

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H03706

研究課題名（和文）J-PARC大強度中間子ビームとTPC検出器によるバリオンとダイバリオンの研究

研究課題名（英文）Studies of baryons and dibaryons with J-PARC high-intensity meson beams and a TPC detector

研究代表者

佐甲 博之（Sako, Hiroyuki）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究主幹

研究者番号：40282298

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,700,000円

研究成果の概要（和文）：Hダイバリオン探索実験（E42）に関しては、2021年5-6月に本実験を遂行し、全1700億事象の(K<sup>+</sup>,K<sup>-</sup>)反応データを収集することに成功した。KuramaスペクトロメータおよびHyperonスペクトロメータにおけるTPC等の検出器の較正等を進め、K中間子の識別と運動量の再構成を行い、粒子の再構成に成功した。

N\*分光実験（E45）に関しては、代表者佐甲と米国側共同代表者(Lamar大学 P. Cole氏)との新たな共同研究体制を確立した。2025年頃の実験を目指し、最終的な検出器の準備および部分波解析のソフトウェア開発を米国の理論研究者と共同で進め、実験準備をほぼ完了した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Hダイバリオンはuuddssクォークから構成されるフレーバー一重項の安定な6クォーク状態と考えられており、本実験によりその存否に最終決着をつけることはハドロン研究分野についてきわめて重要なインパクトを与えることが期待できる。実験は2021年に無事終了し、解析が進んでおり、今後この問題に決着をつけることが期待される。また、N\*分光実験(E45)は質量2GeV以下のN\*スペクトルの完全解明のために極めて重要な実験である。本研究期間に実験の準備がほぼ終了し、2025年の実験で成果が得られることが期待される。

研究成果の概要（英文）：On H-dibaryon search experiment (E42), we carried out the experiment in May-June, 2021, and collected 170 billion (K<sup>+</sup>,K<sup>-</sup>) reaction events in total. We proceed with the calibration of detectors such as the TPC, and Kaon identification and momentum reconstruction with the Kurama Spectrometer and the Hyperon Spectrometer.

On the N\* spectroscopy experiment (E45), we established a new organization with the co-spokespersons, H. Sako (PI of this Kakenhi program), and P. Cole (Lamar Univ.). Aiming at the experiment in 2025, we proceed with the detector preparation and development of partial wave analysis software with theoretical researcher in USA, and complete most of the preparation.

研究分野：原子核物理学

キーワード：J-PARC バリオン ダイバリオン

### 1. 研究開始当初の背景

近年、従来のクォーク・反クォークや 3 クォーク状態では説明できない X,Y,Z 中間子や  $c\bar{c}$ ペンタクォークバリオン、6 クォーク状態の可能性が指摘される $\Delta\Delta$ ダイバリオンなど、エキゾチックな存在形態をもつハドロンの発見が相次いでいる。大強度の $\pi,K$  中間子ビームによるハドロ生成実験が可能な J-PARC は、エキゾチックなものを含む様々なハドロンの性質の定量的理解に不可欠な高統計データを提供するものとして注目されている。 $\pi,K$  中間子ビームを用いたハドロ生成実験では、ビーム粒子と反応で生成された最も運動量の高い粒子のみを測定し、残りの生成粒子は運動量・エネルギー保存則から間接的に測定する欠損質量法が主流であった。しかし、ハドロンの反応や崩壊事象を一意に決定し、生成粒子を識別する必要がある実験では、生成粒子を全て測定する必要があり、そのためには三次元飛跡検出器が最も有効である。

量子色力学 (QCD) では 6 クォーク状態 (ダイバリオン) の存在は排除されていない。そのうち最も安定なものとして H ダイバリオン ( $uuddss$ ) が予言されている。ダブルハイパー核  ${}^6_{\Delta\Delta}\text{He}$  の発見によって  $\Delta\Delta$  質量からその 7 MeV 下までの質量領域は排除されたが、 $\Delta\Delta$  の束縛状態や共鳴状態として存在する可能性がある。

電子・光子ビームによる中間子生成反応実験を通じ、核子共鳴 ( $N^*, \Delta^*$ ) の分光研究は近年進展を見せているが、Particle Data Group に報告されている  $N^*, \Delta^*$  共鳴の約半数については、存在すら確立していない。最近、チャンネル結合法に基づく  $\pi N, \gamma N$  反応の包括的理論解析により、 $\pi N \rightarrow \pi\pi N$  ( $^2, 2$ ) 反応のデータが  $N^*, \Delta^*$  共鳴の質量スペクトルの確立に不可欠であることが示された。 $(^2, 2)$  反応の部分波解析から  $N^*, \Delta^*$  共鳴の質量スペクトルを完全に決定するためには、数千万事象のデータが必要であるが、 $(^2, 2)$  反応の現世界データは 24 万事象と完全に不足している。このことから、 $(^2, 2)$  反応のデータは  $N^*, \Delta^*$  共鳴の質量スペクトルを確立する上で決定的に重要な最後の “missing piece” であると広く認識されている。本研究では、世界に存在する全  $(^2, 2)$  反応データの統計量を 2 桁向上させ、チャンネル結合法に基づく部分波解析との連携により、2 GeV 以下の質量をもつ  $N^*, \Delta^*$  共鳴のスペクトルとスピン・パリティを決定する。また、最近の格子 QCD 計算で存在が予言されたグルーオン有効自由度の励起を伴うハイブリッドな  $N^*, \Delta^*$  共鳴 (qqqq 状態) を探索する。

### 2. 研究の目的

J-PARC で実現可能な世界最高強度の  $\pi, K$  中間子ビームと代表者らが開発した高性能の三次元飛跡検出器 (TPC) を駆使して、バリオンおよびダイバリオンの分光学的研究における長年の課題の解決を目指す。 $(K^-, K^+)$  反応の測定 (J-PARC E42 実験) により H ダイバリオンの存否を決定し、 $(\pi, 2\pi)$  反応の測定 (同 E45 実験) により 2 GeV 以下の  $N^*, \Delta^*$  バリオン共鳴の質量スペクトルを決定する。上記の測定を実現するため、E45 実験に用いる水素標的と粒子多重度カウンタを開発するとともに、E42, E45 実験のために TPC の安定化および耐高計数率化を行う。

### 3. 研究の方法

J-PARC における世界最高強度の  $\pi, K$  中間子ビームを用いて H ダイバリオンおよびバリオン分光実験を行う。H ダイバリオンの探索 (J-PARC E42 実験) については  $(K^-, K^+)$  反応の測定を、K-ビームをダイヤモンド標的に照射して行う。荷電粒子を識別する Kurama スペクトロメータと、TPC を中心とする Hyperon スペクトロメータとの組み合わせによって、反応によって生成した  $K^+$  をタグし、 $\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega$  等の不変質量を測定することによって H ダイバリオンを探索する。

バリオン分光実験 (E45 実験) については、 $N^*, \Delta^*$  共鳴の  $N^*, \Delta^*$  反応を、 $\pi$  ビームを液体水素標的に照射して Hyperon スペクトロメータによって測定する。これらの反応をビームエネルギーを細かいステップで 0.7 GeV/c から 2.0 GeV までの運動量で変化させて測定し、得られた微分反応断面積から部分波解析によって 2 GeV 以下の  $N^*, \Delta^*$  の質量スペクトルとスピン・パリティを決定する。これらの実験基盤として、H ダイバリオン実験の  $K^+$  識別用チェレンコフカウンタ、 $N^*$  実験の水素標的・標的ホルダ及び粒子多重度カウンタを開発する。さらに代表者らが開発した三次元飛跡検出器 TPC の安定化、および耐高計数率化を行う。

### 4. 研究成果

当初の予定より J-PARC ハドロン実験施設のビームタイムスケジュールが大幅に遅延したため、H ダイバリオン探索実験 (E42 実験) は 2021 年に遂行することができたが、N\* 分光実験 (E45 実験) のビームタイムは本研究課題終了後の 2025 年頃の予定となった。E42 実験に関しては、2021 年 5 - 6 月に本実験を遂行し、全 1700 億事象の(K+,K-)反応データを収集することに成功した。TPC、TPC ホドスコープ、水チェレンコフカウンタ、及び Kurama スペクトロメータのドリフトチェンバーと TOF カウンタ等、すべての検出器の安定運転に成功した。特に TPC に関しては、アルゴン・メタン混合ガスのフローレートを 1L/min に増加させることによって、水蒸気と酸素の混入を数 10ppm 以下に抑制し、その結果電子増幅器である GEM (Gas Electron Multiplier) の放電レートを 10 回/hour 以下に低減することが可能となり、TPC の安定運転を達成した。検出器校正に関して、TPC の波形データのベースライン補正、ドリフト速度とオフセットの校正、水平方向位置の校正等を行い、さらに Kurama Spectrometer の各検出器の校正を行った。これによって、反応点の位置分布、TPC のエネルギー損失による粒子識別、Kurama スペクトロメータの飛行時間測定による粒子識別を確立し、 $-p$  不変質量分布による  $\Lambda$  の再構成に成功した。このように H ダイバリオン探索のための不変質量解析に必要な準備が整った。

N\* 分光実験 (E45) に関しては、米国側共同研究者 K. Hicks 氏の退任により、代表者佐甲と新たな米国側共同代表者(Lamar 大学 P. Cole 氏)との新たな共同研究体制を確立した。2025 年頃の実験を目指し、検出器およびデータ解析の準備を進めた。液体水素標的およびその昇降システムを製作し、またこの標的に対応した TPC の標的ホルダの製作を行った。2 荷電粒子トリガーを行う TPC ホドスコープを製作し、E42 実験に使用した。データ解析については、部分波解析のソフトウェア開発を原子力機構の S. H. Kim、米国 Connecticut 大学の K. Joo 教授、米国 ANL の T. S. Harry-Lee 教授とともに開始した。また E45 実験のためのデータ収集系速度の向上のため、E42 実験の TPC 波形データの解析を行った。サンプリングレートを 1/2 に減らしても二粒子分解能に影響がないことが分かり、2 倍の速度でのデータ収集が可能であることがわかった。さらに粒子シミュレーションを行い、TPC ホドスコープの前方角領域に関する細分化の要否について調べた。ダブルヒットの確率が十分低いため、細分化は不要であることを示した。以上のように、E45 実験のほとんどの準備が完了した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ahn J.K., Choi S., Hasegawa S., Hayakawa S.H., Hong J., Ichikawa Y., Imai K., Kim S.H., Makida Y., Ohhata H., Sako H., Sasaki K., Sato S., Takahashi T., Tanida K., Yoshida J.	4. 巻 1047
2. 論文標題 Superconducting dipole magnet for Hyperon spectrometer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 167775 ~ 167775
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2022.167775	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 Y. Ichikawa, J. K. Ahn, T. Akaishi, S. Ashikaga, S. W. Choi, K. Hicks, H. Ekawa, S. Hasegawa, S. Hayakawa, K. Imai, S. Ishimoto, W. S. Jung, B. M. Kang, S. H. Kim, J. Y. Lee, T. Nanamura, H. Sako, K. Sasaki, S. Sato, K. Shirotori, K. Suzuki, S. Suzuki, T. Takahashi, K. Tanida, S. B. Yang, J. Yoshida	4. 巻 33
2. 論文標題 Time Projection Chamber “HypTPC” for the Hadron Spectroscopy at J-PARC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSC.33.011103	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 Ichikawa Y., Ahn J.K., Akaishi T., Ashikaga S., Choi S.W., Hicks K., Ekawa H., Hasegawa S., Hayakawa S., Imai K., Ishimoto S., Jung W.S., Kang B.M., Kim S.H., Lee J.Y., Nanamura T., Sako H., Sasaki K., Sato S., Shirotori K., Suzuki K., Suzuki S., Takahashi T., Tanida K., Yang S.B., Yoshida	4. 巻 31
2. 論文標題 Time Projection Chamber “HypTPC” for the Hadron Spectroscopy at J-PARC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSC.33.011103	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 Kim Shin Hyung, Ichikawa Yudai, Sako Hiroyuki, Ahn Jung Keun, J-PARC E42/45/72 Collaboration	4. 巻 1498
2. 論文標題 Development of a time projection chamber for J-PARC hadron physics program	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012023 ~ 012023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1498/1/012023	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 Jung Wooseung, Ahn Jung keun, Hasegawa Shoichi, Hicks Kenneth, Hwang Sanghoon, Ichikawa Yudai, Kim Shinhyung, Sako Hiroyuki, Sato Susumu, Tanida Kiyoshi	4. 巻 27
2. 論文標題 Development of TPC Trigger Hodoscope for J-PARC E42/E45 Hadron Experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.27.011007	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 Kim Shin Hyung, Ahn Jung Keun, Sako Hiroyuki, Ichikawa Yudai, Sugimura Hitoshi	4. 巻 Hadron2017
2. 論文標題 GEM based TPC for the high intensity beam at J-PARC	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PoS	6. 最初と最後の頁 221
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.310.0221	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

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Hiroyuki Sako
2. 発表標題 Studies of baryon resonances with meson beams at J-PARC -J-PARC E45 and E72-
3. 学会等名 APCTP Workshop on Nuclear Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yudai Ichikawa
2. 発表標題 Time Projection Chamber "HypTPC" for the hadron spectroscopy at J-PARC
3. 学会等名 J-PARC symposium 2019, Tsukuba, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yudai Ichikawa
2. 発表標題 Experimental and Theoretical Hadron Physics, Programs with HypTPC
3. 学会等名 the 52nd Reimei Workshop “ Experimental and Theoretical Hadron Physics: Recent Exciting Developments ”, Tokai, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市川裕大
2. 発表標題 J-PARC E42/45実験のためのMPPCを用いた高時間分解能検出器の開発(2)
3. 学会等名 日本物理学会74回年次大会(九州大学、福岡市)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐甲博之
2. 発表標題 J-PARC E45の物理と展望
3. 学会等名 RCNP研究会「ガンマ線ビームを用いた原子核・ハドロン物理の新局面と今後の展望」、大阪大学、茨木市(招待講演)
4. 発表年 2019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	市川 裕大  (Ichikawa Yudai)  (50756244)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究職    (82110)	

6. 研究組織（つづき）

	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	キム シンヒョン  (Kim Shinhyung)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・博士研究員  (82110)	

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			
米国	Lamar University	University of Connecticut	Argonne National Laboratory	他1機関
韓国	Korea University			