

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03654

研究課題名(和文) 超弦的アクシオンが引き起こす重力波現象の理論的探査

研究課題名(英文) Theoretical research on gravitational wave phenomena caused by string axions

研究代表者

吉野 裕高 (Hiroataka, Yoshino)

大阪市立大学・数学研究所・特別研究員

研究者番号：20377972

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の研究テーマはブラックホールまわりのアクシオン場の振る舞い、特に超放射不安定によって増幅し、自己相互作用が重要になる段階で起こる現象を明らかにする計画であった。しかし超放射不安定の時間スケールが長く、数値シミュレーションによって遂行するのは困難であった。そこでブラックホール周辺の時空の性質および観測可能な現象を明らかにする方向性も含めて研究をおこなった。重力崩壊する星の光学的な像、ブラックホール周辺の強重力場を特徴付ける概念の提案、ブラックホール遠方の光の振る舞い、ブラックホール磁気圏での光子・重力子変換によって生じる重力波の観測可能性に関して成果をあげた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ブラックホール周辺の観測が可能になってきた中で、それに関わる理論の基本的な概念の整備、将来観測にかかわる基礎的な研究成果を出すことができた。また、もともとのアクシオンのテーマでは成果が思うようになかったが、次につながるステップを踏むことができた。

研究成果の概要(英文)：The original aim of this research project was to clarify the behavior of axion field around a black hole, in particular, at the stage where the self-interaction effects become important after the growth of the superradiant instability. However, the time scale of the superradiant instability is extremely long, and it was difficult to proceed with this project by numerical simulations. For this reason, I included the clarification of the properties of gravitational field around black holes and observable phenomena into the plan. As a result, I have accomplished the research in the following issues: The optical image of a star under gravitational collapse, proposition a new concept to characterize the strength of gravity around a black hole, clarification of photon behavior at the distant region from a black hole, and the observability of gravitons generated by the photon-graviton conversion in black hole magnetospheres.

研究分野：一般相対論

キーワード：ブラックホール 強重力 アクシオン 重力波

1. 研究開始当初の背景

本研究がはじまる1年前に重力波観測の分野で非常に大きな前進があった。アメリカの Advanced LIGO と呼ばれる重力波干渉計において、重力波が初めて観測された。重力波の波形は、一般相対性理論において連星ブラックホール合体のさいに放射される重力波の理論波形によく一致していた。したがって、ブラックホール近傍で起こる現象を観測し、一般相対性理論の成否を研究できる時代が幕を開けた。一方、Arvanitaki らによって重力波観測を通して超弦理論の証拠を探ることができる可能性をもつ「アクシバースシナリオ」が提唱されていた。それによると、非常に軽い質量を持つスカラー場(アクシオン場)が複数ある可能性があり、それが事実であれば回転ブラックホール周辺でブラックホールの回転エネルギーを引き抜いて増幅し、その動的振る舞いを通して重力波が放射される。このような未知の重力波源からの重力波放射を調べることが必要な状況であった。

2. 研究の目的

(1)本研究のもともとの目的は、アクシバースシナリオにおけるスカラー場のブラックホール周辺での振る舞いを詳細に調べ、そこから放射される重力波の波形の定量的な予測をおこない、検出に必要な重力波テンプレートをつくることであった。特に、アクシバースシナリオで予測されるスカラー場(アクシオン場)は非線形の自己相互作用をするため、その効果を取り入れて最終状態を予測することが必要になる。

(2)一方、研究をすすめていくにしたがい、後述するように技術的困難に直面し、研究が停滞せざるを得なかった。さらに、2019年には Event Horizon Telescope が M87 と呼ばれる電波銀河の中心にあるブラックホール周辺領域の撮像(ブラックホールシャドウ)に成功するなど、新たな進展があった。そこで、当初の計画を進行しつつ、当初よりも広い視点を持ち、本プロジェクトのテーマの舞台であるブラックホール周辺の重力場そのものの性質を調べ、ブラックホール周辺で引き起こされる電磁波や重力波現象を明らかにするという目的を新たに設定した。

3. 研究の方法

(1)本研究のもともとの目的であるブラックホール周辺のスカラー場の振る舞いと重力波放射に関しては、信頼できる数値コードを作成の上、シミュレーションを行った。その他、ブラックホール周辺に磁場がある場合は、アクシオンが電磁波に転換される現象がおこるが、その現象を調べるためのコード開発もおこなった。

(2)広い観点でのアプローチに対してはいくつかのテーマを設定した。

(2-1)重力崩壊してブラックホールになる星を光学的に観測するとどのように見えるかという問題を設定し、「光線追跡法」と呼ばれる数値計算手法で計算し、その光学的像を作成した。

(2-2)ブラックホールシャドウの像の形を決めるのに重要になる概念に「光子球面」がある。これは球対称ブラックホールにおいて光子が円運動をする場所であるが、一般の動的な、対称性の低い時空では良い定義がなかった。この光子球面の一般に使える拡張概念を提案し、その性質を解析した。

(2-3)ブラックホール周辺から遠方の観測者に届く光の振る舞いに関する解析をおこなった。

(2-4)ブラックホールまわりに磁場があると、そこを伝播する光子の一部が重力波に転換される「光子・重力子変換」と呼ばれる現象がおこる。その過程で生じる重力波の量を見積った。

4. 研究成果

(1)本研究計画以前に、回転ブラックホールまわりの有質量スカラー場の振る舞いを調べる数値コードを開発してはいたが、本研究ではまず、以前使用していたコードの問題点を改良した。以前は計算領域の外側の境界で固定端の境界条件を課していた。これは場が有質量であるため、現実的な無反射境界条件を課するのが難しかったためである。本研究で無反射境界条件を課す方法

の開発に成功した。

新しいコードを使って計算しなおしたところ、以前とは違う結果が得られた。以前の計算は $l=m=1$ モードのアクシオン雲の成長の最終段階で「ポーズノバ」と呼ばれる爆発現象がおこることを示唆していた。しかし、新しいコードではポーズノバ現象はおこらず、超放射不安定によってブラックホールから引き抜いたエネルギーをそのまま遠方に放射する状態に落ちくであろうことを示唆していた。古いコードでは固定端の境界条件によって遠方に放射された場が反射されて戻ってきて、それがポーズノバの発生を引き起こしたと思われる。「調べたパラメータにおいてはアクシオン雲の成長の最終段階ではポーズノバはおこらない確率が高い」というのが得られた知見である。

次の課題として、各モード、パラメータにおける最終状態の決定に取り組んだ。狙いは長期シミュレーションによってアクシオン雲がほぼ定常になる状態まで追うことであった。しかし、この段階で研究は困難に直面した。研究実施計画においてあらかじめ指摘しておいたとおり、この現象の典型的な時間スケールがブラックホール半径の10の7乗倍以上である。私は3次元の数値コードを開発したが、それでは計算が重すぎてこの時間スケールのシミュレーションはできない。そこで、擬スペクトル法と呼ばれるより計算が軽くなる方法を用いたコードを新たに開発した。当初は、それで長期シミュレーションが可能になるだろうと期待していたが、モードの数を制限する度合いにより結果が違ってしまった。つまり、擬スペクトル法でもある程度多くのモードを考慮に入れてシミュレーションしなければ正確な結果が得られない。したがって、この方法でも計算に長時間かかる。したがって取り組んでいる問題は単に数値計算すればよいという問題ではなく、非常に難しい問題であった。

3次元コードではあるパラメータではブラックホールから引き抜いたエネルギーをそのまま遠方に放射する、ほぼ定常な最終状態と思われるものが得られた。これを論文にして発表することも考えたが、ちょうどその頃、京都大学のグループが他の解析的な方法でこのアクシオン雲の最終状態を議論し、あるパラメータではポーズノバがおこり、別のパラメータでは定常状態に落ちくくと主張した。私のコードで定常状態が得られたパラメータは、京都大学のグループが「ポーズノバが起こる」とした領域に位置しており、これもまた発表をためらわせることになった。学会等では発表をおこなったものの、論文にはできておらず、十分な成果が出たとは言えない。

本研究は現在も続けており、京大のグループも別の解析的な方法で成果をあげてきているため、相互に交流をおこなってこの問題を解決しようとしている。2022年度より別の関連テーマである科研費プロジェクトの分担研究員になっているため、本研究を継続していきたいと考えている。

関連する話題として、ブラックホール周辺に磁場があるときに、スカラー場と磁場が相互作用して電磁波を放出する現象を調べるためのコードを書いたが、状況次第で数値不安定がおこりやすい。研究会の一般講演で報告したが、論文にはできておらず、大きな成果が出たとは言えない状況である。

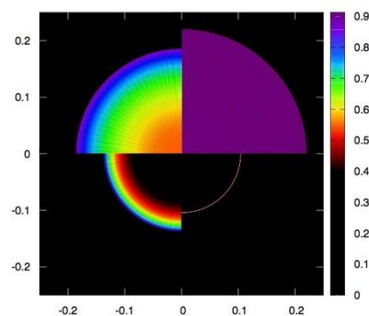
(2) 広い観点でのアプローチの成果

(2-1) 重力崩壊してブラックホールになる星を電磁波観測したときに見える映像を計算する研究をおこなった。重力崩壊する星を光学的に観測するとどのように見えるかを光線追跡法という数値手法で計算し、その光学的像を作製した。この研究は基礎的であり、いくつかの先行研究があったものの、完璧に答えを出した研究はこれまでになかった。

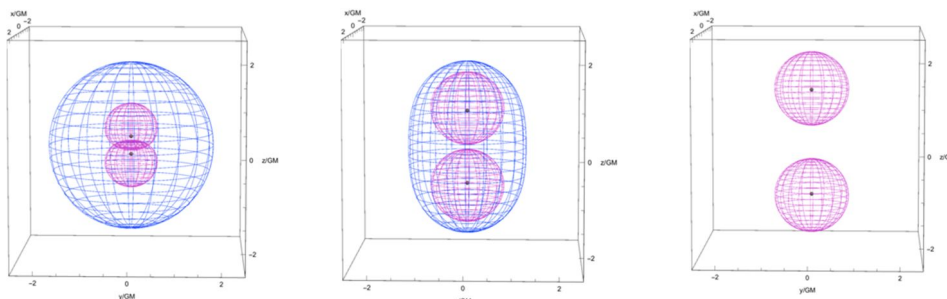
得られた像を図に示す。星の表面に固定した系では、星は紫外線を放射しているとする。重力崩壊が始まると、中心付近が次第に赤方偏移して見え、次第に赤外線になる。その部分は黒く表示してある。像の端は可視光のままであるが、これはちょうど「光子球面」近くで放射され、光子球面を何度も巡回してから観測者に届く光である。この端の可視光の領域は時間がたつにつれて小さくなる。そして最終的には見えなくなるが、端のほうは可視光が届くのであるが、届く光子数フラックスが小さくなってゆくことによって見えなくなるのだという知見が得られた。

実際の超新星爆発（より正確には爆発しない failed supernova と考えられている）においては、星のまわりにプラズマがあるため、可視光は地球に届かない。しかし、重力崩壊では「ニュートリノ球」と呼ばれるニュートリノ放射の実効的な表面があり、その信号を本研究により近似的に予言できる。したがってこの研究は銀河系内で将来超新星爆発が起こったときに、そこからのニュートリノの信号を予測するために必要な基礎研究という意味も持つ。これは論文として投稿し、出版された成果である。

重力崩壊する星の映像の理論計算



(2-2) ブラックホール時空での強重力場を特徴づける概念である「動的横捕捉面 (dynamically transversely trapping surface, DTTS)」を提案する論文を投稿し、出版された。静的球対称な時空では「光子球面」と呼ばれる光の円軌道のある球面が強重力場を特徴づける概念として広く受け入れられているが、一般的な動的時空には適用できない。そこで我々は光子球面を一般化して、一般的な動的時空における自然な概念を定義することに成功した。これはブラックホールの「見かけの地平面」と類似性を持つように定義されている。具体的には、重力源を囲む面から重力源と垂直な方向に光子を飛ばし、その光子の集合が収縮していくならば、その面は動的横捕捉面であるとする。2体ブラックホール系における動的横捕捉面の様子を図に示す。



さらに、「動的横捕捉面」が形成されるための条件を数値的に解析した別の論文も投稿し、受理されている。そこでは見かけの地平面の形成条件である「フープ仮説」との類似性が成り立つことを示した。また、電磁場がある場合における動的横捕捉面の性質を議論した論文も出版した。

また、本研究以前に共同研究者によって提案されていた別の光子球面を一般化した概念に「loosely trapped surface (LTS)」があったが、それをさらに一般化し、重力の強さを特徴づける強度パラメータを持つ概念である「重力探査面 (attractive gravity probe surface, AGPS)」を提唱した。これは強度パラメータ α が $-1/2$ であれば無限遠にある面に対応し、 $\alpha = 0$ であれば光子球面に対応し、 $\alpha = 1$ であれば地平面に対応することになる。このように重力の性質を明らかにするための基礎的な研究で成果をあげることができた。

(2-3) ブラックホールの遠方での光の振る舞いを解析し、これまでに知られていない非自明な振る舞いをする可能性があることを示した。具体的には、遠方からブラックホールの視線方向と垂直に光子を放つ状況を考える。単純に考えると、その光子は遠方に届くと期待される。しかし、重力波や物質の遠方への流れがある場合は、その光子がその流れを感じて屈折し、遠方に届かない可能性があることを指摘した。このテーマで2つの論文を投稿し、出版されている。

(2-4) 磁気圏を持つ銀河中心の超巨大ブラックホール周辺において、ブラックホールに落ち込む物質(降着円盤)から放射される光を考える。光がブラックホールまわりを旋回しながら磁場を通り抜けるときに「光子・重力子変換」と呼ばれるメカニズムによって重力波に変換される。これはこれまで認識されていなかった高周波の重力波源になりうる。その過程で生じる重力波の存在量を見積もり、観測可能性を検討した。結果は、宇宙にある全銀河からの寄与を足し合わせれば、宇宙背景重力波として観測可能性があることを示唆した。この成果は論文として投稿し、出版された。

「光子・重力子変換」はアクシオンにも類似の「光子・アクシオン変換」があることが知られており、アクシオンへの拡張も可能である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Yoshino Hiroataka, Takahashi Kazuma, Nakao Ken-ichi	4. 巻 100
2. 論文標題 How does a collapsing star look?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 084062(27ページ)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.084062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshino Hiroataka, Izumi Keisuke, Shiromizu Tetsuya, Tomikawa Yoshimune	4. 巻 2020
2. 論文標題 Transversely trapping surfaces: Dynamical version	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 023E02(34ページ)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz161	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yoshino Hiroataka, Izumi Keisuke, Shiromizu Tetsuya, Tomikawa Yoshimune	4. 巻 2020
2. 論文標題 Formation of dynamically transversely trapping surfaces and the stretched hoop conjecture	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 053E01(24ページ)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa050	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 小玉英雄, 吉野裕高	4. 巻 73
2. 論文標題 重力波観測による究極理論探査	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 752-761
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kangjae Lee, Tetsuya Shiromizu, Hirotaka Yoshino, Keisuke Izumi, and Yoshimune Tomikawa	4. 巻 2021
2. 論文標題 Loosely trapped surface and dynamically transversely trapping surface in Einstein-Maxwell system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 103E03(15ページ)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa133	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Keisuke Izumi, Yoshimune Tomikawa, Tetsuya Shiromizu, Hirotaka Yoshino	4. 巻 2021
2. 論文標題 Area bound for surfaces in generic gravitational field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 083E02(28ページ)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab089	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Masaya Amo, Keisuke Izumi, Yoshimune Tomikawa, Hirotaka Yoshino, Tetsuya Shiromizu	4. 巻 104
2. 論文標題 The asymptotic behavior of null geodesics near future null infinity: Significance of gravitational waves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 064025(14ページ)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.064025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kaishu Saito, Jiro Soda, Hirotaka Yoshino	4. 巻 104
2. 論文標題 Universal 1020Hz stochastic gravitational waves from photon spheres of black holes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 063040(7ページ)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.063040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masaya Amo, Tetsuya Shiromizu, Keisuke Izumi, Hirotaka Yoshino, Yoshimune Tomikawa	4. 巻 105
2. 論文標題 Asymptotic behavior of null geodesics near future null infinity II: curvatures, photon surface and dynamically transversely trapping surface	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 064074(10ページ)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.064074	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 吉野裕高, 早田次郎
2. 発表標題 重力誘導デコヒーレンスについて
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉野裕高, 早田次郎
2. 発表標題 確率論的 Schrodinger-Newton 方程式に従う波動関数の振る舞い
3. 学会等名 研究会「巨視的量子現象と量子重力」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hirotaka Yoshino, Keisuke Izumi, Tetsuya Shiromizu, Yoshimune Tomikawa
2. 発表標題 Dynamically Transversely Trapping Surfaces in a Kerr spacetime
3. 学会等名 Online JGRG workshop 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉野裕高, 泉圭介, 白水徹也, 富川祥宗
2. 発表標題 強重力場領域を特徴づける新しい概念の提案
3. 学会等名 The 4th workshop on Mathematics and Physics in General Relativity (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉野裕高, 早田次郎
2. 発表標題 アキシオンとブラックホール磁気圏について
3. 学会等名 ブラックホール磁気圏研究会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hirotaka Yoshino, Kazuma Takahashi, Ken-ichi Nakao
2. 発表標題 Let us watch a collapsing star: How does it look?
3. 学会等名 22nd International Conference on General Relativity and Gravitation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉野裕高, 泉圭介, 白水徹也, 富川祥宗
2. 発表標題 強重力場領域を特徴付ける新しい面の定義とその性質
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉野裕高, 小玉英雄
2. 発表標題 スカラー場の超放射について
3. 学会等名 BZ77研究会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirotaka Yoshino, Keisuke Izumi, Tetsuya Shiromizu, Yoshimune Tomikawa
2. 発表標題 Dynamically Transversely Trapping Surfaces
3. 学会等名 The 29th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG29) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉野裕高, 泉圭介, 白水徹也, 富川祥宗
2. 発表標題 Dynamically Transversely Trapping Surfaces
3. 学会等名 第21回特異点研究会－特異点と時空および関連する物理－
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉野裕高, 小玉英雄
2. 発表標題 回転ブラックホール周辺での有質量スカラー場の不安定成長：自己相互作用の効果
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroataka Yoshino, Hideo Kodama
2. 発表標題 Improved Analysis of Axion Bosenova
3. 学会等名 Molecule workshop 2018 "Dynamics in Strong Gravity Universe" (京都大学基礎物理学研究所) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉野裕高, 小玉英雄
2. 発表標題 ブラックホール・アクシオン系の最終状態について
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会 (信州大学)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroataka Yoshino, Hideo Kodama
2. 発表標題 Improved Analysis of Axion Bosenova
3. 学会等名 The 28th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG28) (立教大学) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroataka Yoshino, Hideo Kodama
2. 発表標題 Gravitational Waves from Axion Cloud around a Rotating Black Hole
3. 学会等名 Nambu Symposium 2018 (大阪市立大学)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉野裕高, 高橋一麻, 中尾憲一
2. 発表標題 重力崩壊過程にある星の撮像 (解析的側面)
3. 学会等名 第20回「特異点と時空、および関連する物理」研究会 (九州大学西新プラザ)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉野裕高, 高橋一麻, 中尾憲一
2. 発表標題 重力崩壊過程にある星の光学映像の理論計算
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会 (九州大学伊都キャンパス)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 安東正樹, 白水徹也, 浅田秀樹, 石橋明浩, 小林努, 真貝寿明, 早田次郎, 谷口敬介	4. 発行年 2020年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 432
3. 書名 相対論と宇宙の事典	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究会主催 2 件 :</p> <p>[1] ブラックホール磁気圏研究会2022 大阪市立大学杉本キャンパス基礎教育実験棟階段教室 (2022年3月8日--3月10日)</p> <p>[2] 研究会「相対論と重力研究の現在, 過去・未来」 大阪市立大学杉本キャンパス理学部E211教室 (2022年3月10日--12日)</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------