

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03939

研究課題名（和文）超新星起源マルチメッセンジャー信号の解析に向けた数値モデルの構築

研究課題名（英文）Numerical modeling of core-collapse supernovae and multi-messenger signals

研究代表者

中村 航（Nakamura, Ko）

福岡大学・理学部・助教

研究者番号：60533544

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：太陽の約8倍以上重い星の多くは、進化の最終段階で重力的に不安定になり崩壊して重力崩壊型超新星として爆発すると考えられている。本研究ではこの過程を数値シミュレーションで再現することを目指し、様々な初期条件で爆発に至る過程とその結果得られる観測量を調査した。初期条件として星の質量や星内部の非対称構造を考慮し、空間3次元のニュートリノ輻射流体計算を実行した結果、初期条件の違いに対応して内部の流体運動の時間発展に差異が見られた。この違いはニュートリノや重力波放射、中心に残される中性子星やブラックホールの特性、さらに爆発の際に合成される元素量等に反映され、将来の観測で検証可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、重力崩壊型超新星が放出するニュートリノ・重力波信号とその親星コア構造との関係を、現実的な3次元空間におけるニュートリノ輻射流体計算によって明らかにした。これは将来発生すると期待される、太陽系近傍での超新星からのニュートリノの検出を引き金とした、重力波観測・光学フォローアップ観測を含む包括的観測体制の構築に寄与する成果である。超新星爆発は、地上では実現できない超高温・高密度における物理の実験場でもある。本研究成果は、人類がこれまでに構築した物理理論がこのような極限環境でも成立するかテストする機会を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：At the end of the lifetime of stars more massive than about eight solar masses, their core would experience gravitational instability and collapse to nuclear densities. This process is thought to produce a core-collapse supernova (CCSN) explosion, leaving neutrino and gravitational wave (GW) signals, explosive nucleosynthesis yields, and either a neutron star or a black hole behind the explosion.

In this study, we have performed three-dimensional hydrodynamic simulations taking account of neutrino transport in order to investigate this interesting astronomical event. We have explored a wide variety of initial stellar structures, which affect the hydrodynamical evolution of supernova materials.

We find that the differences in the initial stellar structure, such as stellar core mass and anisotropic density distribution, are reflected in the neutrino and GW signals as well as the properties of the compact remnant. Our findings will be tested through future observations.

研究分野：理論宇宙物理学

キーワード：超新星 数値シミュレーション ニュートリノ 重力波 マルチメッセンジャー天文学

## 1. 研究開始当初の背景

1916年に一般相対性理論に基づいてアインシュタインが予言した重力波という現象は、2016年にアメリカのLIGO検出器による直接観測によって実証された。この時の重力波はブラックホール連星の合体からの重力波であったが、2017年にはLIGOおよびイタリアのVirgo検出器によって、中性子星連星が合体する際の重力波も観測された。まさに重力波天文学が幕を開けたと言えるだろう。そこで次のターゲットとして有力なのが、大質量星が進化の最終段階で起こす重力崩壊型超新星(以下、超新星と記す)と呼ばれる大爆発現象である。超新星からの重力波はコンパクト連星合体に比べて弱く、検出が難しいと考えられている。しかし、天の川銀河系内で超新星が発生すれば十分観測できる可能性があることを申請者が示した[1]。観測された波形から超新星の物理に迫るには、波形と親星構造の対応をあらかじめテンプレートとして用意しておく、適切な光学フォローアップ観測を即座に提案できる体制を構築しておくことが不可欠である。そのためには、幅広い親星モデルに対して数値シミュレーションを実行することが必要になる。

## 2. 研究の目的

本研究では、重力崩壊型超新星が放出するニュートリノ・重力波信号とその親星コア構造との関係を、セルフコンシステントな多次元ニュートリノ輻射流体計算によって理論的に調べた。超新星になり得る幅広い質量域の親星を対象にした数値計算を実行する事によって、親星の構造を反映した超新星ニュートリノ光度・エネルギースペクトルの時間発展を解いた。親星構造と超新星ニュートリノの対応関係を明らかにすることによって、来たるべき近傍超新星ニュートリノの観測を引き金とした重力波観測・光学フォローアップ観測を含む包括的観測体制の構築に寄与することを目的とした。大質量星の進化の最後に最も一般的に起こると考えられている重力崩壊型超新星は、莫大なエネルギーの放出や重元素の形成などを通し、宇宙の構造、化学組成進化に極めて重要な役割を果たすとともに、ニュートリノ、重力波、高エネルギー宇宙線などを用いた新しい天文学の重要な観測対象となっている。その中でもニュートリノおよび重力波は、大質量星が重力崩壊した際に中心に形成される高密度領域から放射され、厚い外層に覆われて電磁波では観測できない中心部の情報を含んでいる。将来の銀河系内超新星から得る知見を最大化する為に、超新星が発する電磁波・ニュートリノ・重力波といったマルチメッセンジャー信号のテンプレートの作成を目指した。

## 3. 研究の方法

我々のグループが開発した重力崩壊型超新星用数値コード3DnSNe[2]は、最も計算量の多いニュートリノ輸送部分に、計算効率の極めて高い等方拡散源近似(Isotropic Diffusion Source Approximation; IDSA [3])と呼ばれる手法を用いている。これによって計算コストの高い空間多次元計算を多数の初期条件に対して実行することが可能となり、本研究で目指した幅広い質量域の親星を網羅する系統的研究が実現された。この数値コードを大幅にアップデートし、ニュートリノの反応率と輸送計算をより精密化した[4]。また重力に一般相対論的效果を近似的に取り入れた[5]。

各初期条件に対して得られた流体およびニュートリノデータから、超新星爆発の観測量となることが期待されるニュートリノの光度およびエネルギースペクトルの時間発展が得られる。また中心の高密度領域の流体運動からは重力波が放出され、その振幅を四重極公式を用いて算出する。日本の水チェレンコフ型ニュートリノ検出器Super/Hyper-Kamiokandeやレーザー干渉計重力波検出器KAGRAを含む現行および次世代のニュートリノ・重力波検出器を想定して、天の川銀河系内で超新星が発生した場合に期待される検出イベントを見積もる。

中心に残される中性子星の諸量(質量、反跳によるキック速度、スピン率)もまた、超新星爆発の最深部で起こった現象の情報を有している。これらの系統的分布を過去の観測量が示す傾向と比較し、超新星モデルの有用性を議論する。

## 4. 研究成果

### (1) 現実的な非球対称初期条件を考慮した重力崩壊計算

星は一般に丸いが、その内部構造は完全に球対称ではない。特に重力崩壊直前の大質量星の内部は、激しい対流運動によって非球対称であることが期待される。そこで星内部の非球対称構造を考慮した25太陽質量の親星モデル[6]を初期条件として、空間3次元の重力崩壊シミュレーションを実行した。内部の対流構造を取り入れたモデルと球対称初期条件から計算を開始したモデルを比較したところ、衝撃波の復活時刻等に差異が見られた。対流層の底部が重力崩壊によって中心に落下し、停滞した衝撃波に触れるタイミングで衝撃波が膨張に転じることを発見した。爆発的元素合成によって、超新星の明るさを決定する $^{56}\text{Ni}$ などの重元素を観測量と同程度生成するには、できるだけ早く衝撃波が復活することが望ましい[7]。今回の結果は、親星内部の非球対称構造が観測と理論モデルのギャップを埋める可能性を示唆するものである。

## (2) 超新星 SN1987A の 3次元モデリング

これまでで最もよく観測された超新星は、天の川銀河近傍の大マゼラン雲に出現した超新星 SN1987A である。超新星起源のニュートリノを観測した唯一の例であり、超新星モデルの比較対象としてよく採用されるが、通常の赤色超巨星ではなく青色超巨星の爆発であること、表面の元素組成に異常が見られることなど、普通の超新星とは異なる特徴が多い。これらの特徴から、この超新星の親星は単独星ではなく連星系であった可能性が示唆されている。

そこで計算の初期条件として、SN1987A 親星の特徴をよく再現する最新の連星進化モデルを採用した[8]。空間3次元計算によって衝撃波の膨張とやがて超新星爆発に至るであろうという結果を得たが(図1)その爆発エネルギーは観測値の10%程度に留まり、合成された $^{56}\text{Ni}$ の質量も観測からの推定値の15%程度であった。一方で当時のニュートリノ検出器の感度を仮定して算出したニュートリノ検出イベント数は実際の観測と同程度であった。計算時間が不足しているかあるいは回転の効果や一般相対論的效果などの物理を十分に組み込んでいないことが原因ではないかと推測している。また、中心に残された中性子星の質量やスピン率は標準的な中性子星の値であった。SN1987A が残したコンパクト天体は未だ発見されていないが、近年 ALMA の観測で温度の高い電波源の存在が示唆されている。今後の観測でさらなる検証が進むことが期待される。

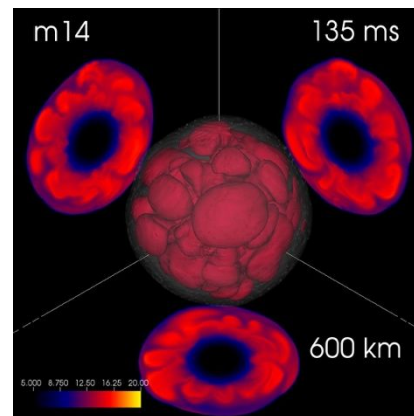


図1. SN1987A モデル中心部のエントロピー分布図。ニュートリノによって加熱された物質が激しく対流している様子がわかる。この対流運動がやがて外側の衝撃波を押し上げ、最終的に超新星爆発に至る。

## (3) 磁場を考慮した系統的3次元超新星シミュレーション

数値コードをさらに改良し、様々な初期質量を持つ親星に対して磁場を考慮した空間3次元の重力崩壊シミュレーションを実行した。初期質量にして太陽の9倍から24倍までを網羅する16個の親星を使用し、重力崩壊で落下してきた物質が中心の高密度コアによって跳ね返され(バウンスして)衝撃波が発生し、ニュートリノによって加熱されて膨張に転じる一連の過程をバウンス後0.5秒まで計算した。空間3次元でのこの種の系統的計算としては世界最大規模となる。

比較的弱い初期磁場を仮定したので、磁場の流体運動に対する影響はほとんど見られなかった。一方、親星の初期構造の違いを反映して衝撃波の時間発展や爆発エネルギー、ニュートリノ光度、重力波振幅等には大きな差異が生じた。銀河中心(距離10キロパーセク)で超新星が爆発したと仮定して、現行のニュートリノ検出器 Super-Kamiokande で期待される検出イベント数を見積もった(図2)。光学観測より早く確実に重力崩壊現象の発生を検出できること、親星によってイベント数が有意に異なること、またいくつかの親星に固有の密度構造を反映した急激な検出数の減少を示すことができる。

超新星ニュートリノの観測から爆発(衝撃波が親星の表面に到達して星を吹き飛ばす)前にその発生を予言でき、さらにその親星構造を識別できる可能性を示した。

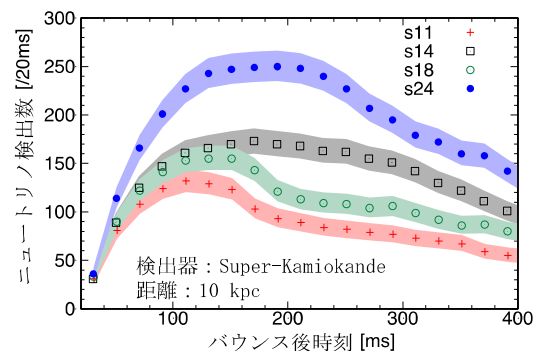


図2. 様々な初期構造を持つ3次元超新星モデルから期待されるニュートリノ検出イベント数の時間発展。検出器はSK、距離は星が密集している超新星の発生率が高い銀河中心までの距離10kpcを仮定した。コア周辺の密度構造に起因する検出数の急激な減少などを捉えることができる。図1. SN1987A モデル中心部のエントロピー分布図。ニュートリノによって加熱された物質が激しく対流している様子がわかる。この対流運動がやがて外側の衝撃波を押し上げ、最終的に超新星爆発に至る。

### < 引用文献 >

- [1] Nakamura, K., Horiuchi, S., Tanaka, M., Hayama, K., Takiwaki, T., and Kotake, K., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 461, 3296, 2016
- [2] Takiwaki, T., Kotake, K., and Suwa, Y., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters, 461, L112, 2016
- [3] Liebendoerfer, M., Whitehouse, S. C., and Fischer, T., The Astrophysical Journal, 698, 1174, 2009
- [4] Kotake, K., Takiwaki, T., Fischer, T., Nakamura, K., and Martinez-Pinedo, G., The Astrophysical Journal, 853, 170, 2018
- [5] Marek, A., Dimmelmeier, H., Janka, H-T., Mueller, E., and Buras, R., The Astrophysical Journal, 445, 273, 2006
- [6] Yoshida, T., Takiwaki, T., Kotake, K., Takahashi, K., Nakamura, K., and Umeda, H., The Astrophysical Journal, 881, 16, 2019
- [7] Sawada, R., and Maeda, K., The Astrophysical Journal, 886, 47, 2019
- [8] Urushibata, T., Takahashi, K., Umeda, H., and Yoshida, T., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters, 473, L101, 2018

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ko Nakamura	4. 巻 2156
2. 論文標題 Core-collapse simulation of SN 1987A binary progenitor and its multimessenger signals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12232
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/2156/1/012232	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ko Nakamura	4. 巻 260
2. 論文標題 Three-dimensional supernova simulation of SN 1987A progenitor with implications for multi-messenger signals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 11020
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/epjconf/202226011020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ko Nakamura, Tomoya Takiwaki, and Kei Kotake	4. 巻 514
2. 論文標題 Three-dimensional simulation of a core-collapse supernova for a binary star progenitor of SN 1987A	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3941 ~ 3952
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stac1586	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計27件（うち招待講演 4件/うち国際学会 11件）

1. 発表者名 Ko Nakamura
2. 発表標題 Core-collapse supernova simulation of a three-dimensional 25 solar-mass progenitor model
3. 学会等名 YITP-OzGrav Workshop（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ko Nakamura
2. 発表標題 Core-collapse simulation of SN 1987A binary progenitor and its multimessenger signals
3. 学会等名 TAUP 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ko Nakamura
2. 発表標題 Three-dimensional supernova simulation of SN 1987A progenitor with implications for multi-messenger signals
3. 学会等名 NIC-XVI (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ko Nakamura
2. 発表標題 Gravitational wave analysis for long-term 3D CCSN simulations
3. 学会等名 SNeGW2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村航
2. 発表標題 現実的な3次元超新星モデルに基づく超新星背景ニュートリノ解析
3. 学会等名 新学術領域「地下宇宙」2021年領域研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村航
2. 発表標題 SN1987Aモデルの重力崩壊計算が示すコンパクト天体の性質
3. 学会等名 中性子星の観測と理論 - 研究活性化ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村航
2. 発表標題 大質量星重力崩壊の空間3次元MHDシミュレーション
3. 学会等名 第34回理論懇シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村航
2. 発表標題 重力崩壊型超新星の空間3次元数値モデルに基づくニュートリノ信号解析
3. 学会等名 第8回超新星ニュートリノ研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村航
2. 発表標題 3D simulations of supernova explosions with magnetic fields
3. 学会等名 CfCAユーザーズミーティング
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村航
2. 発表標題 磁場を考慮した3次元超新星モデルの初期流体進化
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村航
2. 発表標題 現実的な3次元超新星モデルに基づく超新星背景ニュートリノ解析
3. 学会等名 地下宇宙領域研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村航
2. 発表標題 大質量星の非対称構造を考慮した重力崩壊計算
3. 学会等名 第33回理論懇シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村航
2. 発表標題 現実的な3次元超新星モデルに向けて
3. 学会等名 第7回超新星ニュートリノ研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村航
2. 発表標題 大質量星の重力崩壊前後を追う一貫した数値シミュレーション
3. 学会等名 CfCAユーザーズミーティング
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ko Nakamura
2. 発表標題 Gravitational wave signal based on a realistic core-collapse supernova model
3. 学会等名 Gravitational wave physics and astronomy: Genesis, The 4th Annual Area Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村航
2. 発表標題 超新星親星の非球対称構造が衝撃波に及ぼす影響
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ko Nakamura
2. 発表標題 Gravitational-wave signals from three-dimensional core-collapse supernova models
3. 学会等名 The 5th Annual Area Symposium Gravitational wave physics and astronomy: Genesis (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 Ko Nakamura
2. 発表標題 Neutrino signals from 3D core-collapse supernova models
3. 学会等名 UGAP2022 ( 国際学会 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ko Nakamura
2. 発表標題 Systematic 3D MHD simulations of core-collapse supernovae
3. 学会等名 Brainstorming Workshop 2022 to revolutionize the Core-collapse Supernova Theory ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ko Nakamura
2. 発表標題 SN 1987A: three-dimensional core-collapse simulation and multi-messenger signals
3. 学会等名 EANAM9 ( 国際学会 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ko Nakamura
2. 発表標題 A systematic study of CCSNe based on 3D MHD simulations
3. 学会等名 OMEG16 ( 国際学会 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ko Nakamura
2. 発表標題 A systematic study of core-collapse supernovae based on 3D MHD simulations
3. 学会等名 SuperVirtual 2022 - From Common to Exotic Transients (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村航
2. 発表標題 重力崩壊型超新星の3次元MHD計算に基づく中性子星諸量の分布
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村航
2. 発表標題 大質量星の重量崩壊とマルチメッセンジャー信号
3. 学会等名 初代星・初代銀河研究会2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村航
2. 発表標題 3次元重力崩壊計算で得られた中性子星質量・スピン・キック速度
3. 学会等名 第35回理論懇シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村航
2. 発表標題 Properties of neutron stars generated by 3D core-collapse simulations
3. 学会等名 CfCAユーズーズミーティング
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村航
2. 発表標題 磁場を考慮した3次元超新星モデルからの重力波
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織			
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)		備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	バージニア工科大学			