

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24244036

研究課題名(和文)大質量星の進化における重力崩壊型超新星の総合的研究

研究課題名(英文)Comprehensive Research of Core-Collapse Supernovae and The Evolution of Massive Stars

研究代表者

山田 章一 (Yamada, Shoichi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：80251403

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、太陽の約10倍以上の質量を持ついわゆる大質量星において、その準静的進化段階からコアの重力崩壊と超新星爆発を経て中性子星またはブラックホールの形成に至る過程を理論的に研究した。まず、近似的シミュレーションを数100のモデルに対して行い、爆発前のコアのコンパクトさが爆発のしやすさを決める重要なパラメータであることを明らかにした。一方、人為的近似を用いないより厳密な数値計算を京スーパーコンピュータで行い、現在の知見を総動員したモデルでも実は爆発を再現できないことを明らかにした。また、コードの相対論化を進めた。他方、回転星の歪んだ形状を数値的に求める独自の新たな手法を完成させた。

研究成果の概要(英文)：In this project, we have conducted theoretical investigations on the evolution of massive stars from the quasi-static phase through the gravitational core-collapse and the subsequent supernova explosion up to the formation of a neutron star or a black hole. We have first performed approximate simulations of core-collapse and explosion for several hundreds of models and made clear that the compactness of the stellar core just prior to the collapse is the single most important quantity to determine the success or failure of explosion. We have also accomplished more rigorous simulations on the K supercomputer and demonstrated that the most sophisticated computations cannot reproduce the supernova explosion. We have then upgraded our code so that general relativity could be handled. We have finally developed a novel formulation to numerically obtain various stellar configurations in rotational equilibrium so that we could study the effect of rotation on the evolution of massive stars.

研究分野：数物系科学

キーワード：超新星 大質量星 重力崩壊 シミュレーション コンパクト天体

1. 研究開始当初の背景

恒星の構造・進化論は宇宙物理学の中で最も確立した分野の一つであるが、進化の最後に相当するコンパクト天体の形成は残されたフロンティアの一つである。特に、大質量星の進化の最後に一般的に起こると考えられている重力崩壊型超新星は、 10^{51} erg という大き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にもかかわらず、その重力崩壊から爆発に至るメカニズムは極めて長きにわたる理論宇宙物理学の大きな謎であった。しかし、近年の系統的探査による観測の大幅な進展と、計算機資源の充実による大規模シミュレーションの発展により、大質量星の進化の最終段階の理論的研究の焦点は、そのランドスケープを描き出すことに移りつつあった。

2. 研究の目的

申請者グループが独自に開発してきたマクロ、ミクロ両過程に対する数値計算コードを駆使し、ニュートリノ輸送と高密度物質の状態方程式を詳細に考慮しつつ、2次元(軸対称, 2D)及び3次元(3D)の数値シミュレーションを系統的に行うことにより、主系列時に太陽の約10~50倍の質量をもつ、いわゆる典型的な大質量星において、超新星爆発が起こるメカニズムを明らかにすることを目的とする。また、大質量星の自転の効果を正確に取り入れたうえで重力崩壊に至る準静的進化を研究するため、バロクリニックな回転平衡形状を数値的に求める全く新しい独自の手法を確立する。さらには、ブラックホール形成も視野に入れ、ニュートリノと重力波放出の定量的な評価を一般相対論的にを行い、その観測可能性を定量的に探る。

3. 研究の方法

主として4つの課題に以下のような方法で取り組む。(1) IDSA を用いて軸対称 2D 及び 3D の重力崩壊シミュレーションを多数のモデルに対して系統的に行い、親星毎の爆発の有無、爆発エネルギーや中性子星の質量、スピン、固有速度などを調べる。(2) ボルツマン方程式を差分化して解くことにより、より精度の高いシミュレーションを少数のモデルに対して行う。(3) 回転を正確に考慮した大質量星の準静的進化計算に向けた独自の全く新しい回転平衡形状を数値的に求める方法の確立。(4) ブラックホール形成も扱えるようにするため、コードの一般相対論化を進める。これらに加え、近傍超新星が起こった場合に備え、ニュートリノと重力波放出を定量的に評価し、その観測可能性を重力崩壊のいろいろなシナリオに対して議論する。

4. 研究成果

以下、研究目的及び研究方法で述べた4つの主課題について、順にその成果を述べていくことにする。ただし(4)については(1)と(2)に含めて言及する。

(1) IDSA 法を用いた系統的探査

① 3D 超新星シミュレーション

セルフコンシステントなニュートリノ輻射輸送計算 (IDSA 法) に基づく 3 次元超新星爆発シミュレーションを京や国立天文台をはじめとする超並列計算機を使用して実行した

(図 1)。11.2 太陽質量モデルに対して、数値分解能依存性、初期摂動不定性を詳細に調べた。結果、従来の 2 次元計算と 3 次元計算 (3D) の質的な差異: 2 次元 (2D)

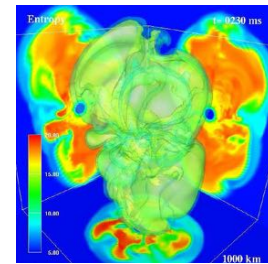


図 1: IDSA 法を用いた三次元超新星シミュレーション例、ニュートリノ加熱により流体が重力的な束縛を振り切り、爆発が開始している様子を示す。

では乱流エネルギーが小スケールから大スケールに遷移するインバースカスケードが起こるのに対して、3次元

では小スケールへのカスケードが凌駕すること、乱流エネルギーの散逸の結果、3D では 2D に比べ爆発を起こすのに困難であることを明らかにすることができた (Takiwaki et al. ApJ (2014))。この結果を受けて、超新星の直接撮像観測でおよそ 16~30 太陽質量の超新星が見つからないその物理的原因 (Red Supergiant problem) の解決に導くアイデアを提唱することができた (Horiuchi et al. (2014), MNRAS Letters)。

② 2D ランドスケープ探査

様々な親星モデルに対して、ニュートリノ輸送を考慮した 2 次元超新星数値計算を行うことによって、爆発にともなう物理量の親星依存性を調べた。親星モデルには Woosley ら (Woosley, Heger, & Weaver (2002) RMP) の太陽金属量を持つ 101 モデル、金属欠乏星のモデル 247 モデル、ゼロ金属量のモデル 30、計 378 モデルを採用した。中心コアの重力崩壊から衝撃波の発達(およそ 1.5 秒)の時間発展について IDSA 法でニュートリノ輸送を解きながらシミュレートし、得られた爆発エネルギー・ニュートリノ光度・原始中性子星質量等を詳細に解析した。その結果、親星コアの重力集中度を表すコンパクトネスがニュートリノ加熱爆発の成否を支配的に決めるパラメータであることを指摘した (Nakamura et al. PASJ, (2015))。またそれにより、ブラックホール形成を起こす可能性が高い親星を同定することができた。

③ 3D 自転重力崩壊シミュレーション

核燃焼をネットワーク計算で流体計算に含む新たな計算手法の開拓を行ったうえで、3次元回転重力崩壊シミュレーションを系統的に行った(Nakamura et al. ApJ, (2014))。図2に示されているように、最新の星の進化計算が予想するコアの回転率($\Omega =$

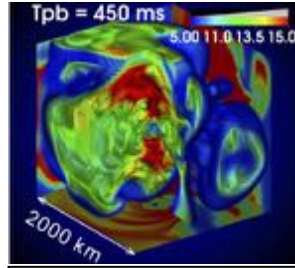


図2: 最新の星進化計算から予想されるコアの自転率を用いた3次元自転重力崩壊計算の一例。星の自転軸と垂直方向(水平面方向)に爆発している様子を示す。

0.2 rad/s)を用いた結果、自転の効果によってコアバウンス後、スパイラル状の衝撃波流体不安定性モード(spiral SASI)が発達することを明らかにした。この不安定性モードの成長により、水平面方向のゲイン質量が増大することが、星が水平面方向に爆発する物理的起因になっていることを突き止めた。このシミュレーションでは、いわゆるライトバルブ近似と呼ばれる、原始中性子星からのニュートリノ光度を仮定したニュートリノ加熱冷却スキームを用いたものであった。IDSA法を用いたシミュレーションでもこの成果を基本的にサポートする結果を得ることができた

(Takiwaki et al. MNRAS Letters in press)。

④ 3D 強磁場自転乱流シミュレーション

マグネターをはじめとする強磁場中性子星の生成メカニズムを理解するためには、星の自転に加え磁場の効果まで含めた大規模3D計算が不可欠である。磁場の成長を定量的に理解するためには、磁気回転不安定性(MRI)が本質的役割を果たすことが知られていたが、従来の2D計算では、ダイナモ

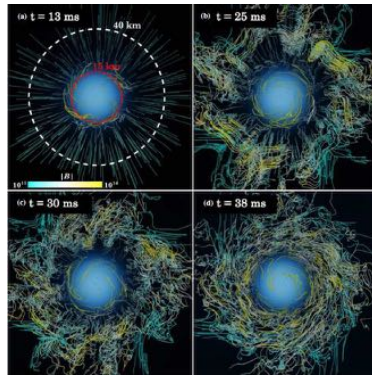


図3: 原始中性子星にフォーカスした強磁場自転超新星の乱流シミュレーション。バウンス後(左上パネル)から40ミリ秒(右下パネル)まで、セミグローバルシミュレーションで追うことに成功した。

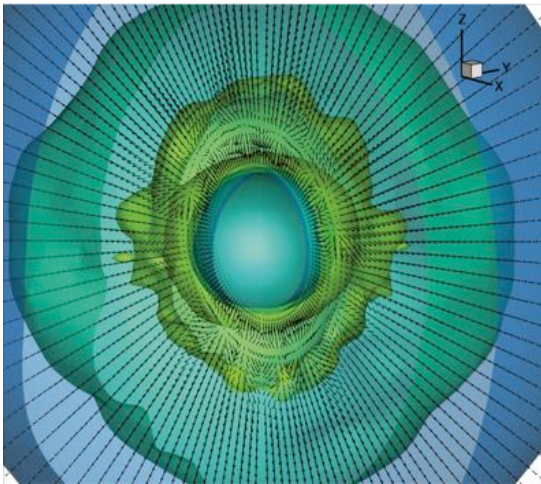
の効果をコンシステントに取り扱うことができないので、3D計算が急務となっていた。技術的側面としては、相対論的平均場近似に基づいた核力状態方程式(Shenらのもの)をゴドノフ法を用いた流体ソルバーに組み込むことに成功した。図3に示すように、MRIの成長率が最も高い原始中性子星付近にフォーカスすることで、十分な数値分解能を持った3D計算を行うことができた(Masada et al. ApJ Letters, (2015))。図3は、初期成層していた磁場形状(図3の左上パネルの無数の線)が乱流の効果で、攪拌され(左上⇒右上⇒左下⇒右下パネルに時間発展していく)、原始中性子星内部(図の左上の丸い点線で囲まれた領域(半径50 km))へ乱流磁場が侵入していく様子を示している。乱流粘性によって、初期の星の自転が散逸され原始中性子星付近に加熱を及ぼす効果も指摘することができた。今後、計算領域を広げSASIなどの効果も含め、超新星コアにおける磁場成長の物理を明らかにしていくことが不可欠である。

(2) ボルツマンソルバーによる精密計算

大質量星進化の末路を定めて、中性子星あるいはブラックホールが形成する境目を定めるためには、重力崩壊による爆発現象を精密に探ることが不可欠である。ここで鍵を握るのが現在まで近似的な手法が用いられてきたニュートリノ輻射輸送計算である。(1)で明らかになったように多次元流体とニュートリノ加熱が組み合わせり爆発が起こることは確実であるが、ニュートリノ加熱量に不定性があり、その評価もままならなかった。本研究では、ボルツマン方程式を解く計算コードにより、この問題点を解消することに成功した。この成果は国際的に高く評価されており、他の超新星研究グループにおいてもニュートリノ輻射輸送の定量的評価の重要度が高まり、分野全体への波及効果を持つこととなった。以下に個別成果を述べる。

① 3D ニュートリノ輻射輸送の特性

研究開始時にプロトタイプの状態であった、6次元ボルツマン方程式の計算コード(ボルツマンソルバー)は、並列化・高速化が行われ、大規模行列の反復解法アルゴリズムの新たな開発成果を生み出した結果、本格的な3次元超新星コア分布への適用が可能となった。これにより世界で初めて3次元空間でのニュートリノ輻射輸送の特性を解明した。特に、非動径方向のニュートリノ流束、非対称な角度分布によるエディントンテンソルの非対角項の寄与が初めて明らかになった。



図は3次元超新星コアのニュートリノ分布流束の様子

さらに、近似手法である Ray-by-ray 法による計算を行うことで、近似による誤差を定量的に明らかにした。この近似手法は方向依存性を強く出しすぎる弱点があり、ニュートリノ加熱率などの量で 20%程度の過大/過少評価する可能性があることがわかり、爆発を定めるにはニュートリノ輻射輸送の精密計算が不可欠であることを明確に示した。

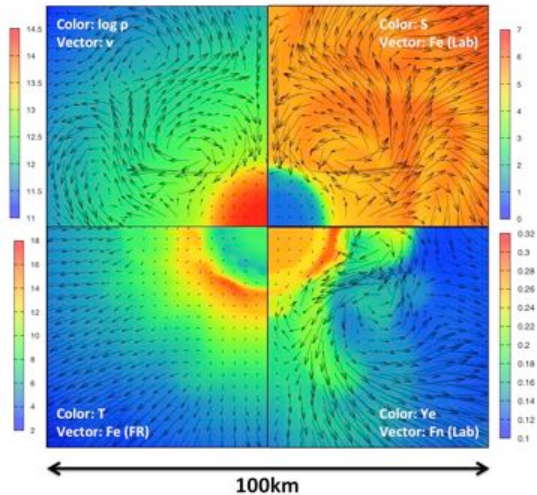
②ニュートリノ輻射流体計算コード完成

固定した物質分布の場合だけでなく、変動する流体分布を扱うため、ボルツマンソルバーを流体計算コードと統合して、新たなニュートリノ輻射流体計算コードを完成させて、コアバウンス後に発達する多次元の衝撃波ダイナミクスを追うことが可能となった。この際、重力崩壊のように高速な流体運動においては、特殊相対論的なボルツマン方程式の扱いが必須であることを示し、物質に閉じ込められたニュートリノが引きずられて一緒に運動する効果を記述する計算コードへの拡張に成功した。相対論を記述する多次元ボルツマン・ニュートリノ輻射流体計算コードは世界で唯一のものである。この際、衝突項の扱いは座標系変換により複雑さを伴うが、電子散乱のようなエネルギー変化を伴う反応系を扱うことも可能として、世界標準のニュートリノ反応系を取り込んだ計算コードとなった。さらに、中心に誕生する原始中性子星が揺れ動く現象を扱えるようムービングメッシュ法を新たに開発して組み込み、将来の一般相対論的な扱いへの拡張も整備した。これは究極の目標となる第一原理計算の一般相対論的多次元ニュートリノ輻射流体計算の基礎となるものである。

③ 2D重力崩壊長時間発展計算の成功

完成したボルツマン輻射流体コードは、超並列規模のシミュレーションへのスケールアップが行われて、京コンピュータにおける長時間計算が行われた。大質量星の重力崩壊から打ち上がった衝撃波が2次元軸対称のもとで時間発展して、爆発に至るかどうかを定めるニュートリノ輻射流体計算に成功し

た。



図は2次元超新星コアバウンス直後の様子

このような精密ニュートリノ輻射流体計算は世界で初のものである。この結果、太陽質量の 11, 15 倍の質量を持つ親星を初期条件として、バウンス後の 400 ms, 600ms と長時間発展を追ったにも関わらず、爆発には至らないことを発見した。これまでの近似計算では爆発に至る例が一般的に見られていたため、本研究の結果はニュートリノ輻射の精密記述が爆発可否を決定する際に鍵となることを明確に示したものであり、世界的にもインパクトのある成果となった。本研究の成果は、これまでの大きな不定性の一つを取り除くものであり、今後の研究において核物理の影響を定量的に決定する方向へと繋がっている。さらに、この数値シミュレーションを様々な親星に適用して重力崩壊現象の全容を系統的に明らかにする予定である。

④ ニュートリノ・核物理の整備・検証

ボルツマンソルバーによるニュートリノ輻射流体計算を行うためには、組み込むニュートリノ・原子核物理の整備と検証が欠かせない。本研究では計算コードの開発と並行して、状態方程式データテーブルの拡張、ニュートリノ軽元素反応率の導出などを行い、数値シミュレーションにおける影響を定めることを行ってきた。特に、原子核混合組成比を考慮した状態方程式の構築は、(c)の重力崩壊計算に組み込まれ、電子捕獲反応率による影響を緻密に定めることに寄与した。また、ニュートリノ反応の影響の探索やニュートリノ放出シグナルの予測なども行って、ニュートリノ観測施設へのデータ提供に結びつく成果となった。

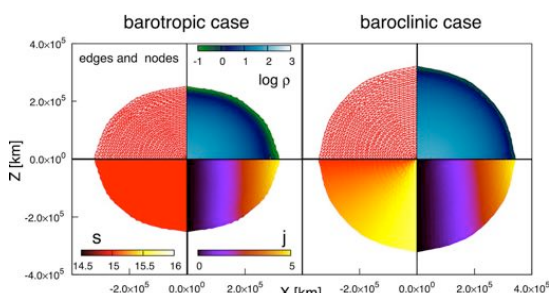
(3) 回転平衡形状計算の新たな定式化

進化の最後に重力崩壊を起こすような大質量星は一般に主系列時に高速に回転している。このため、その構造と進化を計算するには自転を考慮する必要があるが、従来は球対

称モデルに遠心力の効果を平均的に付け加えるだけであった。しかし、一般に自転星は球対称ではなく扁平な形状をしており、密度、温度、元素の分布はみな非球対称である。したがって軸対称性のみを仮定した回転平衡状態を定量的に求める必要がある。その際、等密度面と等圧力面が一般に一致しない、いわゆる baroclinic な平衡形状を扱う必要がある。さらには、こうした平衡状態の集合として星の進化を表す場合、角運動量とエントロピーの分布の時間変化を適切に扱う必要がある。特に後者はこれまでの研究において極めて困難な点であった。というのも、それらがみなオイラー的記述によっていたからである。

本研究では、ラグランジュ変分法に基づく独自の定式化によりこの問題を解決することに成功した。具体的には、回転平衡状態が各流体素片に与えられたエントロピーと角運動量の分布に対してある汎関数に停留値を与えることを用い、各流体素片の位置を基礎変数とする定式化を行った。まず、任意に選んだ初期形状を三角形分割し、各頂点に質量、エントロピー、角運動量を与え、上述の汎関数を三角形分割に応じて近似したエネルギー関数を最小にする頂点の位置をモンテカルロ法を用いて探した。その結果、適切な smoothing を適用すれば、異なる初期形状から同じ回転平衡状態が得られること、またそれらが他のオイラー的手法で得られた解とよく一致することを示し、論文として発表した。

下図はそうした解の一例である。ラグラ



ンジュ法を用いてこうした平衡解を求めた例は今までに無く、回転平衡形状を星の進化計算に用いるうえでの一つの画期的成果となっている。また、これまでの球対称モデルで通常仮定されてきた、いわゆる shellular 的回転則を持った平衡形状が得られたことも重要である。今後は、核融合反応とエネルギー輸送の計算を組み込むのと同時に、モンテカルロ法よりも効率と精度のよい方法を開発していく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 60 件) 全て査読有

2015 年度

1. K. Hayama, T. Kuroda, K. Nakamura and S. Yamada, “Circular polarizations of gravitational waves from core-collapse supernovae: A clear indication of rapid

rotation”, PRL, 2016, 116, 151102, pp5
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.151102

2. K. Sumiyoshi, T. Takiwaki, H. Matsufuru and S. Yamada, “Multi-dimensional Features of Neutrino Transfer in Core-Collapse Supernovae”, ApJS, 2015, 216, pp37
DOI: 10.1088/0067-0049/216/1/5

3. N. Yasutake, K. Fujisawa and S. Yamada, “A Novel Formulation by Lagrangian Variational Principle for Rotational Equilibria: Toward Multi-Dimensional Stellar Evolutions”, MNRAS Lett., 2015, 446, p56-60
DOI: 10.1088/0067-0049/216/1/5

4. K. Nakamura, T. Takiwaki, T. Kuroda, K. Kotake, “Systematic features of axisymmetric neutrino-driven core-collapse supernova models in multiple progenitors”, PASJ, 2015, 67, pp17
DOI: 10.1093/pasj/psv073
2014 年度

5. K. Sumiyoshi, T. Takiwaki, H. Matsufuru and S. Yamada, “Multi-dimensional Features of Neutrino Transfer in Core-Collapse Supernovae”, ApJ, 2015, 216, p5-41
DOI:10.1088/0067-0049/216/1/5

6. H. Nagakura, K. Sumiyoshi and S. Yamada, “Three-dimensional Boltzmann-Hydro code for core-collapse in massive stars I. special relativistic Treatments”, ApJS, 2014, 214, p16-34
DOI: 10.1088/0067-0049/214/2/16

7. T. Takiwaki, K. Kotake and Y. Suwa, “A Comparison of Two- and Three-dimensional Neutrino-hydrodynamics Simulations of Core-collapse Supernovae”, ApJ, 2014, 786, pp8
DOI : 10.1088/0004-637X/786/2/83

8. S. Horiuchi, K. Nakamura, T. Takiwaki, K. Kotake and M. Tanaka, “The red supergiant and supernova rate problems: implications for core-collapse supernova physics”, MNRAS Lett., 2014, 445, pL99-L103
DOI: 10.1093/mnrasl/slu146
2013 年度

9. K. Nakamura, T. Takiwaki, K. Kotake and N. Nishimura, “Revisiting Impacts of Nuclear Burning for Reviving Weak Shocks in Neutrino-driven Supernovae”, ApJ, 2014, 782, pp14
DOI:10.1088/0004-637X/782/2/91

10. S. Furusawa, S. Yamada, K. Sumiyoshi and H. Suzuki, “New equation of state based on liquid drop approximation of heavy nuclei and quantum approach to light nuclei for core collapse supernova simulations”, ApJ, 2013, 772, pp16

DOI:10.1088/0004-637X/772/2/95

2012年度

11. T. Takiwaki, K. Kotake and Y. Suwa, “Three-dimensional Hydrodynamic Core-collapse Supernova Simulations for an 11.2 Msun Star with Spectral Neutrino”, ApJ, 2012, 749, pp17
DOI:10.1088/0004-637X/749/2/98

[学会発表] (計 52 件)

1. S. Yamada, “Core-Collapse Supernova Theory: the current status and future prospects”, 「Quarks to Universe in Computational Science(QUCS2015)」(招待講演) 2015年11月6日, 春日野国際フォーラム(奈良)
2. K. Kotake, “Explosion theory of core-collapse supernovae”, IAU XXIV general assembly, 「Bridging Laboratory Astrophysics and Astronomy」(招待講演) 2015年8月5日, Hawaii (USA)
3. K. Sumiyoshi, “Multi-dimensional neutrino transfer in core-collapse supernovae and its implications” 「International workshop on Nuclear Physics and Astrophysics of Neutron-Star Mergers and Supernovae and the Origin of R-Process Elements」(招待講演) 2014年9月8日~2014年09月12日, European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas, Trento (Italy)
4. K. Kotake, “Multi-D Core-Collapse Supernova Explosions and the Multi-Messenger Signatures”, 「The 40th COSPAR Scientific assembly」(招待講演) 2014年8月2日~2014年8月10日 Lomonosov Moscow State University, Moscow (Russia)
5. K. Sumiyoshi, “Data sets of equation of state for core-collapse supernovae: their impact on dynamics and signals”, 「International workshop on The Structure and Signals of Neutron Stars, from Birth to Death」(招待講演) 2014年3月26日 Auditorium al Duomo, Florence (Italy)
6. S. Yamada, “My Personal Overview of Core-Collapse Supernovae Theory”, 「Multi-Messenger from Core-Collapse Supernovae」(招待講演) 2013年12月3日福岡大学(福岡)
7. K. Kotake, “Multi-D Core-Collapse Supernova Explosions and the Multi-Messenger Signatures”, 「Supernovae and Gamma-ray bursts」(招待講演) 2013年10月29日京都大学(京都)
8. K. Kotake, “Explosion mechanism of core-collapse supernovae and the astrophysical multi-messengers”, 「13th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics(TAUP)」2013年9月12日 Asilomar,

California (USA)

9. K. Sumiyoshi, “Numerical modeling of core-collapse supernovae with progress in nuclear physics and Supercomputing”, 「International Symposium: Quarks to Universe in Computational Science(QUCS2012)」(招待講演) 2012年12月13日~2012年12月16日 Nara Prefectural New Public Hall (奈良)

[図書] (計 1 件)

S. Yamada, “Gravitational Collapse of Massive Stars and EOS” in ‘Neutron Stars: The Aspect of High Density Matter, Equations of State and Observables’, Nova Science Publishers, 2012, p259-287

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 章一 (YAMADA SHOICHI)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 80251403

(2) 研究分担者

住吉 光介 (SUMIYOSHI KOHSUKE)
沼津工業高等専門学校・教養科・教授
研究者番号: 30280720

固武 慶 (KOTAKE KEI)
福岡大学・理学部・准教授
研究者番号: 20435506

(3) 研究連携者

前田 恵一 (MAEDA KEI-ICHI)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 70199610

橋本 正章 (HASHIMOTO MASA AKI)
九州大学・理学研究院・教授
研究者番号: 20228422

長瀧 重博 (NAGATAKI SHIGEHRO)
理化学研究所・准主任研究員
研究者番号: 60359643

滝脇 知也 (TAKIWAKI TOMOYA)
国立天文台・助教
研究者番号: 50507837

諏訪 雄大 (SUWA YUDAI)
京都大学・基礎物理学研究所・准教授
研究者番号: 40610811

長倉 洋樹 (NAGAKURA HIROKI)
California Institute of Technology・
学振海外特別研究員
研究者番号: 00616667