

## 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 25 年 6 月 20 日現在

機関番号：57403

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010 ~ 2012

課題番号：22540297

研究課題名（和文）非球対称重力崩壊型超新星爆発における爆発的元素合成  
および爆発機構の解明

研究課題名（英文）Study on explosion mechanism and explosive nucleosynthesis  
in aspherical core-collapse supernovae

研究代表者

藤本 信一郎（FUJIMOTO SHIN-ICHIRO）

熊本高等専門学校・制御情報システム工学科・准教授

研究者番号：10342586

研究成果の概要（和文）：本研究では、重力崩壊型超新星爆発の現実的な多次元非球対称シミュレーションに基づいて、爆発に伴い放出されるガスの化学組成を調査した。太陽と同じ金属量をもつ大質量星に対して、爆発エネルギーが（観測値と同程度の） $10^{51}$  乗 erg 程度の場合、放出ガスの化学組成は太陽系組成を再現することを示した。また金属量 0 の大質量星の超新星爆発に伴う放出ガス組成は、低金属量恒星の表面組成の観測値をおおむね再現することを示した。さらに超新星爆発に対する核反応熱の影響を調査し、核反応熱の影響はニュートリノ加熱と同程度であるか、より大きいことを示した。

研究成果の概要（英文）：Based on simulations of aspherical explosion of core-collapse supernovae (SNe) of massive stars, we investigate abundances of SN ejecta. We find that abundances of ejecta from an SN of a star with the solar metallicity reproduce the solar composition, and that abundances of ejecta from SNe of zero-metal massive stars well reproduce observed abundances of the surface of metal-poor stars. Moreover, from SN simulations employed with newly-developed hydrodynamic code, in which heating via nuclear reactions are taken into account, we show that the nuclear heating are greater than or comparable to neutrino-heating.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：理論天文学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙物理，理論天文学，元素合成，超新星爆発

### 1. 研究開始当初の背景

重力崩壊型超新星(以下超新星)爆発は太陽質量の 8 倍程度の以上の大質量星の進化の最終段階である。銀河全体に匹敵する明るさで輝き、典型的な爆発エネルギーは  $10^{51}$  乗 erg に達する。爆発の際に、大質量星進化途

中に準静的に合成された元素および超新星爆発の際に爆発的に合成された元素を星間空間へと放出する。

超新星の爆発機構は未だ解明されていないが、ニュートリノ輻射輸送流体力学シミュレーションに基づいた多くの研究からニュ

ートリノ加熱が重要な役割を果たすことが分かってきている。球対称を仮定した場合、爆発するのは9倍太陽質量程度の大質量星のみであり、11倍太陽質量以上の大質量星は爆発しないことが示され、これらの星の爆発には非球対称性が本質的であることが認識された。実際にドイツ MPI グループの2次元軸対称計算において、11倍太陽質量と15倍太陽質量の大質量星が爆発する兆候が示された。

観測からも超新星爆発の非球対称性が示されている。近傍の超新星残骸のX線・赤外線観測からは重元素分布の非球対称性が明らかにされた。さらに爆発から数ヵ月後の39個の超新星の可視光観測からは、球対称爆発では説明不可能な非対称な波長分布を持つ酸素輝線が得られた。しかも非対称酸素輝線は、5割を超える超新星において観測され、非球対称超新星爆発の普遍性を示唆している。

一方、超新星爆発における元素合成の研究には、これまで主に球対称モデルが用いられてきた。球対称モデルは様々な観測を説明することができ、個々の超新星の重元素量を再現し、太陽系組成とも矛盾が無いことが示された。しかし球対称モデルでは生成されるNiが太陽系組成よりも多いこと、Ti44組成が太陽系組成や超新星SN1987A・Cas Aの観測値よりも小さいことなどの欠点も明らかにされた。非球対称爆発を考慮すれば、Ti44は増加することが示されたが、組成は非球対称度に敏感である。さらに陽子過剰核(以下p核)と呼ばれる安定核(特にMo、Ru)の太陽系組成との不一致は未解決の大問題である。

また爆発後も放出されずに恒星中心部に残されるガスの質量 masscut は未定パラメータであり、超新星の光度曲線の観測から要求されるNi質量を再現するように定められる。しかし近年の観測からNi質量は超新星毎に大きく異なることが示され、Ni質量からのmasscut決定の普遍性は疑わしい。また鉄族元素組成はmasscutの値に敏感であり、組成の決定にはmasscutの正確な値が必要不可欠である。加えて鉄族元素組成は電子比の値に非常に敏感であるが、過去の研究では、電子比は超新星爆発直前の値から変化しないと仮定して元素合成計算が行われている。

## 2. 研究の目的

このように理論・観測の両面から重力崩壊型超新星爆発における非球対称性の重要性が明らかにされている。にもかかわらず超新星爆発における爆発的要素合成研究の多くは球対称が仮定され、様々な不定性を内在する。本研究では、現実的な多次元非球対称超新星爆発シミュレーションに基づいて、重力

崩壊型超新星における非球対称爆発的要素合成を調査する。

球対称モデルの様々な不定性を取り除き、超新星爆発の際に放出される重元素組成・質量を明らかにする。まず鉄族以下の重元素組成・放出量への非球対称爆発の影響を調べ、次にp核の組成・放出量を計算する。さらに以上の結果の恒星質量・金属量への依存性を明らかにし、理論的に得られた組成と、太陽系組成・個々の超新星の組成・金属欠乏星の表面組成との比較から超新星およびその親星の性質を探る。

## 3. 研究の方法

本研究では、まず電子陽電子捕獲反応・ニュートリノ吸収反応による電子比進化を考慮した多次元非球対称超新星爆発シミュレーションを行う。ただし高密度物質の性質に関しては未だ不明な点もあり、爆発の正否に重要な状態方程式には不定性があるため、原子中性子星が存在する中心部を計算領域に含めず、原子中性子星から放射されるニュートリノ光度と温度をパラメータとして爆発計算を行う。こうすることで限られた研究期間内で多くのモデルを調査することが可能になる。また過去の研究ではパラメータであったmasscut・爆発エネルギーの大きさと非球対称度は我々の手法では爆発シミュレーションから一意に決定される。

次に爆発計算から得られた密度・温度・電子比(中性子過剰度)進化に基づいて、中性子からBi以下の約2000核種を含む核反応ネットワークを用いて放出ガスの質量および化学組成を計算し、重力崩壊型超新星爆発における爆発的要素合成を調査する。まず典型的な太陽と同じ金属量をもつ15倍太陽質量の大質量星に対して、詳細な研究を行い、次の様々な質量と金属量の大質量星に関して研究を行う。併せて核反応熱の効果を組み込んだ流体力学コードを開発し、超新星爆発に対する核反応熱の影響を調査する。

## 4. 研究成果

まず太陽と同じ金属量をもつ15倍太陽質量の大質量星に対して、以下のことを示した。(1) 爆発エネルギーが(爆発エネルギーの観測値と同程度の)10の51乗erg程度の場合、超新星爆発に伴う放出ガスの化学組成は太陽系組成を再現する。(2) ただし球対称モデルと同様に、Ti44は太陽系組成より少なく、Ni62は多い。(3) 爆発エネルギーが10の51乗erg程度のモデルの場合、爆発後形成される中性子星の質量は典型的な観測値(太陽質量の1.5-1.6倍)程度である。(4) かつコアバウンスから200-300ミリ秒と早い時期に爆発する。(5) 遅い中性子過剰核(s過程核)の光分解によりp過程核が合成される。Mo92

より軽いp過程核は、中性子過剰な放出ガス中においても形成される。

次に金属量0で様々な質量をもつ大質量星に対して、以下のことを示した。

(1) 放出される鉄の質量は爆発エネルギーに正の相関がある。(2) 金属量0の大質量星の超新星爆発によって放出されるガス組成を質量関数で平均した組成は、低金属量恒星の表面組成の観測値をおおむね再現する。(3) ただし K, Co の組成を再現するにはニュートリノ反応の効果が重要である。(4) また恒星質量が大きいくほど爆発エネルギーが大きいく場合の方が、低金属量恒星の表面組成の観測値をより良く再現する。(5) 低金属量恒星で観測される炭素過剰を再現するには、質量の軽い(15倍太陽質量以下)恒星の、低エネルギー爆発が重要である。

さらに核反応熱の効果を取り入れた超新星爆発コードを開発し、太陽と同じ金属量を持つ15倍太陽質量の恒星の超新星爆発に対する核反応熱の影響を調査し、以下のことを示した。

(1) 核反応熱の影響はニュートリノ加熱よりも大きいか、同程度である。(2) 核反応熱のうち、再結合反応の寄与が燃焼反応の寄与よりも大きい。(3) 球対称爆発の場合には再現できなかった超新星1987Aの観測値(爆発エネルギーとNi56質量)を2次元の場合は再現可能である。

## 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4件)

Shin-ichiro Fujimoto, Kei Kotake, Masa-aki Hashimoto, Masaomi Ono and Naofumi Ohnishi: 査読有 "Explosive nucleosynthesis in the neutrino-driven aspherical supernova explosion of a non-rotating 15Msun star with solar metallicity", *Astrophysical Journal* 738 巻 1 号 61-75 頁 (2011) DOI: 10.1088/0004-637X/738/1/61

Yukihiro Kikuchi, Masaomi Ono, Yasuhide Matsuo, Masa-aki Hashimoto, Shin-ichiro Fujimoto: 査読有 "Effects of a New Triple- Reaction on the S-process in Massive Stars", *Progress of Theoretical Physics* 127 巻 1 号 171-178 頁 (2012) DOI: 10.1143/PTP.127.171

Masaomi Ono, Masa-aki Hashimoto, Shin-ichiro Fujimoto, Kei Kotake, Shoichi Yamada: 査読有 "Explosive nucleosynthesis in magnetohydrodynamical jets from

collapsars II", *Progress of Theoretical Physics* 128 巻 4 号 741-765 頁 (2012) DOI : 10.1143/PTP.128.741

Yu Yamamoto, Shin-ichiro Fujimoto, Hiroki Nagakura, Shoichi Yamada: 査読有 "Post-shock-revival evolution in the neutrino-heating mechanism of core-collapse supernovae", *Astrophysical Journal in press* (2013)

〔学会発表〕(計14件)

Shin-ichiro Fujimoto, Masa-aki Hashimoto, Masaomi Ono, Kei Kotake, Naofumi Onishi: "Nucleosynthesis in neutrino-driven, aspherical supernova explosion of a massive star", 3rd international conference on Frontiers in nuclear structure, astrophysics, and reactions, Rodes, Greek (2010年8月23-27日)

Masaomi Ono, Masa-aki Hashimoto, Shin-ichiro Fujimoto, Kei Kotake, Shoichi Yamada: "Heavy-element Nucleosynthesis in magnetohydrodynamical Jets from Collapsars", 3rd international conference on Frontiers in nuclear structure, astrophysics, and reactions, Rodes, Greek (2010年8月23-27日)

藤本信一郎, 固武慶, 橋本 正章, 小野勝臣, 大西直文: "ニュートリノ駆動重力崩壊型超新星爆発における元素合成", 研究会「超新星からのマルチメッセンジャー」国立天文台(東京都三鷹市)(2011年3月01日)

藤本信一郎: "R過程元素合成", 研究会「KISS検討会」理化学研究所・仁科ホール(埼玉県和光市)(2011年03月05日)

藤本信一郎, 橋本 正章, 小野勝臣, 固武慶, 大西直文: "定在降着衝撃波不安定性により誘発された重力崩壊型超新星爆発における爆発の元素合成 3 -- 初代大質量星", 日本天文学会2011年春期年会, 筑波大学(茨城県筑波市)(2011年3月16日)

Shin-ichiro Fujimoto, Masa-aki Hashimoto, Masaomi Ono, Kei Kotake: "Explosive nucleosynthesis in neutrino-driven, zero-metal supernovae", *Explosive Ideas about Massive Stars - from Observations to Modeling*, Stockholm, Sweden (2011年8月10-13日)

藤本信一郎, 橋本 正章, 小野勝臣, 固武慶: "定在降着衝撃波不安定性により誘

発された重力崩壊型超新星爆発における爆発的元素合成 4 -- 初代星における爆発直後の物質混合の影響", 日本天文学会 2011 年秋期年会, 鹿児島大学(鹿児島県鹿児島市) (2011 年 9 月 20 日)

藤本信一郎, 橋本 正章, 小野勝臣, 固武 慶: "定在降着衝撃波不安定性により誘発された重力崩壊型超新星爆発における爆発的元素合成 5 -- 第一・第二世代超新星における炭素・酸素組成", 日本天文学会 2012 年秋期年会, 大分大学(大分県大分市) (2012 年 9 月 19-21 日)

Shin-ichiro Fujimoto, Masa-aki Hashimoto, Masaomi Ono, Kei Kotake: "Nucleosynthesis in neutrino-driven aspherical supernovae of population III stars", The 11th Int. Symp. on Origin of Matter and Evolution of Galaxies, Riken, Saitama, Japan (2011 年 11 月 14-17 日)

Masaomi Ono, Masa-aki Hashimoto, Shin-ichiro Fujimoto, Kei Kotake, Shoichi Yamada: "Nucleosynthesis in a massive star associated with Magnetohydrodynamical Jets from Collapsars", The 11th Int. Symp. on Origin of Matter and Evolution of Galaxies, Riken, Saitama, Japan (2011 年 11 月 14-17 日)

Shin-ichiro Fujimoto, Masa-aki Hashimoto, Masaomi Ono, Kei Kotake: "Nucleosynthesis in neutrino-driven, aspherical Population III supernovae", IAU Symposium 279: Death of massive stars: supernovae and gamma-ray bursts, Nikko, Tochigi, Japan (2012 年 3 月 12-16 日)

Shin-ichiro Fujimoto, Masa-aki Hashimoto, Masaomi Ono, Kei Kotake: "Nucleosynthesis in a neutrino-driven supernova explosion of first stars", First stars IV - From Hayashi to the Future -, Kyoto, Japan (2012 年 5 月 21-25 日)

Shin-ichiro Fujimoto, Masa-aki Hashimoto, Masaomi Ono, Kei Kotake: "Production of p-nuclei in ejecta from a neutrino-driven, aspherical supernova", XII International Symposium on Nuclei in the Cosmos, Cairns, Australia (2012 年 8 月 5-10 日)

Shin-ichiro Fujimoto, Masa-aki Hashimoto, Masaomi Ono, Kei Kotake: "Effects of neutrino interactions on nucleosynthesis during neutrino-driven, aspherical

supernovae", VI International symposium on Nuclear Physics in Astrophysics, Lisbon, Portugal (2013 年 5 月 19-24 日)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤本 信一郎 (FUJIMOTO SHIN-ICHIRO)  
熊本高等専門学校・  
制御情報システム工学科・准教授  
研究者番号: 10342586

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

固武 慶 (KOTAKE KEI)  
国立天文台・理論天文部・助教  
研究者番号: 20435506