

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2022

課題番号：15K05092

研究課題名（和文）高次元ブラックホールの安定性

研究課題名（英文）Stability of Higher Dimensional Black Holes

研究代表者

石橋 明浩 (Ishibashi, Akihiro)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：10469877

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：高次元ブラックホールの安定性について3つの観点・手法で成果を得た。I. 安定性の一般的な判定基準、II：具体的モデルの摂動マスター方程式の導出、III：新しいエネルギー条件に基づく安定性判定。Iでは臨界回転および漸近AdS回転ブラックホールの超放射不安定性の判定基準を確立した。IIでは時空次元の高い極限をとる「大きな次元近似」を用いて漸近AdS高次元ブラックホールの安定性を調べた。また様々な有質量ベクトル場およびテンソル場の静的臨界ブラックホール上での線形摂動マスター方程式の導出に成功した。IIIでは漸近AdS時空の境界上における「共形不変な光的エネルギー条件」の概念を新たに提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高次元ブラックホールの安定性基準を確立したことにより、真空のダイナミカルな選択機構や余剰次元のコンパクト化機構など、超弦理論における動的現象に対する示唆を得ることができた。また、多様な高次元ブラックホール時空を、安定性の観点から系統的に分類することが可能となった。この成果は、ゲージ・重力対応を用いた応用を通して物性論や原子核物理など他の分野にも波及効果がある。また、重力現象の何が4次元に特有なのかを深く理解することが可能となり、宇宙物理学にとっても意義がある成果といえよう。我々の住む宇宙が本質的には高次元時空であると明らかになれば、人々の世界観に大きなインパクトを与え得る。

研究成果の概要（英文）：I studied the stability of higher dimensional black holes based on the following three viewpoints: I. to establish general criteria for black hole instability, II. to derive master equations for massive bosonic perturbations of some classes of higher dimensional black holes, III. to obtain general criteria for black hole stability based on the null energy conditions. For item I, we have successfully established a general criterion for the onset of super-radiant instability of asymptotically AdS, rotating black holes. For item II, by taking the so-called "Large D expansion" we studied instability of asymptotically AdS black holes. We have also successfully derived master equations for massive vector and tensor perturbations on a class of static, extremal black holes. As for item III, we have proposed a novel notion of energy conditions, that is called "Conformally Averaged Null Energy Condition" which is expected to apply for stability analyses in the AdS/CFT correspondence.

研究分野：一般相対論・重力理論

キーワード：ブラックホール 一般相対論 重力理論 超弦理論 宇宙論 高次元時空

1. 研究開始当初の背景

超弦理論は重力と素粒子のゲージ相互作用を統一する試みの最有力候補であるが、未だ摂動論を超えた枠組みでは定式化されていない。そのような状況の中、D プレーンと呼ばれる膜状ソリトン解を介して「素粒子の場の量子論」と「重力理論」が互いに等価であるという「双対性」が発見され、研究の大きな潮流を成し始めていた。この双対性の最も上手く行く具体例が、反ドジッター(AdS)時空と呼ばれるある種の高次元重力と、その無限遠の境界時空における場の量子論(CFT)の等価性を予言した「AdS/CFT 対応」であった。この対応関係においては「境界上の場の理論」側についての研究が進んでいたが、この双対性の本質を理解するため、もう一方の側である「高次元重力」の基礎的研究も望まれていた。また、超弦理論と双対性の発展に動機付けられて、高次元一般相対論の研究も大きく進展した。高次元重力の性質を最も端的に表すのが、「高次元ブラックホール」である。例えば、4次元時空では見られない位相構造をもつブラック・リング解をはじめとする様々な高次元ブラックホール厳密解が発見された。そして双対性の応用の観点からも、高次元ブラックホールの対称性や安定・不安定性といった基礎研究が望まれる状況であった。

2. 研究の目的

自然界の力の統一理論の最有力候補である超弦理論は高次元時空で記述されるため、その非摂動的ソリトン解として多様な高次元ブラックホールを自然に予言する。そのため、高次元ブラックホールの理解こそが超弦理論の非摂動的定式化へ向けた鍵となる。本研究計画は、高次元ブラックホール時空の基本的性質の内、その動的安定性・不安定性に焦点をあて、重力相互作用の観点から超弦理論の非摂動的側面を明らかにすることを目標とした。特に、回転ブラックホールに特有の超放射不安定性、熱力学的特徴と動的安定性の関係、AdS/CFT 対応を用いた安定性解析をおこない、「GL 不安定性」「SR 不安定性」「BF 制限」など、不安定性の起源を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

高次元ブラックホールの動的安定性・不安定性の基準の確立と、安定性の観点からの系統的分類のために、1. 運動方程式に現れる時間発展演算子の性質、2. 初期値問題に対する変分原理、3. 数値計算による摂動ダイナミクス研究の3つの方法を計画した。特に1.2.の方法については、安定性以外の観点からも有用となる成果を得るため、I. 安定性の一般的な判定基準を明らかにする、II. 具体的モデルでの摂動マスター方程式を導出する、III. エネルギー条件に基づく安定性の判定方法を考案する、ということを目指した。III は、I. II. のような摂動に対する安定性解析とは別に、時空上で適切に定義された何らかのエネルギーの正負や、下限の存在により時空安定性を考察する視点を与え、さらに一般相対論における様々な数学的諸定理への応用も視野に入れたものである。

4. 研究成果

本研究計画に関する成果を、22 編の査読付き論文で発表した。また、19 件(うち招待講演 10 件/うち国際学会 10 件)の学会・研究会発表をした。以下では主な成果を幾つか取り上げて簡潔に報告する。

I に関しては、まず高次元の臨界回転ブラックホールについて、その事象の地平面近傍のスケール極限から現れる AdS 時空の BF 制限に着目して、方法 2. の正準エネルギーを用いて安定性の判定条件を確立することに成功した。

[研究論文: S. Hollands, A. Ishibashi (2015)]

さらに、方法 2. の正準エネルギーの方法を漸近 AdS 回転ブラックホールに応用し、超放射不安定性の一般的判定基準を確立することに成功した。

[研究論文: S.R. Green, S. Hollands, A. Ishibashi, R.M. Wald (2016)]

[研究論文: Akihiro Ishibashi, Paolo Pani, Leonardo Gualtieri, Vitor Cardoso (2015)]

II については、時空次元の高い極限をとることで重力の自由度を単純化して解析的に扱うことを可能にする「大きな次元近似」の手法を用いて、漸近 AdS 高次元ブラックホールの安定性を調べ、一般相対論の大きな未解決問題である宇宙検閲官仮説に関する考察をした。

[研究論文: N. Iizuka, A. Ishibashi, K. Maeda (2018)]

また、様々な有質量ベクトル場および有質量テンソル場の静的臨界ブラックホール上での線形摂動マスター方程式の導出に成功した。

[研究論文: Vitor Cardoso, Takahisa Igata, Akihiro Ishibashi, Kodai Ueda (2019)]

[研究論文: Akihiro Ishibashi, Kodai Ueda (2018)]

特に、有質量ベクトル場やテンソル場は、質量のない重力波摂動に比べて同じ時空次元においても力学自由度が増大するが、その全てを余さず脱結合した常微分方程式系に帰着させることができた。これにより、一般次元の漸近 AdS 時空を含む様々な静的臨界ブラックホールの安定性解析に必要な基礎方程式を整備することができた。そして、方法 1. の運動方程式に現れる時間発展演算子について、漸近 AdS 時空の場合には安定性・不安定性と、AdS 無限遠での境界条件の種類との完全な対応関係を明らかにすることができた。この成果については現在まとめの作業を行っている。

III に関しては、本計画の研究背景にある AdS/CFT 対応への応用も視野に入れた研究を行い、AdS 時空とその境界面上での因果律に着目し、両者の因果律が整合的でなくなるような場合は、境界上での量子場に対する平均化された光的エネルギー条件 (ANEC) が破れることを、具体例を構成して示した。また、漸近 AdS 時空の境界上における「共形不変な光的エネルギー条件 (CANEC)」の概念を新たに提案することができた。これまでに提案された光的エネルギー条件とは異なり、CANEC は強結合量子場の効果を考慮した条件となっており、今後、AdS/CFT 対応に関する研究への応用が期待できる。

[研究論文: Akihiro Ishibashi, Kengo Maeda (2022)]

[研究論文: N. Iizuka, A. Ishibashi, K. Maeda (2020)]

本研究により、高次元ブラックホールの不安定性の基準を確立したことで、真空のダイナミカルな選択機構、余剰空間次元コンパクト化機構など、超弦理論における動的現象に対する示唆を得ることができた。また、多様な高次元ブラックホール時空を安定性の観点から系統的に分類することが可能となった。この成果は、ゲージ・重力対応を用いた応用を通して物性論や原子核物理など他の分野にも波及効果がある。また、一般次元の成果から、重力現象の何が 4 次元に特有なのかを深く理解することが可能となり宇宙物理学にとっても意義がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件／うち国際共著 12件／うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Chiang-Mei Chen, Yi Chen, Akihiro Ishibashi, Nobuyoshi Ohta, and Daiki Yamaguchi	4. 巻 105
2. 論文標題 Running Newton coupling, scale identification, and black hole thermodynamics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 106026
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.105.106026	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 該当する

1. 著者名 Norihito Iizuka, Akihiro Ishibashi, Kengo Maeda	4. 巻 9
2. 論文標題 Flows of extremal attractor black holes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 93
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP09(2022)093	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 Akihiro Ishibashi, Kengo Maeda	4. 巻 104
2. 論文標題 First law of entanglement entropy in AdS black hole backgrounds	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 26004
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.104.026004	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 Akihiro Ishibashi, Nobuyoshi Ohta, Daiki Yamaguchi	4. 巻 104
2. 論文標題 Quantum improved charged black holes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 66016
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.104.066016	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 Akihiro Ishibashi, Kengo Maeda	4. 巻 3
2. 論文標題 The averaged null energy condition on holographic evaporating black holes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03%282022%29104	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 Norihito Iizuka, Akihiro Ishibashi and Kengo Maeda	4. 巻 10
2. 論文標題 The averaged null energy conditions in even dimensional curved spacetimes from AdS/CFT duality	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2020)106	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 Akihiro Ishibashi, Kengo Maeda, Eric Mefford	4. 巻 100
2. 論文標題 Achronal averaged null energy condition, weak cosmic censorship, and AdS/CFT duality	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 66008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.066008	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 該当する

1. 著者名 Stefan Hollands, Akihiro Ishibashi	4. 巻 36
2. 論文標題 News versus information	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 195001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ab3c1e	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 該当する

1. 著者名 Vitor Cardoso, Takahisa Igata, Akihiro Ishibashi, Kodai Ueda	4. 巻 100
2. 論文標題 Massive tensor field perturbations on extremal and near-extremal static black holes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.044013	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 該当する

1. 著者名 Norihiko Iizuka, Akihiro Ishibashi, Kengo Maeda	4. 巻 3
2. 論文標題 Conformally invariant averaged null energy condition from AdS/CFT	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 161
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2020)161	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 Kodai Ueda and Akihiro Ishibashi	4. 巻 97
2. 論文標題 Massive vector field perturbations on extremal and near-extremal static black holes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124050
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.124050	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 Thiago Assumpcao, Vitor Cardoso, Akihiro Ishibashi, Mauricio Richartz, Miguel Zilhao	4. 巻 98
2. 論文標題 Black hole binaries: ergoregions, photon surfaces, wave scattering, and quasinormal modes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 64036
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.064036	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 該当する

1. 著者名 Akihiro Ishibashi, Kengo Maeda, Eric Mefford	4. 巻 99
2. 論文標題 Violation of the quantum null-energy condition in a holographic wormhole and infrared effects	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 26004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.026004	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 該当する

1. 著者名 Stefan Hollands, Akihiro Ishibashi, Robert M. Wald	4. 巻 34
2. 論文標題 BMS Supertranslations and Memory in Four and Higher Dimensions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 155005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/aa777a	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 該当する

1. 著者名 David Garfinkle, Stefan Hollands, Akihiro Ishibashi, Alexander Tolish, Robert M. Wald	4. 巻 34
2. 論文標題 The Memory Effect for Particle Scattering in Even Spacetime Dimensions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 145015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/aa777b	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 該当する

1. 著者名 Akihiro Ishibashi, Kengo Maeda, Eric Mefford	4. 巻 96
2. 論文標題 Holographic stress-energy tensor near the Cauchy horizon inside a rotating black hole	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 24005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.024005	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 該当する

1. 著者名 Norihiko Iizuka, Akihiro Ishibashi, Kengo Maeda	4. 巻 3
2. 論文標題 Cosmic Censorship at Large D: Stability analysis in polarized AdS black branes (holes)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 177
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2018)177	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 Stephen R. Green, Stefan Hollands, Akihiro Ishibashi, Robert M. Wald	4. 巻 33
2. 論文標題 Superradiant instabilities of asymptotically anti-de Sitter black holes	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 125022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/0264-9381/33/12/125022	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 該当する

1. 著者名 Akihiro Ishibashi, Kengo Maeda, Takashi Okamura	4. 巻 94
2. 論文標題 Holographic superfluid flows with a localized repulsive potential	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 46007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.94.046007	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 Sefan Hollands, Akihiro Ishibashi	4. 巻 339
2. 論文標題 Instabilities of extremal rotating black holes in higher dimensions	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Communications in Mathematical Physics	6. 最初と最後の頁 949-1002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00220-015-2410-0	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 該当する

1. 著者名 Norihiko Iizuka, Akihiro Ishibashi, Kengo Maeda	4. 巻 8
2. 論文標題 A rotating hairy AdS3 black hole with the metric having only one Killing vector field	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2015)112	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 Akihiro Ishibashi, Paolo Pani, Leonardo Gualtieri, Vitor Cardoso	4. 巻 9
2. 論文標題 Superradiant instability of the Kerr brane	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2015)209	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 該当する

[学会発表] 計18件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Akihiro Ishibashi
2. 発表標題 Averaged null energy condition in curved spacetime from AdS/CFT
3. 学会等名 YITP workshop Recent progress in theoretical physics based on quantum information theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田航大
2. 発表標題 Massive tensor field perturbations on extremal and near-extremal static black holes"
3. 学会等名 The 29th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田航大
2. 発表標題 Massive tensor field perturbations on extremal and near extremal static black holes
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 上田航大
2. 発表標題 最大荷電ブラックホール時空上の有質量ベクトル場の摂動展開法
3. 学会等名 日本物理学会2018年度秋季大会・信州大学
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上田航大
2. 発表標題 最大荷電ブラックホール時空上の有質量テンソル場の摂動展開法
3. 学会等名 日本物理学会74回年次大会・九州大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石橋明浩
2. 発表標題 ブラックホールの数理：その大域構造と安定性
3. 学会等名 日本物理学会74回年次大会・九州大学（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石橋明浩
2. 発表標題 On massive vector perturbations in extremal black holes
3. 学会等名 京都大学基礎物理学研究所国際モレキュール型研究会「Dynamics in Strong Gravity Universe」(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上田航大
2. 発表標題 Massive vector field perturbations on extremal static black holes
3. 学会等名 国際研究会「The 28th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan」(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akihiro Ishibashi
2. 発表標題 Asymptotic symmetry and Memory effects
3. 学会等名 Infrared physics of gauge theories and quantum dynamics of inflation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石橋明浩
2. 発表標題 重力の記憶
3. 学会等名 五色浜相対論研究会 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 石橋明浩
2. 発表標題 Memory and symmetry
3. 学会等名 KMI 研究会 「General relativity in higher dimensions」 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 石橋明浩
2. 発表標題 高次元重力
3. 学会等名 第28回理論懇シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 石橋明浩
2. 発表標題 BMS Supertranslations and Gravitational memory
3. 学会等名 研究会「Holography, Quantum Entanglement and Higher Spin Gravity」 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石橋明浩
2. 発表標題 A rotating hairy AdS(3) black hole with only one Killing vector field
3. 学会等名 One Hundred Years of STRONG GRAVITY (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 石橋明浩
2. 発表標題 AdS時空の不安定性
3. 学会等名 名古屋大学理学研究科談話会 (招待講演)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 石橋明浩
2. 発表標題 Perturbation and stability of higher dimensional black holes
3. 学会等名 GR 100 years in Lisbon (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 石橋明浩
2. 発表標題 Superradiant Instability of AdS black holes
3. 学会等名 VIII Black Holes Workshop (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 石橋明浩
2. 発表標題 一般相対論の今
3. 学会等名 一般相対論～これからの100年 (招待講演)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 石橋明浩	4. 発行年 2018年
2. 出版社 サイエンス社	5. 総ページ数 200
3. 書名 ブラックホールの数理 -- その大域構造と微分幾何 --	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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			
フランス	Ecole Polytechnique			
ポルトガル	Universidade de Lisboa			
ドイツ	Leipzig University			
フランス	Ecole Polytechnique			
ブラジル	Universidade Federal do ABC			
ポルトガル	Universidade de Lisboa			
ドイツ連邦共和国	University of Leipzig			
アメリカ合衆国	University of Chicago	Oakland University	University of California, Santa Barbara	
ドイツ連邦共和国	University of Leipzig			
アメリカ合衆国	University of Chicago	Oakland University	University of California, Santa Barbara	
ドイツ連邦共和国	University of Leipzig			

共同研究相手国	相手方研究機関			
イタリア共和国	University of Roma			
ポルトガル共和国	Institute Superior Tecnico			