

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：32620

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03830

研究課題名（和文）「中間子の重力形状因子はJ-PARCで観測できるか？」のQCDに基づく研究

研究課題名（英文）"Can we observe the gravitational form factors of the pion at J-PARC?": studies based on QCD

研究代表者

田中 和廣 (Tanaka, Kazuhiro)

順天堂大学・医学部・教授

研究者番号：70263671

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：未知であったツイスト4の重力形状因子の前方極限（ゼロ運動量移行）の値を、トレース異常に基づく厳密式を用い、その摂動効果は3ループ、非摂動効果は実験データおよび格子QCDからの最新のインプットで求めた理論予測値として定量計算し、核子と中間子で世界最高精度（核子は誤差2%、中間子は誤差50%）を得た。これは、核子については当初の目標を超えた精密化であり、中間子についても今後の実験データおよび格子QCD計算の進展によって同様な高精度の予言ができる理論である。この結果を応用して、核子と中間子の質量のクォーク、グルーオンそれぞれからの寄与への分解に、新しい結果とそれが示唆する描像の提案もした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々の世界を構成する基本要素である陽子を、その内部の素粒子（クォーク、グルーオン）を用いて表現し、素粒子の基礎理論であるQCDに基づいて計算した。特に、重力形状因子と呼ばれる、陽子内でのクォークの空間分布およびグルーオンの空間分布を表す形状因子の前方（運動量移行がゼロ）での値を誤差2パーセント以下の高精度で決定することに成功した。この値は陽子の全エネルギーと関連するため、陽子の質量を、ほぼ質量ゼロである素粒子それぞれの作用を起源とする成分の合計として表す公式を導くことへの応用や、今後の新しい実験データとの比較が待たれるなど、発展性のある結果である。中間子に対する拡張や関連する他の成果も得た。

研究成果の概要（英文）：Previously unknown values of the twist-4 gravitational form factor in the forward limit are quantitatively calculated using an exact formula based on the trace anomaly. In this formula, we incorporate the perturbative effects up to three loops and the nonperturbative effects using the inputs for matrix elements from recent empirical and lattice QCD results. This resulted in our theoretical prediction of the values of the twist-4 gravitational form factor in the forward limit, with the world's highest accuracy of 2% and 50% for nucleons and pions, respectively. This level of precision for nucleons surpasses our initial goals, and our theory would allow similar high accuracy predictions for pions when experimental data or lattice QCD calculations were improved in the future. These results have also led to a new mass decomposition formula, for nucleons as well as for pions, into the contributions originating from quarks and from gluons, providing new insights into structure of hadrons.

研究分野：ハドロン物理、素粒子物理の理論

キーワード：重力形状因子 QCD J-PARC エネルギー・運動量テンソル GPD 3ループ QCD和則 高次ツイスト

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) QCD のエネルギー・運動量テンソルのハドロン行列要素は、ハドロンと重力子との相互作用を決定し重力形状因子と呼ばれる。重力形状因子は、ハドロン内部での圧力の分布やハドロン深部環境下でクォーク、グルーオンが感受する力の“ずれ応力”の分布をも表現し、ハドロンがクォークとグルーオンの非摂動効果によってどのように形づくられているかに対して新しい視点を与える量である。QCD のエネルギー・運動量テンソルのハドロン行列要素を表す重力形状因子に、ツイスト 2、3、4 に対応する形状因子があることはハドロンの種類によらずあてはまり、ツイスト 3 と 4 のものについては、核子や中間子をはじめあらゆるハドロンで振る舞いが未知であった。

(2) J-PARC の 2 次中間子ビームを中間子の“標的代わり”にした散乱データから中間子の重力形状因子検出が可能かどうかの検討、中間子の重力形状因子それ自体の理論の整備、また、それらを総合して物質深部の構造・安定性についての新しい視点・理解として何が目指せるのか、の解明が未解決の重要な課題として浮かび上がった。

2. 研究の目的

(1) ハドロンの重力形状因子は、(実および仮想)光子あるいは他のハドロンとの高エネルギー散乱実験のデータから「歪化(非前方パートン分布あるいは一般化パートン分布関数、GPD)関数」を検出すれば、これを通してその振舞いを割り出せる。J-PARC の 2 次荷電中間子の大強度・高エネルギービームを、金など原子番号 $Z = 1$ の原子核標的と超辺縁衝突させる場合の断面積の理論計算を行い、 Z の 2 乗に比例するシグナルから中間子の歪化関数の検出が可能か、定量的に明らかにする。さらにそこから重力形状因子まで求めるのに十分なシグナルが得られるかを明らかにすることを目的とする。

(2) 断面積の計算とその理論誤差の評価、さらに重力形状因子決定へのインパクトの評価には、中間子の歪化関数や重力形状因子それ自体の理論の整備も不可欠で、これも並行して進めていく。ハドロン内部の描像と安定性の理解を書き改める成果を目指す。

3. 研究の方法

(1) J-PARC の 2 次中間子ビームを、金など原子番号 $Z = 1$ の原子核標的と超辺縁衝突させる場合について理論計算を行う。入射する荷電中間子の側から見ると、原子核の電荷 Ze は高速で運動し光子のフラックスを発生させる。この光子と荷電中間子の高エネルギー散乱として、光子のフラックスが荷電中間子の深部のクォークと相互作用することによって引き起こされる排他的(exclusive)散乱に注目し、QCD の短距離効果と長距離効果への因子化(演算子積展開)の手法で計算する。短距離効果は摂動 QCD で計算できる。長距離効果は中間子の歪化関数で表される。歪化関数は、主要項(ツイスト 2)とツイスト 3 補正項までの精度で扱い、これらの振幅への寄与を特定する。この排他的“深部散乱”振幅と競合(干渉)するプロセスを、次に計算する。競合過程に現れるソフトな QCD 効果は、光円錐 QCD 和則の方法で評価する。競合過程の振幅の方が深部散乱振幅よりも大きい可能性があり、断面積は、競合過程振幅の絶対値の 2 乗、深部散乱振幅と競合過程振幅の干渉項、深部散乱振幅の絶対値の 2 乗、の和で書ける。この各項が、終状態粒子の角分布について特有のパターンをもつ可能性を検討する。また、最も大きいと予想される競合過程振幅の絶対値の 2 乗は、測定例が豊富でないソフトな QCD 効果の検出に使えるので、J-PARC で期待されるシグナルを検討しておく。以上は、代表者と分担者で互いに突き合わせて進める(次に述べるパラメトリゼーション関連は分担者が主に担当)。

(2) 中間子のツイスト 2 歪化関数については、モデル化したパラメトリゼーションがあるので、不定性を付加して用いる。ツイスト 3 歪化関数について、同様なパラメトリゼーションが先行研究でつくられているか調査し、無い場合には自前で用意する。これら歪化関数のパラメトリゼーションを上記の断面積計算に用い、ツイスト 2、3 の歪化関数を検出できるか、観測量がパラメトリゼーションのどのパラメーターに敏感か調べ、有効なスキームを検討する。歪化関数をアイソスカラー成分とアイソベクター成分に分解する方法も検討する。また、J-PARC の大強度ビームの場合のシグナルの大きさ、 Z の 2 乗への依存性のスロープを理論誤差を明確にして計算し、中間子の歪化関数が J-PARC でどれだけの精度で検出できるか、さらに重力形状因子へのインパクトはどうか検討する。

(3) 代表者は重力形状因子自体を理論的に解明する研究も進め上記の計画に利用・反映する。重力形状因子の繰り込みスケール依存性と QCD のトレース・アノマリーとの間に新しい関係があることを見出しているため、3 ループレベルで中間子の重力形状因子に適用する。この結果は運動量移行がゼロのときの厳密な関係を与えることになるので、運動量移行への依存性は、別

途、QCD 和則を用いて評価する。

4. 研究成果

(1) 前方極限（ゼロ運動量移行）でのツイスト 4 の重力形状因子については、繰り込みスケールに対する依存性のみならずスケールが大きいときの漸近的値が、QCD のトレース・アノマリーに関係づけられることを、2 ループまでの近似で本研究課題開始以前の研究結果として得ていたが、この結果を 3 ループレベルに拡張することができた。3 ループにおいても、漸近値は、クォーク質量およびシグマ項と呼ばれる量に比例する効果を除き、カラーの数とフレーバー数で確定する値として求めることができた。

この前方極限（ゼロ運動量移行）での繰り込みスケール依存性の式を、核子行列要素の場合に定量計算した。繰り込みスケール無限大極限では、QCD のトレース・アノマリーに関係した漸近的値になることがわかっていたが、この漸近値への接近は当初の予想よりずっと緩やかで、現象論的に重要なエネルギースケールでは 3 ループ補正まで取り入れれば精密な予言ができることがわかった。3 ループ補正まで取り入れた精密な計算を核子の場合に行った。クォーク質量とシグマ項と呼ばれる量に比例する効果からの影響（不定性）を含めた数値予言を得た。また、同様な 3 ループ定量計算を中間子の場合に拡張し数値予言を求めたところ、QCD のトレース・アノマリーに関係した漸近的値への接近はやはり緩やかだが、クォーク質量に比例する寄与が主要項を与え、核子の場合とは異なる特徴が明らかとなった。

以上のように、QCD のトレース異常に起因する厳密な式を用い、摂動効果は 3 ループ、非摂動効果は実験データおよび格子 QCD からの最新のインプットで求めた NNLO QCD 予言値として、ツイスト 4 の重力形状因子の前方極限（ゼロ運動量移行）での定量計算を核子と中間子のそれぞれの場合について、現時点で実行可能な世界最高精度（核子は誤差 2%、中間子は誤差 50%）で完了することができた。これは、核子については当初の目標を超えて精密化することができたものであり、中間子についても、今後の実験データあるいは格子 QCD 計算の進展によって同様な高精度の理論予言が実現できる理論を提示することができた。

さらに、定量計算結果を応用し、核子や中間子の質量構造（全質量へのクォーク、グルーオンそれぞれからの寄与への分解）の新しい結果とそれが示唆する描像を提案することができた。

(2) 重力形状因子と歪化関数との関係を与える理論式の整備を行った。重力形状因子の母関数となる歪化関数について、エルミート性、パリティ保存、時間反転不変性を用いた考察から、従来知られていなかった新奇なトランスバーシティ歪化関数をスピン 3/2 ハドロンに対して求めた。また、歪化関数はハドロン内の光的（light-like）2 点関数であるので、これをローレンツ変換とスケール変換を用いて空間的 2 点関数と関係付けそのマッチング係数関数を 1 ループ計算することも行った。また、ハドロンが重いクォークを含む（例えば B 中間子）場合の光的 2 点関数に現れるカスプ特異性に由来する強いスケール依存性について、2 ループ異常次元も含めた次主要次数(NLO)で扱う方法を開発した。

歪化関数や空間的 2 点関数とは異なるタイプのハドロン内 2 点関数として重要なものに、横運動量依存分布関数（TMD 関数）が知られているが、これについて当初予定していなかった進展があった。スピン 1 のハドロンに対する横運動量依存クォーク分布関数（クォーク TMD 関数）について、クォーク相関関数の独立なテンソル構造への分解として QCD 演算子に基づく定義を与え、特に、ツイスト 3 と 4 においてこれまで知られていなかった新しい TMD 関数を明らかにし、全部で 32 の TMD 関数が存在することを示した。これらの TMD 関数の中に、横運動量で積分すると時間反転不変性からゼロになる総和則を満たすものが存在することも見付けた。また、スピン 1 のハドロン、高次ツイストパートン分布関数を分類し、そのツイスト 2 部分を抽出する関係式を導いた。ツイスト 2 部分を抽出したあとの残りの部分を、クォーク場の QCD 運動方程式を用いることにより 3 体以上の多体パートン分布関数で表す関係式も導いた。スピン 1 粒子の例として重陽子に対して、ツイスト 3 と 4 において可能な TMD 関数とパートン分布関数を示し、テンソル偏極パートン分布関数とツイスト 3 の多体パートン分布関数の間の関係式を研究して、将来の実験研究の重要性を説明した。

(3) 中間子ビームを用いた J-PARC プロセスの断面積を評価するための光円錐 QCD 和則の扱いでは、和則の分散公式の導出を行い、非連結なカレント行列要素と連結なものを含む公式を導出して非連結なカレント行列要素の役割を明らかにし、非連結なカレント行列要素の寄与を中間子の歪化関数を用いて表す公式を得た。J-PARC プロセスの断面積の計算については、計算式に当初の想定を越えた項の存在が明らかになり、その扱いについての先行研究も無かったが、分散公式の一般理論に基づき対処法を検討して扱った。

米国フェルミ研究所のニュートリノビームを利用して核子の歪化関数および重力形状因子を観測する可能性の検討は、当初の計画にはなかった内容であるが進展があった。ニュートリノ反応を利用して、核子の歪化関数および重力形状因子を求める可能性を、Goloskokov-Kroll の歪化関数のパラメトリゼーションを用いて $\nu+N \rightarrow \mu+N'+\pi$ の断面積を計算して検討し、断面積へのクォークとグルーオンそれぞれの寄与を求めた。このニュートリノ反応における中間子生成過程の断面積の計算結果から、荷電生成と中性生成はそれぞれ、グルーオン歪化関数とクォーク歪化関数の決定に役立つことを示した。

(4) J-PARC での観測では、重力形状因子の非前方（有限運動量移行）の振る舞いも重要となるので、有限運動量移行の場合に QCD の非摂動効果を扱って重力形状因子の振る舞いを求める試みとして、ツイスト 3 と 4、および 2 のものも含め 中間子の重力形状因子を、QCD 和則を用いて評価するための定式化を行った。QCD の非摂動効果と摂動効果を一貫した手法で扱うため、形状因子を 3 点関数の QCD 和則で計算する従来の方法を改良し、2 点関数の QCD 和則を構成して、大運動量移行のみならず低い運動量移行の領域にも適用範囲を拡張できた。和則の分散公式の導出および演算子積展開主要項の計算を行い、ツイスト 2 と 3 と 4 のテンソル構造の抽出をすることができた。2 点関数の演算子積展開の補正項として、中間子の高次ツイスト光円錐波動関数で表される寄与の定量評価を行い、重力形状因子が低運動量領域で抑制あるいは負になる特徴的振る舞いを示すことができた。

(5) B 中間子のような軽い反クォークと重いクォークからなる系に対する重力形状因子を考え、重いクォークの質量が無限大の極限において成り立つ関係を導出した。また、このような系についても、質量構造を表現する基本非摂動パラメーターをトレース・アノマリーに関係づける公式を求めることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 24件 / うち国際共著 19件 / うちオープンアクセス 23件）

1. 著者名 Dongyan Fu, Yubing Dong, S. Kumano	4. 巻 109
2. 論文標題 Transversity generalized parton distributions in spin-3/2 particles	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 96006, 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.109.096006	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 V. D. Burkert et al. (S. Kumano 71st author)	4. 巻 131
2. 論文標題 Precision Studies of QCD in the Low Energy Domain of the EIC	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress in Particle and Nuclear Physics	6. 最初と最後の頁 104032, 1-74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pnnp.2023.104032	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 F. Gross et al. (S. Kumano, 45th author)	4. 巻 83
2. 論文標題 50 years of Quantum Chromodynamics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 1125, 1-636
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-023-11949-2	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 K. Tanaka	4. 巻 2303
2. 論文標題 Twist-four gravitational form factor at NNLO QCD from trace anomaly constraints	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 013(1-33)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2023)013	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 K. Tanaka	4. 巻 37
2. 論文標題 Three-loop Corrections to the Quark and Gluon Decomposition of the QCD Trace Anomaly and Their Applications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 020405(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.37.020405	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 S. Kumano	4. 巻 4
2. 論文標題 J-PARC hadron physics and future possibilities on color transparency	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the workshop on The Future of Color Transparency, Hadronization and Short-Range Nucleon- Nucleon Correlation Studies, Physics	6. 最初と最後の頁 565-577
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/physics4020037	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 S. Kumano, Qin-Tao Song	4. 巻 8
2. 論文標題 Transverse-momentum-dependent parton distribution functions for spin-1 hadrons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 SciPost Physics Proceedings	6. 最初と最後の頁 174(1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21468/SciPostPhysProc.8.174	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 S. Kumano, Qin-Tao Song	4. 巻 8
2. 論文標題 Possible studies of gluon transversity in the spin-1 deuteron at hadron-accelerator facilities	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 SciPost Physics Proceedings	6. 最初と最後の頁 100(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21468/SciPostPhysProc.8.100	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 S. Kumano, Qin-Tao Song	4. 巻 3
2. 論文標題 Gluon transversity and TMDs for spin-1 hadrons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Suplemento de la Revista Mexicana de Fisica	6. 最初と最後の頁 0308097(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.31349/SuplRevMexFis.3.0308097	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 S. Kumano, Qin-Tao Song	4. 巻 37
2. 論文標題 Useful relations and sum rules for PDFs and multiparton distribution functions of spin-1 hadrons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 020308(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.37.020308	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 S. Kumano, Qin-Tao Song	4. 巻 37
2. 論文標題 TMDs for spin-1 hadrons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 020130(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.37.020130	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 Shunzo Kumano, Qin-Tao Song	4. 巻 2021
2. 論文標題 Twist-2 relation and sum rule for tensor-polarized parton distribution functions of spin-1 hadrons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2021)141	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 永江知文他、熊野俊三	4. 巻 66
2. 論文標題 日本の核物理の将来レポート 2021年版7章「核子構造の物理」	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 原子核研究	6. 最初と最後の頁 1-316
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 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 Shunzo Kumano, Qin-Tao Song	4. 巻 826
2. 論文標題 Equation-of-motion and Lorentz-invariance relations for tensor-polarized parton distribution functions of spin-1 hadrons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136908 ~ 136908
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2022.136908	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 Shunzo Kumano, Roberto Petti	4. 巻 NuFact2021
2. 論文標題 Possible studies on generalized parton distributions and gravitational form factors in neutrino reactions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 092, 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.402.0092	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 Shunzo Kumano, Qin-Tao Song	4. 巻 101
2. 論文標題 Deuteron polarizations in the proton-deuteron Drell-Yan process for finding the gluon transversity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 094013, 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.094013	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 Shunzo Kumano, Qin-Tao Song	4. 巻 103
2. 論文標題 Transverse-momentum-dependent parton distribution functions up to twist 4 for spin-1 hadrons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 014025, 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.014025	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 A. Arbuzov et al. (Shunzo Kumano 17th author)	4. 巻 in press
2. 論文標題 On the physics potential to study the gluon content of proton and deuteron at NICA SPD	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress in Nuclear and Particle Physics	6. 最初と最後の頁 1-48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pnnp.2021.103858	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 R. Abdul Khalek et al. (Shunzo Kumano 150th author)	4. 巻 2103.05419
2. 論文標題 Science Requirements and Detector Concepts for the Electron-Ion Collider: EIC Yellow Report	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 arXiv:2103.05419	6. 最初と最後の頁 1-902
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 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 Shunzo Kumano	4. 巻 2019 version
2. 論文標題 Gravitational sources in the microscopic world and novel hadron physics by gluon transversity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 KEK Annual Report	6. 最初と最後の頁 50-51
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 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 Kazuhiro Tanaka	4. 巻 26
2. 論文標題 Operator Relations for Gravitational Form Factors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 021003 (1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.26.021003	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 S. Kumano, Qin-Tao Song	4. 巻 101
2. 論文標題 Gluon transversity in polarized proton-deuteron Drell-Yan process	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 054011 (1-22)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.054011	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 S. Kumano, Qin-Tao Song	4. 巻 101
2. 論文標題 Deuteron polarizations in the proton-deuteron Drell-Yan process for finding the gluon transversity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 094013 (1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.094013	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 熊野俊三	4. 巻 第64巻
2. 論文標題 ハドロンの重力形状因子	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 原子核研究	6. 最初と最後の頁 76-89
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 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 -

[学会発表] 計72件(うち招待講演 35件/うち国際学会 46件)

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Novel hadron physics by 3D and spin-1 structure functions
3. 学会等名 Yonsei workshop series on Nuclear Hadron Physics-3, Yonsei University, Seoul, South Korea, April 6, 2023 (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Structure functions of the deuteron
3. 学会等名 CFNS workshop on Electron-Nuclei Interaction at EIC, CFNS, Stony Brook University, Stony Brook, New York, USA, July 7, 2023 (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Structure functions of the spin -1 deuteron
3. 学会等名 ECT* workshop on Tensor Spin Observables, ECT*, Trento, Italy, July 10, 2023 (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Progress on GPD tomography and spin-1 structure functions
3. 学会等名 Seminar at Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Huizhou, Guangdong, China, August 15, 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 GPD program with hadronic beams
3. 学会等名 ECT*-APCTP joint workshop: exploring resonance structure with transition GPDS, ECT*, Trento, Italy. August 23, 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中和廣
2. 発表標題 重力形状因子に対するQCD関係式
3. 学会等名 第20回高エネルギーQCD・核子構造勉強会, 理化学研究所(和光市), 2023年9月19日 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuhiro Tanaka
2. 発表標題 QCD relations for gravitational form factors
3. 学会等名 KPS-JPS Joint Symposium on EIC (Electron-Ion Collider) physics of Korean Physical Society Fall Meeting, Changwon, Korea, October 24-27, 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuhiro Tanaka
2. 発表標題 Perturbative QCD constraints on the gravitational form factors
3. 学会等名 6th Joint Meeting of the American Physical Society Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, Waikoloa, USA, November 26-December 1, 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuhiro Tanaka
2. 発表標題 Pion gravitational form factors from QCD sum rules
3. 学会等名 6th Joint Meeting of the American Physical Society Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, Waikoloa, USA, November 26-December 1, 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 3D tomography of hadrons with hadron and lepton beam
3. 学会等名 6th Joint Meeting of the American Physical Society Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, Waikoloa, USA, November 26-December 1, 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 TMDs and PDFs for spin-1 hadrons up to twist 4
3. 学会等名 6th Joint Meeting of the American Physical Society Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, Waikoloa, USA, November 26-December 1, 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuhiro Tanaka
2. 発表標題 Twist-four quark/gluon gravitational form factor $\bar{C}(q,g)$ at NNLO QCD from trace anomaly constraints
3. 学会等名 RIKEN-BNL Research Center Workshop on Generalized Parton Distributions for Nucleon Tomography in the EIC Era, Upton, USA, January 17-19, 2024 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田中和廣
2. 発表標題 中間子の重力形状因子に対するQCD和則：ツイスト4補正の効果
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会、オンライン開催、2024年3月18日-21日
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 川村浩之, 田中和廣
2. 発表標題 B中間子波動関数のNLO発展方程式の配位空間での解析
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会、オンライン開催、2024年3月18日-21日
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 董宇兵, 付東彦, 熊野俊三
2. 発表標題 スピン3/2 ハドロンの一般化パートン分布の研究
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会、オンライン開催、2024年3月18日-21日
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 陳旭榮, 熊野俊三, 國友理紗, 吳思雨, 謝垂平
2. 発表標題 ニュートリノ反応におけるパイ中間子生成断面積を用いた一般化パートン分布の研究
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会、オンライン開催、2024年3月18日-21日
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 TMDs, PDFs, and multiparton distributions of spin-1 hadrons and their relations
3. 学会等名 29th International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Recent progress on TMDs and PDFs of spin-1 hadrons
3. 学会等名 6th International Workshop on Transverse Polarization Phenomena in Hard Processes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Studies of GPDs and gravitational form factors at KEKB, J-PARC, and Fermilab-LBNF
3. 学会等名 Workshop on Origin of the Visible Universe: Unraveling the Proton Mass (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Gravitational form factors of hadrons from GPDs
3. 学会等名 Workshop on Revealing emergent mass through studies of hadron spectra and structure (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Prospects on GPDs and structure functions of spin-1 deuteron
3. 学会等名 APCTP Workshop on the Physics of Electron Ion Collider (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Progress on structure functions of the spin-1 deuteron
3. 学会等名 Workshop on Tomography of light nuclei at an EIC (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuhiro Tanaka
2. 発表標題 Twist-four gravitational form factor $\bar{C}_{\{q,g\}}$ at NNLO QCD from trace anomaly constraints
3. 学会等名 The 30th international workshop on deep-inelastic scattering and related subjects (DIS 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中和廣
2. 発表標題 中間子の重力形状因子に対するQCD和則
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川村浩之, 田中和廣
2. 発表標題 ブースト変換した非局所演算子に基づく準(擬)パートン分布関数の因子化
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 熊野俊三, 宋勤涛
2. 発表標題 クォークの運動方程式を用いたスピン1粒子のパートン分布関数の関係式
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中和廣
2. 発表標題 核子および中間子のツイスト4重力形状因子のNNLO QCD計算とシグマ項
3. 学会等名 日本物理学会 春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川村浩之, 田中和廣
2. 発表標題 ブースト変換した非局所演算子に基づく準(擬)パートン分布関数の因子化II
3. 学会等名 日本物理学会 春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 熊野俊三, 國友理紗
2. 発表標題 ニュートリノ反応を用いた核子の重力形状因子に関する理論研究
3. 学会等名 日本物理学会 春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 熊野俊三, 松本理恵子
2. 発表標題 量子コンピュータを用いた重いクォーク束縛系の研究
3. 学会等名 日本物理学会 春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Possible studies of gluon transversity in the spin-1 deuteron at hadron-accelerator facilities
3. 学会等名 28th International workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects (DIS2021), (Online) Stony Brook, New York, USA, April 14, 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊野俊三
2. 発表標題 Electric quadrupole moment of π^-
3. 学会等名 Meeting of the K10 Task Force at J-PARC, (Online) Tokai, Japan, April 15, 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Hadron tomography and gravitational form factors
3. 学会等名 Workshop on Mass in the Standard Model and Consequences of its Emergence, (Online) ECT*, Trento, Italy, April 20, 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 TMDs for spin-1 hadrons
3. 学会等名 QCD Evolution Workshop 2021, (Online) UCLA, Los Angeles, USA, May 14, 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 J-PARC hadron physics and future possibilities on color transparency
3. 学会等名 Workshop on The Future of Color Transparency and Hadronization Studies at Jefferson Lab and Beyond, (Online) USA-eastern time, MSU/Orsay/FIU/Penn State, June 7, 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Gluon transversity and TMDs for spin-1 hadrons
3. 学会等名 19th International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure (Haron2021), (Online) Mexico City, Mexico, July 28, 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Structure functions of spin-1 deuteron
3. 学会等名 8th EicC workshop in Lanzhou, (Online) Lanzhou, China, August 27, 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Possible studies on generalized parton distributions and gravitational form factors by high-energy LBNF neutrino beam
3. 学会等名 22nd International Workshop on Neutrinos from Accelerators (NuFact 2021), (Online/In person) Cagliari, Italy, September 9, 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuhiro Tanaka
2. 発表標題 Three-loop corrections to the quark and gluon decomposition of the QCD trace anomaly and their applications
3. 学会等名 The 24th International Spin Symposium (SPIN2021), hybrid (Matsue, Japan and online), October 18-22, 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 TMDs for spin-1 hadrons
3. 学会等名 The 24th International Spin Symposium (SPIN2021), hybrid (Matsue, Japan and online), October 18-22, 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川村浩之, 田中和廣
2. 発表標題 B中間子の光円錐波動関数と擬波動関数への輻射補正の解析
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会, オンライン (Zoom) 開催, 2021年9月14日-17日
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中和廣
2. 発表標題 核子のツイスト4の重力形状因子に対する3ループQCD補正の効果
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会, オンライン (Zoom) 開催, 2021年9月14日-17日
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊野俊三, 宋勤涛
2. 発表標題 スピン1粒子のツイスト3パートン分布関数
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会, オンライン (Zoom) 開催, 2021年9月14日-17日
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Polarized PDFs and TMDs for spin-1 hadrons
3. 学会等名 5th Workshop on QCD Structure of the Nucleon, (In person/Online) Alcala de Henares, Madrid, Spain, October 6, 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 Shunzo Kumano
2 . 発表標題 Novel hadron physics by structure functions of spin-1 hadrons
3 . 学会等名 Light Cone 2021 Conference: Physics of Hadrons on the Light Front, (In-person/Online) Jeju Island, South Korea, November 30, 2021 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Kazuhiro Tanaka
2 . 発表標題 Operator relations for the GPDs and the gravitational form factors of hadrons
3 . 学会等名 High Energy Accelerator Research Organization (KEK) theory-center workshop on GPDs and related topics at J-PARC, online, Tsukuba, Japan, December 22, 2021 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Shunzo Kumano
2 . 発表標題 Possible GPD studies at the Fermilab long-baseline neutrino facility
3 . 学会等名 High Energy Accelerator Research Organization (KEK) theory-center workshop on GPDs and related topics at J-PARC, online, Tsukuba, Japan, December 22, 2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Shunzo Kumano
2 . 発表標題 Hadron physics from baryon structure
3 . 学会等名 Second International Workshop on Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (2nd J-PARC HEF-ex WS), (Online) J-PARC, Tokai, Japan, February 18, 2022 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 田中和廣
2. 発表標題 クォークおよびグルーオンのエネルギー運動量テンソルのそれぞれへのト्रेसアノマリーと 中間子の質量公式・重力形状因子への応用
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会, オンライン (Zoom) 開催, 2022年3月15日-19日
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川村浩之, 田中和廣
2. 発表標題 B中間子の光円錐波動関数と擬波動関数の摂動的マッチングについて
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会, オンライン (Zoom) 開催, 2022年3月15日-19日
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中和廣
2. 発表標題 QCDト्रेसアノマリーのクォークおよびグルーオンのエネルギー運動量テンソルの寄与への分解の3ループ公式
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会, オンライン (Zoom) 開催, 2020年9月14日-17日
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuhiro Tanaka
2. 発表標題 Accessing nucleon GPDs with the exclusive pion-induced Drell-Yan process at J-PARC
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会シンポジウム Japan-Korea symposium on high-energy reactions and flavors in quark matter, オンライン (Zoom) 開催, 2021年3月12日-15日 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中和廣
2. 発表標題 核子のツイスト4の重力形状因子に対する3ループQCD補正の効果
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会, オンライン (Zoom) 開催, 2021年3月12日-15日
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Possible studies of polarized structure functions for the spin-1 deuteron at hadron accelerator facilities
3. 学会等名 Online seminar, Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia, May 21, 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 熊野俊三, 宋勤涛
2. 発表標題 グルーオン・トランスバーシティ分布を用いた重陽子の新たな構造研究
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会, オンライン (Zoom) 開催, 2020年9月14日-17日
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Gluon transversity and tensor-polarized gluon distribution in the deuteron
3. 学会等名 Online workshop, Gluon content of proton and deuteron with the Spin Physics Detector at the NICA collider, Dubna, Russia, October 1, 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Polarized structure functions of spin-1 deuteron in proton-deuteron Drell-Yan processes
3. 学会等名 Online, 17th International Workshops on Hadron Structure and Spectroscopy, Trieste, Italy, November 18, 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Structure functions for the spin-1 deuteron
3. 学会等名 Online, 7th workshop on Resummation, Evolution, Factorization 2020, Edinburgh, United Kingdom, December 9, 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Possible studies on gravitational form factors of hadrons by high-energy LBNF neutrino beam
3. 学会等名 Online workshop on Beta decay, r process, and related weak-interaction processes, Tsukuba, Japan, February 19, 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊野俊三, 宋勤涛
2. 発表標題 スピン1粒子の横運動量依存パートン分布関数
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会, オンライン (Zoom) 開催, 2021年3月12日-15日
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuhiro Tanaka
2. 発表標題 Operator relations for gravitational form factors
3. 学会等名 9th International Conference on Physics Opportunities at an Electron-Ion-Collider (POETIC 2019), Berkeley, USA, September 16-21, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中和廣
2. 発表標題 ハドロンの重力形状因子に対するQCD関係式
3. 学会等名 研究会「クォーク模型からみたエキゾチックハドロン研究の進展とQCDの新展開」, 理化学研究所 和光キャンパス, 2019年7月6日 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Tanaka
2. 発表標題 Accessing GPDs with the exclusive pion-induced Drell-Yan process at J-PARC
3. 学会等名 11th Circum-Pan-Pacic Symposium on High Energy Spin Physics, Miyazaki, Japan, August 27-30, 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Tanaka
2. 発表標題 Gravitational form factors and light-cone distributions for pseudoscalar mesons
3. 学会等名 Mainz Institute for Theoretical Physics Program "Light-Cone Distribution Amplitudes of Hadrons in QCD and Their Applications", Mainz, Germany, January 13-24, 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuhiro Tanaka
2. 発表標題 Accessing nucleon GPDs with the exclusive pion-induced Drell-Yan process at J-PARC
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会シンポジウム Japan-Korea symposium on high-energy reactions and flavors in quark matter, 名古屋大学現地開催中止によるオンライン開催, 2020年3月16日-19日 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中和廣、八田佳孝、Abha Rajan
2. 発表標題 QCDトレースアノマリーのクォークおよびグルーオンのエネルギー運動量テンソルの寄与への分解公式
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会, 名古屋大学現地開催中止によるオンライン開催, 2020年3月16日-19日
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Gravitational form factors for finding mass and pressure distributions in hadrons
3. 学会等名 11th Circum-Pan-Pacic Symposium on High Energy Spin Physics, Miyazaki, Japan, August 27-30, 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Generalized distribution amplitudes and gravitational form factors of hadrons
3. 学会等名 XVth Rencontres du Vietnam "Perspectives in Hadron Physics", Quy Nhon, Vietnam, September 22-28, 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Quark and gluon transversity distributions
3. 学会等名 KEK workshop on Nucleon electric dipole moments and spin structure in 2020, KEK, Tokai, Japan, January 11, 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Partonic structure of tensor-polarized deuteron
3. 学会等名 Workshop on Exploring QCD with light nuclei at EIC, Stony Brook, New York, USA, January 21-24, 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shunzo Kumano
2. 発表標題 Internal structure of exotic-hadron candidates by hard reactions
3. 学会等名 KEK workshop on Physics of heavy-quark and exotic hadrons, KEK, Tokai, Japan, January 27-29, 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 熊野俊三, 宋勤涛
2. 発表標題 陽子・重陽子衝突におけるグルーオン・トランスバーシティ分布研究
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会, 名古屋大学現地開催中止によるオンライン開催, 2020年3月16日-19日
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔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
研究 分担者	熊野 俊三 (Kumano Shunzo) (10253577)	日本女子大学・理学部・教授 (32670)	2020年度まで：高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授 2021年度：高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・シニアフェロー 2022年度から：日本女子大学・理学部・教授
研究 分担者	川村 浩之 (Kawamura Hiroyuki) (30415137)	順天堂大学・医学部・准教授 (32620)	追加：2022年4月20日

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			
中国	Chinese Academy of Sciences			
中国	Zhengzhou University			
フランス	Ecole Polytechnique			
米国	University of South Carolina			
米国	Brookhaven National Laboratory			