

機関番号：34506

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21840055

研究課題名（和文） 超新星爆発・ガンマ線バーストの爆発機構および初期宇宙・遠方宇宙の研究

研究課題名（英文） Research of explosion mechanism of supernovae and gamma-ray bursts and evolution of the universe

研究代表者

富永 望 (TOMINAGA NOZOMU)

甲南大学・理工学部・講師

研究者番号：00550279

研究成果の概要（和文）：

ガンマ線バースト・(極)超新星の発生機構の本質、またそれらを用いて第一世代星や宇宙の化学進化を理解することを目的として研究を行った。初めて報告された shock breakout の観測に対して、世界で初めて理論モデルを提出し、さらにそれを用いた遠方宇宙探査計画を提案した。同時に、相対論的ジェットと非相対論的ジェットの 2 成分を持つ超新星爆発における元素合成計算を行い、これまで難しかった金属欠乏星のチタンの組成の再現を可能にする超新星モデルを提出した。

研究成果の概要（英文）：

I studied the nature of gamma-ray bursts and supernovae, the first stars, and the chemical evolution of the universe. I constructed a theoretical model reproducing the first observations of shock breakout and proposed a distant supernova survey with shock breakout with the optical telescope. Furthermore, I calculated nucleosynthesis in gamma-ray burst-supernovae with 2 components of energy injection, i.e., relativistic jets and non-relativistic jets, and presented a theoretical model reproducing abundance ratio of titanium to iron in the extremely metal-poor stars which was difficult to be explained with the previous models.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,090,000	327,000	1,417,000
2010 年度	990,000	297,000	1,287,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,080,000	624,000	2,704,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：超新星爆発、ガンマ線バースト、元素合成、第一世代星、非球対称爆発、可視光・赤外線観測

## 1. 研究開始当初の背景

超新星爆発は、銀河に匹敵する明るさを持ち  $10^{51}$  エルグ以上の莫大なエネルギーを放出する宇宙最大規模の爆発現象である。その起源は太陽の 8 倍以上の質量を持つ大質量星で、一生の最期に重力崩壊を起こした結果で

ある。超新星爆発は明るく(現在、赤方偏移 0.5 程度まで観測されている)、さらにその一部はガンマ線バースト(ガンマ線で非常に明るく赤方偏移 8.2 という遠方でも観測可能)を伴うため(Galama et al. 1998, Nature, 395, 670)、遠方宇宙のプロープとなることが

期待されている。また、超新星爆発は宇宙における重元素(炭素、酸素、鉄といった重い元素)の主要な供給源であり、特に宇宙初期では他に重元素の供給源が存在せず、その化学進化に重要な役割を果たした。このように超新星爆発は遠方宇宙の観測研究・宇宙の進化に対して重要な現象であるが、30年以上にわたる理論研究にも関わらず、その爆発機構は未だ解明されていない(Janka et al. 2007, Phys. Rep., 442, 38)。一方で、超新星爆発・ガンマ線バースト、初期世代星の観測は年々増加している。本研究では特に以下の超新星爆発に関係した天体現象に注目する。

#### (1) 超新星爆発・ガンマ線バースト

ガンマ線バーストは通常の超新星爆発の10倍以上のエネルギーをもつ極超新星爆発を伴って起こる現象である。私はガンマ線バーストのスペクトルと超新星爆発の親星の質量・爆発エネルギーに関係があると指摘しているが、私の研究以外には相対論的ジェットを伴うガンマ線バーストと非相対論的な超新星爆発を同時に扱う研究はほとんど行われておらず、両者の関係を明らかにする統一的なモデルは提出されていない。

#### (2) 初期世代星、初代天体

宇宙初期に形成され現在まで生き残っている星は、初期世代星と呼ばれ、宇宙の進化を記録している。その観測数はまだ少ないが、SDSS/SEGUE などの大規模初期世代星探査が世界中で行われ、また計画されている(Yanny et al. 2009, AJ, 137, 4377)。それらの探査によってもたらされる初期世代星の数は10万を超え、膨大な数のサンプルをどう活用して初代天体・宇宙進化に制限を与えるのか、ということが喫緊の課題である。また、近年、宇宙論的構造形成シミュレーションを用いた初代天体形成の研究が活発となっており(Yoshida et al. 2006, ApJ, 652, 6)、初代天体が宇宙進化に及ぼした影響を明らかにすることが現実的かつ重要な課題となっている。

#### (3) 超新星爆発の Shock breakout

星内部で形成された衝撃波が星表面に到達すると、衝撃波に蓄えられた熱エネルギーが放射として解放される。この現象は Shock breakout と呼ばれ、全ての超新星爆発に伴うと考えられている。Shock breakout は、ガンマ線バーストを除いて超新星からの光で最も明るく遠方の超新星爆発の観測手段になると考えられていたが(Chugai et al. 2000, Mem. Soc. Astron. Italiana, 71, 383)、継続時間が1日程度と短く観測が困難であった。2008年に初めて Shock breakout の増光から減光までの観測が報告され(Schawinski 2008, Science, 321, 223)、観測を再現する理論モデルの提出、観測から超新星の性質を明らかにする手法の確立が求められている。一

方、私は多波長放射流体計算と現実的な星のモデルを用いて、Shock breakout の多波長光度曲線を求めた。その結果、Shock breakout が赤方偏移2という遠方でも観測可能であることを初めて示した。

## 2. 研究の目的

超新星爆発・ガンマ線バーストの流体・元素合成・放射輸送計算を用いて、現在独立に研究が行われている超新星爆発・ガンマ線バーストの多波長観測、初期世代星の観測、超新星爆発の爆発機構の理論研究を結びつけ、新たな視点を超新星爆発・ガンマ線バーストの観測・理論研究へ与えることを目的とする。特に、同一の超新星モデルから超新星爆発、ガンマ線バースト、初期世代星に対する理論予測を与え、観測と比較し観測事実に基づき超新星爆発の爆発機構に制限を与える。さらに、超新星爆発最初期の明るい現象である Shock breakout について、理論モデルに基づいた現実的な観測提案を行い、初期宇宙・遠方宇宙に対する新たな観測研究を開拓する。

## 3. 研究の方法

### (1) 宇宙初期の化学・力学進化の解明

SDSS/SEGUE などの初期世代星探査やすばる望遠鏡などを用いた観測によって、今後も初期世代星の観測数が増加することが期待される。それに備えて、多次元流体・元素合成計算を用いて様々な質量、爆発エネルギー、非球対称性を持った超新星爆発における元素合成を計算し、初期世代星の元素組成と比較し、超新星爆発の性質を求め、宇宙初期の進化に示唆を与える。

### (2) Shock breakout を用いた遠方超新星爆発の観測

Shock breakout の理論モデルと2008年に報告された観測の比較から、超新星爆発の親星の質量・半径、爆発エネルギーなどを明らかにし、Shock breakout の観測から超新星爆発の性質を導く方法を確立する。同時に、筆頭提案者として提案した Shock breakout の観測を用いて、これまで観測することができなかった遠方の超新星爆発の爆発エネルギーや発生頻度、遠方宇宙での大質量星形成率や星質量分布の時間進化などを導き、その手法を発展させる。平成23年度にはすばる望遠鏡に次世代観測装置 Hyper Suprime-Cam が搭載され視野が現装置の約10倍となるため、多数の Shock breakout の検出が期待される。それらと比較可能な Shock breakout の多波長光度曲線のデータベースを構築する。

## 4. 研究成果

本研究課題では、ガンマ線バースト・(極)超新星の発生機構の本質、またそれらを用いて第一世代星や宇宙の化学進化を理解する

ことを目的として研究活動を行っている。

(1) Shock breakout の理論モデルの構築

2008年に初めて観測例が報告された超新星爆発の shock breakout について、多波長輻射流体計算を用いて、紫外線から可視光までの観測を再現できる超新星爆発のモデルを構築した。その結果、観測された超新星爆発は主系列時に  $20M_{\odot}$  の質量をもつ星が  $1.2 \times 10^{51}$  エルグで爆発した現象であったことを明らかにした。またそのモデルを用いて、同じ超新星爆発が約 75 億光年離れた遠方宇宙で起こったとしても観測可能であることを指摘した。

(2) 超新星爆発 2005bf の非球対称構造

特異な光度曲線を示した超新星爆発 2005bf からの光の偏光を観測することによって、超新星爆発の非球対称構造に制限を与えた。

(3) 超新星爆発におけるニッケル 56 の合成量

超新星爆発で合成されるニッケル 56 の量についてはさまざまな数値計算が行われている。本研究では解析的手法を用いることによって、それら全ての数値計算の結果を統一的に理解することに成功した。またそれにより、ガンマ線バースト 980425 に付随していた明るくエネルギーの大きい極超新星 1998bw についてそのニッケル 56 の起源は衝撃波過熱による爆発的要素合成であったことを突き止めた。

(4) 超新星残骸 Cygnus Loop の X 線観測とその解釈

Cygnus Loop は爆発から一万年程度経過した超新星残骸である。そのため、空間的に大きく広がっており、超新星における元素組成の空間分布を得ることができる。今回、670k 秒の観測によって初めて Ar の検出に成功し、それを用いて超新星親星に対する強い制限を与えた。

(5) 非常に暗かった超新星爆発 2008ha の光度曲線

超新星爆発 2008ha はこれまでに観測された超新星の中で、最も暗い。そのような超新星に対して、流体計算、元素合成計算、輻射輸送計算を行うことにより、超新星爆発 2008ha が通常の超新星爆発の 1000 分の一程度のエネルギーを持つ非常に弱い爆発であったことを明らかにした。

(6) 非常に明るかった超新星爆発 2007bi の光度曲線

超新星爆発 2007bi はこれまでに観測された超新星の中でもっとも明るい超新星の一つである。そのため、電子対生成型超新星爆発ではないかと提案された。しかし、今回、超新星爆発の輻射輸送計算を行うことによって、重力崩壊型超新星でも説明可能であることを示した。

(7) 2 成分ジェットを伴う重力崩壊型超新星

における元素合成

超新星爆発のうち一部は、ガンマ線バーストと同起源であり、相対論的ジェットと非相対論的爆発の二つの成分をもつと提案されている。そこで、2 成分のエネルギー注入をもつ超新星爆発における元素合成を調べた。(8) II 型超新星の Shock breakout の多色光度曲線の理論予言の提出

我々は、多色輻射流体計算コード STELLA を用いて、厚い水素層を持つ赤色超巨星の起こす II 型超新星爆発の光度曲線を計算した。星の進化に基づいた親星モデルを用いて理論予言を提出したのは初めてであり、その明るさが非常に明るく、赤方偏移 1 を超える遠方でも観測可能であることを示した。また、様々な質量の星について光度曲線を提出し、星の質量が大きいほど星の半径が大きく、shock breakout が赤くなるため観測しやすいことを示した。

(9) Shock breakout を用いた遠方宇宙探査の提案

上記研究に基づき、星の初期質量関数や母銀河や銀河間空間による減光を加味し、現存の観測装置、観測プロジェクト、および将来計画されている観測装置、観測プロジェクトで、実際にどれだけの数の Shock breakout が検出可能であるかを見積もった。その結果、日本のすばる望遠鏡を用いた観測が最も効率的であることが明らかとなった。そのため、すばる望遠鏡を用いた具体的な観測計画を提案し、すばる望遠鏡の次世代装置である Hyper Suprime-Cam を用いた大規模観測計画の一員として検討を進めた。

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 30 件)

査読あり

1. Moriya, T. J. and Tominaga, N. "Diversity of Luminous Supernovae from Non-steady Mass Loss", ApJ, 747, (2012) 118.
2. Moriya, T., Tominaga, N., Blinnikov, S. I., Baklanov, P. V., and Sorokina, E. I. "Supernovae from red supergiants with extensive mass loss", MNRAS, 415, (2011) 199-213.
3. Kobayashi, C., Tominaga, N., and Nomoto, K. "Chemical Enrichment in the Carbon-enhanced Damped Ly $\alpha$  System by Population III Supernovae", ApJ, 730, (2011) L14.
4. Tominaga, N., Morokuma, T., Blinnikov,

- S. I., Baklanov, P., Sorokina, E. I., and Nomoto, K.  
"Shock Breakout in Type II Plateau Supernovae: Prospects for High-Redshift Supernova Surveys",  
ApJS, 193, (2011) 20.
5. Uchida, H., Tsunemi, H., Tominaga, N., Katsuda, S., Kimura, M., Kosugi, H., Takahashi, H., and Takakura, S.  
"First Detection of Ar-K Line Emission from the Cygnus Loop",  
PASJ, 63, (2011) 199-208.
  6. Moriya, T., Tominaga, N., Tanaka, M., Nomoto, K., Sauer, D. N., Mazzali, P. A., Maeda, K., and Suzuki, T.  
"Fallback Supernovae: A Possible Origin of Peculiar Supernovae with Extremely Low Explosion Energies",  
ApJ, 719, (2010) 1445-1453.
  7. Ohsawa, R., Sakon, I., Onaka, T., Tanaka, M., Moriya, T., Nozawa, T., Maeda, K., Nomoto, K., Tominaga, N., Usui, F., Matsuhara, H., Nakagawa, T., and Murakami, H.  
"Observations of the Optical Transient in NGC 300 with AKARI/IRC: Possibilities of Asymmetric Dust Formation",  
ApJ, 718, (2010) 1456-1459.
  8. Moriya, T., Tominaga, N., Tanaka, M., Maeda, K., and Nomoto, K.  
"A Core-collapse Supernova Model for the Extremely Luminous Type Ic Supernova 2007bi: An Alternative to the Pair-instability Supernova Model",  
ApJ, 717, (2010) L83-L86.
  9. Nozawa, T., Kozasa, T., Tominaga, N., Maeda, K., Umeda, H., Nomoto, K., and Krause, O.  
"Formation and Evolution of Dust in Type IIb Supernovae with Application to the Cassiopeia A Supernova Remnant",  
ApJ, 713, (2010) 356-373.
  10. Nomoto, K., Tanaka, M., Tominaga, N., and Maeda, K.  
"Hypernovae, gamma-ray bursts, and first stars",  
NewAR, 54, (2010) 191-200.
  11. Tominaga, N., Blinnikov, S., Baklanov, P., Morokuma, T., Nomoto, K., and Suzuki, T.  
"Properties of Type II Plateau Supernova SNLS-04D2dc: Multicolor Light Curves of Shock Breakout and Plateau",  
ApJ, 705, (2009) L10-L14.
  12. Tanaka, M., Yamanaka, M., Maeda, K., Kawabata, K. S., Hattori, T., Minezaki, T., Valenti, S., Della Valle, M., Sahu, D. K., Anupama, G. C., Tominaga, N., Nomoto, K., Mazzali, P. A., and Pian, E.  
"Nebular Phase Observations of the Type Ib Supernova 2008D/X-ray Transient 080109: Side-viewed Bipolar Explosion",  
ApJ, 700, (2009) 1680-1685.
  13. Tanaka, M., Kawabata, K. S., Maeda, K., Iye, M., Hattori, T., Pian, E., Nomoto, K., Mazzali, P. A., and Tominaga, N.  
"Spectropolarimetry of the Unique Type Ib Supernova 2005bf: Larger Asymmetry Revealed by Later-Phase Data",  
ApJ, 699, (2009) 1119-1124.
  14. Kawabata, K. S., Tanaka, M., Maeda, K., Hattori, T., Nomoto, K., Tominaga, N., and Yamanaka, M.  
"Extremely Luminous Supernova 2006gy at Late Phase: Detection of Optical Emission from Supernova",  
ApJ, 697, (2009) 747-757.
  15. Maeda, K. and Tominaga, N.  
"Nucleosynthesis of  $^{56}\text{Ni}$  in wind-driven supernova explosions and constraints on the central engine of gamma-ray bursts",  
MNRAS, 394, (2009) 1317-1324.
- 査読なし
16. Shibata, S. and Tominaga, N.  
"Origin of Ultra-High Energy Cosmic Rays: Nuclear Composition of Gamma-ray Burst Jets",  
AIPC, 1367, (2011) 241-244.
  17. Tominaga, N.  
"Supernova Properties in the Early Universe and Extremely Metal-Poor Stars",  
AIPC, 1294, (2010) 293-294.
  18. Moriya, T., Yoshida, N., Tominaga, N., Blinnikov, S. I., Maeda, K., Tanaka, M., and Nomoto, K.  
"Interaction-Powered Supernovae as Probes of the High-Redshift Universe",  
AIPC, 1294, (2010) 268-269.
  19. Nomoto, K., Moriya, T., Tominaga, N., and Suzuki, T.  
"Explosive Nucleosynthesis in Luminous Hypernovae and Faint Supernovae",

- AIPC, 1294, (2010) 76-83.
20. Tominaga, N.  
"Nucleosynthesis in Jet-induced Supernovae: Connection between Gamma-Ray Bursts and Extremely Metal-Poor Stars",  
AIPC, 1279, (2010) 254-257.
  21. Moriya, T., Tominaga, N., Tanaka, M., Nomoto, K., Sauer, D. N., Mazzali, P. A., Maeda, K., and Suzuki, T.  
"Faint Core-Collapse Supernovae with fallback",  
AIPC, 1279, (2010) 224-226.
  22. Nomoto, K., Moriya, T., Tominaga, N., and Suzuki, T.  
"Unusual Supernovae and Their Connections to First Stars and Gamma-Ray Bursts",  
AIPC, 1279, (2010) 60-68.
  23. Nomoto, K., Moriya, T., and Tominaga, N.  
"Explosive Nucleosynthesis in Supernovae and Hypernovae",  
AIPC, 1238, (2010) 9-17.
  24. Ito, H., Aoki, W., Honda, S., Beers, T. C., and Tominaga, N.  
"A very low upper limit for a Be abundance of a carbon-enhanced metal-poor star",  
IAUS, 268, (2010) 337-338.
  25. Ito, H., Aoki, W., Honda, S., Beers, T. C., and Tominaga, N.  
"The 9th Magnitude CEMP star BD+44°493: Origin of its Carbon Excess and Beryllium Abundance",  
IAUS, 265, (2010) 124-125.
  26. Nomoto, K., Moriya, T., and Tominaga, N.  
"Nucleosynthesis of the Elements in Faint Supernovae and Hypernovae",  
IAUS, 265, (2010) 34-41.
  27. Tominaga, N.  
"Nucleosynthesis in jet-induced supernovae",  
Proceedings of the 11th Symposium on Nuclei in the Cosmos, (2010) 163.
  28. Nomoto, K., Moriya, T., Tanaka, M., Maeda, K., Tominaga, N., and Suzuki, T.  
"Hypernova and Gamma-Ray Bursts",  
Proceedings of the 11th Symposium on Nuclei in the Cosmos, (2010) 30.
  29. Maeda, K., Tominaga, N., Umeda, H., Nomoto, K., and Suzuki, T.  
"Supernova nucleosynthesis and stellar population in the early Universe",  
MmSAI, 81, (2010) 151.
  30. Tanaka, M., Maeda, K., Nomoto, K., Mazzali, P. A., Tominaga, N., Kawabata, K. S., and Hattori, T.  
"Optical Emission from Aspherical Core-Collapse Supernovae",  
AIPC, 1111, (2009) 413-420.
- [学会発表] (計 11 件)
1. 富永望、「Shock Breakout of Type II Plateau Supernova」、Death of Massive Stars: Supernovae and Gamma-Ray Bursts (栃木)、2012年3月12日
  2. 富永望、「High-redshift Type II supernova survey with shock breakout」、New Horizons in Time Domain Astronomy (オックスフォード、イギリス)、2011年9月19日
  3. 富永望、「2成分ジェットを伴う重力崩壊型超新星における元素合成」、日本天文学会 2010 年秋季年会 (金沢)、2010 年 9 月 22 日
  4. 富永望、「Nucleosynthesis in jet-induced supernovae」、11th Symposium on Nuclei in the Cosmos (ハイデルベルグ、ドイツ)、2010年7月19日
  5. 富永望、「Nucleosynthesis in Jet-induced Supernovae: Connection between Gamma-Ray Bursts and Extremely Metal-Poor Stars」、DECIPHERING THE ANCIENT UNIVERSE WITH GAMMA-RAY BURSTS (京都)、2010年4月23日
  6. 富永望、「電子捕獲型超新星爆発とくに星雲を作った超新星 1054」、日本天文学会 2010 年春季年会 (広島)、2010 年 3 月 24 日
  7. 富永望、「Supernova Properties in the Early Universe and Extremely Metal-Poor Stars」、THE FIRST STARS AND GALAXIES: CHALLENGES FOR THE NEXT DECADE (テキサス、アメリカ)、2010 年 3 月 8 日
  8. 富永望、「Shock Breakout を用いた  $z > 0.5$  の重力崩壊型超新星の直接観測」、日本天文学会 2009 年秋季年会 (山口)、2009 年 9 月 16 日
  9. 富永望、「Implications from Type II Supernova Shock Breakout」、A Festival of Cosmic Explosions (ロサンゼルス、アメリカ)、2009 年 8 月 21 日
  10. 富永望、「Multicolor Light Curves of Type II Supernova Shock Breakout」、Stellar Death and Supernovae (サンタバーバラ、アメリカ)、2009 年 8 月 17 日

11. 富永望、「超新星爆発とその観測」、天文  
天体物理若手の会夏の学校（群馬）、  
2009年7月29日

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://tpweb2.phys.konan-u.ac.jp/~tominaga/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富永 望 (TOMINAGA NOZOMU)

甲南大学・理工学部・講師

研究者番号：00550279

(2) 研究分担者

なし

研究者番号：

(3) 連携研究者

なし

研究者番号：