

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20540226

研究課題名（和文） 宇宙の第一世代星の初期質量関数を金属欠乏星の特異な元素組成から探る

研究課題名（英文） Providing the initial mass function of the first-generation stars of the universe with a peculiar chemical abundance pattern of metal-poor stars

研究代表者

野本 憲一 (NOMOTO KEN' ICHI)

東京大学・数物連携宇宙研究機構・特任教授

研究者番号：90110676

研究成果の概要（和文）：宇宙で最初に誕生した第一世代の星、すなわち、重元素を含まない種族 III の星の典型的質量（初期質量関数）を明らかにすることは、第一世代の銀河の形成、初期宇宙の進化を明らかにする上で、極めて重要である。本研究では、古い星や QSO 吸収線系の化学組成と、この研究において計算した大質量星の超新星爆発モデルの予測する化学組成との比較から、上記の典型的質量が太陽質量の 20-50 倍程度であることを推定することに成功した。

研究成果の概要（英文）：It is critically important to determine the typical mass (i.e., Initial Mass Function) of the First Stars in the Universe, which contain no heavy elements called Population III stars, because those stars affect the formation of First galaxies and evolution of early Universe. In the present study, we simulated the supernova explosion of massive stars to predict the abundance patterns of ejecta. By comparing the model prediction and the observed patterns, we estimated that the typical masses of First Stars are 20-50 $M_{\odot}$ .

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：超新星、宇宙化学進化、元素合成、宇宙初代星、大質量星

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙で最初に誕生した第一世代の星、すなわち、重元素を含まない種族 III の星は、比較的大きな質量を持つことが予想され、その進化や超新星爆発は周囲のガスに熱的、力学的、化学的に大きな影響を与え、銀河の形成に大きく関わると想定されていた (supernova feedback)。しかし、第一世代の

星がどのように形成され、どのような質量関数を持っていたかは、観測的にも理論的にも論争が続いていて、現在の天文学が解くべき重要問題の一つと考えられていた。

(2) 当時、観測の進展により、宇宙初期の天体の化学組成が太陽組成から大きく離れた特異なパターンを示すことが分かってきた。例えば、ハローの極端な金属欠乏星では、Fe

に対して Mn, Cr が太陽組成比より少なく、逆に Zn, Co が 1 ケタ近く多い。さらに、Fe に対して極端に C の多い星の存在の割合も非常に高い。また、高赤方偏移の QSO 吸収線系の元素組成の中にも、特異なものが発見された。これらの特異な組成は、第一世代の星の超新星爆発の元素合成の結果と考えられ、第一世代の星の質量関数を推定する上で、重要な手がかりであると考えられ始めていた。

## 2. 研究の目的

(1) 宇宙の第一世代の星の質量関数あるいは典型的な質量を、銀河のハロー星や高赤方偏移の QSO 吸収線系などの宇宙の進化の初期に形成された天体の化学組成を説明する試みによって、精度よく推定することを目的とした。

(2) より具体的には、第一世代の星形成の数値計算、大質量星や極超新星の爆発と元素合成、それらの星の再電離源としてのパワー、巨大・中質量ブラックホール形成といった理論モデルと、第一世代に近い天体の元素組成などの観測事実を、統一的に説明する第一世代の星の理論モデルの構築を目指し、第一世代の星の典型的質量を精度良く推定する。

## 3. 研究の方法

(1) 第一世代の星が、大量のガスを降着しながら、どのように大質量星に進化していくかを計算する。

(2) 多数の極超新星・超新星の元素合成モデルのコンピュータ・シミュレーションを行い、化学組成を予測する。銀河のハローで観測されている極端な金属欠乏星の元素組成や、高赤方偏移の QSO 吸収線系の元素組成と、それぞれ比較検討する。観測される特異な元素組成を説明しうるような星の質量、爆発エネルギー、非球対称の程度などを推定する。

## 4. 研究成果

(1) 第一世代の星が質量降着によって約 1 太陽質量 ( $M_{\odot}$ ) から質量を増やしながら進化していく過程を、重力崩壊の段階まで計算した。星からの feedback 次第で、100-1000 $M_{\odot}$  という大質量星が形成され得ることを示した (図 1)。第一世代の大質量星では、シリコンや酸素のコアの振動が激しくなることを発見し (図 1)、この振動が極端に明るい超新星の性質を説明できるかどうか、質量関数は 100 $M_{\odot}$  にまで延びていると結論できるかどうかのカギとなることを見出した。

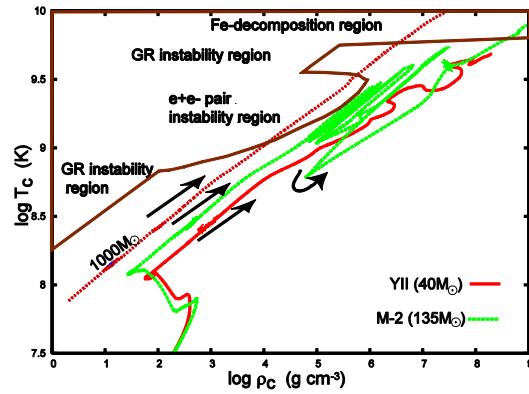


図 1: 質量降着を伴って進化していく第一世代の星の中心密度と温度の進化。

(2) Ibc 型超新星の光度曲線とスペクトルのモデルと観測から、質量、爆発エネルギーを推定する研究により、25-50 $M_{\odot}$  の星の超新星は、図 2 と 3 に示すように、2つの場合に分かれることを示した。すなわち、極超新星とよばれるエネルギーが通常の超新星の数 10 倍にもなる巨大爆発を起こし大量の Fe を放出する場合と、暗い超新星とよばれる fallback を起こして鉄の放出量が極端に少ない爆発である。

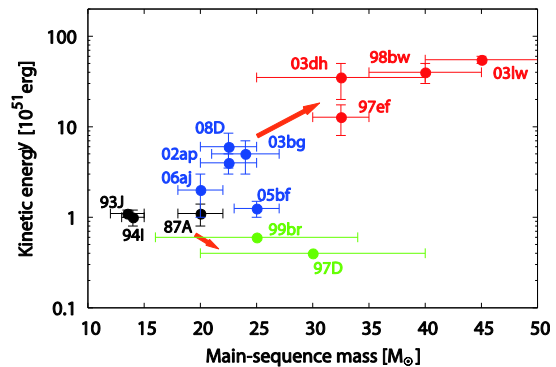


図 2: 超新星の親星の質量と爆発エネルギーの関係

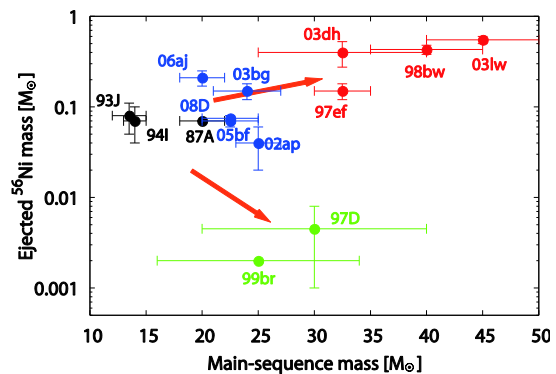


図 3: 超新星の親星の質量と放出する  $^{56}\text{Ni}$  の質量との関係

(3) Extremely Metal-Poor (EMP) Stars とよばれる古い星の化学組成は、Ti/Fe, Co/Fe, Zn/Fe の比が大きいことが特徴的である。この特徴は、 $25M_{\odot}$  の星の通常の超新星爆発では、よくは再現できない。それに対して、 $25M_{\odot}$  の星の極超新星爆発の放出物の化学組成は、よく再現する (図4)。

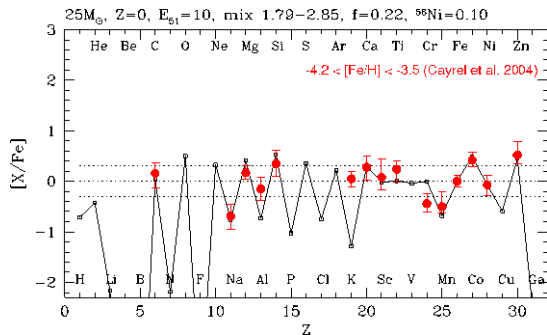


図4： Extremely Metal-Poor (EMP) Stars の化学組成と、 $25M_{\odot}$  の星の極超新星爆発の放出物の化学組成の比較。Ti/Fe, Co/Fe, Zn/Fe の比がよく合う。

(4) 一方、Fallback を起こして鉄の放出量が極端に少ない爆発の放出物は、C/Fe 比が太陽組成に比べて、極端に大きくなる。この特徴は、C-enhanced Extremely Metal-Poor Stars (CEMP) とよばれる、古い星に多く観測されている化学組成をよく説明する。

(5) 大質量星となる星のうち、 $140-300M_{\odot}$  の質量範囲の星は、電子陽電子対生成による崩壊が起因となって、大規模な核爆発を起し、極めて大量の Fe と Si を放出することを示した。その元素組成は、上記の観測されている元素組成とは、大きくはずれている。

(6) 高赤方偏移で重元素量の少ない QSO 吸収線系の元素組成が、CEMP stars とよく似ていることを示した。銀河スケールでの元素組成もこのような一致が見られるということは、宇宙初期の典型的な星の質量は  $10-50M_{\odot}$  と考えられる。

## 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 12 件)

① Nomoto, K., Maeda, K., Tanaka, M., and Suzuki, T., “Gamma-Ray Bursts and magnetar-forming Supernovae”, *Astrophysics and Space Science*, 332, 101-110, 2011.

② Kobayashi, C., Tominaga, N., and Nomoto, K., “Chemical Enrichment in the Carbon-enhanced Damped Ly alpha System by Population III Supernovae”, *The Astrophysical Journal*, 730, L14, 2011.

③ 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”, *The Astrophysical Journal*, 719, 1445-1453, 2010.

④ 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”, *The Astrophysical Journal*, 717, L83-L86, 2010.

⑤ Kawabata, K. S., Maeda, K., Nomoto, K., Taubenberger, S., Tanaka, M., Deng, J., Pian, E., Hattori, T., and Itagaki, K., “A massive star origin for an unusual helium-rich supernova in an elliptical galaxy”, *Nature*, 465, 326-328, 2010.

⑥ Nomoto, K., Tanaka, M., Tominaga, N., and Maeda, K., “Hypernovae, gamma-ray bursts, and first stars”, *New Astronomy Reviews*, 54, 191-200, 2010.

⑦ Ohkubo, T., Nomoto, K., Umeda, H., Yoshida, N., and Tsuruta, S., “Evolution of Very Massive Population III Stars with Mass Accretion from Pre-main Sequence to Collapse”, *Astrophysical Journal*, 706, 1184-1193, 2009.

⑧ Wanajo, S., Nomoto, K., Janka, H.-T., Kitaura, F. S., and Muller, B., “Nucleosynthesis in Electron Capture Supernovae of Asymptotic Giant Branch Stars”, *Astrophysical Journal*, 695, 208-220, 2009.

⑨ Tanaka, M., Tominaga, N., Nomoto, K., Valenti, S., Sahu, D. K., Minezaki, T., Yoshii, Y., Yoshida, M., Anupama, G. C., Benetti, S., Chincarini, G., Valle, M. D., Mazzali, P. A., and Pian, E., “Type Ib Supernova 2008D Associated With the Luminous X-Ray Transient 080109: An Energetic Explosion of a Massive Helium Star”, *Astrophysical Journal*, 692, 1131-1142, 2009.

⑩ 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”,

Astrophysical Journal, 705, L10-L14, 2009.

⑪ Tominaga, N., Limongi, M., Suzuki, T., Tanaka, M., Nomoto, K., Maeda, K., Chieffi, A., Tornambe, A., Minezaki, T., Yoshii, Y., Sakon, I., Wada, T., Ohya, Y., Tanaka, T., Kaneda, H., Onaka, T., Nozawa, T., Kozasa, T., Kawabata, K. S., Anupama, G. C., Sahu, D. K., Gurugubelli, U. K., Prabhu, T. P., and Deng, J., “The Peculiar Type Ib Supernova 2006jc: A WCO Wolf-Rayet Star Explosion”, Astrophysical Journal, 687, 1208-1219, 2008.

⑫ Nozawa, T., Kozasa, T., Tominaga, N., Sakon, I., Tanaka, M., Suzuki, T., Nomoto, K., Maeda, K., Umeda, H., Limongi, M., and Onaka, T., “Early Formation of Dust in the Ejecta of Type Ib SN 2006jc and Temperature and Mass of the Dust”, Astrophysical Journal, 684, 1343-1350, 2008.

〔学会発表〕(計7件)

① 川端弘治, 前田啓一, 野本憲一, 田中雅臣, S. Taubenberger, J. Deng, E. Pian, 服部堯, 板垣公一, “楯円銀河に現れた Ib 型超新星 2005cz は特殊な重力崩壊型か?”, 日本天文学会 2010 年秋季年会, 金沢大学, 2010 年 9 月 22 日～9 月 24 日

② K. Nomoto, “Hypernovae and gamma-ray bursts”, 11th Symposium on Nuclei in the Cosmos, Heidelberg, Germany, 2010, July 19-23

③ 富永望, S. Blinnikov, 野本憲一, “電子捕獲型超新星爆発とかに星雲を作った超新星 1054”, 日本天文学会 2010 年春季年会, 広島大学, 2010 年 3 月 24 日～3 月 27 日

④ K. Nomoto, “Nucleosynthesis of the Elements in Faint Supernovae and Hypernovae”, Chemical Abundances in the Universe: Connecting First Stars to Planets, IAU (International Astronomical Union) Symposium No. 265, Rio de Janeiro, Brazil, 2009, August 10-14

⑤ 野本憲一, 田中雅臣, 白田知史, 服部堯, O.Krause, 後藤美和, S.Birkmann, “すばるによる銀河系内超新星からの Light Echo の可視分光観測(2):Tycho”, 日本天文学会 2009 年春季年会, 大阪府立大学, 2009 年 3 月 24 日～3 月 27 日

⑥ K. Nomoto, “The Cosmic Explosions: The Violent Supernovae”, The Opening Ceremony of the International Year of Astronomy by UN (United Nations Organization), UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), & IAU (International

Astronomical Union), UNESCO, Paris, France, 2009, January 15-16

⑦ K. Nomoto, “Chemical Yields from Supernovae and Hypernovae”, The Galaxy Disk in Cosmological Context, IAU (International Astronomical Union) Symposium No. 254, Copenhagen, Denmark, 2008, June 9-13

〔図書〕(計1件)

野本憲一, “恒星” (シリーズ 現代の天文学 第7巻), 日本評論社, 2009年7月, 責任編集, 5,7章:執筆

〔産業財産権〕

○出願状況(計 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◇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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

野本 憲一 (NOMOTO KEN' ICHI)  
東京大学・数物連携宇宙研究機構・特任教授  
研究者番号: 90110676

### (2) 研究分担者

鈴木 知治 (SUZUKI TOMOHARU)  
東京大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号: 20280935

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

