

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03853

研究課題名（和文）超対称フローが導く数値超対称性の新展開

研究課題名（英文）New frontier of numerical supersymmetry led by supersymmetric gradient flows

研究代表者

加堂 大輔（Kadoh, Daisuke）

同志社大学・理工学部・准教授

研究者番号：90447219

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本課題は、素粒子物理学の分野で精力的に研究されている超対称理論において、超対称なグラディエントフロー法の基礎理論を確立し、それをスーパーコンピュータを使った数値計算に応用することで、超対称性の自発的破れの機構や重力の量子的性質の解明を目指している。研究成果として、 $N=1$ SYM、SQCD、並びに、Wess-Zuminoモデルでの超対称フロー方程式の導出を行った。WZモデルにおいて、フロー場の相関関数の紫外有限性を摂動論の任意の次数で証明した。また、SYMとSQCDについて、摂動1次まで同様の性質が得られることを示した。これらの成果は、超対称フロー法の今後の応用の基礎を与えるものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超対称性は、ミクロな世界の現象を調べる素粒子物理学で精力的に研究されてきた重要な研究テーマである。本研究では、スーパーコンピュータを使って、超対称性理論を数値的に研究する新手法として、超対称グラディエントフロー法の開発を行った。様々な超対称モデルにおいて、超対称グラディエントフロー法の基礎理論を確立した。これらの成果は、超対称性の自発的破れを介して実際の宇宙ができた宇宙創成の謎の解明や、宇宙誕生時のビッグバンを引き起こす重力のミクロな性質の解明につながると期待できる。

研究成果の概要（英文）：This project aims to establish a fundamental theory of supersymmetric gradient flows in supersymmetric theories, which have been intensively studied in the field of particle physics, and to apply it to numerical calculations using a supercomputer in order to clarify the mechanism of spontaneous breaking of supersymmetry and the quantum nature of gravity. We have derived the supersymmetric flow equations in $N=1$ SYM, SQCD and Wess-Zumino model, and proved the ultraviolet finiteness of the correlation function of the flow fields in the WZ model at all order of perturbation theory. We also show that similar properties are obtained for SYM and SQCD up to the leading order of perturbation theory. These results provide a theoretical basis for future applications of the supersymmetric flow method.

研究分野：素粒子論

キーワード：超対称性 格子場の理論 グラディエントフロー 場の量子論 拡散方程式 SYM SQCD AdS/CFT

1. 研究開始当初の背景

格子ゲージ理論は、場の理論のダイナミクスを解くことを得意としている。格子を用いて超対称理論のダイナミクスを解くという発想は、多くの研究者を引きつけてきた魅力的なアイデアである。しかし、このアイデアには解決すべき問題点が少なくとも2つある。1つは、格子理論の連続極限として、4次元超対称理論を得る簡単な方法がないこと。もう一つは、エネルギー運動量テンソルなどの物理量が、格子理論を使って直接定義できないことである。超対称性の破れのオーダーパラメータである真空エネルギーや重力双対なブラックホールの熱力学量は、エネルギー運動量テンソルの期待値から評価できる。

この種の問題を解決するアプローチとして、グラディエントフロー法(Luscher,2009)が発展してきた。ヤンミルズ理論のフロー法では、フロー場の相関関数が紫外有限(Luscher-Weisz, 2011)となり、格子理論で直接エネルギー運動量テンソルが定義できるようになる(鈴木,2013)。さらに、超対称ヤンミルズ理論にフロー法を適用すると、格子から連続極限を取る際、理論の係数を微調整するために必要な超カレントの定義も得られる(鈴木ら,2017)。

このようにフロー法のアプローチは、超対称格子理論においても有力である。しかし、これまでの研究は、超対称でないフロー方程式を使う範囲に限定されてきた。これに対して、超対称化されたフロー方程式を使うことは、超対称性のダイナミクスを格子計算で解く上で、有力なアプローチであろう。本課題に至る準備段階の研究として、研究代表者の加堂は分担者の浮田とともに、超対称ヤンミルズ(SYM)理論における超対称フロー法の基礎理論の構築を進めてきた。

2. 研究の目的

本課題は、素粒子物理学の分野で精力的に研究されている超対称理論において、超対称なグラディエントフロー法の基礎理論を確立し、スーパーコンピュータを使った数値計算に応用することで、超対称性の自発的破れの機構や重力の量子的性質の解明を目指す。

3. 研究の方法

4次元 $N=1$ SYM や SQCD において、超対称グラディエントフロー法の基礎理論を構築する。これらの理論において、超対称フロー方程式を導出し、そこから得られたフロー場の相関関数に対して、紫外の性質を調査する。また、Wess-Zumino 模型のようなゲージ理論ではない場合において、超対称フロー法を整備する。これらの研究と並行して、超対称理論・超対称フロー法を数値計算するため、テンソルネットワーク法を使った数値計算手法について研究を進める。

4. 研究成果

(1) SYM と SQCD 理論における超対称フロー理論の構築

4次元の $N=1$ SYM において、超場形式を使って、超対称なグラディエントフロー方程式を導出した。導出した方程式は、時間微分と超対称変換がゲージ変換まで交換する(DK-Ukita, EPJC 2022)。同様に、 $N=1$ SQCD 理論において、超対称なグラディエントフロー方程式を導出した(DK-Ukita, EPJ-ST2022)。導出には、 $N=1$ SYM で行った超場形式によるアプローチに物質場を導入することで実現した。結果として得られたこれらの方程式は、フロー時間微分と超対称変換がゲージ変換まで交換するという意味で超対称的である。また、SQCD フローで生成されたフロー場の2点関数に対して、1ループレベルの計算を行い、それらの紫外の振る舞いについて調査した。その結果、ゲージ多重項の2点関数は紫外有限となり、物質場の多重項の2点関数はすべての場について共通の波動関数繰り込み分を除いて有限になるという、超フロー特有の性質が得られた(DK-Maru-Suzuki-Ukita, PTEP2022)。これらの成果は、今後、超対称フロー法の応用の基礎を与えるものである。

(2) Wess-Zumino 模型における超対称フロー理論の構築

最も簡単な超対称模型の一つである Wess-Zumino 模型において、超対称フロー方程式を成分場と超場形式の双方で導出した(DK-Kikuchi-Ukita, PRD2019)。さらに、Wess-Zumino 模型のグラディエントフロー方程式についても研究を進め、摂動展開に関する次数勘定定理を導いた。この定理を使いつつ、フロー方程式の初期条件を適切に選ぶことで、摂動の全次数でフロー場の任意の相関関数が紫外有限であることを証明した(DK-Kikuchi-Ukita, PRD2023)。

(3) テンソルネットワーク法の整備

超対称格子理論のモンテカルロ計算には、符号問題と呼ばれる技術的な困難がある。また、超対称フロー法の計算の実現には、方程式の右辺に現れるフェルミオンの双線形項の扱いも問題になる。これらの問題の解決策として、テンソル繰り込み群(TRG)法を使った計算が有効である。

2次元スカラー理論に TRG 法を適用する研究を進め、臨界結合定数の精密確定 (DK et al., JHEP2019) や有限密度系での計算の実現 (DK et al., JHEP2020) を行った。また、4次元スカラー理論への TRG 計算の拡張も実現した (Akiyama et al., JHEP2020)。さらに、フェルミオン変数を伴った場合での TRG 法の一般論 (Akiyama-DK, JHEP2021) や 2次元ヤンミルズ理論における計算手法の開発 (Fukuma-DK-Matsumoto, PTEP2021) を行った。

その他に、新しい TRG の数値計算アルゴリズムの改 (DK-Oba-Takeda, JHEP2022) や手法の基本的な性質の調査 (DK-Kuramashi-Ueno, PTEP2019) を行うと共に、量子重力模型の 1 つである 2次元のローレンツ型の量子レッジ模型におけるテンソル繰り込み群計算の実現 (Ito-DK-Sato, PRD2022) を行った。また、格子上に超対称性を部分的に実現した低次元の超対称模型 (超対称量子力学系) に対して、転送行列を使った数値計算法を開発し、精密な数値計算が実現できることも示した (DK-Nakayama, NPB2019; DK-Kamei-So, PTEP2019)。

上記の研究に関連して、国内外の国際学会・研究会において、7回の招待講演と 21回の一般公演で成果を発表している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 16件）

1. 著者名 Daisuke Kadoh, Yoshinobu Kuramashi, Ryoichiro Ueno	4. 巻 2019, Issue 6
2. 論文標題 Irregular parameter dependence of numerical results in tensor renormalization group analysis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PTEP 2019 (2019) 6, 061B01	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz056	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 Daisuke Kadoh, Katsumasa Nakayama	4. 巻 949
2. 論文標題 Lattice study of supersymmetry breaking in N=2 supersymmetric quantum mechanics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nucl.Phys.B 949 (2019) 114783	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysb.2019.114783	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 Daisuke Kadoh, Kengo Kikuchi, Naoya Ukita	4. 巻 -
2. 論文標題 Supersymmetric gradient flow in the Wess-Zumino model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys.Rev.D 100 (2019) 1, 014501	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.014501	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 Daisuke Kadoh, Takeru Kamei, Hiroto So	4. 巻 -
2. 論文標題 Numerical analyses of N=2 supersymmetric quantum mechanics with a cyclic Leibniz rule on a lattice	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PTEP 2019 (2019) 6, 063B03	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz053	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 Kadoh Daisuke, Kuramashi Yoshinobu, Nakamura Yoshifumi, Sakai Ryo, Takeda Shinji, Yoshimura Yusuke	4. 巻 2019
2. 論文標題 Tensor network analysis of critical coupling in two dimensional ϕ^4 theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP05(2019)184	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 Sakai Ryo, Kadoh Daisuke, Kuramashi Yoshinobu, Nakamura Yoshifumi, Takeda Shinji, Yoshimura Yusuke	4. 巻 -
2. 論文標題 Tensor network study of two dimensional lattice ϕ^4 theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PoS(LATTICE2018)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.334.0232	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 Daisuke Kadoh, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Ryo Sakai, Shinji Takeda & Yusuke Yoshimura	4. 巻 -
2. 論文標題 Investigation of complex ϕ^4 theory at finite density in two dimensions using TRG	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JHEP 02 (2020) 161	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2020)161	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 Akiyama Shinichiro, Kadoh Daisuke, Kuramashi Yoshinobu, Yamashita Takumi, Yoshimura Yusuke	4. 巻 2020
2. 論文標題 Tensor renormalization group approach to four-dimensional complex ϕ^4 theory at finite density	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2020)177	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 Akiyama Shinichiro, Kadoh Daisuke	4. 巻 2021
2. 論文標題 More about the Grassmann tensor renormalization group	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2021)188	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 Fukuma Masafumi, Kadoh Daisuke, Matsumoto Nobuyuki	4. 巻 2021
2. 論文標題 Tensor network approach to two-dimensional Yang-Mills theories	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab143	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 Kadoh Daisuke, Oba Hideaki, Takeda Shinji	4. 巻 2022
2. 論文標題 Triad second renormalization group	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2022)121	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 Kadoh Daisuke, Ukita Naoya	4. 巻 82
2. 論文標題 Supersymmetric gradient flow in N=1 SYM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-022-10404-y	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 Kadoh Daisuke	4. 巻 -
2. 論文標題 Recent progress in the tensor renormalization group	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PoS(LATTICE2021)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.396.0633	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 Ito Yoshiyasu, Kadoh Daisuke, Sato Yuki	4. 巻 106
2. 論文標題 Tensor network approach to 2D Lorentzian quantum Regge calculus	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevd.106.106004	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 Kadoh Daisuke, Ukita Naoya	4. 巻 232
2. 論文標題 Supersymmetric gradient flow in 4d N=1 SQCD	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The European Physical Journal Special Topics	6. 最初と最後の頁 359 ~ 364
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjs/s11734-022-00707-2	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 -

1. 著者名 Kadoh Daisuke, Maru Nobuhito, Suzuki Mitsuyo, Ukita Naoya	4. 巻 2023
2. 論文標題 Perturbative calculation of supersymmetric gradient flow in N = 1 supersymmetric QCD	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac165	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 Kadoh Daisuke, Kikuchi Kengo, Ukita Naoya	4. 巻 107
2. 論文標題 Perturbative analysis of the Wess-Zumino flow	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.125015	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 -

〔学会発表〕 計28件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Daisuke Kadoh
2. 発表標題 Tensor renormalization group method in higher dimensions
3. 学会等名 INT Program Tensor Networks in Many Body and Quantum Field Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daisuke Kadoh
2. 発表標題 The tensor network approach to 2d Yang Mills theory
3. 学会等名 International workshop on tensor networks in many body and lattice field (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daisuke Kadoh
2. 発表標題 Recent progress in the tensor renormalization group
3. 学会等名 The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加堂大輔
2. 発表標題 テンソルネットワーク法の場の理論への応用について
3. 学会等名 離散的手法による場と時空のダイナミクス 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木光世, 加堂大輔, 丸信人, 浮田尚哉
2. 発表標題 N=1 SQCDにおける超対称グラディエントフローの紫外有限性
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本信行, 福間将文, 加堂大輔
2. 発表標題 2次元Yang-Mills理論へのTRGの適用について
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤善康, 加堂大輔, 佐藤勇貴
2. 発表標題 Quantum Regge Calculus with Causality
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木光世, 加堂大輔, 丸信人, 浮田尚哉
2. 発表標題 N=1 SQCDにおける超対称グラディエントフローの1ループ補正
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mitsuyo Suzuki
2. 発表標題 UV divergent structure of supersymmetric gradient flow in N=1 SQCD
3. 学会等名 KEK Theory Workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mitsuyo Suzuki
2. 発表標題 UV-finiteness of supersymmetric gradient flow in N=1 SQCD
3. 学会等名 YITP Workshop Strings and Fields 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊地健吾, 加堂大輔, 浮田尚哉
2. 発表標題 グラディエントフローと非線り込み定理
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daisuke Kadoh
2. 発表標題 Tensor network methods in four dimensional field theory
3. 学会等名 Numstrings 2021 (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加堂大輔
2. 発表標題 テンソルネットワーク法の進展について
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大羽秀明、加堂大輔、武田真滋
2. 発表標題 三つ組第二テンソルくりこみ群
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊地健吾、加堂大輔、浮田尚哉
2. 発表標題 Wess-Zuminoグラディエントフローの紫外有限性
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daisuke Kadoh, Naoya Ukita
2. 発表標題 Gradient flow equation in SQCD
3. 学会等名 LATTICE2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Sakai, D. Kadoh, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, S. Takeda, Y. Yoshimura
2. 発表標題 Tensor network study of two dimensional complex phi4 theory at finite density
3. 学会等名 LATTICE2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Kadoh
2. 発表標題 Tensor network in complex scalar field theory toward lattice studies of AdS/CFT
3. 学会等名 EDS Blois 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木 光世, 加堂大輔, 丸信人, 浮田尚哉
2. 発表標題 N=1 SQCDにおける超対称フロー法の構成法と摂動論
3. 学会等名 基研研究会 素粒子物理学の進展 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加堂大輔
2. 発表標題 テンソル線り込み群を用いた 複素作用問題へのアプローチ
3. 学会等名 離散的手法による場と時空のダイナミクス 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藏増嘉伸, 加堂大輔, 中村宜文, 坂井涼, 武田真滋, 吉村友佑
2. 発表標題 テンソル線り込み群による2次元有限密度複素phi4理論の解析
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 鈴木光世, 加堂大輔, 丸信人, 浮田尚哉
2. 発表標題 N=1 SQCDにおける超対称フローの摂動論について
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 宗博人, 加堂大輔, 亀井武成
2. 発表標題 Numerical analyses of N=2 supersymmetric quantum mechanics with cyclic Leibniz rule on lattice
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 加堂大輔, 杉野文彦
2. 発表標題 格子超対称ヤンミルズ理論における超フロー方程式
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 Daisuke Kadoh
2. 発表標題 A new renormalization group on higher dimensional tensor networks
3. 学会等名 TNSAA 2019-2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mitsuyo Suzuki, Daisuke Kadoh, Nobuhito Maru, Naoya Ukita
2. 発表標題 On UV-finiteness of supersymmetric gradient flow in $N=1$ SQCD
3. 学会等名 KEK-TH workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加堂大輔, 中山勝政
2. 発表標題 Renormalization group on a triad tensor network
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会(2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菊地健吾, 加堂大輔, 浮田尚哉
2. 発表標題 Wess-Zuminoグラディエントフローの有限性
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会(2020年)
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	丸 信人 (Maru Nobuhito) (40448163)	大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授 (24402)	
研究分担者	浮田 尚哉 (Ukita Naoya) (50422192)	筑波大学・計算科学研究センター・研究員 (12102)	
研究分担者	谷口 裕介 (Taniguchi Yusuke) (60322012)	筑波大学・計算科学研究センター・准教授 (12102)	

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
---------	---------