Ia 型超新星の色に着目し、その補正を加えることでより高精度の距離測定手法につながり得ること

を示した (Maeda et al. 2011; Cartier et al. 2011)。

②宇宙遠方 (赤方偏移 1.4) で発生した非常に明るい超新星について、Ia 型超新星が重力レンズ効果により増光された現象であることを突き止めた (Quimby et al. 2013, 2014)。将来観測においてこのような重力レンズ効果を受けた超新星を識別する方法を提案し、そのような観測からハッブル定数を精度よくきめられる可能性を指摘した。

### (5) 重力崩壊型超新星の起源と爆発機構 :

①IIb 型超新星は大質量星が少量の水素外層を残した段階で爆発したと考えられる超新星であり、その進化過程や親星の理解は様々なタイプの超新星、特に II 型、Ib/c 型超新星の起源を統一的に理解するためのカギになると考えられる。IIb 型超新星 SN 2011dh は近傍の M51 銀河で発生し、様々な観測がなされた。特に、爆発前・爆発後のハッブル宇宙望遠鏡の観測から、その親星が従来考えられていなかった黄色巨星と呼ばれる特殊な星であることが突き止められた。この超新星について輻射輸送計算に基づく研究を行い、爆発直後数日の観測結果が黄色巨星の爆発で矛盾なく説明できることを示した (Bersten et al. 2012)。今後、このような非常に初期からの観測により、親星の性質を突き止めることができ、本研究はそのような新たな取り組みの基礎となる理論研究である。

②上記 IIb 型超新星 SN 2011dh で明らかになった黄色巨星に至る進化として、単独星・連星進化の両方が提案されている。チャンドラ望遠鏡による X 線観測データ解析を行い、その親星周囲の星周環境と爆発直前の質量放出率を求めた (Maeda et al. 2014)。これにより、連星進化モデルが正しいことが示唆された。この研究は、X 線観測から星周物質密度・質量放出率を導くための基礎となる理論的考察も含み、今後の超新星の X 線観測の基盤を与えるものである。

③近傍で発生した、重い星を起源とする重力崩壊型超新星の周辺環境について面分光を用いた観測研究を行った (Kuncarayakti et al. 2013ab)。単独星進化モデルに基づく 20 太陽質量を超える星のみが恒星風により水素外層を進化中に吹き飛ばしヘリウムコアがむき出しになった段階で爆発し Ib/c 型として観測されると考えられる。一方、観測結果からはより軽い星も Ib/c 型として爆発していること、つまり連星進化過程が重要であることを明らかにした。一方、単独星進化モデルからは 20 太陽質量より軽い星は水素外層を持ったまま爆発する II 型になると考えられるが、観測結果からはより重い星でも II 型として爆発している例があることが示唆された。

## (6) 超新星の多様性の研究：

①重力崩壊型である Ib/c 型超新星について、多次元輻射計算を推進し、その観測的性質に視線方向依存性、それに基づく多様性が生じることを示した (Rapoport et al. 2012)。これは、今後大規模な超新星サーベイデータと比較する基礎的な理論モデルとなる。

②Ib 型超新星 SN2012au の詳細な追観測研究を行った (Takaki et al. 2013)。これがガンマ線バーストを伴って現れる Ic 型”極”超新星と似た性質を持つことを示した。これは未解明である極超新星の起源の解明に非常に有用な結果であると期待される。ガンマ線バーストに伴う極超新星は観測例が未だに少なく、まだその起源や爆発機構が解明されていない。新たに発見された近傍ガンマ線バーストに付随する超新星の追観測研究を実施した (Bufano et al. 2012; Malandri et al. 2012)。これにより、ガンマ線バーストに付随する超新星の多様性が明らかになりつつある。また、Ib/c 型超新星の光度曲線の観測データの統計的な理論モデルを構築し、Ib 型と Ic 型の爆発時における物質混合の程度に差があることを明らかにした (Cano et al. 2014)。これは、Ib 型と Ic 型超新星の違いが従来考えられていたような親星の違いだけで決まるのではなく、爆発過程の違いを反映している可能性を指摘したものである。

③超新星の中には非常に高密度の星周物質内で爆発したと考えられるものがあり、これは IIn 型と呼ばれる。このような超新星は総じて非常に明るいものを含み、また近年宇宙論的プルーフとして注目される超高輝度超新星もこのタイプに属するのではないかと考えられている。IIn 型超新星の光度曲線についての理論研究を進め、大規模な観測データと比較するための基礎を構築した (Moriya et al. 2013, 2014)。また、その起源が謎の超高輝度超新星の正体を解明するため、非常に濃い星周物質内で爆発した超新星という理論モデルに基づく輻射過程を検討し、これがこれまで提案されている他の理論シナリオと観測的に区別できることを示した (Moriya & Maeda 2012)。

## (7) 多波長超新星天体物理学：

①超新星電波放射の理論研究を推進した。超新星親星・爆発前の質量放出・爆発の性質を突き止める手法を提案し (Maeda 2013a)、また逆コンプトン過程を考慮することで衝撃波における高エネルギー電子の加速機構に迫れる可能性を示した (Maeda 2012)。これらのアイデアをもとに、とくにサブミリ波領域での超新星の放射モデルを構築し (Maeda 2013b)、ALMA 望遠鏡による ToO 観測提案が採択された。

②爆発直前の進化を反映する超新星ごく近傍の星周物質の性質を突き止める目的で、X 線観測を推進した。黄色巨星親星に至る進化を明らかにしたほか (Maeda et al. 2014)、

IIn 型超新星の質量放出率を X 線吸収を用いて測ることにより、可視観測とは全く独立な質量放出率の見積もりを得た (Katsuda et al. 2014)。これらの研究に基づき、スザク望遠鏡やチャンドラ望遠鏡で観測提案が採択された。

## (8) 超新星の周辺環境へのフィードバック：

①超新星におけるダスト形成過程の理論研究を行った (Fallest et al. 2011; Nozawa et al. 2011)。Ia 型超新星におけるダスト形成の理論研究から、ダストが”観測されない”ということから親星進化・爆発機構に制限をつけ得ることを示した。

②同時に、観測的手法を用いた超新星ダスト形成の研究を行った。近傍超新星の AKARI 望遠鏡のデータの解析から、ダスト形成についての観測的制限を付けた (Tanaka et al. 2012)。すばる望遠鏡による観測を行い、超新星においてダストが形成される瞬間をとらえた。これを用い、超新星ダスト形成過程と形成されるダストの性質を、組成やサイズ分布といったこれまでにない詳細まで突き止めた (Maeda et al. 2013)。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 38 件)

① 前田 啓一、勝田 哲、馬場 彩、寺田 幸功、深沢 泰司、Long-Lasting X-Ray Emission from Type IIb Supernova 2011dh and Mass-Loss History of The Yellow Supergiant Progenitor, *The Astrophysical Journal*、査読有、785、2014、95-106

DOI: 10.1088/0004-637X/785/2/95

② 前田 啓一、野沢 貴也、Devendra Sahu、他 (著者 18 名中 1 番目)、Properties of Newly Formed Dust Grains in Luminous Type IIn Supernova 2010jl, *The Astrophysical Journal*、査読有、776、2014、5-20

DOI: 10.1088/0004-637X/776/1/5

③ 前田 啓一、Young Supernovae as Experimental Sites to Study Electron Acceleration Mechanism, *The Astrophysical Journal*、査読有、762、2013、L24-28

DOI: 10.1088/2041-8205/762/2/L24

④ 前田 啓一、Probing Shock Breakout and Progenitors of Stripped-Envelope Supernovae through Their Early Radio Emissions, *The Astrophysical Journal*、査読有、762、2013、14-25

DOI: 10.1088/0004-637X/762/1/14

⑤ 前田 啓一、寺田 幸功、Dan Kasen、他 (著者 12 名中 1 番目)、Prospect of Studying Hard X- and Gamma-Rays from Type Ia Supernovae, *The Astrophysical Journal*、査読有、760、2012、54-62

DOI: 10.1088/0004-637X/760/1/54

⑥ 前田 啓一、Injection and Acceleration of Electrons at A Strong Shock: Radio and X-ray Study of Young Supernova 2011dh、The Astrophysical Journal、査読有、758、2012、81-89  
DOI: 10.1088/0004-637X/758/2/81

〔学会発表〕(計33件)

- ① 前田 啓一、Nebular Line Diagnostics on SN Ia Explosion Mechanism、IAS Type Ia Supernova Workshop、2014/2/10-12、プリンストン高等研究所 (US)
- ② 前田 啓一、Supernovae in Optical and Beyond、Supernovae and Gamma-Ray Bursts in Kyoto、2013/10/28-11/1、京都大学基礎物理学研究所
- ③ 前田 啓一、Young Supernovae and Electron acceleration mechanism: Millimeter Perspectives、Frascati Workshop 2013、2013/5/27-6/1、パレルモ (イタリア)
- ④ 前田 啓一、Expected Hard X-Rays And Gamma-Rays from SNe Ia、Frascati Workshop 2013、2013/5/27-6/1、パレルモ (イタリア)
- ⑤ 前田 啓一、Electron Acceleration in Supernovae、the PANDA symposium on Multi-messenger Astronomy、2013/4/22-26、西安 (中国)
- ⑥ 前田 啓一、A Few Issues in CSM Interaction Signals and on Mass Loss Estimate、Mitchell Institute workshop on supernovae and cosmology、2013/4/9-11、テキサス (US)
- ⑦ 前田 啓一、Supernova Optical Observations and Theory、IAU Symposium 296: Supernova Environmental Impacts、2013/1/7-11、Raichak (インド)
- ⑧ 前田 啓一、Luminous Type II In Supernova 2010jl、Kavli IPMU Focus Week on Supernovae Near and Far、2012/12/12-14、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構
- ⑨ 前田 啓一、Origin of the Diversity of Type Ia Supernovae、Supernovae, Dark Energy and Cosmology、2012/11/20-21、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構
- ⑩ 前田 啓一、Asymmetries and Reddening of Supernovae、Workshop on CSM and Type Ia Supernovae、2012/8/31、ストックホルム大学 (スウェーデン)
- ⑪ 前田 啓一、Asymmetries in Supernovae、IAU Symposium 279: Death of Massive Stars: Supernovae & Gamma-Ray Bursts、2012/3/12-16、日光

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~keiichi.maeda/index\\_j.html](http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~keiichi.maeda/index_j.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田 啓一 (MAEDA, Keiichi)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・  
特任准教授

研究者番号: 00503880