

研究種目： 基盤研究（C）  
 研究期間：2005～2008  
 課題番号： 17540267  
 研究課題名（和文） 大質量星の重力崩壊とコンパクト天体の形成にともなう  
 高エネルギー天体现象の研究  
 研究課題名（英文） Study on High Energy Phenomena in Massive Star Collapses and  
 Formations of Compact Objects  
 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

## 研究成果の概要：

低速で自転する大質量星の重力崩壊に着目した研究を行った。特にニュートリノがどのように放出されるか、またそれによって高密度物質の状態方程式に関してどこまで情報を引き出すことができるかを調べた。その結果、ニュートリノ観測によりブラックホール形成と高密度領域での核物質の圧縮率が推定できることなどを明らかにした。また、超新星コアでおこる流体力学不安定性についても線形解析と数値計算により系統的な研究を行った。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	1,200,000	0	1,200,000
2006年度	800,000	0	800,000
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,500,000	450,000	3,950,000

## 研究分野：理論宇宙物理学

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：高エネルギー天体、大質量星、重力崩壊、超新星、中性子星、  
 ブラックホール、ニュートリノ、重力波

## 1．研究開始当初の背景

長い継続時間を持つガンマ線バーストが大質量星の重力崩壊により引き起こされることがほぼ確実視されるようになり、従来の超新星爆発などとあわせて統一的にそのメカニズムを考える必要が出てきた。

## 2．研究の目的

質量が太陽の約10倍から1000倍の大質量星がその準静的進化の後に起こす重力崩壊のダイナミクスや、ニュートリノ、重力波放出などの高エネルギー物理過程を詳

細に研究し、重力崩壊の結果生成される高密度コンパクト天体を分類し、超新星、ハイパーノバ、ガンマ線バースト、マグネター、クオーク星といったいわゆる高エネルギー天体の形成機構を明らかにすることである。

## 3．研究の方法

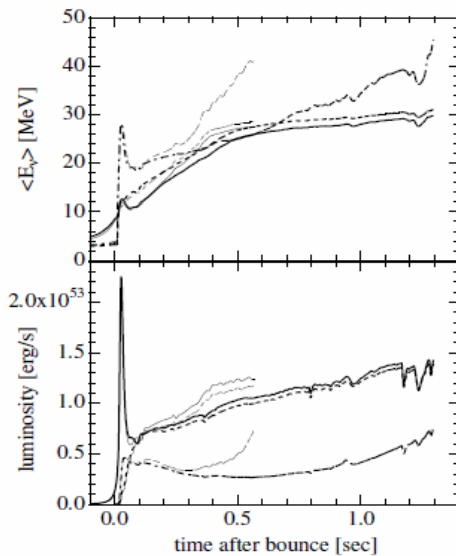
ガスの運動とその中でのニュートリノ輸送とを同時にかつ定量的に数値計算することにより、重力崩壊の鍵をにぎる物理過程の機構を調べるとともに、従来の電磁波とは異なる観測手段としてニュートリノや重力波

を想定し、それらの具体的なシグナルを理論的に予言する。

#### 4. 研究成果

##### [大質量星の重力崩壊の長時間進化]

超新星コアの1次元球対称なダイナミクスのシミュレーションで、バウンス後1秒にわたる輻射流体力学の計算を行い、状態方程式の違いが与える影響を明らかにした。この研究の延長として、ブラックホールをつくる重力崩壊モデルの計算も行い、ニュートリノ放射における通常の超新星とは異なる特徴を指摘した。特に前者では、ニュートリノの光度とスペクトルが通常の超新星と定性的に異なるため、その観測からブラックホールの形成がわかること、またブラックホール形成までにかかる時間から高密度核物質の性質が推定できる可能性があることを世界で始めて指摘し、Physical Review Letters に発表した(下図)。また、原始中性子星の冷却を含む更なる長時間計算をするため、準定常近似を用いたコードを開発し、これまでにバウンス後15秒まで計算ができています。

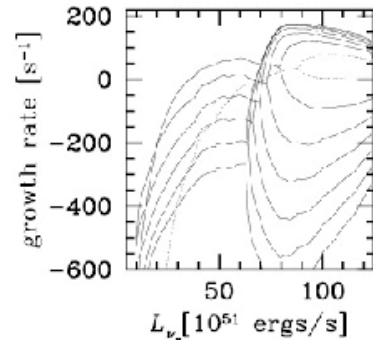


##### [非常に大きい質量を持った星の重力崩壊]

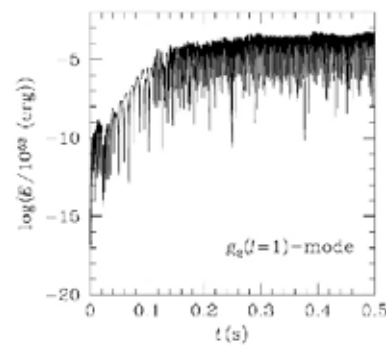
現在の宇宙でも存在すると考えられている40倍の太陽質量をもった星と、宇宙初期に第1世代星としてのみ存在したと考えられる100-1000倍の太陽質量を持った星に着目した。どちらも重力崩壊のあとにブラックホールを形成すると考えられる。球対称性を仮定し、一般相対論的な輻射流体力学シミュレーションを行い、ダイナミクスの特徴とニュートリノの光度、スペクトルを計算し、その観測可能性を議論した。

##### [降着定常衝撃波の不安定性]

近年話題になっている Standing Accretion Shock Instability (SASI) と対流を同じ定式化のもとで線形解析し(下図)、それらの関係を明らかにするとともに、2次元軸対称を仮定した数値計算で、不安定な非線形成長とその飽和を詳細に明らかにした。また、そこから放出される重力波についても計算を行った。さらにこの不安定性へニュートリノとアルファ粒子との非弾性衝突が及ぼす影響も調べた。



これに関連して、中性子星の g-mode 固有振動の振幅(下図)、それが超新星爆発に果たす役割についての研究結果を発表した。また、定常降着衝撃波の3次元非軸対称モードに対する不安定性の数値的解析を行い、線形成長ならびに非線形飽和の様相を明らかにした。

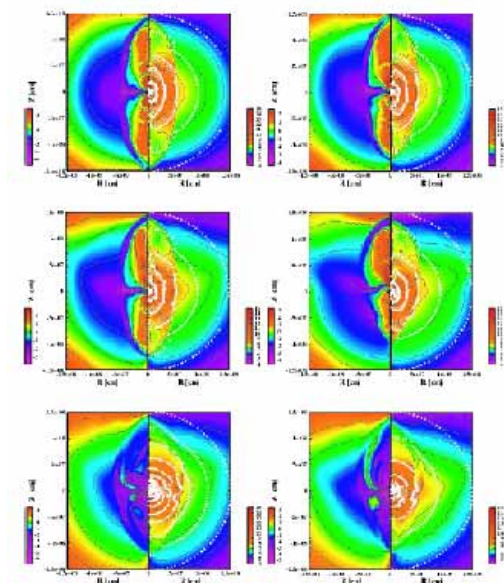


##### [コンパクト天体の形成に関する磁場の役割]

マグネター表面からのニュートリノ風への超強磁場の影響を1次元のラグランジュ法を用いて系統的に調べた。また、ガンマ線バーストの有望なシナリオの一つであるコラプサーモデルにもとづき、そこで起こると期待される重元素の合成を2次元のMHDシミュレーションにより定量的に明らかにした。

一方、強磁場超新星に関する研究では、従

来我々が研究してきた高速自転と強磁場の組み合わせによる即時爆発のシナリオに沿って、若いパルサーの観測でよく知られている固有速度の起源に関する新たな機構の提唱を行った。そこでは、最近の進化計算で示唆されている、双極子的な磁場が赤道対称性を破って存在する事が仮定されており、結果は数 100 ~ 1000km/s の固有速度を出しうるといふものであった(下図)。また、アルフベン波によるエネルギー輸送で超新星爆発を起こす斬新な機構も発表した。



## 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 27 件)

- H. Nagakura and S. Yamada  
The Standing Accretion Shock Instability in the Disk around the Kerr Black Hole  
Astrophysical Journal, 査読有  
696, 2009, 2026-2035
- K. Sumiyoshi, S. Yamada and H. Suzuki  
Emergence of Hyperons in Failed Supernovae: Trigger of the Black Hole Formation  
Astrophysical Journal Letters, 査読有  
690, 2009, L43-L46
- H. Nagakura and S. Yamada  
General Relativistic Hydrodynamical Simulations and Linear Analysis of the Standing Accretion Shock Instability around a Black Hole  
Astrophysical Journal, 査読有  
689, 2008, 391-406
- K. Sumiyoshi, S. Yamada and H. Suzuki

Dynamics and Neutrino Signal of Black Hole Formation in Non-Rotating Failed Supernovae. II. Progenitor Dependence  
Astrophysical Journal, 査読有  
688, 2008, 1176-1185

K. Nakazato, K. Sumiyoshi, H. Suzuki and S. Yamada

Oscillation and Future Detection of Failed Supernova Neutrinos from a Black-Hole-Forming Collapse  
Physical Review D, 査読有  
78, 2008, 083014

C. Ishizuka, A. Ohnishi, K. Tsubakihara, K. Sumiyoshi and S. Yamada

Tables of Hyperonic Matter Equation of State for Core-Collapse Supernovae  
Journal of Physics G, 査読有  
35, 2008, 085201

W. Iwakami, K. Kotake, N. Ohnishi, S. Yamada and K. Sawada

Three-Dimensional Simulations of Standing Accretion Shock Instability in Core-Collapse Supernovae  
Astrophysical Journal, 査読有  
678, 2008, 1207-1222

T. K. Suzuki, K. Sumiyoshi and S. Yamada  
Alfven Wave-Driven Supernova Explosion  
Astrophysical Journal, 査読有  
678, 2008, 1200-1206

K. Nakazato, K. Sumiyoshi and S. Yamada  
Astrophysical Implications of Equation of State for hadron-quark mixed phase: Compact Stars and Stellar Collapses  
Physical Review D, 査読有  
77, 2008, 103006

H. Sawai, K. Kotake and S. Yamada  
Numerical Simulations of Equatorially-Asymmetric Magnetized Supernovae: Formation of Magnetars and their Kicks  
Astrophysical Journal, 査読有  
672, 2008, 465-478

K. Sumiyoshi, S. Yamada and H. Suzuki  
Dynamics and Neutrino Signal of Black Hole Formation in Nonrotating Failed Supernovae. I. Equation of State Dependence  
Astrophysical Journal, 査読有  
667, 2007, 382-394

N. Ohnishi, K. Kotake and S. Yamada  
Inelastic Neutrino-Helium Scatterings and Standing Accretion Shock Instability in Core-Collapse Supernovae  
Astrophysical Journal, 査読有  
667, 2007, 375-381

K. Nakazato, K. Sumiyoshi and S. Yamada  
Numerical Study on Stellar Core Collapse

- and Neutrino Emission: Probe into the Spherically Symmetric Black Hole Progenitors with 3-30 Solar Iron Cores  
Astrophysical Journal, 査読有  
666, 2007, 1140-1151  
S. Yoshida, N. Ohnishi and S. Yamada  
The g-Mode Excitation in the Proto Neutron Star by the Standing Accretion Shock Instability  
Astrophysical Journal, 査読有  
665, 2007, 1268-1276  
N. Yasutake, K. Kotake, M. Hashimoto and S. Yamada  
Effects of QCD phase transition on gravitational radiation from two-dimensional collapse and bounce of massive stars  
Physical Review D, 査読有  
75, 2007, 084012  
S. Fujimoto, M. Hashimoto, K. Kotake, and S. Yamada  
Heavy Element Nucleosynthesis in a Collapsar  
Astrophysical Journal, 査読有  
656, 2007, 382-392  
T. Yamasaki and S. Yamada  
Stability of the Accretion Flows with Stalled Shocks in Core-Collapse Supernovae  
Astrophysical Journal, 査読有  
656, 2007, 1019-1037  
K. Kotake, N. Ohnishi and S. Yamada  
Gravitational Radiation from Standing Accretion Shock Instability in Core-Collapse Supernovae  
Astrophysical Journal, 査読有  
655, 2007, 406-415  
T. Yamasaki and S. Yamada  
Standing Accretion Shocks in the Supernova Core: Effects of Convection and Realistic EOS  
Astrophysical Journal, 査読有  
650, 2006, 291-298  
K. Sumiyoshi, S. Yamada, H. Suzuki and S. Chiba  
Neutrino signals from the formation of a black hole: A probe of the equation of state of dense matter  
Physical Review Letters, 査読有  
97, 2006, 091101
- 21 K. Nakazato, K. Sumiyoshi and S. Yamada  
Gravitational Collapse and Neutrino Emission of Population III Massive Stars  
Astrophysical Journal, 査読有  
645, 2006, 519-533
- 22 S. Fujimoto, K. Kotake, S. Yamada, M. Hashimoto and K. Sato  
Magnetohydrodynamic Simulations of a Rotating Massive Star Collapsing to a Black Hole  
Astrophysical Journal, 査読有  
644, 2006, 1040-1055
- 23 S. Nishimura, K. Kotake, M. Hashimoto, S. Yamada, N. Nishimura, S. Fujimoto and K. Sato  
R-Process Nucleosynthesis in MHD Jet Explosions of Core-Collapse Supernovae  
Astrophysical Journal, 査読有  
642, 2006, 410-419
- 24 N. Ohnishi, K. Kotake and S. Yamada  
Numerical Analysis on Standing Accretion Shock Instability with Neutrino Heating in the Supernova Cores  
Astrophysical Journal, 査読有  
641, 2006, 1018-1028
- 25 H. Ito, S. Yamada, K. Sumiyoshi and S. Nagataki  
Effects of Magnetic Fields on Proto-Neutron Star Winds  
Progress of Theoretical Physics, 査読有  
114, 2005, 995-1020
- 26 H. Sawai, K. Kotake and S. Yamada  
The Core-Collapse Supernova with "Non-Uniform" Magnetic Fields  
Astrophysical Journal, 査読有  
631, 2005, 446-455
- 27 K. Sumiyoshi, S. Yamada, H. Suzuki, H. Shen, S. Chiba and H. Toki  
Postbounce Evolution of Core-Collapse Supernovae: Long-Term Effects of Equation of State  
Astrophysical Journal, 査読有  
629, 2005, 922-932
- [学会発表](計 10 件)  
山田章一  
“重力崩壊型超新星の爆発メカニズム”  
重力崩壊型超新星と高エネルギー天文学  
2009年2月2日, 東京大学  
Shoichi Yamada  
“SASI in Black Hole Accretions”  
Asymmetric instability in stellar core collapse  
2008年7月2日  
Institute de Henri Poincare (Paris)  
Shoichi Yamada  
“Elementary Processes in Core-collapse and Neutrino Burst”  
20 years after SN1987A  
2007年2月24日, Hawaii  
Shoichi Yamada  
“Recent Issues in Core-collapse Supernovae”  
16<sup>th</sup> JGRG

2006年11月30日, 新潟

Shoichi Yamada

“Core-collapse Supernovae and Neutron  
Star Formation”

COSPAR

2006年7月16-23日, 北京

山田章一

“Hydrodynamical and  
Magnetohydrodynamical Instabilities in  
Supernova Cores”

日本地球惑星科学連合2006年大会

2006年5月14日幕張メッセ

Shoichi Yamada

“Supernovae in Universe”

COE International Workshop

“Energy Budget of High Energy Universe”

2006年2月24日, 東京大学

Shoichi Yamada

“Gravitational Collapse of Massive  
Stars”

国際シンポジウム OMEG2005

2005年11月10日, 東京大学

Shoichi Yamada

“Supernovae:Rotation, Jet, Neutrino”

TAUP2005

2005年9月10-14日, Zaragoza

Shoichi Yamada

“Asymmetric Supernovae”

The 59th Yamada Conference

'Inflating Horizon of Particle  
Astrophysics and Cosmology'

2005年6月21日, 東京大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山田 章一 (YAMADA SHIOCHI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号: 80251403

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし