

機関番号：12601

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2008年度～2009年度

課題番号：20840007

研究課題名（和文） 理論と観測の融合による Ia 型超新星の爆発機構の解明  
及び宇宙論研究への応用研究課題名（英文） Theoretical and observational study on supernova explosion mechanism  
and cosmological application.

研究代表者

前田 啓一 (MAEDA KEIICHI)

東京大学・数物連携宇宙研究機構・特任助教

研究者番号：00503880

研究成果の概要（和文）：

Ia 型超新星は白色矮星が核反応暴走により爆発する現象である。本課題では、(1) Ia 型超新星における核反応の理論計算により、宇宙の元素の起源を明らかにし、(2) 核反応暴走の始まり方をとらえる手段を提供した。(3) この理論予想をもとに観測データを解析し、爆発のはじまりかたに強い非対称性があることを明らかにし、(4) その非対称性が Ia 型超新星の多様性の起源であることを証明した。以上は、Ia 型超新星を用いた宇宙論研究にも直接的な影響を持ち、関連分野の未解決問題を同時に解決するブレークスルーとなる成果である。

研究成果の概要（英文）：

Type Ia supernovae (SNe Ia) are thermonuclear explosions of a white dwarf. In this research, (1) I calculated nuclear reactions in SNe Ia and studied a role of type Ia as the origin of some elements in the Universe, and (2) provided an observational method to clarify how the thermonuclear sparks are ignited within a white dwarf. (3) Based on this prediction, I examined available observational data and showed that the ignition generally starts at an offset from the center of a white dwarf. (4) I further proved that this asymmetry is the origin of a mysterious diversity in SNe Ia. These results have various implications for the supernova cosmology. These provide breakthroughs in the related fields since these findings can solve several unresolved issues by a single, unified scenario.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2008年度 | 1,320,000 | 396,000 | 1,716,000 |
| 2009年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 2,520,000 | 756,000 | 3,276,000 |

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：宇宙物理、天文、宇宙論、超新星、輻射輸送、元素合成

## 1. 研究開始当初の背景

白色矮星は電子縮退圧により支えられている星であり、量子力学に基づきそのとりうる最大質量が厳密に決まるというユニークな特徴を持つ。これは、チャンドラセカール質量と呼ばれ、太陽質量の約 1.4 倍である。連星進化中に白色矮星の質量が増大しこのチャンドラセカール質量を超えると、中心部の収縮・密度増加に伴い、爆発的な核反応が起こる。すると白色矮星全体に核反応燃焼波が進行し、星全体を吹き飛ばす。これが、Ia 型超新星の標準理論である。

その爆発前の親星の性質が一樣であることから、Ia 型超新星の性質（光度等の観測量）も一樣になると予想される。実際、Ia 型超新星の観測量の間には自己相似的な相関がみられる。最も顕著なものとして、その光度－時間進化のタイムスケールの間に良い相関がある（光度の大きいものほどゆっくりと進化する）。この関係を用いれば、距離のわからない遠方超新星に対し、その光度の類推をすることで、その距離を類推できる。つまり、Ia 型超新星を宇宙の標準光源として用いることができる。

Ia 型超新星を標準光源として用いた観測的宇宙論研究により、宇宙のエネルギーの 70% 以上が正体不明の暗黒エネルギーであることが分かるなど、大きな成果が得られている。一方で、いくつかの問題点があることも分かっている。

(1) 爆発機構そのものの詳細は未解明。そのように核暴走反応が始まるか、燃焼波の進行・その性質の変化（爆燃波→爆轟波）等はほとんど理解されていない。

(2) Ia 型超新星の観測量は実際には多様性を示す。特に、その分光的性質の多様性は大きな問題である。Ia 型超新星のスペクトル進化には多様性があるが（スペクトルが急激に進化するもの、ゆっくり進化するものが混在する）、その進化の仕方は光度と相関しないことが知られている。これは、Ia 型超新星が一つのパラメータであらわされる自己相似的な現象ではないことを示し、よってその標準光源としての性質に少々の疑問が投げかけられている。

(3) Ia 型超新星を用いた宇宙論研究の次のレベルに進むためには（例えば暗黒エネルギーの正体に迫るには）、光度－タイムスケールの関係よりも高精度の光度見積りの手法を導出する必要がある。

## 2. 研究の目的

本課題では、上記の問題点を解決し、(1) 爆発機構の未解決問題を解決すること、(2) Ia 型超新星の観測的多様性の起源を突き止め、Ia 型超新星の標準光源としての精度の評価をおこなうこと、(3) 以上の結果が超新星宇宙論に与える影響を評価し、より高精度の宇宙論研究への道を開くこと、を目的とする。

## 3. 研究の方法

私は、研究当初において、Ia 型超新星の研究に以下のような問題点があるとして本課題の構想に至った。

(1) 最新の爆発理論と観測とを比較する手法が確立されていない。最新の爆発理論では、核反応燃焼波の進行が球対称からずれることが本質的である。実際、近年の爆発理論研究では、大規模数値計算による多次元爆発モデルが主流となっているが、そのような爆発の特徴がどのような観測によりテストされるかが明らかになっていない。

(2) 既存の観測では不十分であり、新たな観測手法が必要とされる。Ia 型超新星は年間数百個発見されるが、いまだに光度－タイムスケールに替わる光度の見積もり手法が見つかっていない。これは、そもそも現在多く用いられている観測手法の限界であると考えられる。上記(1)により新たな観測手法を提案し、そのような観測を推し進めることが必要である。

私は、これらの問題を解決するため、以下のような方法を提案した。

(1) 最新の多次元爆発モデルに基づく詳細な核反応計算を行う。この結果は、Ia 型超新星モデルから観測量を引き出すためのものになるのに加え、銀河の化学進化（元素の起源）を論じる上でも基礎となるデータを与える。

(2) 上記のモデルをもとに、どのような観測を行えば爆発機構を特定できるかを明らかにする。この目的のために、多次元の輻射輸送計算を行う。

(3) 上記の理論予測をもとに、既存の観測データを集め、爆発機構の特定を行う。同時に、新たな観測提案を行う。様々な観測結果を新たな知見をもとに調べ直し、Ia 型超新星の観測的多様性の起源を探る。

(4) 上記の結果をもとに、宇宙論的研究への影響、より高精度な光度見積もり手法を模索する。

#### 4. 研究成果

(1) Ia型超新星において核暴走反応が白色矮星からの中心からずれて起こるモデルに基づき、大規模な爆発流体計算と核反応計算の二次元計算を行った。近年の理論的考察から、このような非対称爆発の起こる可能性が指摘されているが、それに基づいた爆発および元素合成の理論計算は世界初である。その結果、様々な新たな知見が得られた(発表論文リスト文献2)。

①爆発はまず爆燃波が非対称に進行することで始まる。この際、大量の安定鉄族元素(58Ni、54Fe等)がつくられる。これらの元素は非対称に分布し、その分布は核暴走反応のはじまり方を反映したものとなる。

②その後、爆燃波から爆轟波への転換が起こると、爆轟波は初期の非対称性をなまらすように球対称に進行する。その結果、爆轟波によってつくられる元素である放射性56Niは初期の非対称性に関係なく球対称的に分布する。この56Niは約100日で鉄に崩壊する際に大量のエネルギーを発生し、これがIa型超新星からの光のエネルギー源となる。

③爆轟波がさらに表面付近に進行する際にSi等の元素をつくる。この表面付近での爆轟波進行において、初期の爆燃波の燃えかすの分布が重要であることが分かった。爆燃波の燃えかすが大量にある方向(核暴走反応が初めに起こった位置)へは爆轟波の進行が妨げられるが、一方で逆方向へは爆轟波は自由に進行する。その結果、表面付近の密度およびSiの分布に非対称性ができる。

④安定鉄族元素と放射性56Ni(鉄に崩壊)はそれぞれ爆発の異なる段階でつくられる(上記①、②)。これまでの球対称を仮定した計算ではこの二種類の元素の量の比率が現在の宇宙における存在量の比率をうまく説明できないことが知られていたが、非対称なモデルでは観測値と良く合うことを示した。逆に、この元素比と核暴走の起こり方に強い関係があることを示したことで、元素合成の観点から爆発機構に強い制限を与えることを示した。

(2) 上記の理論計算から得られた知見をもとに、これを単純化したモデルについて多次元の輻射計算を行った。これにより、爆発機構、特に核暴走反応の起こり方をとらえるための新たな観測手法を提案した。具体的には、爆発後半年程度経過した後に後期分光観測を行うことで、爆発の非対称性および核反応

暴走の起こり方を特定できることを示した(文献3)。

①可視域のいくつかの放射が爆発初期の爆燃波の燃えかすからの放射であることを示した(7000 - 7500 オングストロームのニッケル、鉄の放射ライン)。また、近赤外-赤外域でも多くの放射ラインが爆燃波の燃えかすからの放射であることを突き止めた。これは、放射理論の考察(各放射ラインの性質)と観測データからの考察(各放射ラインの時間進化や各超新星における多様性・一様性)に基づき、モデルにはほとんど依存しない結果である。

②同様に、最も強い放射ライン(4500-5500 オングストロームの鉄輝線)が、爆轟波の燃えかすからの放射であることを明らかにした。

③上記の考察から、後期スペクトル中のライン形状を調べることで、爆燃波・爆轟波の燃えかすの分布及び視線方向が決定できることを示した。

④観測データから、爆燃波の燃えかすは非対称に(片側に偏って)分布し、爆轟音波の燃えかすは球対称的に分布することを明らかにした。これは、上記のような、核暴走が中心からずれた場所で発生する理論モデルの結果と一致する。これは、非対称爆発モデルを支持する観測的証拠の世界初の発見である。

⑤これまで、鉄の強いライン(上記②)の振る舞いから、Ia型超新星爆発は非対称ではありえないということが言われていたが、これは上記の考察から間違った認識であったことを示した。

⑥これらの新しい知見に基づき、将来観測機器計画(JWST、SPICA、TMT等)により爆発機構にさらに強い制限を与えられると提唱した。

⑦さらに可視後期分光観測データを増やすことでも様々な新たな知見が得られることを示した。これをもとにした観測提案が、すばる望遠鏡により採択されている。

(3) Ia型超新星の分光的多様性(スペクトルの進化の様子にばらつきがあること)が、上記の非対称爆発における視線方向が異なる効果によるものであることを発見した(文献1)。

①初期の分光データ(分光的多様性を示す)と後期の分光データの比較を行い、分光的多様性と後期スペクトルから測った視線方向に強い相関があることを発見した。

②これは、爆発が非対称であることの更なる証拠であるとともに、未解決であった分光的多様性の起源がその視線方向のばらつき

によるものであることの強い証拠である。

③この関係が、上記(1)の理論モデルの結果から理論的にも矛盾なく理解できることを示した。

④分光的多様性は、宇宙論における超新星の標準光源としての精度に疑問を投げかけるものであった。本研究結果により、この多様性はランダムな視線方向の効果であることが示されたが、これは、光度の見積もりにもランダムな効果として入ってくる。これは、Ia型超新星が標準光源として問題なく適用されえることを評価したことに対応する(より専門的には、この分光的多様性に起因する光度の見積り誤差が、statisticでありsystematicでないことを示した)。

⑤さらに、爆発機構やその視線方向の決定方法を提供し、それに基づきより高精度の光度見積り可能性を指摘した。これは、より高精度の超新星宇宙論への第一歩である。

以上(1-3)をもって、Ia型超新星の爆発機構の特定、Ia型超新星の観測的多様性の起源の解明、その標準光源としての精度の評価に関して、当該分野でブレイクスルーとなる成果が得られた(結果の一部はNatureに第一著者として発表)。これは、より高精度の宇宙論研究の開拓につながるものである。以上、本課題における提案案件は、当初の目的以上に達成されたとと言える。

上記の研究と並行し、超新星の元素の起源としての役割への考察(文献4、5、8)、チャンドラセカール質量を超える白色矮星を起源とするIa型超新星候補の観測とそれに関する考察(文献6、7)等における成果も挙げた。また、Ia型超新星と重い星を起源とする超新星の中間に属する超新星の発見(文献9:Natureに第二著者として発表)も、特筆すべき成果であり、国内外で多数の報道がなされた。他、超新星の観測・理論両面における研究を推進した(文献10-18)。

#### 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18件)

1. Maeda, K., Benetti, S., Stritzinger, M., et al. (著者13人中1番目), “An asymmetric explosion as the origin of spectral evolution diversity in type Ia supernovae”, 2010, **Nature**, 印刷中(査読有)

2. Maeda, K., Roepke, F.K., Fink, M.,

Hillebrandt, W., Travaglio, C., Thielemann, F.-K., “Nucleosynthesis in two-dimensional delayed detonation models of type Ia supernova explosions”, 2010, **The Astrophysical Journal**, 712, 624-638 (査読有)

3. Maeda, K., Taubenberger, S., Sollerman, J., et al. (著者7人中1番目), “Nebular spectra and explosion asymmetry of type Ia supernovae”, 2010, **The Astrophysical Journal**, 708, 1703-1715 (査読有)

4. Maeda, K., Tominaga, N., Umeda, H., Nomoto, K., Suzuki, T., “Supernova nucleosynthesis and stellar population in the early Universe”, 2010, **Mem. S. A. It.**, 印刷中(査読有)

5. Maeda, K., Tominaga, N., “Nucleosynthesis of  $^{56}\text{Ni}$  in wind-driven supernova explosions and constraints on the central engine of gamma-ray bursts”, 2009, **Monthly Notice of the Royal Astronomical Society**, 394, 1317-1324 (査読有)

6. Maeda, K., Iwamoto, K., “Observational characteristics and possible asphericity of over-luminous type Ia supernovae”, 2009, **Monthly Notice of the Royal Astronomical Society**, 394, 239-249 (査読有)

7. Maeda, K., Kawabata, K., Li, W., et al. (著者8人中1番目), “Subaru and Keck observations of the peculiar type Ia supernova 2006gz at late phases”, **The Astrophysical Journal**, 690, 1745-1752 (査読有)

8. Maeda, K., “Asymmetric explosion of type Ia supernovae and their observational signatures”, 2010, **AIP conference series: TOURS symposium on nuclear physics and astrophysics**, 印刷中(査読無)

9. Kawabata, K.S., Maeda, K., Nomoto, K., et al. (著者9人中2番目), “A massive star origin for an unusual helium-rich supernova in an elliptical galaxy”, 2010, **Nature**, 465, 326-328 (査読有)

10. Moriya, T., et al. (著者5人中4番目), “A core-collapse supernova model for the extremely luminous type Ic supernova 2007bi: ...”, **The Astrophysical Journal (Letters)**, 印刷中(査読有)

11. Tanaka, M., et al. (著者 11 人中 4 番目), “Spectropolarimetry of extremely luminous type Ia supernova 2009dc: …”, 2010, **The Astrophysical Journal**, 714, 1209-1216 (査読有)

12. Nozawa, T., et al. (著者 7 人中 4 番目), “Formation and evolution of dust in type IIb supernova with application to the Cassiopeia supernova remnant”, 2010, **The Astrophysical Journal**, 713, 356-373 (査読有)

13. Yamanaka, M., et al. (著者 34 人中 6 番目), “Early phase observations of extremely luminous type Ia supernova 2009dc”, 2009, **The Astrophysical Journal (Letters)**, 707, L118-L122 (査読有)

14. Tanaka, M., Yamanaka, M., Maeda, K., et al. (著者 14 人中 3 番目), “Nebular phase observations of the type Ib supernova 2008D/X-ray transient 080109:…””, 2009, **The Astrophysical Journal**, 700, 1680-1685 (査読有)

15. Taubenberger, S., et al. (著者 14 人中 9 番目), 2009, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 397, 677-694 (査読有)

16. Tanaka, M., Kawabata, K. S., Maeda, K., et al. (著者 9 人中 3 番目), “Spectropolarimetry of the unique type Ib supernova 2005bf: …”, 2009, **The Astrophysical Journal**, 699, 1119-1124 (査読有)

17. Kawabata, K. S., Tanaka, M., Maeda, K., et al. (著者 7 人中 3 番目), “Extremely luminous supernova 2006gy at late phases: …”, **The Astrophysical Journal**, 697, 747-757 (査読有)

18. Tanaka M., Kawabata, K. S., Maeda, K., Hattori, T., Nomoto, K., ” Optical spectropolarimetry and asphericity of type Ic SN 2007gr”, 2008, **The Astrophysical Journal**, 689, 1191-1198 (査読有)

[学会発表] (計 23 件)

1. 前田啓一, 「TMT 時代の超新星観測」、日本天文学会 2010 年春季年会、2010/4/24-27、広島大学 (国内研究会、招待講演)

2. 前田啓一, 「超新星の爆発構造」、日本天文学会 2010 年春季年会、2010/3/24-27、広島大学 (国内、招待講演)

3. 前田啓一, 「可視・赤外後期スペクトルで探る Ia 型超新星の爆発構造」、日本天文学会 2010 年春季年会、2010/3/24-27、広島大学 (国内)

4. 前田啓一, 「Hunting for type Ia supernova explosion mechanism」、Physics of Compact Objects、2010/3/15-17、沖縄リゾート・シーパークホテル (国際研究会、招待講演)

5. 前田啓一, 「Tackling supernova explosion mechanism by Astro-H」、Exploring supernova remnants and pulsar wind nebulae in X-rays、2010/2/18-19、ISAI/JAXA (国際、招待講演)

6. 前田啓一, 「Ia 型超新星の爆発構造: 可視から赤外域における後期観測の重要性」、第理論天文学懇談会、2009/12/20-22、名古屋大学 (国内)

7. 前田啓一, 「Nucleosynthesis in type Ia supernova explosions and observational signatures」、TOURS symposium on nuclear physics and astrophysics、2009/11/16-20、神戸オービスホール (国際)

8. 前田啓一, 「Near-Infrared frontiers of supernova study」、TAO 観測装置ワークショップ、2009/9/11、東京大学 (国内、招待講演)

9. 前田啓一, 「Nebular spectra of type Ib/c and Ia supernovae, and their explosion asymmetry」、A festival of cosmic explosions、2009/8/21-23、カリフォルニア工科大学、USA (国際)

10. 前田啓一, 「Nebular spectra of type Ib/c and Ia supernovae, and their explosion asymmetry」、Stellar death and supernovae、2009/8/17-21、カリフォルニア大学サンタバーバラ校、USA (国際)

11. 前田啓一, 「Asymmetry in supernova explosions」、IPMU Dark energy conference、2009/6/22-26、東京大学 (国際)

12. 前田啓一, 「Hypernovae and their progenitors」、JEM-EUSO international collaboration workshop、2009/6/22-23、

Seoul Ewha University、韓国（国際、招待講演）

13. 前田啓一、「Supernovae nucleosynthesis in the early and present Universe」、FRASCATI workshop 2009, 2009/5/25-30、Eolian Hotel, イタリア（国際、招待講演）

14. 前田啓一、「多次元爆燃—爆轟 Ia 型超新星爆発における元素合成」、日本天文学会 2009 年春季年会、2009/3/24-27、大阪府立大学（国内）

15. 前田啓一、「Observational Constraints on supernova nucleosynthesis」、爆発的要素合成での水素燃焼と  $\nu p$  プロセス、 $r$  プロセスとの競合、2009/2/19-20、理化学研究所（国内）

16. 前田啓一、「星の進化と超新星元素合成：現状と課題」、理論天文学懇談会、2009/2/15-17、国立天文台（国内、招待講演）

17. 前田啓一、「超新星の多様性と GRB へのリンク」、GRB 研究会 2008、2008/11/28-29、国立天文台（国内、招待講演）

18. 前田啓一、「Asymmetry and other hints for the supernova explosion mechanism」、Messengers of supernova explosions、2008/11/17-21、東京大学（国際）

19. 前田啓一、「Observational signatures of supernova explosion asymmetry」、7th RESCEU symposium on astroparticle physics and cosmology、2008/11/11-14、東京大学（国際）

20. 前田啓一、「後期分光観測で視る重力崩壊型超新星の形状」、日本天文学会 2008 年秋季年会、2008/9/11-13、岡山理科大学（国内）

21. 前田啓一、「明るい Ia 型超新星はスーパーチャンドラセカール質量の白色矮星の爆発か？」、日本天文学会 2008 年秋季年会、2008/9/11-13、岡山理科大学（国内）

22. 前田啓一、「超新星観測との比較のための商社シミュレーション」、先駆的科学計算に関するフォーラム 2008、2008/7/21-22、九州大学（国内、招待講演）

23. 前田啓一、「Observational aspects of supernovae and evidences for asphericity」、

Workshop for novae and supernovae、2008/5/15、東京大学（国際、招待講演）

[その他]

<http://member.ipmu.jp/keiichi.maeda/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

前田 啓一 (MAEDA KEIICHI)  
東京大学・数物連携宇宙研究機構  
・特任助教

研究者番号：00503880