

令和元年6月7日現在

機関番号：34506

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05440

研究課題名（和文）多次元相対論的輻射流体・元素合成計算で探るガンマ線バーストの起源

研究課題名（英文）Gamma-ray bursts studied with multi-dimensional radiation hydrodynamics and nucleosynthesis calculations

研究代表者

富永 望 (Tominaga, Nozomu)

甲南大学・理工学部・教授

研究者番号：00550279

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 16,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では球面調和関数を用いて非等方・非弾性散乱であるコンプトン散乱を取り扱う相対論的多次元多波長輻射輸送計算コードの開発を完了し、相対論的光子輸送計算コードとの比較や様々なテスト計算を行い、その結果が一致することを確認した。また、輻射輸送計算のみならず、GRB相対論的ジェット加速機構とその元素組成の関係を明らかにし、相対論的多次元多波長輻射輸送計算コードを適用する対象として観測的研究も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでGRBの輻射流体計算に適用可能な計算コードの開発に成功したのはモンテカルロ法を用いた手法のみであり、本研究で開発した輻射輸送方程式を直に解く相対論的多次元多波長輻射輸送計算コードはGRB輻射機構の解明に向けた独立した手法として重要である。また、それに加えてGRB相対論的ジェットの加速機構とその元素組成の関係を明らかにしたことは新しい着眼点であり、GRB輻射機構・加速機構の理解を深めると考えられる。

研究成果の概要（英文）：I developed a time-dependent, multi-group, multi-dimensional relativistic radiative transfer code, which is required to numerically investigate radiation from relativistic fluids. I implemented treatments of time dependence, multifrequency bins, Lorentz transformation, and elastic Thomson and inelastic Compton scattering to the publicly available spherical harmonic discrete ordinate method code. This implementation is validated using various test problems and comparisons with the results from a relativistic Monte Carlo code. Furthermore, I clarified the relation between the acceleration mechanism and nuclear composition of relativistic jets and performed observational studies of transients for which the radiative transfer code can be applied.

研究分野：天体物理学

キーワード：ガンマ線バースト 超新星爆発 輻射輸送計算

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ガンマ線バースト (GRB) は 1 秒以下から 100 秒程度という短時間に 10^{51} エルグものエネルギーをガンマ線で放射する宇宙最大の爆発である。この短時間放射は即時放射と呼ばれ、その後残光という現象が続く。GRB は非常に明るく遠方でも観測可能なため、GRB 残光を背景光とした宇宙再電離時期の推定、GRB 即時放射の相関関係を用いた宇宙論パラメータの決定、GRB 発生数を用いた星形成史の決定など、GRB を観測手段とした遠方宇宙研究が盛んに行われている。しかし、GRB の起源は未だ明らかとなっておらず、その起源の解明は 1970 年代の GRB の発見以来長年のテーマであり、また、GRB を用いた遠方宇宙研究をさらに発展させるためにもその解明が急務である。

これまで GRB の理論研究は主に一様流体を仮定した解析的な研究やオーダー評価によって発展してきたが、特に近年 GRB 即時放射・残光および付随する超新星爆発の観測データが増えるにつれてそれらの理論研究では解釈できない観測例が増えてきていた。そのため、GRB の輻射流体計算を実現する重要性が認識されていた。一方で、輻射輸送計算は宇宙物理学の分野で長年研究されてきたテーマであるが、空間 3 次元、運動量空間 3 次元の 6 次元方程式を解く必要があり、その実現は最先端の研究である。これまで、流体の速度が光速より十分遅い、運動量空間角度方向の積分 (拡散近似、M1 近似) などの近似によって計算を簡略化する手法が頻りに用いられてきた。しかし、GRB では、熱的放射を伴う高温のコクーンおよびそれに囲まれた相対論的ジェットが存在し、輻射と流体がコンプトン散乱によって相互作用していることから、その輻射輸送計算には非球対称相対論的流体、ローレンツ変換、輻射の非等方性、非弾性非等方散乱、流体との相互作用を取り扱うことが可能な多次元相対論的輻射流体計算が必要となり、これまで GRB の輻射輸送計算はほとんど行われてこなかった。

2. 研究の目的

ガンマ線バースト (GRB) は非常に明るく遠方宇宙の観測手段として活用されている。しかし、その起源は未だ明らかとなっておらず、GRB を用いた遠方宇宙研究を発展させるためにもその解明が急務である。そこで、本研究では、観測データと定量的に比較可能な理論研究が必要と考え、多次元多波長相対論的輻射流体・元素合成計算コードを開発することを目的とした。

3. 研究の方法

直交座標系を用いて多次元相対論的輻射輸送計算コードを構築した後に、軸対称極座標系へ変更しテスト計算を行う。また、GRB においてはコンプトン散乱が重要であることから多波長性を考慮した計算コードを開発しテスト計算を行う。それにより、球面調和関数によるコンプトン散乱および光子の波長変化の取り扱いを確認する。その後、多次元相対論的流体計算コードによって現実的な星のモデルを用いて相対論的ジェットが放出される計算を行って密度構造進化を得、その密度構造進化に基づき、輻射から流体へのフィードバックを考えずに輻射輸送計算を行う。

また、輻射流体計算が実現した後は、相対論的ジェットの加速機構と矛盾のない輻射機構を用いて輻射流体計算を行う必要がある。そのために必要不可欠な相対論的ジェットの構成要素を明らかにするために、相対論的ジェットの加速機構と相対論的ジェット中に含まれる元素組成の関係を調べる。

4. 研究成果

(1) 多次元多波長相対論的輻射流体計算コードの開発

並進対称性を仮定した直交座標系に基づいた多次元相対論的輻射輸送計算コードを構築した。図 1 は、静止系で等方的に光を放射する光源が光速の 99.5% という非常に速い速度で移動している際に研究室系で観測される光のエネルギーを表している。相対論的に移動する物体からの光は相対論的ビーミングによって、移動する方向に偏り、その角度がローレンツ因子の逆数程度となることが知られている。光強度のローレンツ変換を行うことにより、相対論的ビーミングを取り扱えていることが分かる。

また、本研究で元にした Spherical Harmonic Discrete Ordinate Method (SHDOM) は、定常解を取り扱う輻射輸送計算コードであったが、時間依存性を取り扱うように変更した (図 2)。さらに、輻

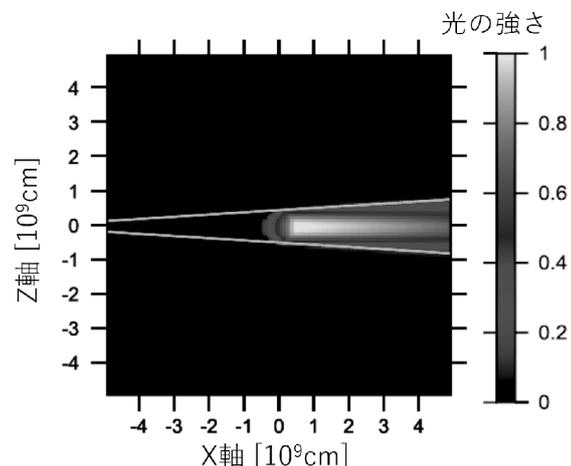


図 1 : X 軸方向に光速の 99.5% で移動している光源からの光。相対論的ビーミングによって光が X 軸方向に集中している。線は理論的に光が集中すると考えられている範囲を示す。

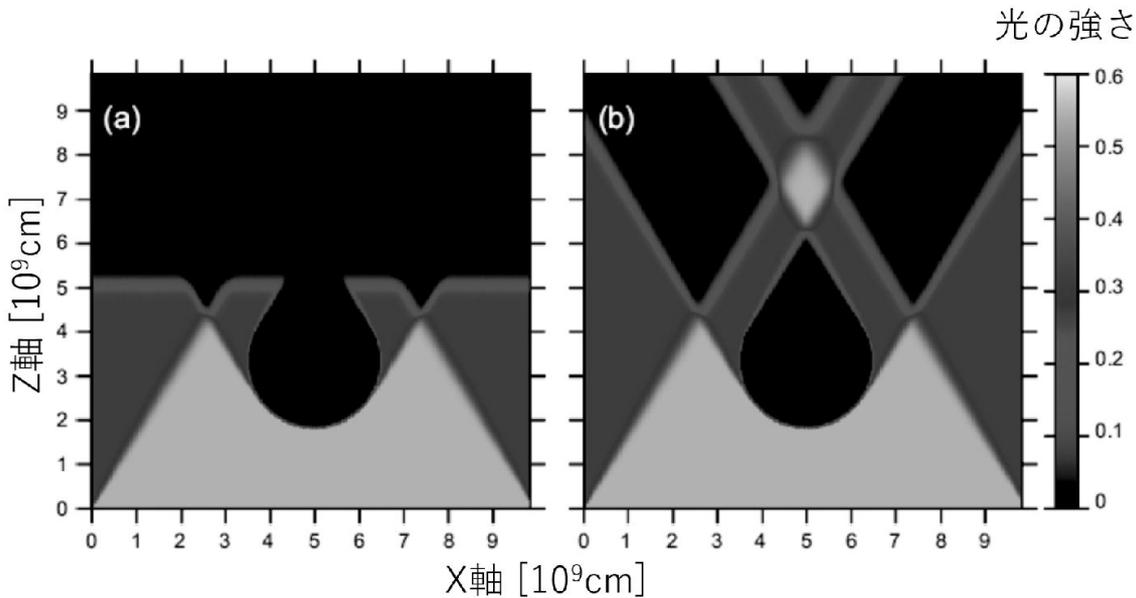


図 2 : Z軸から 30 度と -30 度の方向に X 軸から放射された光のエネルギー。(x,z) = (5.0x10⁹cm, 3.3x10⁹cm) の位置には半径 1.5x10⁹cm の吸収体が置いてある。空間角度方向の積分(拡散近似、M1 近似)を用いた計算では光が吸収体の後ろに回り込んだり、光が衝突したりするが、光強度を解く本計算では光線同士が相互作用せずすり抜ける。左は光放射後 0.2 秒後、右は 1.0 秒後の様子である。

射輸送方程式を用いて光強度を直接解く計算コードであるため、空間角度方向の積分(拡散近似、M1 近似)を用いた計算では正しく取り扱うことができない吸収体の後ろに形成される影や進行方向の異なる光線の交差などを正しく解けていることを示した(図 2)。

さらに、球面調和関数を用いて非等方散乱を取り扱う SHDOM の特徴を活かし、非等方散乱でありかつ非弾性散乱であるコンプトン散乱を取り扱うことを可能にした(図 3)。当初予定していなかったがコンプトン散乱の非弾性散乱という特徴を正しく取り扱うには多波長輻射輸送計算を実現する必要があることが明らかとなり、エネルギー幅を区切った多波長輻射輸送計算コードを構築した。その結果を我々の開発した相対論的光子輸送計算コードの結果と比較し、コンプトン散乱を正しく取り扱えていることを確認した(図 3)。その他、相対論的多次元多波長輻射輸送計算コードと相対論的光子輸送計算コードの比較を通じた比較を行い、相対論的多次元多波長輻射輸送計算コードが正しく相対論的輻射輸送を解けていることを確認した。

我々の開発した相対論的光子輸送計算コードは、一般に高エネルギー実験との比較で使用されている電子ガンマ線シャワーソフトウェア (ELECTRON GAMMA SHOWER [EGS]) との比較を通じて、非相対論的な場合にその結果が一致することを確認している。

さらに、本計算コードを軸対称

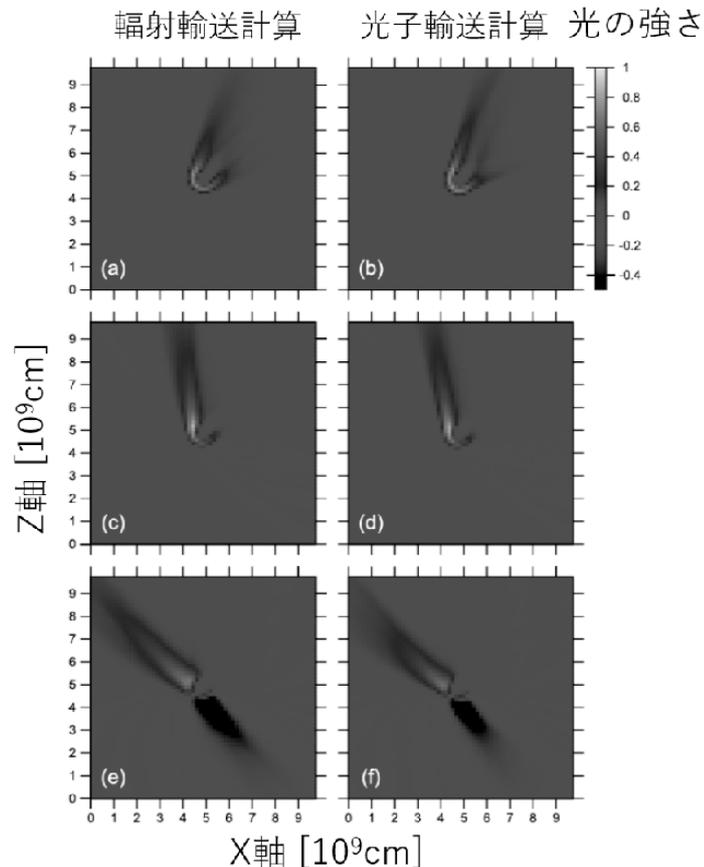


図 3 : 中心に静止している散乱体に X 軸 Z 軸から放射された光が散乱された後の Z 軸方向のフラックス。散乱はコンプトン散乱であり、入射光のエネルギーは電子の静止質量エネルギーである。

左側が輻射輸送計算の結果であり、右側が光子輸送計算の結果である。また、上から順に、エネルギー範囲が電子の静止質量エネルギーの 0.88-0.99 倍、0.66-0.77 倍、0.44-0.55 倍である。

系に拡張し、非相対論的な場合にその結果が EGS と一致することを確認し、現実的な星のモデルを用いた爆発計算に基づく輻射輸送計算を行った。

(2) GRB の相対論的ジェットの元素組成

GRB の相対論的ジェットの加速機構として、ニュートリノ対消滅に依って生成された熱エネルギーによって加速するという説や強い磁場による磁気エネルギーによって加速するという説が提案されている。GRB の輻射機構は相対論的ジェットの加速機構によることから、加速機構をどのように制限するかは重要である。

本研究では GRB 相対論的ジェット中における核反応を計算し相対論的ジェットに含まれる元素の組成を明らかにした。その結果、相対論的ジェットが磁場によって加速されている場合は、質量数 20 を超える重い元素が合成されるが、相対論的ジェットが熱エネルギーによって加速される場合は、水素・ヘリウムなどの軽元素のみが含まれることを明らかにした。

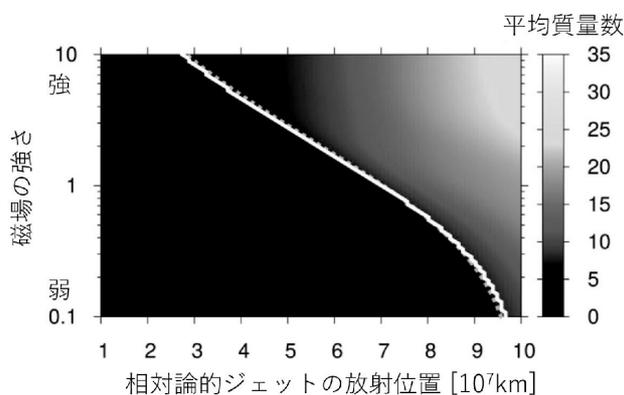


図 4：相対論的ジェットが形成される位置と相対論的ジェット中の磁場の強さによって、相対論的ジェット中の核子の平均質量数がどのように変わるかを示している。磁場が強くと相対論的ジェットが外で形成されると重い核子が残る。

以上の研究で、相対論的多次元多波長輻射輸送計算コードの開発に成功している。これまで GRB の輻射流体計算に適用可能な相対論的多次元多波長輻射輸送計算コードの開発に成功したのはモンテカルロ法を用いた手法のみであり、輻射輸送方程式を直に解く本研究の手法は独立した手法として重要である。また、輻射輸送計算のみならず、GRB 相対論的ジェットの加速機構とその元素組成の関係を明らかにしたことは全く新しい着眼点と言える。それに加えて、相対論的多次元多波長輻射輸送計算コードを適用する対象として有力な GRB や高速電波バーストの観測的研究も行った。以上のことから、本研究の成果は GRB 輻射機構および相対論的ジェットの加速機構に対する理解を深めると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 46 件)

1. Suwa, Y., Tominaga, N., and Maeda, K. "Importance of ^{56}Ni production on diagnosing explosion mechanism of core-collapse supernova", MNRAS, 483, (2019) 3607-3617 (<https://doi.org/10.1093/mnras/sty3309>).
2. Kokubo, M., Mitsuda, K., Morokuma, T., Tominaga, N., Tanaka, M., Moriya, T. J., Yoachim, P., Ivezić, Ž., Sako, S., and Doi, M. "A Long-duration Luminous Type II In Supernova KISS15s: Strong Recombination Lines from the Inhomogeneous Ejecta-CSM Interaction Region and Hot Dust Emission from Newly Formed Dust", ApJ, 872, (2019) 135 (<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaff6b>).
3. Tominaga, N., Niino, Y., Totani, T., Yasuda, N., Furusawa, H., Tanaka, M., Bhandari, S., Dodson, R., Keane, E., Morokuma, T., Petroff, E., and Possenti, A. "Optical follow-up observation of Fast Radio Burst 151230", PASJ, 70, (2018) 103 (<https://doi.org/10.1093/pasj/psy101>).
4. Niino, Y., Tominaga, N., Totani, T., Morokuma, T., Keane, E., Possenti, A., Sugai, H., and Yamasaki, S. "A search for optical transients associated with fast radio burst 150418", PASJ, 70, (2018) L7 (<https://doi.org/10.1093/pasj/psy102>).
5. Tanaka, S. J., Toma, K., and Tominaga, N. "Confinement of the Crab Nebula with tangled magnetic field by its supernova remnant", MNRAS, 478, (2018) 4622-4633 (<https://doi.org/10.1093/mnras/sty1356>).
6. Katsuda, S., Takiwaki, T., Tominaga, N., Moriya, T. J., and Nakamura, K. "Progenitor Mass Distribution of Core-collapse Supernova Remnants in Our Galaxy and Magellanic Clouds Based on Elemental Abundances", ApJ, 863, (2018) 127 (<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aad2d8>).
7. Nakaoka, T., Kawabata, K. S., Maeda, K., et al. (全 7 名中 25 番目) "The Low-luminosity Type IIP Supernova 2016bkv with Early-phase Circumstellar Interaction", ApJ, 859, (2018) 78 (<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabee7>).
8. Hatsukade, B., Tominaga, N., Hayashi, M., Konishi, M., Matsuda, Y., Morokuma, T., Morokuma-Matsui, K., Motogi, K., Niinuma, K., and Tamura, Y. "Obscured Star Formation

- in the Host Galaxies of Superluminous Supernovae", *ApJ*, 857, (2018) 72 (<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aab616>).
9. Ishigaki, M. N., Tominaga, N., Kobayashi, C., and Nomoto, K. "The Initial Mass Function of the First Stars Inferred from Extremely Metal-poor Stars", *ApJ*, 857, (2018) 46 (<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aab3de>).
 10. Tominaga, N., Tanaka, M., Morokuma, T., et al. "Subaru Hyper Suprime-Cam Survey for an optical counterpart of GW170817", *PASJ*, 70, (2018) 28 (<https://doi.org/10.1093/pasj/psy007>).
 11. Katsuda, S., Morii, M., Janka, H.-T., et al. (全 11 名中 12 番目) "Intermediate-mass Elements in Young Supernova Remnants Reveal Neutron Star Kicks by Asymmetric Explosions", *ApJ*, 856, (2018) 18 (<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aab092>).
 12. Utsumi, Y., Tominaga, N., Tanaka, M., et al. "A challenge to identify an optical counterpart of the gravitational wave event GW151226 with Hyper Suprime-Cam", *PASJ*, 70, (2018) 1 (<https://doi.org/10.1093/pasj/psx125>).
 13. Tanaka, M., Utsumi, Y., Mazzali, P. A., Tominaga, N., et al. "Kilonova from post-merger ejecta as an optical and near-Infrared counterpart of GW170817", *PASJ*, 69, (2017) 102 (<https://doi.org/10.1093/pasj/psx121>).
 14. Utsumi, Y., Tanaka, M., Tominaga, N., et al. "J-GEM observations of an electromagnetic counterpart to the neutron star merger GW170817", *PASJ*, 69, (2017) 101 (<https://doi.org/10.1093/pasj/psx118>).
 15. Chiaki, G., Tominaga, N., and Nozawa, T. "Classification of extremely metal-poor stars: absent region in A(C)-[Fe/H] plane and the role of dust cooling", *MNRAS*, 472, (2017) L115-L119 (<https://doi.org/10.1093/mnras/1/slx163>).
 16. Morokuma, T., Tanaka, M., Tanaka, Y. T., et al. (全 5 名中 83 番目) "OISTER optical and near-infrared monitoring observations of peculiar radio-loud active galactic nucleus SDSS J110006.07+442144.3", *PASJ*, 69, (2017) 82 (<https://doi.org/10.1093/pasj/psx075>).
 17. Jiang, J.-A., Doi, M., Maeda, K., et al. (全 10 名中 25 番目) "A hybrid type Ia supernova with an early flash triggered by helium-shell detonation", *Natur*, 550, (2017) 80-83 (<https://doi.org/10.1038/nature23908>).
 18. Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. (全 2377 名中 3652 番目) "Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger", *ApJ*, 848, (2017) L12 (<https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa91c9>).
 19. Tanaka, S. J., Chiaki, G., Tominaga, N., and Susa, H. "Blocking Metal Accretion onto Population III Stars by Stellar Wind", *ApJ*, 844, (2017) 137 (<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa7e2c>).
 20. Bauer, F. E., Treister, E., Schawinski, K., et al. (全 20 名中 25 番目) "A new, faint population of X-ray transients", *MNRAS*, 467, (2017) 4841-4857 (<https://doi.org/10.1093/mnras/stx417>).
 21. Moriya, T. J., Mazzali, P. A., Tominaga, N., et al. "Light-curve and spectral properties of ultrastripped core-collapse supernovae leading to binary neutron stars", *MNRAS*, 466, (2017) 2085-2098 (<https://doi.org/10.1093/mnras/stw3225>).
 22. Yamanaka, M., Nakaoka, T., Tanaka, M., et al. (全 39 名中 41 番目) "Broad-lined Supernova 2016coi with a Helium Envelope", *ApJ*, 837, (2017) 1 (<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa5f57>).
 23. Yoshida, M., Utsumi, Y., Tominaga, N., et al. "J-GEM follow-up observations of the gravitational wave source GW151226*", *PASJ*, 69, (2017) 9 (<https://doi.org/10.1093/pasj/psw113>).
 24. Morii, M., Ikeda, S., Tominaga, N., et al. "Machine-learning selection of optical transients in the Subaru/Hyper Suprime-Cam survey", *PASJ*, 68, (2016) 104 (<https://doi.org/10.1093/pasj/psw096>).
 25. Bassa, C. G., Beswick, R., Tingay, S. J., et al. (全 8 名中 13 番目) "Optical and radio astrometry of the galaxy associated with FRB 150418", *MNRAS*, 463, (2016) L36-L40 (<https://doi.org/10.1093/mnras/1/slw151>).
 26. Ishiyama, T., Sudo, K., Yokoi, S., Hasegawa, K., Tominaga, N., and Susa, H. "Where are the Low-mass Population III Stars?", *ApJ*, 826, (2016) 9 (<https://doi.org/10.3847/0004-637X/826/1/9>).
 27. Morokuma, T., Tominaga, N., Tanaka, M., et al. "An effective selection method for low-mass active black holes and first spectroscopic identification", *PASJ*, 68, (2016) 40 (<https://doi.org/10.1093/pasj/psw033>).
 28. Tolstov, A., Nomoto, K., Tominaga, N., Ishigaki, M. N., Blinnikov, S., and Suzuki, T. "Multicolor Light Curve Simulations of Population III Core-Collapse Supernovae: From Shock Breakout to ^{56}Co Decay", *ApJ*, 821, (2016) 124

- (<https://doi.org/10.3847/0004-637X/821/2/124>).
29. Tanaka, M., Tominaga, N., Morokuma, T., et al. "Rapidly Rising Transients from the Subaru Hyper Suprime-Cam Transient Survey", *ApJ*, 819, (2016) 5 (<https://doi.org/10.3847/0004-637X/819/1/5>).
 30. Katsuda, S., Acero, F., Tominaga, N., et al. "Evidence for Thermal X-Ray Line Emission from the Synchrotron-dominated Supernova Remnant RX J1713.7-3946", *ApJ*, 814, (2015) 29 (<https://doi.org/10.1088/0004-637X/814/1/29>).
 31. González-Gaitán, S., Tominaga, N., Molina, J., et al. "The rise-time of Type II supernovae", *MNRAS*, 451, (2015) 2212-2229 (<https://doi.org/10.1093/mnras/stv1097>).
 32. Tominaga, N., Shibata, S., and Blinnikov, S. I. "Time-dependent Multi-group Multi-dimensional Relativistic Radiative Transfer Code Based on the Spherical Harmonic Discrete Ordinate Method", *ApJS*, 219, (2015) 38 (<https://doi.org/10.1088/0067-0049/219/2/38>).
 33. Suwa, Y. and Tominaga, N. "How much can ^{56}Ni be synthesized by the magnetar model for long gamma-ray bursts and hypernovae?", *MNRAS*, 451, (2015) 282-287 (<https://doi.org/10.1093/mnras/stv901>).
 34. Shibata, S. and Tominaga, N. "Nuclear composition of magnetized gamma-ray burst jets", *PASJ*, 67, (2015) 49 (<https://doi.org/10.1093/pasj/psv020>).
 35. Yamanaka, M., Maeda, K., Kawabata, K. S., Tanaka, M., Tominaga, N., et al. "OISTER Optical and Near-Infrared Observations of Type Ia Supernova 2012Z", *ApJ*, 806, (2015) 191 (<https://doi.org/10.1088/0004-637X/806/2/191>).

[学会発表](計 15 件)

1. 富永望, "FRB151230 の可視光追観測", 日本天文学会 2018 年秋季年会, 2018
2. Nozomu Tominaga, "Nucleosynthesis in core-collapse supernovae and hypernovae", TDLI workshop on the exploding universe, 2018 (招待講演)
3. Nozomu Tominaga, "Macronova/Kilonova and the EM counterpart of GW170817", The 3rd PANDA symposium, 2018 (招待講演)
4. 富永望, "GW170817 の電磁波追観測 Electromagnetic follow-up observations of GW170817", 日本物理学会 2018 年春季年会, 2018 (招待講演)
5. 富永望, "GW170817: すばる望遠鏡 HSC を用いた可視光対応天体の探索", 日本天文学会 春季年会, 2018
6. Nozomu Tominaga, "Search for an optical/NIR counterpart of GW170817", Gravitational wave physics and astronomy: Genesis, 2017 (招待講演)
7. Nozomu Tominaga, "Searches for Electromagnetic Counterparts of Gravitational Waves", Neutron Star Mergers and Galactic Chemical Evolution, 2017 (招待講演)
8. Nozomu Tominaga, "Supernova nucleosynthesis and extremely metal-poor stars", A Celebration of CEMP and a Gala of GALAH 2017, 2017 (招待講演)
9. Nozomu Tominaga, "Supernova Nucleosynthesis", OMEG2017, 2017 (招待講演)
10. 富永望, "重力波源の可視光追観測", 連星中性子星・ブラックホールを含む重力波源の電磁波対応天体, 2017 (招待講演)
11. 富永望, "超新星残骸観測から探る超新星爆発", 日本天文学会 2017 年春季年会, 2017 (招待講演)
12. 富永望, "HSC Transient Survey", マルチメッセンジャー天文学研究会, 2017 (招待講演)
13. 富永望, "Transient Survey with Subaru/Hyper Suprime-Cam", Gravitational-Wave Astrophysics in the High Event Rate Regime, 2016 (招待講演)
14. 富永望, "Search for optical counterparts of gravitational waves", Compact stars and gravitational waves, 2016 (招待講演)
15. 富永望, "Development of a multidimensional relativistic radiative transfer code", FRONTIERS OF NONLINEAR PHYSICS 2016, 2016 (招待講演)

[その他]

ホームページ等

<http://tpweb2.phys.konan-u.ac.jp/~tominaga/>