

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25400277

研究課題名(和文) 拡張重力理論における非線形ダイナミクス

研究課題名(英文) Non-linear dynamics in Extended Gravity Theories

研究代表者

真貝 寿明(Shinkai, Hisaaki)

大阪工業大学・情報科学部・教授

研究者番号：30267405

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：重力波の直接検出が実現され、一般相対性理論の検証を、ブラックホール(BH)などの強い重力場を用いて行うことが可能になりつつある。本研究では、もっとも有力な修正重力理論の1つであるガウスボンネ重力理論に注目し、そのダイナミクスの一端を明らかにした。高次曲率項により時空特異点の発生が回避されうること、および高次元になるほどその傾向が顕著なことを複数のモデルで示した。

また、BHの合体成長モデルがどのように判別されるのかを議論した。地上に設置された重力波干渉計で観測されるBH合体イベント数を具体的に予測した。さらに、BHが放つリングダウン重力波を実データから抽出する手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：Direct detection of gravitational waves is realized and it is becoming possible to verify the theory of general relativity using a strong gravity field such as black hole (BH). In this research, we focused on the Gauss-Bonnet gravity theory, which is one of the most influential modified gravity theories, and clarified a part of its dynamics. We showed in multiple models that the occurrence of space-time singularities can be avoided by higher-order curvature terms and that the tendency is prominent as the dimension becomes higher.

We also discussed how a growth model of BHs is distinguished from others in gravitational wave observation. We estimated the number of BH merger events observed by the ground-based gravitational wave interferometers. Furthermore, we proposed a new method to extract ring-down gravitational wave emitted by a BH from actual data.

研究分野：一般相対性理論, 重力波

キーワード：一般相対性理論 重力理論 ブラックホール 重力波 時空特異点

# 1 研究開始当初の背景

## (1) 研究計画申請時の研究背景

アインシュタインが構築した一般相対性理論は、重力現象を記述する理論としてこれまで多くの検証に耐えてきている。しかし、宇宙初期や真に強い重力場では、量子補正を含めた修正（あるいは拡張）が必要であると考えられる。現在、もっとも有力な修正重力理論の1つに、ストリング理論から導出される高次曲率項を含んだ理論（ガウス・ボンネ重力理論、ラブロック重力理論、およびそれらにディラトン場を含めた重力理論）がある。例えば、ディラトン場  $\phi$  を含めたガウス・ボンネ重力理論の作用は

$$S = \int_{\mathcal{M}} d^{N+1}x \sqrt{-g} \left[ \frac{1}{2\kappa^2} \left\{ \mathcal{R} + \alpha e^{-\lambda\phi} \mathcal{L}_{GB} + \mathcal{L}_{\text{dilaton}} \right\} + \mathcal{L}_{\text{matter}} \right] \quad (1)$$

となり、修正重力を表す高次曲率項は、

$$\mathcal{L}_{GB} = \mathcal{R}^2 - 4\mathcal{R}_{\alpha\beta}\mathcal{R}^{\alpha\beta} + \mathcal{R}_{\alpha\beta\gamma\delta}\mathcal{R}^{\alpha\beta\gamma\delta} \quad (2)$$

である。高次曲率項があることによって、一般相対性理論が予言する時空特異点の存在や発生問題が、回避されるかもしれない、と期待されているが、実際のダイナミクスは未知である。

このような修正重力理論が近年急速に注目を集める理由の1つに、(第2世代)重力波レーザー干渉計の建設が世界で進んでいることが挙げられる。日本のKAGRA干渉計・米国のLIGO・欧州のVIRGOなどにより、重力波の直接検出が数年後にも期待されており、実データの蓄積から、強い重力場での一般相対性理論の検証も可能になるはずである。また、別の理由として、ブレーンワールド宇宙モデルに端をなす近年の一連の高次元時空に対する関心も挙げられる。

## (2) 研究遂行時の研究背景の変化

アメリカのLIGOグループは、2015年9月に重力波を初めて直接検出することに成功した、と2016年2月に発表した。検出の報告がされたことを受け、重力波を用いた一般相対性理論の検証可能性についても研究のテーマを新たに加えた。

その1つは、重力波観測データを用いて、ブラックホールの合体成長するモデルがどのように判別できるのか、というテーマである。2016年にLIGOが

発表するまで、ブラックホール連星の存在は(理論上は予想されていたものの)一例も知られていなかった。ところが、重力波の直接検出によって、たちまち4例も報告されることになり、研究状況が一変した。研究計画として、銀河中心に存在が確認されている超巨大ブラックホールの形成過程が、重力波観測によって、今後どのように解明されるのかを加えることにした。

また、実際の重力波観測による重力理論そのものの判別可能性も実データにもとづいて解析する時代が到来することになった。もっとも重力理論の影響が検出されるのは、最終的に形成されるブラックホールが放出する(リングダウン重力波)である。短時間で急速に減衰する重力波データの解析には新手法の開発が必要であり、その研究にも着手した。この研究は、2017年度から採択された新学術領域研究「重力波物理学・天文学：創世記」計画研究A01「重力波データ解析による重力理論の検証」の研究分担者として現在にも継続されるテーマとなった。

また、研究代表者は、2015年より日本の重力波干渉計KAGRAの科学部門実行委員長(chair of the board, KAGRA Scientific Congress)を務めることになり、日本発の重力波検出分野の研究推進を統括する立場になった。米欧のLIGO/Virgoグループに比肩する成果を早期に挙げられるようプロジェクト全体を組織し、同時に検出に関する全体論文執筆計画も策定することになった。KAGRAの初期試運転(iKAGRA)が2016年春に行われ、その成果も本研究成果に含めている。

# 2 研究の目的

## (1) 研究計画申請時の研究目的

重力波の直接検出を可能にするレーザー干渉計の建設が進み、強い重力場での一般相対性理論の検証にも期待が高まってきている。本研究では、修正重力理論として高次曲率項を含んだ理論(ガウス・ボンネ重力理論)に注目し、数値的手段を用いて非線形ダイナミクスの一端を明らかにする。数値計算のための定式化から着手し、最終的にはブラックホールやワームホールの形成過程や安定性、重力波伝播現象における重力理論の差異を時間発展を追うことによって明らかにする。曲率項の複雑さゆえ着手されていなかった研究であるが、具体的に数値積分す

ることにより、方法論や問題点を明らかにして、次世代の相対論研究の1つの柱に発展させる。

## (2) 後に追加した研究目的

銀河中心に存在する超巨大ブラックホールの形成過程には、小さなブラックホールが合体成長してきた、とするモデルと巨大なガス雲が収縮して大きなブラックホールが直接形成された、とするモデルに別れて論争が続いている。本研究では、地上に設置された重力波干渉計による直接観測で、前者のモデルから予想される重力波のイベント数を導き、将来的な観測計画に結びつけることを計画する。また、重力理論の検証を重力波データから行うため、ブラックホールが放出する重力波（リングダウン重力波）の抽出を行う解析手法の開発に取り組む。具体的には自己回帰モデルとして知られる波形データの再構築法を重力波データ解析に応用する。

## 3 研究の方法

### (1) 拡張重力理論に関する研究について

2013年度（H25年度）は、超弦理論を由来にするガウス・ボンネ重力理論（拡張重力理論）におけるダイナミクス研究に着手した。まず、初期特異点がない時空に注目するために、ワームホール時空の安定性をテーマにした。4次元アインシュタイン時空でのワームホール（エリス解）は不安定であり、エネルギー的なバランスが崩れることによってブラックホールやスロート膨張することが、2002年に Shinkai-Hayward によって報告されている。我々は、まず、一般  $N$  次元空間でこの形のワームホール解を導き、次に摂動計算を行った。

2014年度（H26年度）は、ワームホール構造に関して、4次元から7次元時空までの時空次元によるダイナミクスの比較、ガウス・ボンネ項の有無によるダイナミクスの比較についての数値コード開発、および数値解析を行った。また、宇宙項が存在する時のワームホール解の存在についてもエネルギー的に解析し、負の宇宙項の場合のみ時空が安定であることを予想した。

2015年度（H27年度）は、前年度までに開発した数値コードをさらに改良し、平面对称な時空と球対称な時空の双方で時間発展ができるようにした。球対称時空では、強い重力の場合にはブラックホール

境界面が出現することが期待されるので、現実的な理論の比較ができるようになった。

2017年度（H29年度）は、研究計画で申請していた「ガウス・ボンネ重力理論での特異点形成」についての論文をまとめ、投稿し、掲載された。

### (2) 巨大ブラックホール形成に関する研究

2016年度（H28年度）は、アメリカの LIGO グループによる重力波初検出の報告がされたことを受け、重力波を用いた一般相対性理論の検証可能性についても研究のテーマを新たに加えた。一般相対性理論が正しいかどうかは、ブラックホールなどの強い重力場での検証が重要になる。折しも LIGO グループによる重力波観測は、これまでに想定されていた以上の質量をもつブラックホール連星の合体を波源とするものであり、理論検証の可能性を強くサポートする。また、銀河中心に存在する超巨大ブラックホール形成史が不確かな現状で、今回の重力波イベントは、ボトムアップ型の形成シナリオを示唆するものでもある。そこで、将来的な理論検証を行うための準備として、近い将来にどれだけのブラックホール合体のイベントが予想されるのかを見積もった。

### (3) 重力波のデータ解析に関する研究

2017年度（H29年度）は、修正重力理論を重力波のデータ解析によって判別する研究に着手した。これまでの重力波データ解析は、あらかじめ予想される重力波の波形を用意しておき、実データとのマッチングから重力波の存在を導く方法がとられている。幾多とある修正重力理論では、このような波形の準備を事前に行うことは得策ではない。そこで、実データそのものから、物理的に意味のあるデータを抽出する方法として、時系列データ解析手法の1つとして知られている自己回帰法 (auto-regressive 法) に注目し、もっとも強い重力場を記述するブラックホール連星の合体直後のリングダウン波形の解析ツールの開発に取り組んだ。

## 4 研究の成果

### (1) 拡張重力理論に関する研究

一般  $N$  次元空間で球対称時空でのワームホール解を導き、次に摂動計算によって、不安定モードが存在することを明らかにした (§5 にリストする雑誌論文の [6])。球対称ワームホール構造は不安定であ

り、追加する微小なエネルギーの正負によって、構造がブラックホールに転じたり、中心部分がインフレーション拡大する現象が我々の研究によって明らかになっている。一般相対性理論を単純に高次元化すれば不安定性は増大することを線形解析で明らかにした。

線形の摂動計算の正しさを確認するために、光座標を用いた数値コードを用いて時間発展を行い、予想通りに不安定であることを示した [4]。同じ初期条件として正のエネルギーを加えた時にはブラックホールが形成しにくいことを確認した。曲率の高次項を取り入れた数値計算は、まだ未開拓の分野であり、球対称時空に限るとはいえ、次元を変えて時空のふるまいを明らかにしたことは、世界の他のグループを大きくリードした。

4次元の一般相対性理論では、平面重力波の衝突によって時空特異点が形成することが知られている。数値計算コードを改良し、この現象を高次元で数値計算すると、衝突後の曲率の増加が抑えられること（したがって、非線形な振る舞いを引き起こす平面重力波の振幅閾値が低くなること）がわかった。また、ガウス・ボンネ理論では一般相対性理論より曲率の増加がさらに抑えられ、したがって特異点形成の振幅閾値がさらに低くなることが判明した [4, 3]。

ガウス・ボンネ重力理論では、曲率2次の補正項を加える際の結合定数 ( $\alpha$ ) の正負が、大きくダイナミクスを変える。正の  $\alpha$  では、同じ初期条件でも特異点形成は遅くなり、ブラックホール形成のための閾値が大きくなってブラックホールは形成しにくくなる。つまり、正の  $\alpha$  はエネルギー底上げ・特異点回避の傾向を与えた。負の  $\alpha$  はその逆である。また、高次元になるほど不安定性は拡大することや、ガウス・ボンネ重力理論では補則された光的面の存在は必ずしも最終的なブラックホール形成を意味しない結果も得た。また、trapped surface の存在は必ずしも最終的なブラックホール形成を意味しないこともあり得ることを結論した。

## (2) 巨大ブラックホール形成に関する研究

銀河中心に見られる巨大ブラックホールが、星質量のブラックホールから合体を続けて成長した結果得られた、とするモデルを構築し、地上における重力波検出器における観測数を予想した。仮定したブラックホール形成モデルや銀河分布モデルが正しけ

れば、日本の KAGRA が本格的な観測を始めた際には、年間で 200 を超えるブラックホール合体のイベントが得られ、その蓄積からモデルの検証が可能であることを結論した [5]。

中間質量・超巨大質量ブラックホールの合体現象によって発生する重力波は、地球上では検出できない低周波数領域に相当する [2] ことから、宇宙空間での重力波検出計画 (LISA, DECIGO) でのイベントレートの見積もりや、より技術的に実現性の高い光格子時計を用いた宇宙空間での重力波検出の新たな方法を提案した。どちらも現在、論文執筆中である。

## (3) 重力波のデータ解析に関する研究

重力理論を重力波のデータ解析から明らかにするための手法として、ブラックホール合体の最終段階で発生するリングダウン重力波の解析が有力視されている。しかし短時間で消失するこのリングダウン部分をノイズに埋もれたデータから抽出する手法はまだ確立していない。そこで、自己回帰モデル (autoregressive 法) を用いて、短時間のデータから波形を再構築する方法を重力波のデータ解析に応用し、リングダウン部分を捉えられることを示した。実際に LIGO の報告した最終ブラックホール質量予想値に近い値を示すリングダウン重力波を抽出することができた。現在、論文執筆中である。

研究代表者は、2017年8月に、日本の重力波干渉計 KAGRA プロジェクトの科学部門実行委員長に選出され、2019年度中の本格観測開始に向けて、組織の構築に尽力することになった。2016年4月の試運転時の論文をまとめる [1] とともに、現在 2018年4月の試運転時の論文執筆を進めている。

より詳細な結果は、学術論文として報告している。

## 5 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 6 件)

- [1] Construction of KAGRA: an Underground Gravitational Wave Observatory  
T. Akutsu *et. al.* (KAGRA Collaboration)  
Prog. Theor. Exp. Phys. (2018) 013F01  
[arXiv:1712.00148]  
<https://doi.org/10.1093/ptep/ptx180>
- [2] Event Rates of Gravitational Waves from merging Intermediate mass Black Holes: based on a Runaway Path to a SMBH  
H. Shinkai

- European Physics Journal, Web of Conferences  
168, 05002 (2018) (5 pages)  
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201816805002>
- [3] Colliding scalar pulses in the Einstein-Gauss-Bonnet gravity  
H. Shinkai & T. Torii  
European Physics Journal, Web of Conferences  
168, 04014 (2018) (5 pages)  
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201816804014>
- [4] Nonlinear Dynamics in the Einstein-Gauss-Bonnet gravity  
H. Shinkai & T. Torii  
Physical Review D **96** (2017) 044009 (14 pages)  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.044009>
- [5] Gravitational waves from merging intermediate-mass black holes : II Event rates at ground-based detectors  
H. Shinkai, N. Kanda & T. Ebisuzaki  
Astrophys. J. **835** (2017) 276 (8 pages)  
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/835/2/276>
- [6] Wormholes in higher dimensional space-time: Exact solutions and their linear stability analysis  
T. Torii & H. Shinkai  
Physical Review D **88** (2013) 064027 (6 pages)  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.88.064027>
- [学会発表] (計 28 件)
- 国際会議発表
1. Intermediate-mass black holes as sources of gravitational waves (poster)  
H. Shinkai  
International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics (CosPA 2017) [Kyoto Univ., December 2017]
  2. Gravitational-wave data analysis using Auto-Regressive model (poster)  
S. Yamamoto & H. Shinkai  
JGRG27: The 27th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan [Hiroshima, November 2017]
  3. Event rates of gravitational waves in space-borne detectors based on a hierarchical growth model of SMBHs (poster)  
H. Shinkai & T. Ebisuzaki  
JGRG27: The 27th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan [Hiroshima, November 2017]
  4. Nonlinear dynamics in Einstein-Gauss-Bonnet gravity  
H. Shinkai  
European Einstein Toolkit Workshop 2017 [Spain, October 2017]
  5. Colliding scalar pulses in the Einstein-Gauss-Bonnet gravity  
H. Shinkai & T. Torii  
The 13th International Conference on Gravitation, Astrophysics, and Cosmology (ICGAC-XIII) [Seoul, Korea, July 2017]  
EPJ Web of Conferences 168, 04014 (2018)
  6. Event Rates of Gravitational Waves from merging Intermediate mass Black Holes: based on a Runaway Path to a SMBH  
H. Shinkai & T. Ebisuzaki  
The 13th International Conference on Gravitation, Astrophysics, and Cosmology (ICGAC-XIII) [Seoul, Korea, July 2017]  
EPJ Web of Conferences 168, 05002 (2018)
  7. Singularity Avoidance of Gauss-Bonnet gravity (poster)  
T. Torii & H. Shinkai  
JGRG26: The 26th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan [Osaka City Univ., October 2016]
  8. Gravitational waves from merging intermediate-mass black-holes (poster)  
H. Shinkai, N. Kanda & T. Ebisuzaki  
JGRG26: The 26th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan [Osaka City Univ., October 2016]
  9. Formation Scenario of SMBH and Gravitational Wave  
H. Shinkai, N. Kanda & T. Ebisuzaki  
The First International Meeting on KAGRA [KAIST, Daejeon, Korea, June 2016]
  10. Singularity formation in n-dimensional Gauss-Bonnet gravity (poster)  
H. Shinkai & T. Torii  
JGRG25: The 25th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan [YITP, Kyoto Univ., December 2015]
  11. Can we distinguish formation models of a super-massive black-hole? (poster)  
H. Shinkai, T. Ebisuzaki, & N. Kanda  
Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop (GWPAW) 2015 [Osaka, Japan, June 2015]
  12. Dynamics in n-dimensional Gauss-Bonnet gravity: I. Colliding Scalar Waves, II. Wormhole evolutions (poster)  
H. Shinkai & T. Torii  
General Relativity and Gravitation: A Centennial Perspective [Penn State, USA, June 2015]
  13. Wormhole dynamics in higher-dimensional space-time (poster)  
H. Shinkai & T. Torii

- JGRG24: The 24rd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan [IMPU, Tokyo Univ., November 2014]
14. Wormhole dynamics in higher-dimensional space-time  
H. Shinkai & T. Torii  
Spanish Relativity Meeting 2014 [Valencia, Spain, September 2014]. conference paper J. Phys.: Conf. Ser. 600 (2015) 012038.
  15. Wormhole dynamics  
H. Shinkai & T. Torii  
International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences [Madrid, Spain, August 2014]. conference paper J. Phys.: Conf. Ser. 574 (2015) 012056.
  16. Wormhole dynamics in Gauss-Bonnet gravity (poster)  
H. Shinkai & T. Torii  
The 23th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG23), [Hirosaki U., Japan, November 2013]
  17. Gravitational collapse of ring objects in five-dimensional space-time (poster)  
Y. Yamada & H. Shinkai  
The 23th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG23), [Hirosaki U., Japan, November 2013]
  18. Wormhole evolutions in higher-dimensional gravity –Effects of Gauss-Bonnet gravity terms (poster)  
H. Shinkai & T. Torii  
The 20th International Conference on General Relativity and Gravitation (GR20), [Warsaw, Poland, July 2013]

## 学会発表

1. 光格子時計を用いた重力波検出法の提案  
真貝寿明 玉川徹 野田篤司 香取秀俊 牧野淳一郎 戎崎俊一, 日本物理学会, 東京理科大学, 2018年3月
2. 中間質量ブラックホール合体モデルと重力波観測  
真貝寿明 戎崎俊一, 日本物理学会, 宇都宮大学, 2017年9月
3. 重力波観測による巨大ブラックホール形成シナリオ解明の可能性  
真貝寿明 神田展行 戎崎俊一, 日本天文学会, 愛媛大学, 2016年9月
4. Dynamics in n-dimensional Gauss-Bonnet gravity II  
真貝寿明 鳥居隆, 日本物理学会, 東北学院大学, 2016年3月
5. Dynamics in n-dimensional Gauss-Bonnet gravity

真貝寿明 鳥居隆, 日本物理学会, 早稲田大学, 2015年3月

6. Topological wormholes and their stability  
鳥居隆 真貝寿明, 日本物理学会, 早稲田大学, 2015年3月
7. 高次元ワームホールの安定性: 宇宙項とガウス・ボンネ項の影響  
鳥居隆 真貝寿明, 日本物理学会, 佐賀大学, 2014年9月
8. 高次元ワームホールの安定性: 線形摂動と時間発展数値解析  
鳥居隆 真貝寿明, 日本物理学会, 東海大学, 2014年3月
9. ワームホールの不安定性  
真貝寿明 鳥居隆, 日本天文学会, 国際基督教大学, 2014年3月

## 〔図書〕(計 1 件)

1. 「ブラックホール・膨張宇宙・重力波 一般相対性理論の100年と展開」真貝寿明 (単著) 光文社, 2015年9月出版, 344ページ, ISBN 978-4-334-03877-8

## 〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

## 〔その他〕

ホームページ

<http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/research/>

雑誌解説記事など

1. 「テンソル計算ソフトウェア リーマンテンソルが一瞬で計算できる」真貝寿明 (単著), サイエンス社『数理科学』2015年7月号
2. 「予想通りで驚いた 重力波初観測の報道に接して」真貝寿明 (単著), 窮理社『窮理』4号 (2016年7月)
3. 「光格子時計による重力波検出」玉川徹, 真貝寿明, 野田篤司, 香取秀俊, 牧野淳一郎, 戎崎俊一 (共著), 岩波書店『科学』2017年12月号

## 6 研究組織

### (1) 研究代表者

真貝 寿明 (SHINKAI Hisa-aki)  
大阪工業大学 情報科学部・教授  
研究者番号: 30267405

### (2) 研究分担者

鳥居 隆 (TORII Takashi)  
大阪工業大学 工学部・准教授  
研究者番号: 00360199