

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20365

研究課題名（和文）長寿命粒子探索実験による軽い暗黒物質の性質の解明

研究課題名（英文）Exploring light dark matter through long-lived particle searches

研究代表者

浅井 健人（Asai, Kento）

東京大学・宇宙線研究所・特任研究員

研究者番号：00913774

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：近年GeV以下の軽い質量を持つ暗黒物質が注目を集めている。宇宙から飛来する軽い暗黒物質はその軽さゆえに核子を反跳させるエネルギーを持たず、直接検出実験の強い制限を回避することが可能である。一方でビームダンプ実験といった長寿命粒子探索実験では高エネルギーの暗黒物質が生成されるため、反跳による検出も可能となる。

本研究では、日本で計画されている電子・陽電子線形加速器であるInternational Linear Collider（ILC）を用いた長寿命粒子探索実験であるILCビームダンプ実験による軽い暗黒物質探索を議論し、暗黒物質の探索に対して感度を持つことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

暗黒物質は、様々な宇宙観測によって存在が確かであると考えられていながら、その性質はほとんど解明されていない。さまざまな直接・間接実験によって積極的に暗黒物質探索が行われているにもかかわらず暗黒物質は未だ発見されていない現在、これらの実験による探索が困難な軽い暗黒物質モデルにも視野を向ける必要がある。

本研究は、そのような暗黒物質に対して、長寿命粒子探索実験が非常に強力な探索手段になりうることを明らかにした点で重要である。また、現在提案中のILCの新たな可能性を開いた点においても意義深いと言える。

研究成果の概要（英文）：Dark matter with light masses below GeV recently has attracted much attention. Because of their lightness, light dark matters from the galactic center do not have enough energy to recoil nucleons and thus avoid strong limits by direct detection experiments. On the other hand, long-lived particle search experiments such as beam dump experiments can produce high-energy dark matters and can detect them by recoil events. In this study, I have discussed light dark matter searches by the ILC beam dump experiment, which is a long-lived particle search experiment using the International Linear Collider (ILC), an electron-positron linear accelerator planned in Japan, and shown that the ILC beam dump experiment has a sensitivity to dark matters.

研究分野：素粒子現象論

キーワード：暗黒物質 長寿命粒子探索実験 標準模型を超える物理 素粒子現象論

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

暗黒物質の正体は、標準模型で説明出来ないものの一つである。その候補の一つが WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) であり、典型的には GeV~TeV の質量を持つ。これを核子との散乱で検出するのが直接探索であり、多くの実験が行われている。しかし、現在のところ暗黒物質は検出されておらず、単純な WIMP 模型には強い制限が課せられている。そこで、反跳エネルギーが小さく核子による直接探索の制限を回避する模型として、GeV 以下の軽い暗黒物質が注目されている。

暗黒物質は媒介粒子を通じて標準模型粒子と相互作用すると考えられている。媒介粒子の候補としてはダークフォトンなどがあり、その発見のために様々な実験が計画されている。その一つが FASER (ForWArD Search ExpeRiment) 実験であり、ATLAS 実験の衝突点で生成された長寿命な新粒子を検出すべく、2022 年の実験開始に向けて建設が進んでいる。この実験では、新粒子は数百 m 飛んだのち、検出器内で電子などの標準模型粒子に崩壊することで検出される。岩盤などによって ATLAS から保護されていることから背景事象が少ないうえ、新粒子が長寿命である必要から加速器実験と比べて標準模型粒子との結合が比較的小さな領域を探索することができる。FASER 実験の他にも、ILC (International Linear Collider) のメインビームダンプの下流に設置する ILC メインビームダンプ実験などの類似の実験が複数提案されている。このように、媒介粒子となりうる長寿命粒子の探索実験が近いうちに実施され、制限が与えられることが期待される。しかし、暗黒物質が媒介粒子と結合しており、暗黒物質が軽い場合は話が異なってくる。長寿命な媒介粒子が重い暗黒物質と結合している場合は、軽い媒介粒子は暗黒物質に崩壊出来ないの、標準模型粒子のみに崩壊し、それを検出できる。一方で、暗黒物質が軽い場合は媒介粒子がほとんど暗黒物質に崩壊し、検出できない可能性がある。

このように、媒介粒子を含めた軽い暗黒物質の模型は、直接検出実験による暗黒物質探索も長寿命粒子探索実験による媒介粒子探索も難しく、軽い暗黒物質発見に向けた新たなアプローチが模索されている。

2. 研究の目的

長寿命粒子探索実験は、高いルミノシティと少ない背景事象が特徴である。これを活かして軽い暗黒物質の探索が可能であるかを議論することは、FASER 実験などが 2022 年に実施され、また ILC 実験が計画されている現在、極めて重要で時宜を得た研究であると言える。

本研究の目的は、軽い暗黒物質・媒介粒子の有効模型のもとで、どのような反応過程や検出器の性能であれば長寿命粒子探索実験が軽い暗黒物質に対して感度を持つかを調べることである。

3. 研究の方法

研究目的の達成のために行う具体的な研究の方法および内容は、以下の 4 項からなる。

(A) 暗黒物質の生成量の見積もり

軽い暗黒物質は、様々な過程によって生成される。例えば、制動放射の場合や、加速器実験の衝突で生成された中間子の稀崩壊によって媒介粒子が生成され、それが軽い暗黒物質に崩壊する場合は考えられる。暗黒物質や媒介質量の種類や質量、実験ごとに主要となる生成過程は異なるので、それらの組み合わせを網羅的に調べる。

(B) シミュレーションによるイベント数の見積もり

(A) によって得た暗黒物質の生成断面積を利用し、暗黒物質と検出器との反応率を見積もることでイベント数を計算する。長寿命粒子探索実験では特に、媒介粒子の崩壊地点や生成粒子のビーム軸に対する角度などの幾何的情報が検出にとって重要なので、Monte Carlo シミュレーションを用いてイベント数を見積もる。また、ニュートリノによる散乱といった背景事象も同様に評価し、長寿命粒子探索実験における軽い暗黒物質の感度を求める。

(C) 軽い暗黒物質用の実験・検出器の提案

本研究では、先ず FASER 実験や ILC メインビームダンプ実験の場合で(A), (B)の議論をし、軽い暗黒物質探索に必要な検出器の性能を調べる。このとき、ALP (Axion Like Particle) 探索用に開発されているピクセル検出器の高い位置・時間分解能を用い、背景事象の識別が可能か調査する。続いて、ILC メインビームダンプ実験のシールド長さや種類、崩壊領域の長さを変えて探索感度を調べ、軽い暗黒物質の検出に最適な実験のセットアップを提案する。

4. 研究成果

(1) ILC ビームダンプ実験による sub-GeV 暗黒物質探索

論文[1]において、ILC ビームダンプ実験による GeV 以下の質量を持つ暗黒物質の探索感度を議論した。軽い暗黒物質のモデルとして、ダークフォトンを経由する擬 Dirac 暗黒物質、スカラー elastic 暗黒物質、スカラー inelastic 暗黒物質、および Majorana 暗黒物質を考え、電子および陽電子ビームダンプ中で制動放射過程と電子陽電子対消滅過程による暗黒物質の生成量を計算した。そして、ビームダンプ、シールドおよび崩壊領域の背後に設置された検出器内でビームダンプより飛来した暗黒物質が電子と弾性散乱して検出されるイベント数を計算し、ILC ビームダンプ実験による軽い暗黒物質への探索感度を求めた。また、擬 Dirac 暗黒物質の場合は2つの暗黒状態が存在し、ビームダンプで生成された重い暗黒状態が崩壊領域にて軽い暗黒状態と荷電粒子に崩壊することでも検出することが可能であることから、そのイベント数も計算した。図1に電子(左図)および陽電子(右図)ビームダンプ実験による擬 Dirac 暗黒物質への探索感度を描いたものを示す。横軸は暗黒物質質量、縦軸は相互作用の強さをとっており、赤色の

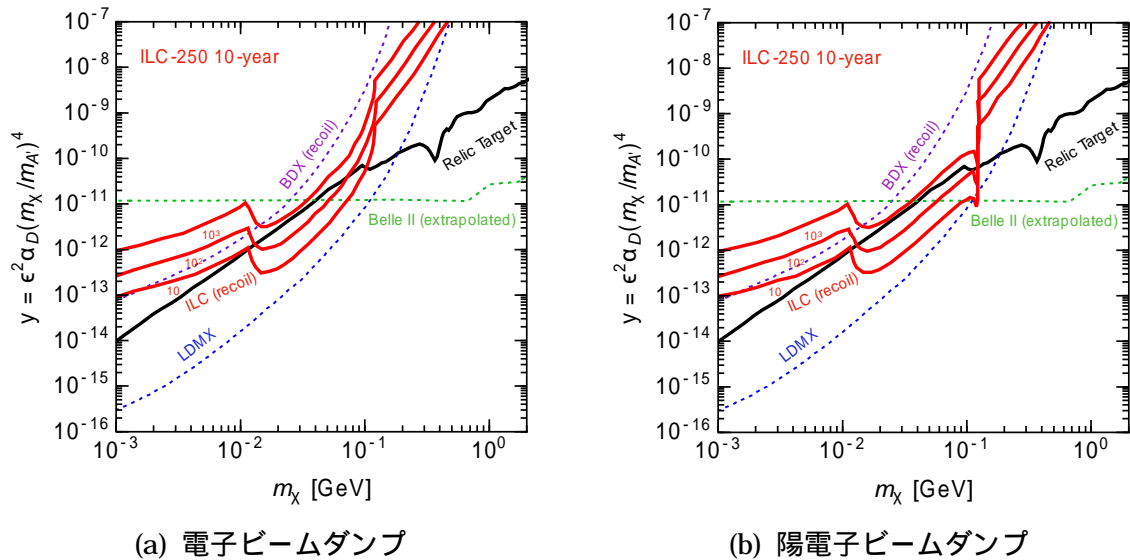


図1：ILC ビームダンプ実験の擬 Dirac 暗黒物質に対する探索感度

実線が検出器にて暗黒物質・電子弾性散乱が10, 100, 1000 イベント検出される領域を示している。暗黒物質が熱的生成機構によって生成された場合、観測結果を説明する残存量となる領域が黒色の実線で描かれている。図1から見て取れるように、ILC ビームダンプ実験は sub-GeV の質量を持つ暗黒物質を探索することが可能であること、電子ビームダンプよりも陽電子ビームダンプの方が重い質量領域において若干感度領域が広いことが明らかとなった。

(2) FASER 実験によるレプトンフレーバーを破る相互作用の探索

論文[2]において、2022 年よりデータ取得を開始した長寿命粒子探索実験である FASER 実験によるレプトンフレーバーを破る (LFV) 相互作用を持つ長寿命粒子探索の可能性を議論した。長寿命粒子探索実験は新粒子と標準模型粒子の相互作用が非常に弱い領域に探索感度があるが、そのような領域では LFV 相互作用がレプトンフレーバーを破らない (LFC) 相互作用と同程度の大きさであっても、ミューオンの LFV 崩壊探索実験等による LFV 相互作用に対する強い制限を回避できる。そこで、FASER 実験による長寿命粒子の LFV 崩壊の探索による LFV 相互作用

用の探索感度を調べた．図 2 に FASER 実験の後継実験である FASER2 実験によるアクシオン様粒子 (ALP) の電子-ミュオン LFV 相互作用の感度領域を示す．黒色の実線，青色の破線，および緑色の点線が LFC 相互作用を変化させたときの FASER2 による ALP-電子-ミュオン結合定数の感度領域である．また，灰色の領域はミュオンの LFV 崩壊 ($\mu \rightarrow e\gamma$) 探索実験によって得られている制限領域である．図 2 から見て取れる様に，従来の LFV 相互作用探索実験では探索できないような非常に小さな LFV 結合を FASER2 実験は探索可能であることを明らかにした．

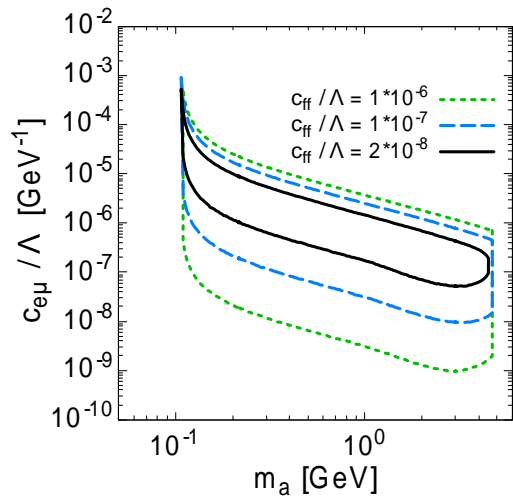


図 2 : FASER2 実験による ALP の LFV 結合の探索可能領域

(3) 非対称媒介粒子模型

宇宙における暗黒物質とバリオンの存在量は Planck 衛星による CMB の観測等によって測定されているが，その存在量はエネルギー密度にするとバリオンに対し暗黒物質がおよそ 5 倍となっている．この異なる過程によって生成される量が同じ桁になっているのは何故かという「偶然の一致問題 (coincidence 問題) に対し，暗黒物質にも粒子反粒子が存在し，何らかの機構によってどちらかが多く作られて対消滅の結果非対称分が残存するという非対称暗黒物質模型が提案されていた．論文[3]において，暗黒物質ではなく暗黒物質と標準模型粒子をつなぐ媒介粒子の非対称性がレプトジェネシスと呼ばれる重い右巻きニュートリノの崩壊によってレプトンの非対称性と同じ量だけ生成され，対消滅によって残った媒介粒子が数 GeV の質量を持つ暗黒物質に崩壊することで残存量の桁の一致を説明する非対称媒介粒子模型を提案した．この模型では，媒介粒子は scotogenic 模型と呼ばれる 1 ループダイアグラムによるニュートリノ質量の生成にも寄与する．論文[3]では，非対称媒介粒子模型がニュートリノ質量および混合，バリオン数と暗黒物質の生成と残存量の桁の一致を全て説明することが可能であることを明らかにした．

(4) 長寿命粒子探索実験によるカイラルな結合を持つ新たなゲージボソン探索

論文[4]において，標準模型のゲージ群の一部である $U(1)_Y$ 群とバリオン数からレプトン数を引いたものをゲージ化した $U(1)_{B-L}$ 群の線型結合で得られる一般的なゲージ群 $U(1)_X$ を考え，対応するゲージボソン Z の長寿命粒子探索実験による探索可能性を議論した．

(5) $\mu\tau$ 相互作用を持つ媒介粒子を含む暗黒物質模型

論文[5]において，レプトンフレーバー非対角な $\mu\tau$ 結合を持つスカラーが媒介粒子となり， Z_4 レプトンフレーバー対称性を持つ暗黒物質模型を構築した．この模型では，媒介粒子が電子や核子と直接の相互作用を持たないために暗黒物質の直接検出の強い制限を回避することができる．また，この媒介粒子はカイラリティ増幅によって大きなミュオンの異常磁気能率 ($g-2$) を得ることができるため，実験値と理論値の不一致を理論的，実験的制限を回避しつつ説明することが可能であることを明らかにした．将来の直接探

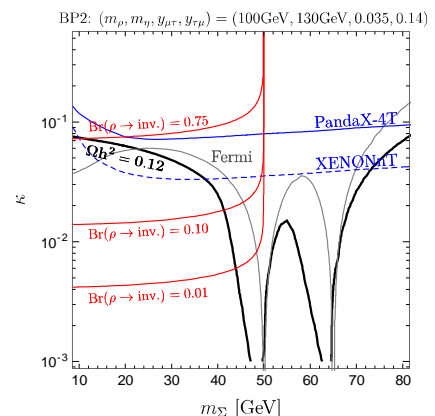


図 3 : 直接・間接探索実験による暗黒物質への制限

素実験による暗黒物質探索についても議論し，図 3 の青色の破線にある様に，質量に依存するが暗黒物質の探索が可能であることを明らかにした．

(6) MUonE 実験による $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ ゲージボソン探索

MUonE 実験は，ミューオン $g-2$ に与えるハドロン真空偏極の寄与を実験に基づいて見積もることを目的としたミューオン-電子散乱測定実験である．論文[6]では，ミューオン $g-2$ 問題を解決する標準模型を超えた物理の候補の一つである $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ ゲージボソンの MUonE 実験による探索可能性について議論した．その結果を図 4 に示す．橙色・黄色の領域がミューオン $g-2$ の問題を解決する $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ ゲージボソンの質量および結合定数であり，黒色の実線が MUonE 実験で観測される $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ ゲージボソン由来のイベント数である．より詳細な背景事象の見積もりが必要ではあるが，ミューオン $g-2$ 問題が示唆する $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ ゲージボソンのパラメーターの全域を MUonE 実験が探索可能であることを明らかにした．

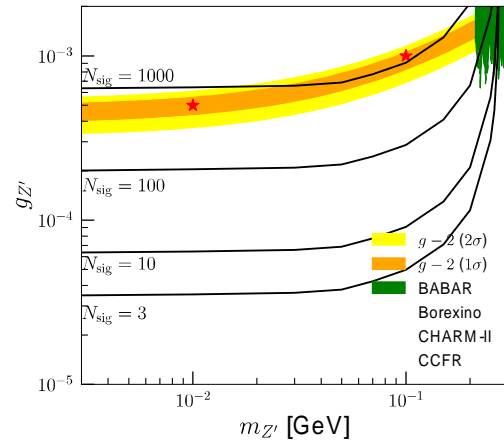


図 4 : MUonE 実験で観測される $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ ゲージボソン由来のイベント数

参考文献

- [1] Kento Asai, Sho Iwamoto, Maxim Perelstein, Yasuhito Sakaki, Daiki Ueda, arXiv:2301.03816[hep-ph]
- [2] Takeshi Araki, Kento Asai, Hidetoshi Otono, Takashi Shimomura, Yosuke Takubo, JHEP 01 (2023) 145, arXiv:2210.12730 [hep-ph]
- [3] Kento Asai, Yuhei Sakai, Joe Sato, Yasutaka Takanishi, Masato Yamanaka, Phys. Lett. B 836 (2023) 137627, arXiv:2209.08257[hep-ph]
- [4] Kento Asai, Arindam Das, Jinmian Li, Takaaki Nomura, Osamu Seto, Phys. Rev. D 106 (2022) 9, 095033, arXiv:2206.12676[hep-ph]
- [5] Kento Asai, Coh Miyao, Shohei Okawa, Koji Tsumura, Phys. Rev. D 106 (2022) 3, 035017, arXiv:2205.08998[hep-ph]
- [6] Kento Asai, Koichi Hamaguchi, Natsumi Nagata, Shih-Yen Tseng, Juntaro Wada, Phys. Rev. D 106 (2022) 5, L051702, arXiv:2109.10093[hep-ph]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Araki Takeshi, Asai Kento, Otono Hidetoshi, Shimomura Takashi, Takubo Yosuke	4. 巻 2023
2. 論文標題 Search for lepton flavor violating decay at FASER	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1~25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP01(2023)145	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 Asai Kento, Sakai Yuhei, Sato Joe, Takanishi Yasutaka, Yamanaka Masato	4. 巻 836
2. 論文標題 Asymmetric mediator in scotogenic model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 137627~137627
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physletb.2022.137627	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 Asai Kento, Das Arindam, Li Jinmian, Nomura Takaaki, Seto Osamu	4. 巻 106
2. 論文標題 Chiral Z' in FASER, FASER2, DUNE, and ILC beam dump experiments	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1~21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.106.095033	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 Asai Kento, Miyao Coh, Okawa Shohei, Tsumura Koji	4. 巻 106
2. 論文標題 Scalar dark matter with a μ flavored mediator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1~11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.106.035017	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 Asai Kento, Hamaguchi Koichi, Nagata Natsumi, Tseng Shih-Yen, Wada Juntaro	4. 巻 106
2. 論文標題 Probing the $L\mu$ - L gauge boson at the MUonE experiment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.L051702	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11件(うち招待講演 1件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Kento Asai
2. 発表標題 New physics searches at the ILC positron and electron beam dump
3. 学会等名 Asia-Pacific Workshop on Particle Physics and Cosmology 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅井健人
2. 発表標題 Search for Lepton Flavour Violating Decay at FASER
3. 学会等名 基研研究会 素粒子物理学の進展2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅井健人
2. 発表標題 ILC陽電子・電子ビームダンプ実験による新物理探索
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 浅井健人
2. 発表標題 Electron Beam Dump Constraints on Light Bosons with Lepton Flavor Violating Couplings
3. 学会等名 ILC夏の合宿2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅井健人
2. 発表標題 New physics searches at the ILC positron and electron beam dumps
3. 学会等名 素粒子現象論研究会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅井健人
2. 発表標題 電子ビームダンプ実験による荷電レプトンフレーバーを破る相互作用への制限
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 浅井健人
2. 発表標題 Scalar Dark Matter with a μ Flavored Mediator
3. 学会等名 基研研究会 素粒子物理学の進展2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅井健人
2. 発表標題 長寿命粒子探索実験によるカイラルなゲージボソンの探索
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kento Asai
2. 発表標題 Scalar Dark Matter with a μ Flavored Mediator
3. 学会等名 Summer Institute 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅井健人
2. 発表標題 Search for Lepton Flavor Violating Decay at FASER
3. 学会等名 Flavor Physics Workshop 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kento Asai
2. 発表標題 ILC Beam Dump Experiment and New Physics Search
3. 学会等名 IAS Program on High Energy Physics (HEP 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

査読中ではあるが、本研究の成果として重要なものとして、
Kento Asai, Sho Iwamoto, Maxim Perelstein, Yasuhito Sakaki, Daiki Ueda, arXiv : 2301.03816 [hep-ph]
がある。

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			
スペイン	バルセロナ大学			
中国	四川大学	北京大学		
米国	コーネル大学			
ハンガリー	エトヴェシュ・ロラード大学			