

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21105001

研究課題名(和文)多彩なフレーバーで探る新しいハドロン存在形態の包括的研究

研究課題名(英文)Elucidation of New hadrons with a Variety of Flavors

研究代表者

飯嶋 徹(Iijima, Toru)

名古屋大学・現象解析研究センター・教授

研究者番号：80270396

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,500,000円、(間接経費) 6,450,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、新学術領域「多彩なフレーバーで探る新しいハドロン存在形態の包括的研究」の総括班として、領域内で行われる計画研究間や公募研究との有機的な連携を図るために、領域研究会、領域セミナーシリーズ「ハドロンスクエア」などの研究上の施策の他、人材育成の観点から若手サマースクールや、Bファクトリーのデータ解析チュートリアルなどの講習会、また成果発表の場として国際会議の主催などを行った。その結果、Bファクトリーでの多くのエキゾチック状態発見といった科学成果が得られるとともに、領域発足以前には独立に研究を行っていた素粒子と原子核両分野の研究者の本格的な交流が進み、人材育成上の成果も得られた。

研究成果の概要(英文)：As a project management group of the 'New hadron' grant-in-aid program, we aim to develop close collaborations among researchers. For this purpose, we have provided opportunities, such as workshops for related subjects, series of seminars entitled as 'Hadron Square' to enhance our research activities. We also had annual summer schools for young researchers, and some tutorials to encourage B-factor y data analyses by nuclear physicists, and hosted some international conferences. These efforts have resulted in scientific achievements, such as observation of new exotic hadrons at the B-factory, stimulated interplays between particle and nuclear physicists, who worked independently before this program started, and then helped to promote young researchers.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学(素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理)

キーワード：素粒子実験 素粒子論 実験核物理学 理論核物理学

1. 研究開始当初の背景

本新学術領域研究は、メソン(クォークと反クォーク)やバリオン(クォーク3つ)としては理解できないエキゾチックハドロン¹の成り立ちと、物質中でハドロン質量が変化する機構を実験的に確立し、QCDの動力学によってクォークからハドロンが形成される機構の解明を目指している。この目的にそって本領域は、Bファクトリー実験におけるエキゾチックハドロン²の研究(計画研究A01)、LEPS実験におけるバリオン異常構造の解明(計画研究B01)、J-PARC E16実験による核物質中でのベクター中間子の質量変化の系統的測定(計画研究C01)の実験研究を推進する三計画研究と、将来の高輝度実験に向けて有用となる先端的測定器の開発研究(計画研究D01)、得られた実験結果をQCDに基づいて統一的に理解することを目指す理論研究(計画研究E01)、そして関連する公募研究から構成されている。

こうした本領域の目的達成のためには、それぞれの計画研究や公募研究で先鋭的な研究を進めるとともに、計画研究間や公募研究との相互作用を促進し有機的な連携を積極的に推し進める必要がある。特にこれまで独立に研究を進めてきた素粒子・原子核分野の研究者が結集して、異なる研究グループで蓄積されてきたノウハウを提供し合い新たな手法の提案を図ることや、理論的にもクォーク・ハドロン・原子核の現象を、同じ強い相互作用をする系と捉え統一的な理解を進める研究組織体制の構築が有効と考えられた。

2. 研究の目的

本研究は、新学術領域「多彩なフレーバーで探る新しいハドロン存在形態の包括的研究」の総括班としての計画研究であり、その目的は、領域内で行われる5計画研究の遂行を助けるとともに、計画研究間や公募研究との相互作用を促進し有機的な連携を積極的に推し進めることにある。例えば、計画研究A01から得られる c 、 b クォークを含む4クォーク状態に関する結果と計画研究B01の s クォークを含む5クォーク状態に関する結果を理論的に統一的に解釈したり、逆に理論的な予言を実験的に確かめることにより、見つかったエキゾチック状態の理解を進めることが可能となる。さらに計画研究C01との連携を合わせることにより、クォークとグルーオンからハドロンが生成され質量を獲得する動的機構の解明が可能となる。また、実験計画研究間では共通する技術的課題があり、連携を強化するメリットは大きい。具体的な取り組みとしては、領域研究会、総括班会議といった議論の場を設けるとともに、核物理研究者のBelleデータ解析への参加を積極的に進め、Belle実験の解析ソフトウェアに關

する講習会などの支援事業を進める。また、検出器開発研究においても、計画研究D01における組織的な検出器開発に加えて、分野横断的な検出器ワークショップを開催し、計画研究間の技術交流を図る。

また領域の研究で得られた成果・情報を発信するとともに、素粒子・原子核の境界領域で活躍できる若手研究者を育成する。その観点からは、ホームページを整備して研究成果を積極的に発信する、啓蒙活動としてBelle研究者が開発した新粒子探索プログラム「B-lab」の普及、若手スクールの開催によって既成の分野にとらわれない多彩なアプローチを駆使してハドロン研究を推し進める若手の育成を図る、などの事業を展開する。そして、新しいハドロン³の存在形態に関する国際会議を主催する。

こうした取り組みによって、領域としての研究成果を最大限に引き上げるとともに、素粒子・原子核の境界領域に新しい研究領域を創設することを目指す。

3. 研究の方法

【研究組織】

上記の目的にそって、各計画研究の成果を集約し研究の指針を与える観点から、領域代表及び各計画研究の代表者とともに、数人の研究協力者を評価担当者として迎え、議論した研究指針を活かすために、3実験の代表者を含んだ構成とした。

【活動内容、施策など】

本領域の目的達成のために、総括班の具体的な活動内容を以下のように設定し実行した。

1) 領域研究会の開催

領域における研究成果の集約、計画研究間・公募研究との間の情報共有、今後の研究指針を議論する目的で、領域に参加する研究者のほか部外研究者も交えた領域研究会を以下のとおり開催した。

- 第1回領域キックオフ研究会(2009年11月27-28日、名古屋大学)
- 第2回領域研究会(2011年2月28日-3月1日、理化学研究所)
- 第3回領域研究会(2012年2月20-21日、大阪大学)
- 第4回領域研究会(2013年3月21-22日、KEK)

2) 領域セミナーシリーズ「ハドロン・スクエア」の開催

「新ハドロン」領域での研究に関連する話題を全国の大学・機関でセミナーの形で提供する「ハドロン・スクエア」を計11回開催した。セミナー内容は、Bファクトリーでの最新の発見の紹介から、ホログラフィックQCDの解説に及び、幅広い聴衆から好評を得

た。

3) クロスオーバー研究会

新学術領域「素核宇宙融合」との合同研究会を2回開催し、ハドロンという共通の対象に対して、QCDの基本原則と現象論に基づく研究の現状を報告するとともに、今後の進展と共同研究の手がかりを議論した。

- 2011年6月23-24日、計算科学研究機構(RIKEN AICS)
- 2012年7月12-13日、名古屋大学

4) 若手サマースクールの開催

多彩なアプローチを駆使してハドロン研究を推し進める若手の育成を図る目的から、大学院生等の若手を対象にしたサマースクールを毎年開催した。3つの実践コースを用意し、若手が各10人程度の実践コースに分かれ、それぞれのテーマを学ぶとともに、4つのセミナー講演を交えて基本事項から最新の進展内容を議論した。

5) Belle 解析スクールの開催

Bファクトリーの大量データを使ったデータ解析の手法を若手が継承し、より活発な物理解析を進めることを目的として、Belle解析スクールを実施し、解析手法についてチュートリアルを使ったより実践的な解説を行った。Belle実験データ解析への核物理コミュニティからの参加を促進するうえでも有効であったと考える。

6) 検出器ワークショップの開催

実験研究で共通に必要な技術開発に関する交流・連携を目的として、

- 「TOPカウンターのLEPS実験への応用に関するミニ研究会」(2010年6月13日)
- 「第3回次世代光センサーに関するワークショップ」(2010年12月17日、名古屋大学、共催)
- 「第4回次世代光センサーに関するワークショップ」(2012年12月26日、大阪大学、共催)

を行った。

7) 国際会議の主催・共催

以下の会議を主催または共催した。

1. Workshop on Hadron and Nuclear Physics (HNP09): 2009年11月16-19日、大阪大学荒田記念館、参加者75名[共催]
2. Flavor Physics Workshop 2009: 2009年12月1日(火)~4日(金)、岐阜県下呂市下呂温泉、参加者45名。[共催]
3. 科研費特定領域と新学術領域による研究会「ストレンジネスから新ハドロンへ」: 2009年12月11-12日、大阪大学荒田記念館、参加者40名[共催]
4. B Workshop 2010: 2010年10月12日(火)~15日(金)、静岡県熱海市熱海温泉、参

加者49名。[共催]

5. BARYONS2010会議: 2010年12月7-11日、大阪大学コンベンションセンター、参加者176名[共催]
6. International Workshop on Using Heavy Flavors to Probe New hadron Spectroscopy/Dynamics: 2012年11月18-21日、韓国釜山、参加者60名。[主催]
7. 8th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2013): 2013年12月2-6日、湘南国際村センター、参加者約120名[共催]
8. XV International Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron2013): 2013年8月4-8日、奈良県新公会堂、参加者246名。[主催]
9. Hadron Physics Symposium: 2014年4月17-19日、名古屋大学、参加者83名[主催]

特に5のBARYONS2010会議では、バリオンの構造と相互作用に関する理論・実験研究の第一人者が集まり、クォークの閉じ込めやカイラル対称性の自発的な破れによって物質が形成される力学機構に関する活発な議論を行うとともに、南部陽一郎先生を迎え、「From BCS to NJL, An Old Story Retold」というタイトルで講演を行って頂いた。

また、本領域の主催による6の国際研究会では、日本・韓国・中国の関連研究者が集結し、日本のBファクトリー、Spring-8、J-PARCと中国高能研究所のBESIII実験で得られた最新結果に関する議論を行った。

8、9は本領域の総括として位置づけた国際会議およびシンポジウムである。8のHadron2013国際会議では、ハドロン物理学に関する国内外の第一線の研究者が集結して、当領域で得られた成果について多くの成果を発表した。9は、当領域の計画研究の成果を総括する講演とともに、国内外の第一線研究者による関連研究課題のレビュー講演を行い、ハドロン物理学に関する今後の展望を議論した。

8) 研究評価

素粒子・原子核分野の著名研究者を評価委員に招いて、領域の外部評価を2回行い、高い評価を受けるとともに研究推進のためのアドバイスを受けた。

第1回領域評価委員会(2011年8月4日)

第2回領域評価委員会(2014年4月18日)

9) 総括班会議の開催

上記領域研究会や評価委員会開催時とそれ以外に各年度1回程度の総括班会議を行い、領域研究会での報告や研究評価をふまえ、年間の研究計画策定を行った。

【公募研究の推進】

本新学術領域の計画研究で進める Belle 実験、LEPS 実験、J-PARC-E16 実験以外にも関連する国内外の実験研究がある。理論研究においても、格子 QCD 計算や最近では弦理論に基づくハドロン質量の計算など、本領域の計画研究 E01 とは異なるアプローチによるハドロンの諸性質の解析が進んでいる。計画研究と相補的な以下の研究を中心に進める方針で公募研究の公募を行った。

1) 関連する他の実験計画で行うハドロン物理に関する実験研究。

2) B ファクトリー、LEPS, J-PARC 等での将来の実験に有用となる検出器の開発。

3) 計画研究とは相補的なアプローチによる理論研究。

総括班では、こうした公募研究を領域の研究に連携させ、本領域における研究をより豊かにすることを目指した。

【情報発信】

領域採択後に迅速にホームページを立ち上げ、研究概要、研究組織や研究成果を掲載して情報発信を行った。また、研究会、セミナー、スクール等の開催情報の周知、文書サーバーへのリンクによって研究情報の共有にも活用した。ホームページアドレス：http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/public/new_hadron/

また、下記の一般公開や講演会において、一般市民への啓蒙活動を行った。

・理化学研究所一般公開： 方位磁石をもちいた「対称性の自発的破れ」の演示模型を製作し、J-PARC E16 実験ポスターとともに展示、説明した。

・大阪大学核物理研究センター公開・見学： 高校生から一般市民を対象に随時希望に応じて加速器施設の公開を行なうとともに、本領域研究に関連する原子核・素粒子物理に関する最新の成果と、講義等を通して紹介している。2010 年は 701 名が訪れた。

また、以下の講演会を行った。

1. 「B ファクトリー実験における三つの発見」飯嶋 徹、名古屋大学高等研究院セミナー、2010 年 3 月 19 日。
2. 「素粒子研究の最先端」飯嶋 徹、東海高校中学“サタデープログラム 17th”、2010 年 6 月 26 日。
3. 「物理学の『見えない』ものを『見る』工夫」宮林 謙吉、奈良県立畝傍高校 SFU 講義、2011 年 2 月 3 日。

4. 研究成果

本総括班のリードによる領域研究の推進によって、以下のような研究上の成果、研究連携および人材育成上の成果が得られた。

【研究成果】

計画研究 A01 からは、B ファクトリー実験で蓄積された高統計データの精力的な解析によって、本領域の 5 年間の研究期間内に 11 個もの新ハドロン粒子が発見され、そのうちエキゾチック粒子は以前のものも含めて約 20 個に達した。新たに発見されたボトムクォークを含んだエキゾチック状態とチャームクォーク状態の比較や、幾つかの状態のスピン・パリティ状態も明らかになり、エキゾチック状態の本質的な理解への道が開けてきた。

計画研究 B01 においては、ペンタクォーク状態やメソン-バリオン共鳴の候補である Θ^+ や $\Lambda(1405)$ に関する新しい結果が、Spring-8/LEPS および J-PARC における実験から得られた。 Θ^+ については、 $\gamma d \rightarrow K^+ K^+ p n$ 反応による生成時の反跳陽子の情報をより積極的に使ったデータ取得と解析が進行中である。また本領域の推進が後押しとなって LEPS2 ビームラインの建設が進み、2013 年 4 月から物理データ取得を開始した。

計画研究 C01 では、原子核内でのベクトル中間子の質量スペクトラムの変化を高精度で系統的に測定する実験(J-PARC E16)の準備として、GEM 飛跡検出器や電子同定検出器の開発が成功し、j-PARC のビームライン建設も始まり、2016 年に実験を開始する目処が得られた。

計画研究 D01 では、将来の高輝度実験における最先端測定器の開発として、高輝度 B ファクトリー実験用 TOP カウンターのプロトタイプと性能検証が完了し実機建設が進んだ。また B ファクトリー実験用に開発された TOP カウンターやエアロジェル検出器、高速読み出し回路を Spring-8 や J-PARC 等における実験に応用する試みも進んだ。

計画研究 E01 では、実験で得られた新種のハドロン粒子の性質を解明する研究を行い、量子色力学に基づいて現象を再現し、従来の陽子や中間子等とは異なったハドロンの存在を強く示唆する結果を得た。また、クォークの閉じ込め機構、QGP 相におけるにおける非摂動ダイナミクス等、量子色力学の基本的な問題においても成果を得た。

【研究連携の進展】

本研究の推進により、各計画研究の先鋭的な研究成果とともに、以下のような連携が進んでいる。

- 重いクォークを含むバリオンの研究の進捗によって、A01 と E01 計画研究の連携が進んだ。具体的には、B ファクトリーで発見された電荷を持つボトムクォークを含むエキゾチック粒子は、B-B* 中間子の分子状態で説明され、その類推からチャームク

オーク状態の理解も進んだ。

- (1405)の生成崩壊、 $\Lambda(1405)$ の光生成、 $\chi(3872)$ の構造崩壊、クオークの破碎関数等で理論(E01)と実験(A01, B01)研究の連携が進んだ。
- 物質中のハドロンの性質・質量の起源に関しては、カイラル有効理論に基づいた解析が進められ、対象となる粒子の強度関数等の解析を目指している(E01-C01)。
- D01とE01計画研究の連携によって、高輝度Bファクトリー実験に向けて開発してきたTOP検出器のビームテストをSPing-8で行うとともに、将来的にLEPS2実験に応用する検討が進んだ。

Bファクトリー実験の解析においては、Belle NPC(Nuclear Physics Consortium)の活動によって、Belle実験のデータ解析への核物理研究者の参加が進み、以下のような研究課題が進展した。

- $B \rightarrow \chi(3872) K$, $\chi(3872) \rightarrow J/\psi \pi^0 \pi^0$ による $\chi(3872)$ 粒子のアイソスピン決定。
- ハドロン間相互作用の解析($\pi\pi/K\pi/KK$ scattering lengthの測定)
- 高エネルギー e^+e^- 衝突における $\Lambda(1405)$ やチャームバリオンの生成率計測
- Scalar & Axial vector メソンの解析
- チャームを含んだダイバリオン状態の探索

こうした成果は、領域に参画する奈良女子大学、名古屋大学、大阪市立大学、KEK等のBelle研究者とNPCメンバーによる定例ミーティング(TV会議)をはじめとする日常的な研究交流の賜物であり、ハドロン解析を行う研究者チームの底辺拡大にも繋がった。

さらに、Belle NPCの活動は、物理解析だけでなく、高輝度Bファクトリー実験用中央飛跡検出器の建設やプロトタイプ検出器のSpring-8における性能検証や、大阪大学核物理研究センターにおけるBelleデータ解析環境の構築などにも及んでいる。

公募研究との連携においても多くの研究進展が得られた。以下にその例をあげる。

- 「B中間子崩壊による軽クオーク中間子の研究」(代表者:宮崎大学工学部 松田達郎)では、高統計高精度のBelle実験データを用いて中間子スペクトルを部分波解析で詳細に調べる研究が進んだ。
- 「通常原子核密度におけるパズル解明にむけたエアロゲル検出器の開発」(代表者:理化学研究所 佐久間史典)はC01で建設予定のスペクトロメータに新しく検出器を付加する提案がなされ、実験計画を共同で検討、推進している。
- 「広範な屈折率領域における高透明度シリカエアロゲルの開発」(代表者:千葉大学 河合秀幸)では、ピンホール乾燥法という新しい制作方法によって、 $n=1.2$ までの屈折率領域でエアロゲルの透過率の

向上に成功し、計画研究D01で進めているBelle II実験用のエアロゲル放射体($n=1.05-1.06$)への応用検討が進んだ。

- 「離れた測定器読みだし回路とCOPPERを結ぶ標準データ転送リンクの開発」(代表者:KEK 伊藤領介)では、B01, C01, D01計画研究で進めるLEPS, J-PARC, Bファクトリーの各実験に共用可能なデータ収集システムの開発が進んだ。
- 理論関係では、重いクオークを含むハドロ分光、QCD有効理論に基づいた真空とハドロ構造の研究、格子QCDに基づいた研究などが進み、計画研究と連絡・連携を密にとりながら共同研究も進んだ。

【人材育成】

本領域の研究推進は若手人材育成にも大きく貢献している。

本領域に関連する研究によって、これまでに14名の大学院生が新たに博士号を取得した(A01:1名、B01:7名、E01:6名)。現在関連研究で博士研究を進めている大学院生もあり、今後も増える見込みである。

また、本領域では、通算18名の若手研究者(うち6名が外国人)を特任助教もしくは研究員として雇用し育成した。15名は新しいポジションを獲得して転出し、このうち3名が教授のポジションを獲得して栄転したことは特筆すべき人材育成上の成果である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Toru Iijima, "Study on Exotic Hadrons", Prog. Theor. Phys. Suppl. 186, 134 (2010).

[学会発表](計*件)

[図書](計8件)

Toru Iijima, "Hadron Spectroscopy at Belle", US-Japan Joint Workshop on Meson Reactions at Jefferson Lab and J-PARC, October 11, 2009.

Toru Iijima, "Studies on Exotic Hadrons at Belle", 3rd Joint Meeting of the NP Divisions of the APS and JPS, October 17, 2009.

Toru Iijima, "Study on Exotic Hadrons at B-factories", 2009 International workshop "Strong Coupling Gauge Theories in LHC Era (SCGT 09)"

Toru Iijima, "Exotic Onia-like Spectroscopy", Physics at LHC (PLHC2012), June 4-9, 2012, Vancouver, Canada.

Toru Iijima, "Recent Hadron Spectroscopy Results from the Belle", XI International Conference on Hypernuclear and Strange Particle

Physics (HYP2012) “, Barcelona, Spain, October 1-5, 2012.

Yuji Kato, “ New result on Θ^+ from LEPS ”, 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20) , Fukuoka, August 20-25, 2012.

C. P. Shen, “ New Heavy Exotic Hadrons ”, Sixth International Conference devoted to Quarks and Nuclear Physics ”, France, April 16-20, 2012.

Y. Kato, “ Study on the charmed strange baryons at Belle ”, XV International Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron2013), Nara, November 4-8, 2013.

〔産業財産権〕

出願状況（計0件）

取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/public/new_hadron/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯嶋 徹 (IIJIMA, Toru)

名古屋大学・現象解析研究センター・教授
研究者番号：80270396

(2) 研究分担者

野海 博之 (NOUMI, Hiroyuki)

大阪大学・核物理研究センター・教授
研究者番号：10222192

保坂 淳 (HOSAKA, Atsushi)

大阪大学・核物理研究センター・教授
研究者番号：10259872

四日市 悟 (YOKKAICHI, Satoshi)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・専任研究員
研究者番号：20360670

宮林 謙吉 (MIYABAYASHI, Kenkichi)

奈良女子大学・自然科学系・准教授
研究者番号：40273833

森松 治 (MORIMATSU, Osamu)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授
研究者番号：60210184

(3) 連携研究者

中野 貴志 (NAKANO, Takashi)

大阪大学・核物理研究センター・教授
研究者番号：80212091

延與 秀人 (EN'YO, Hideto)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・主任研究員
研究者番号：30213606