

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 22 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20340038

研究課題名（和文）宇宙初期から現在にいたる星間塵供給源としての超新星の役割の解明

研究課題名（英文）The investigation of the role of supernovae as the source of interstellar dust from the dawn of the universe to the present time

研究代表者

小笹隆司（KOZASA TAKASHI）

北海道大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：90263368

研究成果の概要（和文）：種々のタイプの超新星爆発モデルを構築し、得られた元素組成、密度構造、温度分布をもちいて、放出されたガス中でのダスト形成とその後の超新星残骸および星間空間での進化を理論的に明らかにし、関連する観測結果と比較することにより星間ダスト供給源としての超新星の役割を解明した。また、得られた結果に基づいた宇宙初期の銀河形成・進化モデルを構築し、ダストの質量だけでなくサイズ分布が銀河進化に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The role of supernovae as the source of interstellar dust was revealed by constructing the model of explosion for a variety of type of supernovae, investigating the formation of dust in the ejecta and its evolution in supernova remnant and interstellar medium theoretically, and by comparing the results with the relevant observations. In addition, the model calculation of formation and evolution of galaxies in the early universe based on the results of formation and evolution of dust revealed that not only the dust mass but also the size distribution strongly influences the evolution of galaxies.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2009年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2010年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2011年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：超新星、ダスト形成進化、超新星残骸、星間塵、銀河形成進化

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙初期では超新星が星間ダストの主要な供給源と考えられている。一方、これまでの近傍の超新星の観測から見積られた超新星爆発時に形成されるダスト量は理論から予想される量の高々100分の1程度であり、星

間塵供給源としての超新星の役割が疑問視されている。超新星でのダスト形成とその後の進化を理論的に取り扱い、関連する観測結果と比較することにより星間塵供給源としての超新星の役割の解明は宇宙初期での星や銀河形成進化過程を考察する上で重要な

研究課題である。

## 2. 研究の目的

(1) 超新星により供給されるダスト種、質量、サイズ分布を明らかにする。

(2) 関連する観測結果と比較することにより、ダスト供給源としての超新星の役割を解明する。

(3) ダスト形成進化の計算結果に基づいて、宇宙初期の銀河形成進化へのダストの役割を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 金属量の異なる種々のタイプの超新星爆発モデルを構築し、得られた元素組成、密度構造、温度分布をもとに、ダスト形成計算を行う。

(2) 超新星残骸および星間空間での衝撃波によるダスト破壊を考慮し、超新星から供給されるダストの種類、量、サイズ分布を明らかにする。

(3) 超新星残骸からの熱放射や銀河のスペクトルエネルギー分布などの観測結果と比較検討することによりダスト供給源としての超新星の役割を解明する。

## 4. 研究成果

### (1) 超新星爆発時での元素合成

金属量と質量の異なる種々の超新星爆発モデルを構築し元素合成計算をおこなった。また今まで調べられていなかった重力崩壊型超新星での弱 r 過程元素合成をしらべ、観測結果と比較して爆発条件を明らかにした。

### (2) 超新星でのダスト形成と進化

① 超新星爆発に形成されるダストサイズは超新星のタイプに依存し、厚い水素外層を持つ重力崩壊型 (II 型) 超新星で形成されるダストはサイズが大きく、衝撃波での破壊を考慮しても星間塵の宇宙初期での主要な供給源となる。一方、水素外層の質量が小さい Ib 型超新星や水素外層のない熱核反応爆発 (Ia) 型超新星は、形成されるダストのサイズは小さく超新星残骸でほとんど破壊され星間塵の主要な供給源にはならない。

② Ib 型超新星 SN2006jc でのダスト形成および形成されたダストからの熱放射量とスペクトルを計算し、観測結果と比較して形成されたダスト種とその質量を明らかにした。

③ IIb 型超新星でのダスト形成・進化計算結果に基づいて超新星残骸からのダストの熱放射のスペクトルエネルギー分布の時間進化を計算し、IIb 超新星残骸である Cas-A の

観測の観測結果を再現するためにはリヴァース衝撃波に掃かれていない 0.07 太陽質量程度の低温ダストが存在することを示した。この結果はその後の Herschel 天文衛星で明らかにされた低温ダストの存在量と一致する。また Herschel 望遠鏡による観測から SN1987A 超新星残骸には 0.4-0.7 太陽質量の低温ダストが存在することを明らかにした。

### (3) 星間空間での進化と減光曲線

① 超新星残骸ではサイズの小さいダストが選択的に破壊され、星間空間に供給されるダストのサイズ分布は形成時の分布から変化する。一方星間乱流による粉砕過程により、サイズの小さいダストが生成され、サイズ分布は形成時のものとほぼ同じになることを明らかにした。

② 赤方変移  $z \sim 1$  の若い赤外線超過銀河のスペクトルエネルギー分布は超新星で形成されたダストの減光曲線により良く再現できることを示した。

### (4) ダストと銀河形成進化

超新星でのダスト形成、その後の破壊によるダスト量とサイズ分布の進化、ダスト表面上での水素分子形成を考慮した銀河形成進化モデルを構築し、ダスト量だけでなくダストのサイズ分布が銀河の進化に大きな影響を及ぼすことを示した。

## 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 43 件)

- ① Tanaka, M., Nozawa, T., et al., A Search for Infrared Emission from Core-Collapsed Supernovae at the transition Phase, *The Astrophysical Journal*, 749, 173 (2012), 査読あり
- ② Sono, T., Umeda, H., Vibrational instability of Population III very massive main-sequence stars due to  $\epsilon$  mechanism, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 421, L34-L38 (2012) 査読あり
- ③ Yasuda, Y., Kozasa, T., Formation of SiC Grains in Pulsation-enhanced Dust-driven Wind around Carbon-rich Asymptotic Giant Branch Stars, *The Astrophysical Journal*, 745, 159 (2012) 査読あり
- ④ Matsuura, M., 外 23 名, Nozawa, T. (16 番目), Herschel Detects a Massive Dust Reservoir in Supernova 1987A, *Science*, 333, 1258-1261 (2011), 査読あり
- ⑤ Fallest, D. W., Nozawa, T., Nomoto, K.,

- Umeda, H., Maeda, K., Kozasa, T., Lazzati, D., On the effects of microphysical grain properties on the yields of carbonaceous dust from Type II supernovae, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 481, 571-582 (2011) 査読あり
- ⑥ Kobayashi, C., Izutani, N., Karakas, A. I., Yoshida, T., Yong, D., Umeda, H., Evolution of Fluorine in the Galaxy with  $\nu$ -process, *The Astrophysical Journal*, 739, L57 (2011) 査読あり
- ⑦ Kobayashi, C., Karakas, A. I., Umeda, H., The evolution of isotope ratios in the Milky Way Galaxy, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 414, 3231-3250 (2011) 査読有り
- ⑧ Hirano, S., Umeda, H., Yoshida, N., Evolution of Primordial Stars Powered by Dark Matter Annihilation up to the Main-sequence Stage, *The Astrophysical Journal*, 738, 58 (2011) 査読あり
- ⑨ Formation of Dust in the Ejecta of Type Ia Supernova, Nozawa, T., Maeda, K., Kozasa, T., Tanaka, M., Nomoto, K., Umeda, H., *The Astrophysical Journal*, 736, 45 (2011), 査読あり
- ⑩ Yamasaw, D., Habe, A., Kozasa, T., Nozawa, T., Hirashita, H., Umeda, H., Nomoto, K., *The Astrophysical Journal*, 735, 44 (2011), 査読あり
- ⑪ Kawara, K., Hirashita, H., Nozawa, T., Kozasa, T., et al., Supernova dust for the extinction law in a young infrared galaxy at  $z \sim 1$ , *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 412, 1070-1080 (2011) 査読あり
- ⑫ Yoshida, T., Umeda, H., A progenitor of the extremely luminous Type Ic supernova 2007bi, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 412, L78-L82 (2011) 査読あり
- ⑬ Namekata, D., Habe, A., Evolution of A Nuclear Gas Disk and Gas Supply to the Galactic Center, *The Astrophysical Journal*, 731, 57 (2011) 査読あり
- ⑭ Watanabe, Y., Sorai, K., Kuno, N., Habe, A., Refined molecular gas mass and star-formation efficiency in NGC 3627, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 411, 1409-1417 (2011) 査読あり
- ⑮ Isensee, K., Rudnick, L., DeLaney, T., Smith, J. D., Rho, J., Reach, W. T., Kozasa, T., Gomez, H., The Three-dimensional Structure of Interior Electa in Cassiopeia A st High Spectral Resolution, *The Astrophysical Journal*, 725, 2059-2070 (2010) 査読あり
- ⑯ Delaney, T. Rudnick, L., Stage, M. D., Smith, J. D., Isensee, K., Rho, J., Allen, G., Gmez, H., Kozasa, T., Reach, W. T., The Three Dimensional Structure of Cassiopeia A, *The Astrophysical Journal*, 725, 2038-2058 (2010) 査読あり
- ⑰ Kuroda, T., Umeda, H., Three-dimensional Magnetohydrodynamical Simulations of Gravitational Collapse of a 15 M sun star, *The Astrophysical Journal Supplement*, 191, 439-466 (2010) 査読有り
- ⑱ Izitani, N., Umeda, H., Nucleosynthesis in High Entropy Hot Bubble of Supernova and Abundance Pattern of Extremely Metal Poor Stars, *The Astrophysical Journal*, 720, L1-L4 (2010) 査読あり
- ⑲ Hirashita, H., Nozawa, T., Huirong, Y., Kozasa, T., Effect of grain shattering by turbulence on extinction curves in starburst galaxies, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 404, 1437-1448 (2010), 査読あり
- ⑳ Kawara, K., Oyabu, S., Matsuoka, Y., Yoshii, Y., Minezaki, T., Sameshima, H., Asami, N., Ienaka, N., Kozasa, T., Stellar Population and dust extinction in an ultraluminous infrared galaxy at  $z=1.135$ , *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 402, 335-344 (2010) 査読あり
- 21 Komiya, Y., Habe, A., Suda, T., Fujimoto, M-Y., Formation History of Metal-poor Halo Stars with the Hieratical Model and the Effect of Interstellar Matter Accretion on the Most Metal-poor Stars, *The Astrophysical Journal*, 717, 542-561 (2010) 査読あり
- 22 Nozawa, T., Kozasa, T., Tominaga, N., Maeda, K., Umeda, H., et al., Formation and Evolution of Dust in Type IIb Supernova with Application to the Cassiopeia A Supernova Remnant, *The Astrophysical Journal*, 713, 356-373 (2010), 査読あり
- 23 Ohkubo, T., Nomoto, K., Umeda, H., Yoshida, N., Tsuruta, S., Evolution of Very Massive Population III stars with

- Mass Accretion from Pre-main Sequence to Core Collapse, *The Astrophysical Journal*, 706, 1184-1193 (2009) 査読有り
- 24 Lee, H. G., Koo, B. C., Moon, D. S., Sakon, I., Onaka, T., Jeong, W. S., Kaneda, H., Nozawa, T., Kozasa, T., AKARI Infrared Observations of the Supernova Remnant G292.0+1.8: Unveiling Circumstellar Medium and Supernova Ejecta, *The Astrophysical Journal*, 706, 441-453 (2009) 査読あり
- 25 Rho, J., Reach, W. T., Tappe, A., Hwang, U., Slavin, J. D., Kozasa, T., Dunne, L., Spitzer Observations of the Young Core-Collapse Supernova Remnant 1E0102-72.3: Infrared Ejecta Emission and Dust Formation, *The Astrophysical Journal*, 700, 579-596 (2009) 査読あり
- 26 Matsui, H., Habe, A., Effects of Minor Mergers on the Coalescence of a Supermassive Black Hole Binary, *Publication of the Astronomical Society of Japan*, 161, 421-428 (2009) 査読あり
- 27 Komiyama, Y., Habe, A., Suda, T., Fujimoto, M.-Y., Hierarchical Formation of the Galactic Halo and the Origin of Hyper Metal-Poor Stars, *The Astrophysical Journal*, 696, L79-L83 (2009) 査読有り
- 28 Smith, J. D., Rudnick, L., DeLaney, T., Rho, J., Gomez, H., Kozasa, T., Reach, W. T., Isensee, K., Spitzer Spectral Mapping of Supernova Remnant Cassiopeia A, *The Astrophysical Journal*, 693, 713-721 (2009) 査読あり
- 29 Izutani, N., Umeda, H., Tominaga, N., Explosive Nucleosynthesis of Weak R-Process Elements in Extremely Metal-Poor Core-Collapse Supernovae, *The Astrophysical Journal*, 692, 1517-1532 (2009) 査読あり
- 30 Sakon, I., 外 20 名, Nozawa, T. (12 番目), Kozasa, T. (13 番目), Umeda, H. (16 番目), Properties of Newly Formed Dust by SN2006JC Based on Near-to Mid Infrared Observation with AKARI, *The Astrophysical Journal*, 692, 546-555 (2009) 査読あり
- 31 Tominaga, N., 外 23 名, Nozawa, T. (17 番目), Kozasa, T. (18 番目), The Peculiar Type Ib Supernova 2006jc: A WCO Wolf-Rayet Star Explosion, *The Astrophysical Journal*, 687, 1208-1219 (2008) 査読あり
- 32 Nozawa, T., Kozasa, T., Tominaga, N., Sakon, I., Tanaka, M., Suzuki, T., Nomoto, K., Maeda, K., Umeda, H. et al., Early Formation of Dust in the Ejecta of Type Ib SN 2006jc and Temperature and Mass of the Dust, *Astrophysical Journal*, 684, 1343-1359 (2008) 査読あり
- [学会発表] (計 51 件)
- ① 大北農平, 大質量 CO 星の非球対称爆発, 日本天文学会 2012 春季年会, 2012 年 3 月 19 日, 龍谷大学
- ② 山澤大輔, ダストのサイズ分布進化と宇宙再電離, 日本天文学会 2012 春季年会, 2012 年 3 月 20 日, 龍谷大学
- ③ 吉田敬, 回転大質量星の進化コードの開発, 日本天文学会 2011 年秋季年会, 2011 年 9 月 20 日, 鹿児島大学
- ④ 大木平, 宇宙論的星質量集積史に基づく早期銀河のサイズ進化, 日本天文学会 2011 年秋季年会, 2011 年 9 月 21 日, 鹿児島大学
- ⑤ 山澤大輔, ダストのサイズ分布進化と原始銀河形成, 日本天文学 2011 年秋季年会, 2011 年 9 月 22 日, 鹿児島大学
- ⑥ 山澤大輔, ダストのサイズ分布進化を考慮した初代銀河形成モデルと宇宙再電離過程, 日本天文学会 2010 年秋季年会, 2010 年 9 月 22 日, 金沢大学
- ⑦ 大木平, 銀河団潮汐場が早期型銀河の進化に与える影響, 日本天文学会 2010 年秋季年会, 2010 年 9 月 22 日, 金沢大学
- ⑧ 吉田敬, SN 2007bi の親星モデル, 日本天文学会 2010 年秋季年会, 2010 年 9 月 22 日, 金沢大学
- ⑨ 行方大輔, 銀河系中心へのガス供給と銀河系中心での星形成について, 日本天文学会 2010 年秋季年会, 2010 年 9 月 24 日, 金沢大学
- ⑩ 二森都, 棒渦巻銀河 M83 における高解像度数値シミュレーション, 天文学会 2010 年秋季年会, 2010 年 9 月 23 日, 金沢大学
- ⑪ 黒田仰生, 大質量星重力崩壊における一般相対論磁気流体計算, 日本天文学会 2010 年秋季年会, 2010 年 9 月 22 日, 金沢大学
- ⑫ 吉田敬, 大質量星の進化における質量放出とその化学組成, 日本天文学会 2010 年春季年会, 2010 年 3 月 24 日, 広島大学
- ⑬ 野沢貴也, Cassiopeia A 超新星残骸中のダストの一生, 日本天文学会 2010 春季年会, 2010 年 3 月 24 日, 広島大学
- ⑭ 野沢貴也, 爆燃 Ia 型超新星爆発時に与えるダスト形成, 日本天文学会 2009

- 年秋季年会, 山口大学
- ⑮ 山澤大輔, ダストのサイズ分布進化とダストにおける水素分子形成を考慮した銀河形成進化モデル, 日本天文学会 2009 年秋季年会, 2009 年 9 月 15 日, 山口大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小笹 隆司 (KOZASA TAKASHI)  
北海道大学・大学院理学研究院・教授  
研究者番号: 90263368

(2) 研究分担者

羽部 朝男 (HABE ASAO)  
北海道大学・大学院理学研究院・教授  
研究者番号: 90180926  
梅田 秀之 (HIDEYUKI UMEDA)  
東京大学・大学院理学系研究科・准教授  
研究者番号: 60447357  
野沢 貴也 (NOZAWA TAKAYA)  
東京大学・数物連携宇宙研究機構・専任研究員  
研究者番号: 90435975

(3) 連携研究者

なし