

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K05469

研究課題名（和文）B中間子崩壊における軽クォークエキゾチック中間子の探索

研究課題名（英文）Study of light quark exotic mesons in B meson decays

研究代表者

松田 達郎（Tatsuro, Matsuda）

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：20253817

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究はKEK・Belle実験によって収集された膨大なB中間子生成データを用い、B中間子崩壊過程でチャーム中間子とともに生成される軽クォーク中間子に焦点を当て、軽クォークエキゾチック中間子探索を目指すというものである。従来報告された軽クォークエキゾチック中間子は、主としてハドロンビームによる回折散乱過程によるものであり、ハドロン散乱過程とは異なるB中間子崩壊過程において探索することが期待されてきた。

本研究は最終的結論には至らなかったが、その方法および方向に道筋を付け、今後研究を継続することで成果が期待されることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物質の最も極微の階層は標準理論と呼ばれる理論によって理解されることが明らかとなってきた。すなわちクォークやレプトンと呼ばれる素粒子が、人類が知る最も極微の階層である。しかし、クォーク等から次の階層のハドロンや原子核に至る道筋の解明は、格子量子色力学と呼ばれるシミュレーション計算による研究が現在最も確実と考えられるものの、精度は計算機能力および手法におおむね制限されており、十分に解明されているとは言えない。そこで本研究はエキゾチック中間子という新たなハドロンの存否や、さらにその性質を実験的研究によって提供することで、人類にとって未知の階層間の繋がりの解明に寄与するという学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）： This study aims to search for light quark exotic mesons, focusing on light quark mesons produced together with charm mesons in the B meson decay processes, using a large amount of B meson production data collected by the KEK Belle experiment. The light quark exotic mesons reported so far are mainly produced by diffraction scattering with hadron beams, and it has been expected to search for them in the B meson decay processes, which are different from the hadron scattering processes.

Although this study has not reached a final conclusion, it has paved the way for the method and direction of the search, and we hope that the continuation of the study will bring results in the near future.

研究分野：ハドロン物理学

キーワード：中間子分光学 エキゾチック中間子 B中間子崩壊 KEK Belle実験

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究開始当初には既に中間子や重粒子などのハドロンが、量子色力学(QCD)に基づいたクォーク・グルーオン多体系として理解されるべきことは疑いの余地がない状況となっていた。QCDはいわゆる“通常のクォーク模型”と呼ばれるハドロン(以後、通常のハドロンと呼ぶ)の存在を導くが、同時に通常のハドロンとは異なる内部構造のハドロン(以後、エキゾチックハドロンと呼ぶ)の存在も導いた。より正確に言えば、QCDの原理的な“方程式”は知られているものの、QCDの非可換ゲージ理論という特徴に由来する非摂動的性質のために解析的に解くことができず、従ってスーパーコンピュータによる格子QCDと呼ばれるシミュレーション計算や、QCDの特性などからエキゾチックハドロンの存在が示唆されていた。実験的には通常のハドロンは発見されるものの、一方で明確なエキゾチックハドロンの存在については数十年の実験的探索を経てもなお議論を呼んでいた。エキゾチックハドロンの存在が確定できない理由は、我々はハドロンの内部の構造を、QCDのクォーク閉じ込めと言う性質のために容易に知ることができず、通常のハドロンとエキゾチックハドロンの区別をハドロンの性質や反応などの状況的判断から行わなければならないからである。その結果、エキゾチックハドロン候補が発見されたとしても、“通常のクォーク模型”から推定される質量にあてはまらない、“通常のクォーク模型”の“座席”からあふれる、あるいは生成・崩壊反応様式が“通常のクォーク模型”的でないなどによって推定せざるを得ない。このような状況ではあるが、明確にエキゾチックハドロンと区別できる状態が存在した。それは、“通常のクォーク模型”で導くことができないエキゾチックな量子数を持つエキゾチックハドロンである。なお、一般にエキゾチックハドロンの候補が発見されたとしても、ハドロン分子的構造など他の解釈もあり得、さらにハドロン相互作用による疑似的共鳴現象などの場合もあり得るので、エキゾチックハドロンの発見の確定は多面的な実験によって判断していくことが求められる。

このような状況で、エキゾチックな量子数を持つエキゾチックハドロン候補として、複数の実験グループからハドロン回折散乱に $\rho(1400)$ や $\rho(1600)$ などの中間子の存在が報告されていた。これらの中間子はクォーク・反クォーク系で許されない $J^{PC}=1^{++}$ という量子数を持ち、これらの状態の存在が確定すれば明確なエキゾチックハドロンと言えた。しかし、ハドロン回折散乱によって発見された $\rho(1400)$ や $\rho(1600)$ にも弱みがあった。それはハドロン回折散乱では同時に多数のハドロンが形成され、それゆえ $\rho(1400)$ や $\rho(1600)$ の存在の抽出にはいわゆる部分波解析という労力を要する解析によって多数の共鳴状態からの分離が求められるが、必ずしも曖昧さなく分離できるとは限らず、また共鳴の背景事象となるハドロン間相互作用について、入射ハドロンと標的ハドロン間の相互作用は十分に理解されているとは言えず、ハドロン間相互作用をどのように仮定するかで結果に曖昧さが残ることである。

(2) KEK Belle 実験は、小林誠氏と益川敏英氏にノーベル物理学賞をもたらす根拠となった B 中間子系における CP 対称性の破れを実証したが、そのために当時最大の B 中間子崩壊事象を収集した。この Belle 実験の事象収集量は、それ以前の米国・CLEO 実験の実に約 80 倍に達した。そしてこの膨大に収集された B 中間子崩壊事象は、“副産物”として B 中間子崩壊過程を利用した中間子分光学研究の機会をもたらしてくれた。その成果として、c クォークなどの重クォークを含む中間子である、X、Y、Z などと呼ばれる“通常のクォーク模型”の枠組みでは説明が困難な質量や崩壊過程を持つエキゾチックな共鳴状態が続々と発見された。これらは b クォークから c クォークへの弱崩壊を利用した生成反応であるが、同時に u、d クォークなどの軽クォークを含む中間子の生成反応も伴っている。すなわち、B 中間子崩壊における軽クォーク中間子の分光学的研究の可能性が開かれたことを意味した。

さらに B 中間子崩壊はハドロン回折散乱とは異なる反応であるという利点がある。B 中間子は b クォークと u/d クォークから構成されるスカラー中間子の基底状態で、崩壊粒子系に対して、弱い相互作用のパリティ非保存のために B 中間子からのパリティの制限は受けないが、一方でスピン角運動量の保存則は成立し、この特徴によって生成される中間子の量子数は限定される。この限定をうまく利用してやれば、多数の共鳴状態が同時に生成されるというハドロン回折散乱のデメリットを回避あるいは緩和できる。このような状況で本研究を開始することとした

2. 研究の目的

上記の背景のもと、本研究の目的を以下のように設定した。

(1) KEK・Belle 実験による高統計 B 中間子崩壊データを用いて、 $\rho(1400)$ や $\rho(1600)$ などの軽クォークからなるエキゾチック中間子の探索を行う。具体的な反応としては $B \rightarrow D^* \rho$ 反応の解析を行い、 $B \rightarrow D^* \rho$ 中間子系に共鳴状態の有無を探索し、 $B \rightarrow D^* \rho$ 系においてエキゾチックな量子数に対応する P 波共鳴の存在の確認を目指した。もし存在が確認できれば明白なエキゾチック状態と言える。

(2) 同時に $B \rightarrow D^* \rho$ 反応などの関連するチャンネルでの探索を行い、軽クォーク中間子状態におけるエキゾチック中間子の存否を明らかにすることを目指した。ただし、 $B \rightarrow D^* \rho$ 最終状態には最終状態とは違って複数の共鳴状態が重畳的に生成されるため、部分波解析の必要性を想定しなければならない。

(3) また、ハドロン回折散乱において共鳴状態の背景事象となるハドロン間相互作用についても考察を進める。

以上の研究を通じて、QCD に基づくハドロン物理の理解の発展に寄与することを目指した。

3. 研究の方法

(1) 研究の目的の(1)に対する研究方法として、KEK・Belle 実験によって収集された B 中間子崩壊データに対し、その中から $B \rightarrow D^* \rho$ 反応事象を抽出しなければならない。なお、KEK・Belle 実験は、平成 21 年度にデータ収集を終了し、以後は解析のみに集中しており、最終的には 772×10^6 BB 対事象が収集されている。

そこで、我々が以前に取組んだ $B \rightarrow D^* \rho$ 反応に対する研究手法を発展させる形で解析に取り組んだ。具体的解析の手順としては、モンテカルロシミュレーションによる解析プログラムを作成し、計算機を用いて $B \rightarrow D^* \rho$ 反応に対応するモンテカルロ事象を生成した。続いて生成したモンテカルロ事象を用いて、反応抽出プログラムの構築を行った。反応抽出プログラムの流れは、

中間子から崩壊して生成された中性 B 中間子事象すべてに対して、再構成できた中性 D 中間子と低運動エネルギーの荷電 ρ 中間子の組合せから荷電 D^* 中間子を再構成し、続いて D^* 中間子が再構成できたすべての事象に対して 3 つの荷電 ρ 粒子と 1 つの ρ^0 中間子を再構成できる事象を選択する。なお、3 つの荷電 ρ 粒子系に対しては全電荷量の和が 1 価で、荷電 D^* 中間子の電荷と逆符号となるように選ぶ。さらに逆符号の組合せとなる 2 つの荷電 ρ 中間子と ρ^0 中間子から D^* 中間子を再構成し、最終的に再構成できた D^* 系のエネルギーおよび運動量が、始状態の中性 B 中間子に対応するもの(これは中性 B 中間子の再構成に対応する)を選択する。以上を通じて反応抽出プログラムの構築し、さらにモンテカルロ事象を使用して検出効率を推定する。

しかし実際の B 中間子崩壊では様々な崩壊事象が排他的ではあるが生成されており、構築した反応抽出プログラムが他の崩壊事象を“誤って”抽出する可能性がある。これに対しては Belle 実験で Generic モンテカルロと呼ぶ、実際の B 中間子の様々な崩壊を含むシミュレーションデータを用いて検討した。これらの検討を通じて、我々は KEK・Belle 実験の B 中間子崩壊データに対して、構築した反応抽出プログラムは十分な有効性をもって反応事象を抽出できることを確認した(図 1)。

$B \rightarrow D^* \rho$ 反応に対する反応抽出プログラムを構築できたので、次の段階として Belle ノート

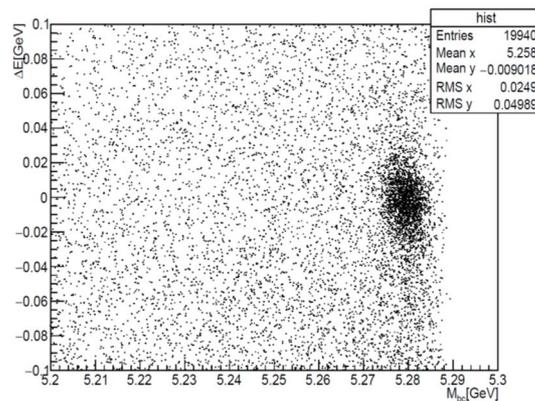


図 1 Generic モンテカルロシミュレーションデータを用いた再構成事象の不変質量 (M_{bc} 、横軸)と再構成したエネルギーと始状態 B 中間子のエネルギーの差 (E 、縦軸)の 2 次元図。事象が集中して濃くなっているところが $B \rightarrow D^*$ 反応に対応し、反応抽出プログラムが有効であることがわかる。

と呼ぶ Belle 実験グループ内に向けての報告の作成、Belle 実験グループ内での検討、確認を経て、実際の実験データ事象へ反応抽出プログラムを適用し、さらにダリッツプロット解析によって 反応における共鳴状態の探索などに進む。

(2) 研究目的の(2)の $B^0 D^{*3}$ 反応については、我々のこれまでの研究によって同反応の抽出プログラムは構築しており、研究を進めるにはさらに部分波解析プログラムの構築が必要である。部分波解析はいわゆるアイソバー模型に基づいた解析で、中間状態としてアイソバーがあると仮定し、生成された一つの状態は二つのアイソバーへ崩壊していくと仮定する。解析では、可能なアイソバーの組合せを考え、さらにアイソバー間の軌道角運動量、パリティなどで分類して一つの部分波とし、すべての部分波の散乱振幅の和の絶対値の二乗を尤度関数として、位相空間内に散乱した崩壊粒子の分布に最尤推定法などにより適合(フィッティング)させ、フィッティングの結果として各部分波の振幅や共鳴状態のパラメーターが得られる。部分波の振幅は複素数として得られる。基本的に共鳴状態の振幅はブライト-ウィグナーの共鳴公式に従うと仮定し、部分波の振幅や、共鳴公式の質量中心と共鳴幅のパラメーターが、それぞれ生成強度や部分波同士の干渉の効果、生成された中間子の特性を与えることができる。なお、実際のアイソバー模型に基づく部分波解析では大きく二通りの方法が知られている。一つ目の方法は“質量独立型”の部分波解析(以後(i)の方法とする)と呼ばれ、すべての事象を細かく崩壊エネルギー毎(終状態の質量毎とも言える)に区分し、それぞれ区分された事象に対してフィッティングを行って崩壊エネルギー毎での各部分波の寄与を求め、これらの寄与を総合して各部分波のエネルギー依存分布を求め、共鳴状態の存在が認められる場合には共鳴公式によるフィッティングをさらに行って共鳴のパラメーターを求める。二つ目の方法は“質量依存型”の部分波解析(以後(ii)の方法とする)と呼ばれ、崩壊エネルギー領域すべての事象に対して、考えられる共鳴状態に対応する散乱振幅と背景事象の振幅すべてを組み合わせ、一挙にフィッティングを行ってパラメーターを求めるという方法である。一般に(i)の方法が任意の形の背景事象の場合にも対応でき、精度が高いと考えられるが、一方で区分されたエネルギー毎にフィッティングを実行するため、計算機パワーおよび労力を多く消費する。一方、(ii)の方法は、背景事象の仮定する振幅の形がフィッティングへ影響するため、得られた結果が歪められる恐れが出るが、フィッティングプログラムおよび作業を比較的簡単化できる。寄与する背景事象の分布が同じならば、(ii)の方法でも、(i)の方法でも同じ結果が得られると期待できるが、(ii)の方法が妥当かどうかは実際の物理反応の背景事象の存否や分布の形に依存し、解析をする前には分からない。従って原則的には(i)の解析法を推奨すべきだが、(ii)の解析法もその簡便さからしばしば採用されている。そこで我々はまず(ii)の部分波解析法での解析プログラムの構築を試みた。

(3) 研究目的の(3)のハドロン回折散乱において背景事象となるハドロン間相互作用について考察を進め、CERN・COMPASS 実験によるハドロン回折散乱の 終状態生成反応において、

系の不変質量の高質量領域での散乱分布が、Deck 散乱と呼ばれる Regge 粒子の非共鳴的 2 重散乱分布と類似していることに我々は気付いた。そこで、Deck 様散乱を仮定して Mathematica を用いたデモンストレーション計算を行って散乱分布を可視化して、実験による散乱分布と比較した。

4. 研究成果

(1) 研究目的の(1)の $B^0 D^{*+}$ 、 $B^0 D^{*0}$ 、 $B^0 D^{*-}$ 反応の抽出と解析については、既に研究方法で説明した通り、反応抽出プログラムを構築できたと考えている。さらに次の段階に進まなければならないが、コロナ禍の対応や研究担当者の所属大学の業務の増大などのために解析作業が停滞している。今回、科研費研究としては終了となるが、さらに解析作業を継続する。

(2) 研究目的の(2)の $B^0 D^{*3}$ 反応の部分波解析については、質量依存型の部分波解析プログラムを ROOT と呼ばれる解析ツールの上にかんりの程度まで構築し、モンテカルロシミュレーション事象を使用してフィッティングを確認する段階まで来ている(図 2)。だが上記研究成果の(1)と同様の理由で解析作業が停滞している。これも解析作業を継続する。

(3) 研究目的の(3)のハドロン回折散乱において背景事象となるハドロン間相互作用の考察については、デモンストレーション計算結果を 2018 年に中国・高能物理研究所で開催された

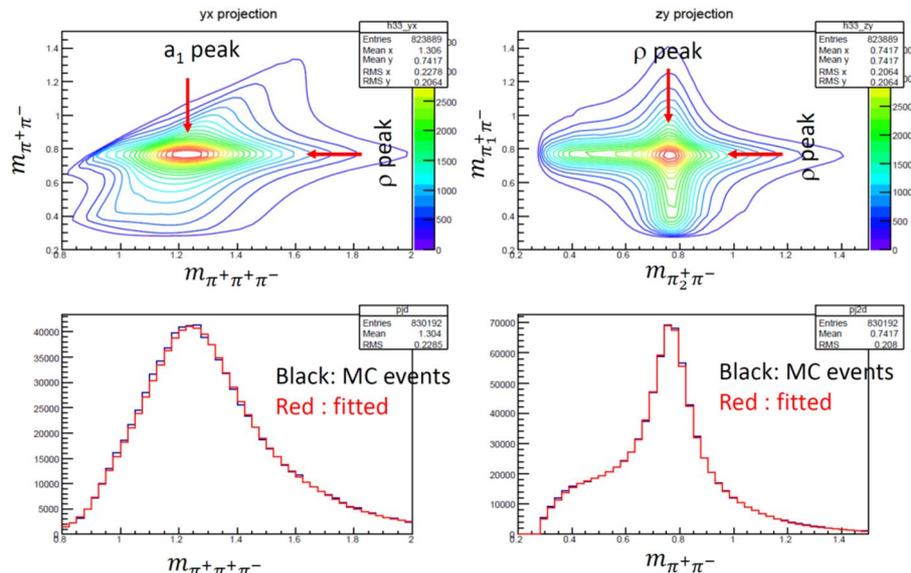


図 2 ROOT を用いて作成したフィッティングプログラムを、モンテカルロシミュレーションによって生成した $B^0 \rightarrow D^{*+} a_1^+ \pi^+$, $a_1^+ \pi^+$ 3 中間子反応事象にフィッティングさせた場合の 2 次元および 1 次元分布図。左側の上下の図から a_1^+ 中間子が再構成され、右側の上下の図からは、 ρ^0 中間子が再構成されていることが確認できる。なお、 ρ^0 中間子の再構成にあたっては同電荷符号の二つの π^+ が存在するため、二つの $\pi^+ \pi^-$ の組合せを考えている。

PWA10/ATHOS5 国際ワークショップで報告した。我々としてはこれ以上の研究を進めていないが、このワークショップの後に米国・ジェファーソン研究所の Joint Physics Analysis Center (JPAC) のグループによって詳細な理論的考察がなされ、その結果が 2021 年に論文として発表された。我々の発表についての言及はないが、同グループのメンバーが上記国際学会に参加しており、何等かの影響を与えた可能性はあり得る。またそうでないとしても、同様の方向での研究結果が得られたことは、我々の考察の方向が間違っていなかったことを示している。

(4) 我々の研究成果ではないが、他グループによる $\rho(1400)$ や $\rho(1600)$ の研究が進展しており、今後継続する我々の研究と関連するので、状況について簡単に触れておきたい。ハドロン回折散乱から得られた $\rho(1400)$ および $\rho(1600)$ の解析結果に対して、前述の JPAC のグループが結合チャンネル法に基づいた解析を行い、 $\rho(1400)$ と $\rho(1600)$ という二つの共鳴状態が、実は $\rho(1600)$ 付近の一つの共鳴状態が現象したものと見なせるという報告をしている。さらに同グループは格子 QCD シミュレーション計算によって、 $J^{PC}=1^{++}$ ハイブリッド中間子共鳴が存在するとすると、終状態が ρ 状態よりもむしろ b_1 状態に強く結合すると考えられるという報告をしている。COMPASS 実験グループではこの報告を受けて、ハドロン回折散乱において終状態 b_1 反応データの部分波解析を開始している。従って我々も B 中間子崩壊から終状態 b_1 状態が生成される反応の解析を進める必要があると考えられる。

一方、ジェファーソン研究所の CLAS 実験などによって光子生成反応による中間子分光実験がされているが、未だに光子生成反応で $J^{PC}=1^{++}$ エキゾチック中間子の観測の報告がなされていない。これは異なる生成反応では $\rho(1600)$ が生成されない可能性を示唆しているのかもしれない。

上記のように、 $\rho(1600)$ あるいは $\rho(1400)$ を B 中間子崩壊において探索する研究の意義と必要性は本研究開始から時を経ても減じていないと考えられる。

<引用文献>

- <https://indico.ihep.ac.cn/event/7377/contributions/93456/>
- <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09420-1>
- <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.042002>
- <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.054502>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Alexeev G.D., Alexeev M.G., Matsuda T et al.	4. 巻 105
2. 論文標題 The exotic meson $\chi_{c1}(1600)$ with $JPC = 1^{+-}$ and its decay into $\chi_{c1}(770)$	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1, 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.012005	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 TOSHI-AKI SHIBATA, TAKAHIRO IWATA, TATSURO MATSUDA	4. 巻 29巻6号
2. 論文標題 The 11th Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Association of Asia Pacific Physical Societies	6. 最初と最後の頁 25-27
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Jackura A., Fernandez-Ramirez C., Matsuda T et al.	4. 巻 779
2. 論文標題 New analysis of $\Lambda(1520)$ tensor resonances measured at the COMPASS experiment	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 464 - 472
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.01.017	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 Aghasyan M., Alexeev M.G., Matsuda T. et al.	4. 巻 98
2. 論文標題 Light isovector resonances in $p\bar{p}$ annihilation at 190 GeV/c	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 92003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.092003	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 Matsuda Tatsuro, BELLE Collaboration	4. 巻 310
2. 論文標題 Production rates of hyperons and charmed baryons from e^+e^- annihilation near $\sqrt{s} = 10.52$ GeV	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.310.0231	査読の有無 無
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4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 黒岩奨大
2. 発表標題 B中間子のD* 崩壊反応の解析
3. 学会等名 日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 黒岩奨大
2. 発表標題 B D* 反応における 共鳴状態の探索
3. 学会等名 Flavor Physics Workshop 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuro Matsuda
2. 発表標題 Kinematical distribution of the Deck effect
3. 学会等名 The International Workshop on Partial Wave Analyses and Advanced Tools for Hadron Spectroscopy, PWA10/ATHOS5 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuro Matsuda
2. 発表標題 Production rates of hyperons and charmed baryons from e+e- annihilation near $\sqrt{s} = 10.52$ GeV
3. 学会等名 XVII International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure (Hadron2017) (国際学会)
4. 発表年 2017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 協力 者	幕野 屯 字美	宮崎大学・農学工学総合研究科・特別協力研究員	
	(MacNaughton Jimmy)	(17601)	

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			
ドイツ	ドイツ電子シンクロトロン研究所	カールスルーエ工科大学	マックスプランク物理学研究所	他9機関
米国	ハワイ大学	バシフィック・ノースウェスト国立研究所	ミシシッピ大学	他11機関
イタリア	イタリア国立核物理研究所およびピサ大学	イタリア国立核物理研究所およびトリノ大学	イタリア国立核物理研究所およびトリエステ大学	他6機関
ロシア連邦	ブドカー原子核物理学研究所	レベデフ物理学研究所	モスクワ物理工科大学	他2機関
韓国	高麗大学校	延世大学校	慶北大学校	他6機関
中国	高能物理研究所			
インド	ラジャ・ラマンナ先端技術センター			
オーストリア	高エネルギー物理学研究所			