

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 13 日現在

機関番号：37111

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26707013

研究課題名(和文) マルチメッセンジャー天文学から迫る高密度爆発天体現象の理論的解明

研究課題名(英文) Theoretical study on explosive stellar phenomena via multi-messenger observation

研究代表者

固武 慶 (Kotake, Kei)

福岡大学・理学部・准教授

研究者番号：20435506

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,700,000円

研究成果の概要(和文)：多様な大質量星に対して多次元のニュートリノ輻射輸送シミュレーションを実行し、中心核(コア)における重力開始から爆発の開始に至るまでの動的進化を調べ、コアの重力収縮度が爆発の成否に本質的であることを示した。特に、爆発後7秒に至るまでの長時間進化を明らかにし、マルチメッセンジャー(重力波、ニュートリノ、電磁波放射)の相関解析を可能にした。特筆すべきは、スーパーカミオカンデによるニュートリノ観測が、重力波の観測可能性を飛躍的に高めることを指摘した点である。光学観測に関しては、天の川銀河の全領域に対して超新星のフォローアップ観測ができるよう、使用すべき望遠鏡の選定・観測戦略を精査した。

研究成果の概要(英文)：By performing the first ever systematic multi-dimensional neutrino-radiation hydrodynamics of core-collapse supernovae, we have shown that core-compactness of the progenitors is the key to diagnose the explodability of massive stars. Assuming axisymmetry of the star, our self-consistent simulations succeeded in following the long-term postbounce dynamics, about 7 s after the onset of explosion. By making a detailed analysis of the multi-messenger observables, we pointed out that Super-Kamiokande plays an essential role, for a Galactic event, in determining the epoch of core-bounce. The time-stamp of core bounce is indispensable for detecting the subsequent gravitational-wave signals that are produced by neutrino-driven convection and the shock instability in the non-linear phase. Regarding optical observation, we have done an observational drill where we have made a detailed plan for multi-wavelength observation not to miss the once-in-a-lifetime supernova event in our Milky way.

研究分野：理論天体物理学

キーワード：超新星爆発 ニュートリノ 重力波 スーパーコンピューティング ニュートリノ輻射輸送 多次元流体シミュレーション 核密度状態方程式 中性子星

1. 研究開始当初の背景

大質量星がその進化の最終段階において迎える超新星がどのような仕組みで爆発にいたるのかは、過去 40 年以上に及ぶ理論宇宙物理学における謎である。この積年にわたる問題の解決に向けて、革新的進展をもたらすことが期待される観測事実が近年続々と報告されてきている。

特に超新星の系統的探査から、これまでのカテゴリーに当てはまらない様々なタイプの超新星の存在が明らかにされつつある。このような観測的進展を受けて、これまでの超新星研究で主流だったアプローチ、単に適当に選んだ一つの親星モデルの爆発の成否にのみ注目するのではなく、系統的な親星に対して、その爆発の成否を決める物理条件を明らかにすることが不可欠である。さらに爆発後に残される中性子星に関しては、2 太陽質量を持つものが観測され、従来の超新星シミュレーションにおいて用いられていた柔らかい状態方程式はすでに観測的に棄却されている。上記のように観測の急速な進展に後押しされ、従来の超新星研究からの大きな飛躍が求められていたのが、本課題開始当初の研究背景である。

2. 研究の目的

上述のような研究背景のもと、本申請課題では、これまで申請者が得た一連の超新星研究の成果を大きく発展させ、大質量星の爆発の成否を握る条件の精査、マルチメッセンジャー天文学から迫る爆発機構の解明を行うことを研究目的とする。具体的には、申請者グループがこれまで開発してきた空間 2 次元、3 次元、一般相対論的 3 次元の超新星シミュレーションをそれぞれの研究目的に応じて実行し、(1)多様な親星を用いた多次元シミュレーションの実行および爆発機構の解明、(2)多次元シミュレーションに基づくマルチメッセンジャーシグナルの定量的予測とその観測可能性の精査、(3)3 次元モデルにおける星の自転・磁場の爆発メカニズムに及ぼす効果の解明、(4)中性子星・ブラックホール形成の分岐を明らかにするために先端的ニュートリノ輻射輸送法を取り込んだ一般相対論的シミュレーションコードの開発、を行うことを研究目的とする。

3. 研究の方法

上記に述べた 4 つのテーマに関してそれぞれ研究の方法を述べていく。

(1) IDSa 法を用いた多次元超新星シミュレーションの実行

① IDSa とよばれる極めて効率の良いニュートリノボルツマン方程式の近似法を使い、超新星の親星モデルとして代表的な Woosley, Heger, and Weaver (Rev. Mod. Phys. 2002, 以下 WHW02 と呼ぶ) の中で、得られた総計 400 モデルに及ぶ親星を初期条件として選び、重力崩壊ならびに超

新星爆発の 2 次元シミュレーションを行う。

② 3 次元計算は計算コストが高いため、①の 2 次元計算による系統的探査の結果、最も早く爆発するものを選び、そのモデルに対して IDSa でニュートリノ輸送を解いたシミュレーションを実行し、2D, 3D どちらが爆発を起こしやすいか、さらに数値分解能依存性、計算の初期の摂動に対する結果の依存性を明らかにする。

(2) マルチメッセンジャーシグナルの定量的予測と観測可能性の精査

① 課題(1)の①の系統的シミュレーションの中で、爆発エネルギーが観測値( $10^{51}$  エルグ)に近いモデルを選び、このモデルに関して、計算領域を星の外層部まで広げ長時間計算を実行することで、爆発時に放射されるマルチメッセンジャー(重力波、ニュートリノ、電磁波)の定量的予測・観測可能性を精査する。

② 上で用いた親星に近い初期モデルを用い、3D 効果を明らかにするため、一般相対論的 3D シミュレーションを行い、重力波波形の特徴と観測可能性を詳細に解析する。特に核密度状態方程式として原子核実験、中性子星観測と整合性の良い 2 つの状態方程式(SFHx と TM1)を用いる。

(3) 3 次元モデルにおける自転・磁場の爆発メカニズムに及ぼす効果

① 自転を伴う重力崩壊の 3 次元の超新星シミュレーション(ニュートリノ輸送は IDSa)を行い、星の自転のバウンス後のダイナミクスに及ぼす効果を明らかにする。

② 3D 自転磁場超新星のセミグローバルシミュレーションを行い、磁気回転不安定性(MRI)の原始中性子星の磁場構造の進化に及ぼす効果を明らかにする。

(4) マルチエネルギーの一般相対論輻射流体コードの作成

これまでシングルエネルギーニュートリノ輸送で行っていたフルに一般相対論的なシミュレーション(Kuroda et al. (2012), ApJ)をマルチエネルギー輸送にアップグレードする。

4. 研究成果

(1) ①の成果:

図 1 でカラーパネルは、IDSa 法に基づく 2 次元超新星爆発シミュレーションを、国立天文台 XC を始めとする並列計算機で実行した結果を表す。s13.0, s75.0 などは親星の質量(13 太陽質量、75 太陽質量)を表す。s13, s75 では

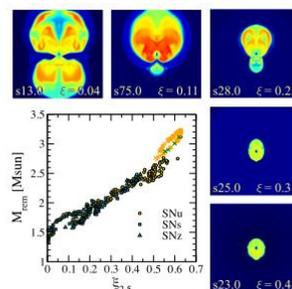


図 1: カラーパネルは IDSa 法を用いた 2 次元超新星シミュレーション例、左下の(大きなパネル)は、コア集中度(x 軸)と中性子星の質量(y 軸)の関係を示す。

トロピー領域（赤・オレンジ・緑の領域）が鉄コアを突き抜けて、爆発を開始していることを示している。一方、s28やs23では高エントロピー領域が小さく、これらは爆発に失敗しているモデルである。この爆発の成否を支配的に決めているのが、“コアのコンパクトネス”と呼ばれるコアの重力収縮度であることを明らかにした。実際、カラーパネルの $\xi$ がコンパクトネスパラメータと呼ばれるもので、左上(s13( $\xi=0.04$ ))から右下パネル(s23( $\xi=0.43$ ))にかけて上昇しており、詳細な解析から $\xi$ が0.2付近までは、コンパクトネスの上昇に伴う重力エネルギーの解放、すなわちニュートリノ光度が上昇するため、爆発エネルギーが上昇するものの、これを過ぎると、コアにおける重力的束縛が強すぎてニュートリノ加熱で爆発を起こすことが極めて難しいことを明らかにした。

左下のパネルで、 $\xi$ が0.2付近の中性子星質量がちょうど2太陽質量に対応しており、これ以上のコンパクトネスを持つ親星の場合、状態方程式で支えられる限界質量を超えてしまい、中心天体がブラックホールになることが期待される。この成果は、コアのコンパクトネスが爆発の成否、さらには中性子星とブラックホールの分岐の一つに指標となることを多次元計算で世界に先駆けて示したものである(Nakamura et al. (2015), PASJ)。

またこの結果を受けて、超新星の直接撮像観測でおよそ16~30太

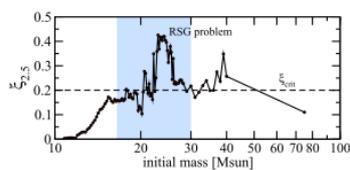


図2:親星の質量(x軸)とコアのコンパクトネス(y軸)の関係。WHW02の親星モデルの場合、 $\xi=0.2$ を境に、これ以上のコンパクトネスを持つ親星(青く塗られた領域)を爆発させることが極めて難しいことを示す数値計算結果と整合性が良い。

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(図2参照、Horiuchi et al. (2014), MNRAS Letters)。

**(1) ②の成果:**2次元計算から最もコンパクトネスが小さく早く爆発するモデル(11.2太陽質量モデル)を戦略的に選び、スパコン「京」を用いた3次元超新星シミュレーションを行った。結果、2次元計算では乱流のエネルギーが小スケールから大スケールに遷移する人工的なエネルギーの流れが起きるのに対して、3次元計算ではそのような流れは起きず、乱流のエネルギーが小スケールで散逸するため、2次元計算に比べ爆発を起こすのが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))。

### (2) ①の成果

(1)①の2次元計算から得られた結果を詳細に解析した結果、爆発エネルギーが観測値に

近いモデル(17太陽質量)を選び出すことに成功した。このモデルに関して、計算

領域を星の外層部まで広げ長時間計算を実行することで、爆発時に放射されるマルチメッセンジャーの定量的予測・観測可能性を精査した(図3参照)。

超新星が系内で起こった場合、ベテルギウスのような近傍で起こった場合、銀河系外で起こった場合の3つのシナリオに特化し、時系列的にマルチメッセンジャー観測を行う戦略を整理し、さらに観測から如何に爆発のメカニズムに迫れるか詳細に調べた。結果、特に銀河中心の超新星に対して、スーパーカミオカンデによるニュートリノ観測でコアバウンスの時間を決定することで、その後の超新星コアで発達する対流・流体不安定性の重力波の観測の信号・雑音比を向上させられることを明らかにした。重力波に関しては、LIGOに加え、VIRGOやKAGRAまで加えたコヒーレントネットワーク解析を行い、重力波信号の再構成、さらに信号・雑音比を定量的に明らかにすることが出来た。光学観測に関しては、ダストによる減光の効果を考慮することで、天の川銀河で超新星が起きた場合に使用すべき光学望遠鏡の選定・観測戦略を明らかにした。

### (2) ②の成果

15太陽質量の親星の中心核(コア)に対して3次元一般相対論的重力崩壊のシミュレーションを行い、重力波シグナルを精査した。近年の

原子核実験のデータ、さらに中性子星の質量・半径の観測に基づく最新の核密度状態方程式(SFHx)を用いた結果、バウンス後、スパイラル運動を伴う衝撃波の流体非軸対称運動が発達することが分かった(図4)。この不

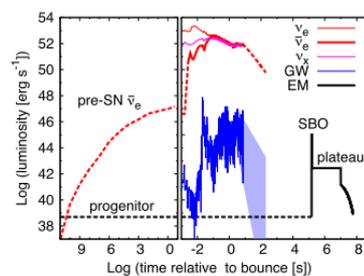


図3:セルフコンシステント長時間超新星シミュレーションに基づくマルチメッセンジャーシグナルの理論予測。ニュートリノ(3種類:赤、ピンク、オレンジ線)、重力波(青線)、電磁波(黒線、可視)シグナルの時間発展を(コアバウンスを基準に)連続的に明らかにすることが成功した。

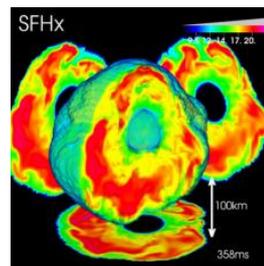


図4:15太陽質量星の3次元一般相対論的重力崩壊のシミュレーション。コアバウンス後、ショックが(壁面パネルにおいて黒い領域と赤い領域の境目が振動しつつ、スパイラル運動をしている最中のスナップショットを示す。このようなスパイラル運動は、最新の状態方程式(SFHx)を用いたときに、最も強く成長することを示した。

安定性の成長のタイムスケールと同じタイムスケールで、重力波シグナルにもサイン波に近い定常的な変調が見られることを発見した。この重力波の典型的な周波数が 100Hz 程度で、これは LIGO を始めとする稼働中の重力波干渉計の最高感度領域にあるために、近傍超新星に関しては、その観測実現性が極めて高いことを指摘した。尚、これまでの一連の超新星爆発からの重力波の成果をまとめたものを図書(Handbook of Supernovae)の 1 チャプターとして執筆した (Kotake and Kuroda, (2016))。

### (3) ①の成果

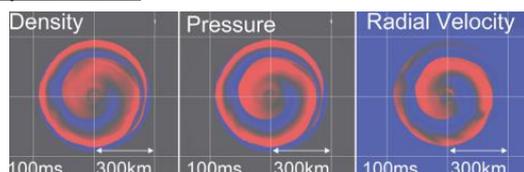


図 5: 高速自転コア(初期の自転率  $\Omega = 2 \text{ rad/s}$ )における非軸対称モードの成長の様子。水平面において、中心の原始中性子星から“の”の字を描くよう衝撃波背面の領域が変形し(左パネル:密度)、圧力波(中心パネル)と速度(パネル)もそれに従い、中心から外側にかけて分布している様子を表す。

星の自転が超新星爆発にどのような影響があるのかを IDSA を用いた 3D シミュレーションによって調べ、自転が駆動する非軸対称流体不安定性に起因する新しい爆発機構を発見した。原始中性子星がその回転エネルギーと重力束縛エネルギーが約 1 パーセントを超えると、非軸対称モードが発達することで原始中性子星表面が歪み(図 5)、それがスクリーのように働いて強く物質をかき混ぜることから、ニュートリノ加熱領域へのエネルギー輸送効率が上がり、星の水平面方向に爆発を起こすことを世界に先駆けて明らかにした(図 6)。この成果は、適切なニュートリ

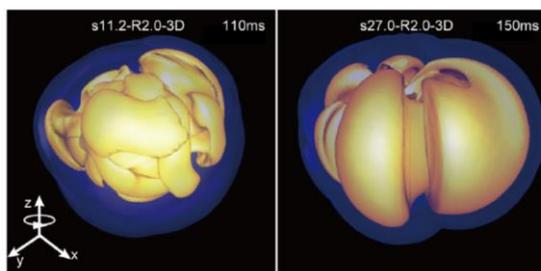


図 6: IDSA を用いた回転重力コアの 3 次元シミュレーションの結果。一般相対論的重力崩壊のシミュレーション。図の左パネルは 11.2 太陽質量、右パネルは 27 太陽質量モデルの等エントロピー面を表す。回転軸(図の z 軸方向)と垂直な方向(水平面方向に)、爆発が起こっていることが分かる。

ノ輻射輸送と空間 3 次元の計算を組み合わせたセルフコンシステントな計算でこそ初めて発見に至ったものであり、輻射輸送法や素過程を突き詰めたシミュレーションを実行する重要性を改めて、強く印象付けるものとなった(Takiwaki et al. MNRAS Letters)。

### (3) ②の成果

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、現実的核力モデルを用いた状態方程式(Shen らのもの)をゴドノフ法を用いた流体計算に組み込むことに成功した。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))。結果、初期に成層していた磁場形状が乱流の効果で、攪拌され原始中性子星内部へ乱流磁場が侵入していく様子を世界に先駆けて明らかにした。また乱流粘性によって、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、計算領域を広げ対流や衝撃波不安定性などの効果も含め、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。

### (4) の成果

一般相対論的ニュートリノ輻射輸送コードを開発し、そのテスト計算を追い、査読論文として完成させ、出版に至らせた(Kuroda, Takiwaki, Kotake, (2016), ApJS)。本計算コード開発は、ブラックホール形成を含む一般相対論的效果が本質的となる親星のダイナミクスを追うために不可欠なものである。本コードは状態方程式、ニュートリノ反応を始めとする入力物理がこれまでの先端的超新星モデルで使われているものと同水準であることが大きな特徴となっている。早速このコードを用いて、昨今大きな話題となっている重力波の初検出源となったブラックホールの生成メカニズムを明らかにするため、その親星として注目されるモデルを用いて重力崩壊のシミュレーションを行い、予備的な成果が得られつつある。

#### 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 12 件) 全て査読有  
2016 年度

1. Takami Kuroda, Kei Kotake, and Tomoya Takiwaki, "A New Gravitational-wave Signature of Standing Accretion Shock Instability from Supernovae", The Astrophysical Journal Letters, 829, L14, (6 pp), (2016)  
DOI: 10.3847/2041-8205/829/1/L14
2. Takami Kuroda, Tomoya Takiwaki, and Kei Kotake, "A New Multi-energy Neutrino Radiation-Hydrodynamics Code in Full General Relativity and Its Application to the Gravitational Collapse of Massive Stars", The Astrophysical Journal Supplement Series,

- 2, 20, (27pp), (2016)  
DOI: 10.3847/0067-0049/222/2/20
3. K. Nakamura, S. Horiuchi, M. Tanaka, K. Hayama, T. Takiwaki, K. Kotake, "Multi-messenger signals of long-term core-collapse supernova simulations : synergetic observation strategies" Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (以下MNRAS と記す), 460, 2, (24pp), (2016)  
DOI: 10.1093/mnras/stw1453
4. Y. Suwa, S. Yamada, T. Takiwaki, and K. Kotake, "The Criterion of Supernova Explosion Revisited: The Mass Accretion History", The Astrophysical Journal (以下ApJ と記す), 816, 43, (16 pp), (2016)  
DOI: 10.3847/0004-637X/816/1/43
5. Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, and Yudai Suwa, "Three-dimensional simulations of rapidly rotating core-collapse supernovae: finding a neutrino-powered explosion aided by non-axisymmetric flows", :MNRAS Letters, 461, 1, (4pp), (2016)  
DOI: 10.1093/mnrasl/slwl105
- 2015 年度
6. Kazuhiro Hayama, Takami Kuroda, Kei Kotake, and Tomoya Takiwaki, "Coherent network analysis of gravitational waves from three-dimensional core-collapse supernova models", Physical Review D, 92, 12, id.122001, (21pp), (2015)  
DOI: 10.1103/PhysRevD.92.122001
7. Ko Nakamura, Tomoya Takiwaki, Kuroda Takami, and Kei Kotake, "Systematic Axisymmetric Core-collapse Supernova Simulations in Multiple Progenitors", Publication of Japan Astronomical Society Japan, 67, 6, (16 pp), (2015)  
DOI: 10.1093/pasj/psv073
8. Youhei Masada, Tomoya Takiwaki, and Kei Kotake, "Magnetohydrodynamic Turbulence Powered by Magnetorotational Instability in Nascent Protoneutron Stars", ApJ Letters, 798, L22, (7 pp), (2015)  
DOI: 10.1088/2041-8205/798/1/L22
- 2014 年度
9. S. Horiuchi, K. Nakamura, T. Takiwaki, K. Kotake, and M. Tanaka, "The red supergiant and supernova rate problems: implications for core-collapse supernova physics", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters, 445, Issue 1, (p. L99-L103), (2014)  
DOI: 10.1093/mnrasl/slul46
10. Ko Nakamura, Takami Kuroda, Tomoya Takiwaki, and Kei Kotake, "Impacts of Rotation on Three-dimensional Hydrodynamics of Core-collapse Supernovae" ApJ, 793, 45, (14 pp), (2014)  
DOI:10.1088/0004-637X/793/1/45
11. Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, and Suwa Yudai, "A Comparison of 2D and 3D Neutrino-hydrodynamics Simulations of Core-collapse Supernovae", ApJ, 786, 83, (8 pp), (2014)  
DOI: 10.1088/0004-637X/786/2/83
12. Nobutoshi Yasutake, Kei Kotake, Masamichi Kutsuna, and Toshikazu Shigeyama, "An investigation into surface temperature distributions of high-magnetic-field pulsars" PASJ, 66, 2, id.50, (12pp), (2014)  
DOI: 10.1093/pasj/psu009
- [学会発表] (計 34 件) 以下抜粋
1. Kei Kotake, "Multi-messenger signatures from 3D core-collapse supernovae", IAU Symposium 331, SN1987A, 30 years later, Village Corail, La Reunion, フランス, 2017 年 2/19-24 (招待講演)
  2. Kei Kotake, "SASI-modulation in Neutrino and Gravitational-wave Signatures", Workshop on compact objects, University of Basel, Basel, スイス, 2016 年 9/29-10/1 (招待講演)
  3. Kei Kotake, "Neutrino Signatures of 3D Supernova Cores", Flavor Observations with Supernova Neutrinos, INT, アメリカ, 2016 年、8/15-19 (招待講演)
  4. Kei Kotake, "Explosion theory of core-collapse supernovae", IAU XXIV general assembly, Bridging Laboratory Astrophysics and Astronomy, Honolulu, アメリカ, 2015 年 8/3-8/5 (招待講演)
  5. Kei Kotake, "Probing Supernova Core-Collapse Physics with Gravitational Wave Detections", Fourteenth Marcel Grossmann (MG14), University of Rome La Sapienza, Rome, イタリア, 2015 年 7/12-7/18 (招待講演)
  6. Kei Kotake, "Peeling the Nature of Core-Collapse Supernovae by Multi-Messenger observables", FOE:remnants, NC State University, Raleigh, アメリカ, 2015 年 6/1-6/5 (招待講演)
  7. Kei Kotake, "Multi-D Core-Collapse Supernova Models and the Multi-Messenger Observables", International Workshop on Neutrino Physics and Astrophysics, Mimar Sinan Fine Arts University, Istanbul, トルコ, 2015 年 3/16-3/20 (招待講演)
  8. Kei Kotake, "Multimessengers from supernovae" Brainstorming meeting, Basel University, Basel, スイス, 2014 年 9/23-10/3 (招待講演)
  9. Kei Kotake, "Multimessenger observables from multi-D supernova simulations" Nuclear Physics and the Origin of R-Process Elements, ECT\*, Trento, イタリア, 2014 年 9/8-9/13 (招待講演)
  10. Kei Kotake, "Multi-D Core-Collapse Supernova Explosions and the

Multi-Messenger Signatures” The 40th  
COSPAR Scientific assembly, Lomonosov  
Moscow State University, Moscow, ロシ  
ア, 2014年8/2-8/10 (招待講演)

[図書] (計1件)

1. Kei Kotake and Takami Kuroda,  
” Gravitational Waves from Core-Collapse  
Supernovae”, Handbook of Supernovae,  
Springer, (Eds. Alsabti, Athem W., Murdin,  
Paul), (pp1~27), (2016)  
DOI:10.1007/978-3-319-20794-0\_9-1

[その他]

ホームページ等

研究代表者のホームページ

<http://www.cis.fukuoka-u.ac.jp/~kkotake/kotake.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

固武 慶 (KOTAKE KEI)

福岡大学・理学部・准教授

研究者番号: 20435506