

令和 5 年 5 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14770

研究課題名（和文）多次元放射流体力学シミュレーションによる特異な超新星の研究

研究課題名（英文）Multi-dimensional radiation-hydrodynamic simulations of luminous supernovae

研究代表者

鈴木 昭宏（Suzuki, Akihiro）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・特任助教

研究者番号：50647659

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、可視光突発天体の中でも特に明るく輝く天体の起源について理論的研究を推し進めた。超高輝度超新星と呼ばれる突発天体は、大質量星の重力崩壊によって起こる大爆発（重力崩壊型超新星）の中でも一際明るく輝く種族であり、その起源はまだ多くの謎に包まれている。本課題では多次元放射流体力学シミュレーションを実施することで、超新星爆発による噴出物が周囲にある物質と衝突することで明るい放射を説明するモデルや、爆発中心に残るコンパクト天体からのエネルギー注入によって輝くモデルについての多次元放射モデルを構築することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙に輝く天体の中には、突発天体と呼ばれる一時的に明るく輝き暗くなっていく種族が存在する。例えば重力崩壊型超新星は太陽の8-10倍以上の質量を持って生まれた星（大質量星）が進化の最終段階に爆発する現象である。重力崩壊型超新星の中でも近年注目されているのは、その明るさが通常の超新星の10-100倍にも達する超高輝度超新星で、その起源はまだ明らかでない。本研究では、スーパーコンピュータ上で多次元放射流体力学シミュレーションを実施することで、超高輝度超新星がどのように光るかを調べ、その多次元的な描像を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focus on exceptionally luminous classes of optical transients and developed radiation-hydrodynamic models based on numerical simulations. So-called superluminous supernovae are among the brightest optical astronomical transients arising from the gravitational collapse of massive stars. Despite their interesting nature, the origin of the bright thermal emission and their progenitor system are still unclear. In this study, we conducted series of multi-dimensional radiation-hydrodynamic simulations based on some proposed scenarios of superluminous supernovae. We succeeded in establishing the multi-dimensional picture of bright transient powered by the collision of the ejecta material with surrounding massive media and by the central compact power source such as a blackhole or neutron star.

研究分野：天体物理学

キーワード：超新星 ガンマ線バースト 放射輸送 流体力学 大規模シミュレーション 突発天体

1. 研究開始当初の背景

形成時の質量が太陽の 8-10 倍を超える星は**大質量星(massive star)**と呼ばれ、その最終進化段階には主に鉄からなる中心核が自身の重力を支えられなくなることで崩壊し、**重力崩壊型超新星(core-collapse supernova; CCSN)**として爆発することが知られている。重力崩壊型超新星は、星の外層や爆発的核燃焼によって合成された **Ni-56** をはじめとする様々な核種を含んだ噴出物(エジェクタ)を星間空間に放出し、**Ni-56** の放射性崩壊を光源とする明るい可視光放射を行う。重力崩壊型超新星は最も古くから観測が行われてきた突発天体の一つであり、爆発機構としては中心核が重力崩壊をする際に放出されるニュートリノのエネルギーによって星の外層を吹き飛ばすことで爆発に至るニュートリノ駆動爆発説が有力である。

一方で、過去 10 年程度にわたる可視光突発天体サーベイの発展によって、大質量星の重力崩壊によって起こる突発天体だと思われるものの、通常の超新星のように **Ni-56** の放射性崩壊で説明するには明るすぎる可視光放射を伴う突発天体の種族が存在することも明らかになってきた。**超高輝度超新星(super-luminous supernova; SLSN)**は、通常の重力崩壊型超新星の 10-100 倍程度の光度で輝く突発天体であり、その明るい光度の起源については未だ活発な議論が続いている。

超高輝度超新星のエネルギー源としてはいくつかのシナリオが提案されている。そのうち有力だと考えられているものが**(1)星周相互作用説**と**(2)中心エンジン説**である。前者では、爆発によって放出される超新星エジェクタが周囲にある密度の濃い**星周物質**と衝突することで力学的エネルギーを散逸し、熱化したエネルギーが最終的に可視光放射として星間空間に放出されるというものである。超新星エジェクタの力学的エネルギーのうちの無視できない割合を衝突によって散逸させるほど質量の大きな星周物質を爆発直前の星の周囲に作り出す機構についてはまだ謎が多いものの、現象論的にはこのような形での明るい可視光放射が可能であり、実際にスペクトルに細い水素の輝線が認められる超高輝度超新星(**II_n 型超新星**)についてはこのシナリオが最も受け入れられている。後者のシナリオでは、超新星爆発を起こした星の中心に残されるコンパクト天体(高速回転する**中性子星**または**ブラックホール降着円盤**)がその回転エネルギーや降着によって解放される重力エネルギーを超新星エジェクタに注入することで明るい可視光放射のエネルギーを賄うというものである。以上のように、超高輝度超新星の起源について、主に可視光放射のエネルギー源という観点から複数のシナリオが提案されている状況であるが、そのどれが観測的事実を過不足なく説明するのか、といった点については未だ活発な議論が続けられていた。

2. 研究の目的

本研究課題においては、超高輝度超新星をはじめとした特異な超新星の起源解明を目指し、**放射流体力学シミュレーション**を用いた光度曲線の計算を通して特異な超新星の多次元的な描像を確立することを目指した。超高輝度超新星に関しては、前述のように可視光放射のエネルギーを賄うための複数のシナリオが提案されている状況にあり、簡易的な光度曲線モデルや 1 次元球対称を仮定した(放射)流体力学シミュレーションが行われ、光度曲線等の観測によって得られる情報との比較が行われていた。一方で、複数のモデルによる理論的な光度曲線が同等に観測される光度曲線の説明に成功するなど、シナリオの峻別にはさらに詳細な理論モデルの構築が必要となる。本研究では、これらのシナリオに立脚した複数の多次元数値シミュレーションを行うことで、今までの簡易的な光度曲線モデルでは不可能であった、観測者の視線方向ごとの光度曲線を計算する。また、数値シミュレーションによって得られた、超新星エジェクタの密度・速度・温度構造などから、それぞれのシナリオにおいて予想される電磁波シグナル(スペクトル,偏光など)の特徴を整理する。その上で、既に提案されている複数のシナリオの峻別あるいはその方法を提案することを目標とした。

3. 研究の方法

本研究課題では、多次元放射流体力学シミュレーションコードの開発・整備を行い、超高輝度超新星の起源シナリオに基づいたシミュレーションを実施することで、前述の目的の達成を目指した。超高輝度超新星からの熱放射を考える上では、星周相互作用説においてはエジェクタの力学的エネルギーから放射エネルギーへの変換が重要となり、中心エンジン説においてはコンパクト天体から注入されるエネルギー(高エネルギー放射)によるエジェクタの加速や構造の変化が重要となる。いずれの場合においてもガスと放射との吸収・放射を介したエネルギー・運動量のやり取りが重要な系であり、放射流体力学に基づいた数値シミュレーションが極めて強力な手段となる。

シミュレーションコードは**適合格子法 (Adaptive mesh refinement; AMR)**を採用し、MPIによるノード間並列および openMP によるスレッド並列により、並列計算機上での実行が可能なよう実装されている。主に自然科学研究機構 国立天文台が運用するスーパーコンピュータの計算資源を利用し、数 100 コアから 1,000 コア程度を利用した 2 次元放射流体シミュレーションおよび 3 次元流体シミュレーションを実施した。本研究課題の主要な研究成果となったシミュレーションの具体的なセットアップは以下の通りである。

(1) 星周相互作用説に基づいた超新星エジェクタ-星周物質衝突

超新星エジェクタ-星周物質相互作用のシミュレーションにおいては、自由膨張する球対称エジェクタを様々なパラメータを持った星周物質に衝突させることで、どれだけのエネルギーを解放し輝くのかを計算する。内側の球対称エジェクタとしては、超新星エジェクタとしてよく仮定される密度構造(内側と外側で異なる冪指数(1 および 10)を仮定した半径の冪関数; $\rho \propto r^{-n}$) および自由膨張に対応する速度則(動径速度が半径と時刻の比で与えられる; $v=r/t$)を採用し、10 太陽質量の全質量および 10^{51} erg の爆発エネルギーという大質量星の重力崩壊として典型的なものを仮定する。その上で、球対称エジェクタの周りには、外縁半径 5×10^{15} cm の位置まで続く、球対称および円盤状の星周物質を仮定する。星周物質の質量や形状といったパラメータは、その形成過程と密接に関係していると考えられるが、形成過程そのものが未解明であることから、これらパラメータには不定性が大きい。本課題においては、それらパラメータを変えたいくつかのモデルを 2 次元放射流体シミュレーションコードによって計算することで、結果がどのように依存するかを考察した。具体的には、0.1, 1, 10 太陽質量の星周物質質量、円盤状星周物質の赤道面からの開き角として 10, 20 度を仮定した球対称 3 モデル+非球対称 6 モデルの計算である。

(2) 中心エンジン説に基づいた超新星エジェクタ中心へのエネルギー注入

中心エンジンモデルについては、星周相互作用モデルと同様に 10 太陽質量および 10^{51} erg のエネルギーを持った超新星エジェクタを仮定する。膨張するエジェクタの中心部分にコンパクト天体を模擬したエネルギー注入を行う。本課題では、このようなセットアップに対して 3 次元流体力学シミュレーションおよび 2 次元放射流体力学シミュレーションを行い、中心でのエネルギー注入に対してエジェクタがどのように応答するのかを考察する。

4. 研究成果

本研究で実施した数値シミュレーションおよびその解析によって得られた成果を「3. 研究の方法」で挙げた 2 課題を中心に紹介する。

(1) 星周相互作用説に基づいた超新星エジェクタ-星周物質衝突

本課題では、まず球対称星周物質を仮定したシミュレーションを行い、1 次元球対称シミュレーションとの相違に着目して結果を解析した。一連のシミュレーションでは、超新星エジェクタと星周物質の衝突により、星周物質/エジェクタ側にそれぞれ伝搬する順行/逆行衝撃波の発達を再現し、衝撃波による力学的エネルギーの散逸を熱源とした明るい熱放射が確認できた。一方で、超新星エジェクタ-星周物質境界において、Rayleigh-Taylor 不安定性や Vishniac 不安定性といった流体力学不安定性が発達し、**超新星エジェクタおよび星周物質がどちらも球対称であっても、結果としてエジェクタや星周物質の密度構造は球対称から外れる**という結果も確認できた。特に、10 太陽質量の球対称星周物質を仮定したモデルにおいては、星周物質が高密度で

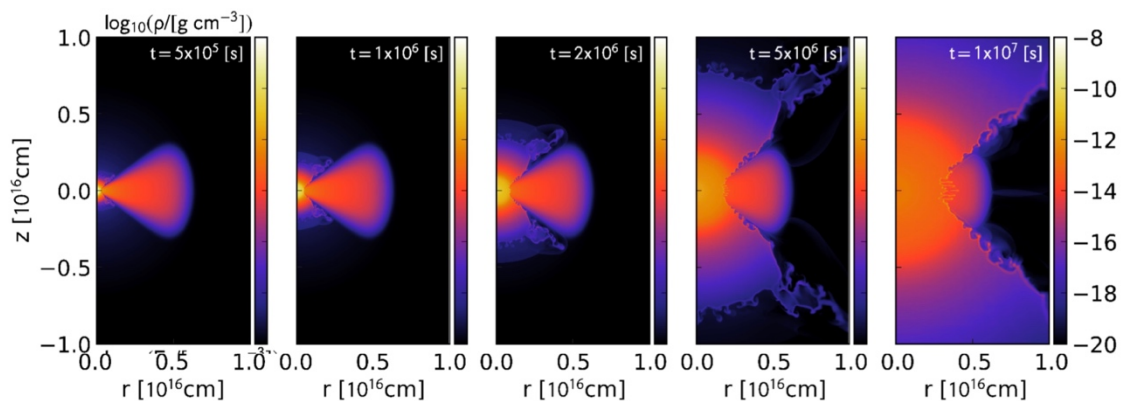


図 1: 円盤型星周物質と超新星エジェクタとの衝突シミュレーションの結果。密度の高い部分が赤く、低い部分が青く表現されている。左から右へ時間が経過するとともに超新星エジェクタが膨張し、赤道面($z=0$)に集中して存在する星周物質と衝突することで力学的エネルギーを放射に変換し輝く(Suzuki, Moriya, Takiwaki 2019)。

あることから衝撃波下流の媒質の放射効率が
高く、その結果、不安定性が効率的に発達し
ていることも確認した。また、それぞれのモ
デルから予想される熱放射の(全波長を積分
した)光度曲線は、最大光度付近においては1
次元球対称の場合と大きな違いはなく、1
次元球対称を仮定した光度曲線モデリングか
らの超新星エジェクタ質量や力学的エネルギー
、星周物質質量などの諸量の見積りには問
題がないことが分かった。

一方で、1次元球対称モデルとは定性的に
異なる結果が予想され、実際に大きな相違が
確認されたのが円盤状星周物質モデルであ
る。図1に円盤状星周物質を仮定した1モ
デルの結果を示した。図に示されたように、
時間が経過するとともに球対称超新星エジ
ェクタが膨張し、赤道面($z=0$)に集中した星周物質
と衝突することで、減速したエジェクタの力
学的エネルギーが熱エネルギーを介して放射
へと変換される。力学的エネルギーの散逸と
熱放射への変換自体は球対称モデルと同じ過
程が起こっているものの、放射エネルギーは
赤道面に近い部分で局所的に生み出され、そ
の後拡散によって対称軸($r=0$)方向へと膨張するエ
ジェクタにも輸送される。このような球対称モデルと定性的に異なる力学的進化は光度曲線の
違いにも反映される。2次元放射流体力学シミュレーションから直接的に計算される視線方向ご
との光度曲線は、視線方向が赤道面に近く星周物質に遮られる場合と視線方向が対称軸に近く
星周物質に遮られない場合で異なる特徴を示す。図2に模式的にまとめられたように、前者の場
合、光度曲線は遅い進化タイムスケールを示す一方で、後者の場合は早い立ち上がりによって特
徴づけられる光度曲線を示す。これらの考察およびスペクトル進化として予想される特徴など
をまとめ、査読論文に成果を発表した(Suzuki, Moriya, & Takiwaki 2019)。

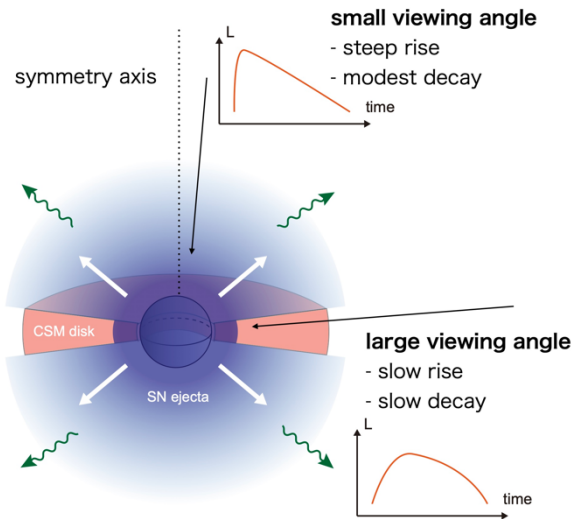


図2: 円盤状星周物質と超新星エジェクタとの衝突によ
って光る突発天体とその光度曲線の模式図。

(2) 中心エンジン説に基づいた超新星エジェクタ中心へのエネルギー注入

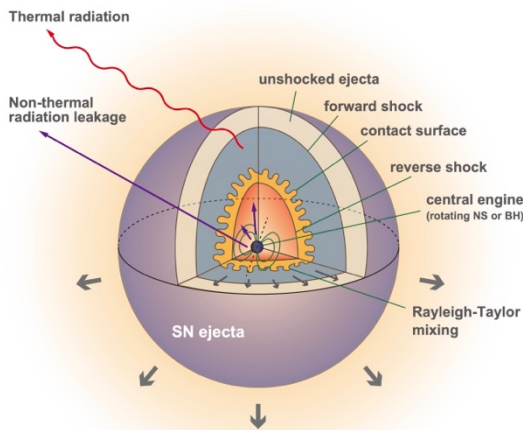
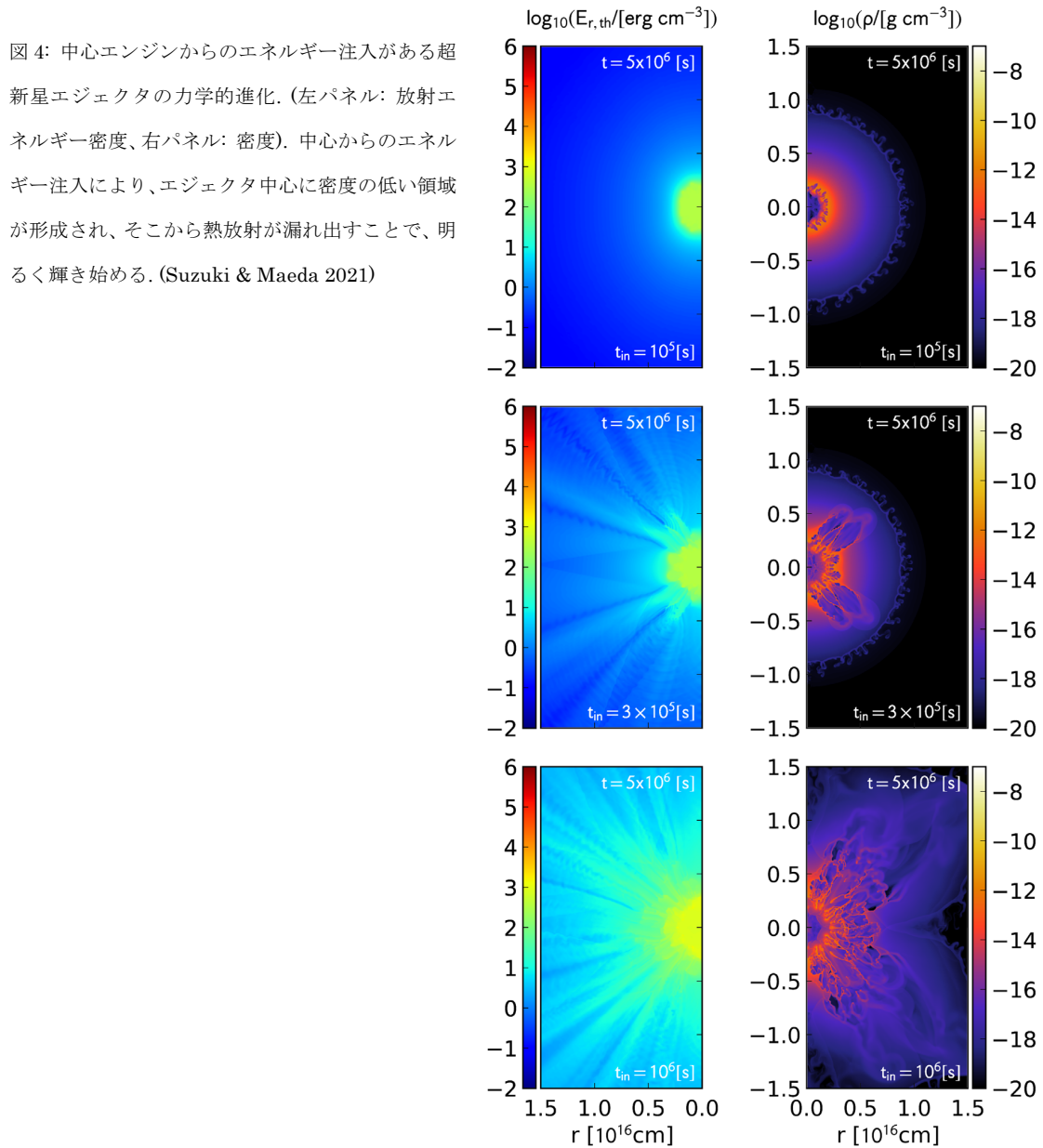


図3: 中心エンジンによって駆動される超新星エジ
ェクタの模式図

図3に模式的に示した中心エンジンモデルの検
証において行ったのは、3次元流体力学シミュレ
ーションおよび2次元放射流体力学シミュレ
ーションである。放射輸送を考えない3次元シミュレ
ーションにおいては、エネルギー注入としては膨張
する超新星エジェクタの中心に高温ガスの形でエ
ネルギーを加えることで、超新星エジェクタがど
のように応答するかを調べた。その結果、エネルギ
ー注入を行った中心領域と外側の境界において、
レイリー=テイラー不安定性の発達によって境界
面が揺らぎ、動径方向に沿って密度が高い領域と
低い領域に分かれる様子が確認された。最終的に
は注入した高温ガスは密度が低い領域を通して高
速流として漏れ出す形でエジェクタ最外層まで
到達する様子が見られた。この特徴は先行してす
でに行っていた2次元流体力学シミュレーション
(Suzuki & Maeda 2017)の結果を再現するもので
あり、より現実的な3次元流体シミュレーションに
よって多次元的な密度構造が実現することが改めて
確認された。この成果は査読論文誌において発
表されている(Suzuki & Maeda 2019)。

また、それに続いて実施した2次元放射流体力学シミュレーションでは、中心領域において非
熱光子の形でのエネルギー注入を考え、注入した非熱光子が超新星エジェクタに吸収されるこ
とで熱化し、熱的光子に変換される過程を再現した。この放射流体力学シミュレーションにおい
ては、前述の流体力学シミュレーションにおいて高速流の形で中心部から噴き出した高温ガス
に代わって、熱化しない状態の非熱光が超新星エジェクタを突き破って星間空間へと抜けてい
く様子が確認された。このような効果は1次元球対称を仮定したシミュレーションでは勿論の
こと、放射輸送を加味しない流体力学シミュレーションでも見られないものであり、多次元放射
流体力学シミュレーションを行ったことで初めて明らかになった過程と言える。この成果は査
読論文誌において発表されている(Suzuki & Maeda 2021)。

以上の多次元流体・放射流体力学シミュレーションによって明らかになった、超新星エジェクタの力学的進化や複雑な密度構造は、中心エンジンによって駆動される超高輝度超新星のスペクトル形成において重要な役割を果たす可能性が高く、中心天体によって実際に超新星エジェクタ内部でのエネルギー注入が行われたことを示す観測的特徴として機能することも期待される。本課題の成果によって、中心エンジンによって駆動される超新星エジェクタの現実的な多次元構造を世界で初めて提供することができた。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Suzuki Akihiro, Maeda Keiichi	4. 巻 925
2. 論文標題 Chemical Stratification in a Long Gamma-Ray Burst Cocoon and Early-time Spectral Signatures of Supernovae Associated with Gamma-Ray Bursts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 148 ~ 148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac3d8d	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 Suzuki Akihiro, Moriya Takashi J., Takiwaki Tomoya	4. 巻 899
2. 論文標題 A Systematic Study on the Rise Time-Peak Luminosity Relation for Bright Optical Transients Powered by Wind Shock Breakout	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 56 ~ 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aba0ba	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 Suzuki Akihiro, Nicholl Matt, Moriya Takashi J., Takiwaki Tomoya	4. 巻 908
2. 論文標題 Extremely Energetic Supernova Explosions Embedded in a Massive Circumstellar Medium: The Case of SN 2016aps	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 99 ~ 99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abd6ce	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 該当する

1. 著者名 Suzuki Akihiro, Maeda Keiichi	4. 巻 908
2. 論文標題 Two-dimensional Radiation-hydrodynamic Simulations of Supernova Ejecta with a Central Power Source	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 217 ~ 217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abd54c	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 Suzuki Akihiro, Maeda Keiichi	4. 巻 880
2. 論文標題 Three-dimensional Hydrodynamic Simulations of Supernova Ejecta with a Central Energy Source	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 150 ~ 150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab2ad3	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 Suzuki Akihiro, Moriya Takashi J., Takiwaki Tomoya	4. 巻 887
2. 論文標題 Supernova Ejecta Interacting with a Circumstellar Disk. I. Two-dimensional Radiation-hydrodynamic Simulations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 249 ~ 249
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab5a83	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16件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 鈴木昭宏
2. 発表標題 ジェット伝搬シミュレーションによるガンマ線バーストが付随する超新星の高速エジェクタ成分の研究
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 鈴木昭宏
2. 発表標題 ロングガンマ線バーストを伴う超新星からの早期電磁波放射
3. 学会等名 第34回理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木昭宏
2. 発表標題 ロングガンマ線バーストを伴う超新星の早期観測とGRBジェット伝播シミュレーション
3. 学会等名 YITP workshop「Extreme Outflows in Astrophysical Transients」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木昭宏
2. 発表標題 中心エンジンモデルに基づいた超高輝度超新星の2次元輻射流体シミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木昭宏
2. 発表標題 Light curve modeling of the extremely bright supernova 2016aps
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木昭宏
2. 発表標題 超新星や関連する突発天体現象からの電磁波放射と数値シミュレーション
3. 学会等名 国立天文台天文シミュレーションプロジェクト ユーザーズミーティング(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木昭宏
2. 発表標題 ガンマ線バーストを伴う超新星の早期観測とGRBジェットシミュレーション
3. 学会等名 国立天文台研究会「星の錬金術から銀河考古学へ」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Suzuki Akihiro, Moriya Takashi J., Takiwaki Tomoya
2. 発表標題 Radiation hydrodynamic simulations of supernova ejecta interacting with circum-stellar disks
3. 学会等名 Fifty-One Erg: an international workshop on the physics and observations of supernovae and supernova remnants (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suzuki Akihiro, Maeda Keiichi
2. 発表標題 Supernova ejecta with a powerful central engine
3. 学会等名 Supernova Remnant II: an odyssey in space after stellar death (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suzuki Akihiro, Maeda Keiichi
2. 発表標題 Dynamical evolution of supernova ejecta with a central energy source
3. 学会等名 High energy astrophysics Japan-Israel workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木昭宏、守屋堯、滝脇知也
2. 発表標題 星周円盤と相互作用する超新星の2次元放射流体力学シミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suzuki Akihiro, Maeda Keiichi
2. 発表標題 Dynamical evolution of supernova ejecta with a central energy source
3. 学会等名 Multi-Messenger Astrophysics in the Gravitational Wave Era (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木昭宏、守屋堯、滝脇知也
2. 発表標題 星周円盤と相互作用する超新星の2次元放射流体シミュレーション
3. 学会等名 シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木昭宏、守屋堯、滝脇知也
2. 発表標題 星周円盤と相互作用する超新星の2次元放射流体シミュレーション
3. 学会等名 第32回理論懇シンポジウム「天文学・宇宙物理学の変遷と新時代の幕開」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suzuki Akihiro, Moriya Takashi J., Takiwaki Tomoya
2. 発表標題 Supernova ejecta colliding with a disk-like circum-stellar medium
3. 学会等名 The Evolution of Massive Stars and Formation of Compact Stars: from the Cradle to the Grave (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木昭宏
2. 発表標題 星周物質との相互作用で光る突発天体における最大光度と増光時間の関係
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>星周物質と衝突して光る突発天体の系統的1次元輻射流体力学シミュレーション https://sci.nao.ac.jp/main/en/articles/systematic-radiation-hydrodynamic-simulations-of-transients-powered-by-circum-stellar-interaction</p>
--

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
---------	---------