

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 16 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540321

研究課題名(和文) 格子QCDを用いたHダイバリオンの存在を探る研究

研究課題名(英文) Study of search for existence of H-dibaryon with lattice QCD

研究代表者

井上 貴史 (Inoue, Takashi)

日本大学・生物資源科学部・准教授

研究者番号：80407353

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：格子QCDの数値シミュレーションを行う事によって、フレーバーSU(3)対称な世界に、安定なHダイバリオンが存在する事を明かにした。これは、バリオン(重粒子)とメソン(中間子)以外にもハドロンが存在することを世界で初めて実証した歴史的な快挙であり、R. Jaffe 博士による有効理論での予想を、37年後に基礎理論に基づいて証明した事になる。期間の後半には、対称世界での格子QCDの結果に現象論の情報を合わせて、現実世界のHダイバリオンを予想した。その結果、少なくとも共鳴状態になる可能性が高い事を明かにした。

研究成果の概要(英文)：By carrying out lattice QCD numerical simulations, we found that one stable H-dibaryon exists in the flavor SU(3) symmetric QCD worlds. This is a historical success which proved for the first time that hadron other than baryon and meson can exist in the QCD world. And this finding confirmed the prediction by Dr. R. Jaffe with an effective theory, by basing on the QCD after 37 years. In the latter half of the period, we estimated the H-dibaryon in the real world by combining lattice QCD result at a symmetric point and phenomenological inputs. We found that it is likely that the H-dibaryon becomes at least a resonance state in the real world.

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：Hダイバリオン エキゾチック・ハドロン ハイペロン相互作用 クォーク 量子色力学 格子場の理論

## 1. 研究開始当初の背景

現在までに発見されているハドロン、すなわち強い相互作用をする粒子は、バリオン (重粒子) とメソン (中間子) に分類される。陽子や中性子はバリオンであり、その他に 粒子などのハイペロンが発見されている。湯川秀樹博士によって核力を説明する為に導入された 中間子は代表的なメソンである。ハドロンはさらに基本的な要素であるクォークから構成される事が解っている。バリオンはクォーク 3 個からなり、メソンはクォークと反クォークからなる。バリオンとメソン以外のハドロンは、クォークを支配する基礎理論である量子色力学 (QCD) から禁止されないにも関わらず、現在までのところ発見されていない。未発見であるが、バリオンとメソン以外のハドロンをエキゾチック・ハドロンと呼ぶ。

Hダイバリオンは最も良く知られたエキゾチック・ハドロンの 1 つであり、今から 37 年前の 1977 年に R. Jaffe 博士によって存在が予言された。このハドロンはクォーク 6 個からなり、バリオン数  $B = 2$  を持つ。このようなハドロンが存在するという予言は、本質的に次の 2 つの、有効模型を用いた考察に基づいている。1) フレーバー 1 重項を組む 6 個のクォークでは、全てのクォークが同じ軌道に入ってもパウリ排除が効かない。2) さらに、グルーオン交換の寄与が大きく引力になる。ここで、フレーバー 1 重項とは、クォークが持つフレーバー  $u, d, s$  の特別な組み合わせであり、フレーバー空間の回転で不変なものである。上記の 2 つの定性的な結論は、特定の模型に依らず普遍的に成り立つため、有効模型を用いた多くの理論研究で Hダイバリオンの存在が示唆された。それ故、今日では Hダイバリオンは最も名前が知られたエキゾチック・ハドロンの 1 つになっている。

Hダイバリオンは有効模型の研究からは存在が確実であるにも関わらず、今日までの加速器を用いた実験で発見されていない。その理由として、次の 2 つが考えられる。1) Hダイバリオンはストレンジネス  $S = -2$  を持つので、生成と観測が容易ではない。2) 現実世界ではフレーバー対称性は陽に破れており、模型の理想的な状況とは異なっている。このうちの 1 点目は加速器施設と測定機器の進歩で克服が期待できる。2 点目はより深刻である。なぜなら、破れによって、測定が不可能なほど Hダイバリオンが不安定な場合や、あるいは Hダイバリオンが存在しない場合もありえるからである。

一方、Hダイバリオンは有効模型の予想であって QCD から導かれたものではないから、フレーバー対称性の破れとは関係なく Hダイバリオンは存在しないのでは、と考える研究者も少なくなかった。この疑問に答えを出すには、QCD から直接に Hダイバリオンの存在を調べる必要がある。その方法のなかでも、格子 QCD の数値シミュレーションは最も有力であり、これまでもいくつかの研究が

行われている。しかしながら、これまでの研究では明確な答えは出されていない。その最大の理由は数値計算コストの高さである。第一に、6 個のクォークからなるハドロンを収めるには空間体積の大きい格子が必要であり、計算コストがかかる。第二に、クォーク 6 体系のデータはノイズが強いため、シグナルを読み取るためには同じデータを何度も測定する必要があり、計算コストがかかる。計算コストの問題に加えて、原理的な困難も存在する。空間体積は大きくしたいが、そうすると有限体積によって離散化されたエネルギー固有値の間隔は急速に小さくなり、エネルギー固有状態の分離が現実的に不可能になってしまう。

以上の様な理由から、本研究の開始当初において、Hダイバリオンは実験で発見されていないだけでなく、基礎理論の観点からも、その存在は定かではなかった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、エキゾチック・ハドロンである Hダイバリオンが QCD の世界に存在するか否かを、格子 QCD の数値シミュレーションを行って、基礎理論に基づいて明かにする事である。

バリオン数  $B = 2$  を持つエキゾチック・ハドロンはバリオン 2 体系と深い関係がある。特に、Hダイバリオンは、ストレンジネス  $S = -2$  かつアイソスピン  $I = 0$  のセクターのバリオン間相互作用と深い関係がある。本研究を申請した当時、格子 QCD の数値シミュレーションからハドロン間相互作用を引き出す新しい手法の開発が進んでいた。本研究は、その新しい手法を用いて、基礎理論 QCD から Hダイバリオンの存在に迫る事が目的である。

格子 QCD では、クォークの質量を変更する事により、様々な QCD 世界を調べる事ができる。本研究では、これを利用し、 $u, d, s$  クォークの質量が揃ったフレーバー  $SU(3)$  対称な QCD 世界から調べることにした。その理由は、第一に、Hダイバリオンの持つフレーバー 1 重項性は、厳密にはフレーバー対称な世界においてのみ定義される概念だからである。第二に、フレーバー対称性の破れが計算を複雑にする事が解っていたからである。現実の世界ではフレーバー対称性は少し破れているが、基本的にはフレーバー  $SU(3)$  対称であるので、フレーバー対称な世界の情報は現実世界の予測に大いに役立つと期待できる。

フレーバー対称な世界では、ハドロンもハドロン多体系も厳密なフレーバー多重項に分類され、例えば、8 重項バリオンの 2 体系は以下の様に 6 個の多重項に分類される。

$$8 \times 8 = \underbrace{1 + 8 + 27}_{\text{symmetric}} + \underbrace{8 + 10 + 10^*}_{\text{anti-symmetric}}$$

本研究課題のHダイバリオンが存在するのは、上式の1の部分である。この部分を慎重に調べてHダイバリオンが存在するか否かを明らかにするのが、本研究の第一の目的である。これが完了次第、フレーバー対称性が破れた世界に移行し、Hダイバリオンの存否を明らかにする。これが本研究の2番目の目的である。その為にはフレーバー対称性が破れた世界を格子QCDでシミュレーションする事が最も直接的ではあるが、計算コストが高い事が予想された。

### 3. 研究の方法

申請当時に開発が進んでいた、格子QCDの数値シミュレーションからハドロン間相互作用を決定する新しい手法は、次の2つの手順からなる。1) 格子上にハドロン2体系を生成し、その波動関数(Nambu-Bethe-Salpeter 波動関数)を測定する。2) 得られた波動関数に含まれる観測可能量を再現する様に、相互作用のポテンシャルを構成する。この方法は筆者が属するHAL QCD Collaborationによって構築され、今ではHAL QCD methodと呼ばれている。引き出されたポテンシャルを応用することで、基礎理論QCDに基づいて、様々な物理量に迫ることが可能になる。本研究では、QCDから引き出されたポテンシャルを解く事によって基底状態を求め、基底状態が束縛状態か散乱状態か確認する事によって、Hダイバリオンが存在するか否かが明らかになる。

一般に、格子QCDの数値シミュレーションにはゲージ配位のセットが必要である。目的に適するゲージ配位セットが公開されている場合にはそれを利用する事も可能であるが、本研究に適するフレーバー対称なゲージ配位セットは存在しないので、本研究の中で生成しなければならない。従って、本研究では次の4ステップを実行した。

- 1) フレーバー対称な5つの点で、ゲージ配位のセットを生成する。
- 2) 生成した配位セットを用いて、フレーバー1重項バリオン2体系の波動関数を測定する。
- 3) 測定した波動関数データを解析して、相互作用のポテンシャルを構成する。
- 4) 得られたポテンシャルを解いて基底状態を確認し、Hダイバリオンの存在を判定する。

第1ステップと第2ステップは計算量が膨大で時間を要する。筑波大学のスーパーコンピュータシステム T2K-Tsukuba を用いて実行した。

### 4. 研究成果

まず初年度に、クォーク質量が縮退したフレーバー対称な世界に安定なHダイバリオンが存在する確証を得た。図1に、本研究期間全体で得られた、Hダイバリオンのエネルギーと大きさを示す。この成果は、バリオンとメソン以外にハドロンが存在する事

を世界で初めて実証した快挙である。この成果を、国際会議 Lattice Field Theory 2011、Particles and Nuclei 2011、日本物理学会等、国内外の多くの会議において発表したところ、高い評価を得た。また、この成果を記した論文は、物理の世界で最も権威のある Physical Review Letters 誌に掲載され、さらにその巻のハイライト論文にも選ばれた。さらに、幾つかの新聞でも報道された。本成果を受けて JPARC 等の実験施設で Hダイバリオンを見つける実験が提案されるなど、ハドロン物理学界に大きな影響を与えている。

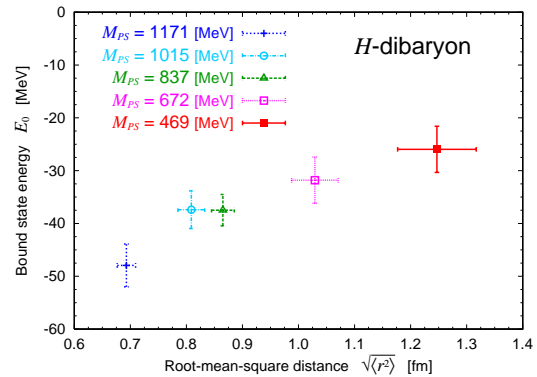


図1：Hダイバリオンのエネルギー

2年度目には、フレーバー対称性が破れた世界におけるHダイバリオンに挑戦した。格子QCDでフレーバー対称性が破れた世界をシミュレーションする事は、やはり、計算コストが高い事が判明した。そこで、1、8、27表現におけるバリオン間相互作用を使って、フレーバー対称世界の情報から現象論的に対称性が破れた世界のHダイバリオンに迫る事にした。その結果、フレーバー対称性の破れが大きくなるにつれHダイバリオンの束縛エネルギーが急速に減少する事、現実の世界ではHダイバリオンは少なくとも共鳴状態になる可能性が高い事、つまり、崩壊しない安定な粒子ではない可能性が高い事、が判った。図2に、 $\Lambda\Lambda$  閾値エネルギーと  $\Xi N$  閾値エネルギーの間にある、共鳴状態のHダイバリオンを示す。この成果は Nuclear Physics A 誌に掲載された。こちらも大いに注目されている。

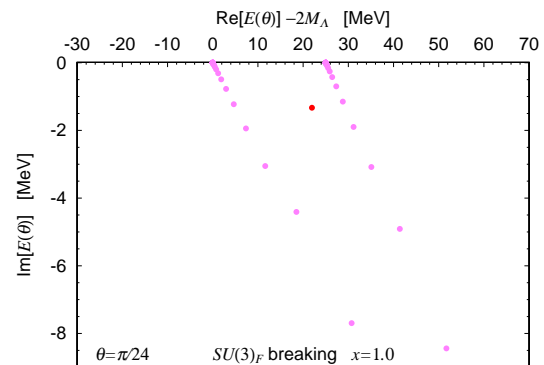


図2：共鳴状態のHダイバリオン

最終年度である3年度目には、クォーク質量が小さい世界、いわゆるカイラル極限でのHダイバリオンの挑戦した。カイラル極限に近い世界では、Hダイバリオンは安定ではあるが束縛エネルギーは小さい事が判った。この成果は近い内に論文として公表する予定である。

本研究期間には、方法に関しても画期的な進歩を達成した。初年度に大きな成果をあげる事ができたのはこの理由による。本研究課題の申請時には、フレーバー1重項のバリオン2体系では有限体積の影響が強く、体積は大きくとらなければならないと考えていた。実際、準備的な計算でその様な兆候が見られていた。それ故、申請時には幾つかの体積でシミュレーションを行う計画であった。しかし、その兆候は有限体積の影響ではなく、励起状態の影響である事が判明した。この励起状態への対策を考えるなかで、励起状態の重なりを心配する事なく、励起状態の成分をも利用して、安定的に相互作用ポテンシャルを引き出せる画期的な方法にたどり着いた。それは以下の様に行う。HAL QCDの方法では、2体系のNBS波動関数を得るために、4点関数を測定する。一般に、4点関数はエネルギーの異なる状態のNBS波動関数が重なったものになる。以前は、4点関数から1つのエネルギー固有状態を分離していた(正確には、1つのエネルギー固有状態で占められている4点関数を選んで使っていた)。新しい方法では、4点関数をそのまま利用する。すなわち、虚時間変数での4点関数の微分を利用すると、各エネルギー固有状態に対する微分方程式の辺ごとの和をとった方程式を導く事ができ、この方程式から安全に相互作用ポテンシャルを引き出す事ができると判ったのである。この発明によって、HAL QCDの方法は、より強固で安全な方法になった。今後、数十年の将来に渡って、HAL QCDの方法はハドロン物理学と原子核物理学を、さらには天体核物理学と宇宙物理学をも、大きく前進させると確信している。

#### 5. 主な発表論文等 [雑誌論文](計11件)

1. T. Inoue et al. [HAL QCD Coll.], (9 authors, 1st), “Equation of State for Nucleonic Matter and its Quark Mass Dependence from the Nuclear Force in Lattice QCD”, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 112503 (2013), DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.112503, 査読有
2. S. Aoki *et al.* [HAL QCD Coll.], (9 authors, 5th), “Lattice QCD approach to Nuclear Physics”, *Prog. Theor. Expr. Phys.* **2012**, 01A105 (2012), DOI: 10.1093/ptep/pts010, 査読有

3. T. Inoue et al. [HAL QCD Coll.], (9 authors, 1st), “Two-Baryon Potentials and H-Dibaryon from 3-flavor Lattice QCD Simulations”, *Nucl. Phys. A* **881**, 28 (2012), DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2012.02.008, 査読有
4. N. Ishii *et al.* [HAL QCD Coll.], (9 authors, 6th), “Hadron-Hadron Interactions from Imaginary-time Nambu-Bethe-Salpeter Wave Function on the Lattice”, *Phys. Lett.* **B712**, (2012) 437, DOI: 10.1016/j.physletb.2012.04.076, 査読有
5. T. Doi *et al.* [HAL QCD Coll.], (9 authors, 5th), “Exploring Three-Nucleon Forces in Lattice QCD”, *Prog. Theor. Phys.* **127**, 723 (2012), DOI: 10.1143/PTP.127.723, 査読有
6. S. Aoki *et al.* [HAL QCD Coll.], (9 authors, 6th), “Extraction of Hadron Interactions above Inelastic Threshold in Lattice QCD”, *Proc. Japan Acad. B* **87**, 509 (2011), DOI: 10.2183/pjab.87.509, 査読有
7. T. Inoue et al. [HAL QCD Coll.], (9 authors, 1st), “Bound H-dibaryon in Flavor SU(3) Limit of Lattice QCD”, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 162002 (2011), DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.162002, 査読有

#### [プロシーディングス]

8. T. Inoue for [HAL QCD Collaboration], “Equation of State of Nucleon Matters from Lattice QCD Simulations”, *PoS LATTICE 2013*, 229 (2013), <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=187>, 査読有
9. T. Inoue for [HAL QCD Collaboration], “Study of H-dibaryon mass in Lattice QCD”, *PoS LATTICE 2012*, 144 (2012), <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=164>, 査読有
10. T. Inoue for [HAL QCD Collaboration], “Bound H-dibaryon in the Flavor SU(3) Limit from a Full QCD Simulation on the Lattice”, *AIP Conf. Proc.* **1441**, 335 (2012), DOI: 10.1063/1.3700547, 査読無
11. T. Inoue for [HAL QCD Collaboration], “Bound H-dibaryon from Full QCD Simulations on the Lattice”, *PoS LATTICE 2011*, 124 (2011), <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=139>, 査読有

[学会発表](計 18 件)

[国際会議]

1. T. Inoue, “Equation of State of Nucleon Matters from Lattice QCD Simulations”, The 31st International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2013), 2013/07/29, University Mainz, Germany
2. T. Inoue, “Neutron Stars from Lattice QCD”, International Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2012), 2012/12/14, Nara Prefectural New Public Hall, Japan
3. T. Inoue, “Study of H-dibaryon mass in Lattice QCD”, The 30th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2012), 2012/06/27, Cairns Convention Centre, Australia
4. T. Inoue, “Bound H-dibaryon in the Flavor SU(3) Limit from a Full QCD Simulation on the Lattice”, The 19th Particles and Nuclei International Conference (PANIC 2011), 2011/07/28, Massachusetts Institute of Technology, USA
5. T. Inoue, “Bound H-dibaryon from Full QCD Simulations on the Lattice”, The 29th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2011), 2011/07/12, The Village at Squaw Valley, California, USA

[日本物理学会]

6. T. Inoue, “Nuclear Equation of State from lattice QCD simulations”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014/03/29, 東海大学
7. 井上貴史 他 8 名, 「格子 QCD による P 波チャネルの核力と核物質の状態方程式」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/09/20, 高知大学
8. 井上貴史 他 8 名, 「格子 QCD による核物質中のハイペロンの研究」, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013/03/26, 広島大学
9. 井上貴史 他 8 名, 「格子 QCD を用いた核物質の研究」, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012/09/13, 京都産業大学
10. 井上貴史 他 8 名, 「格子 QCD を用いた H ダイバリオン質量の研究」, 日本物理学会 第 67 回年次大会, 2012/03/25, 関西学院大学
11. 井上貴史 他 8 名, 「格子 QCD を用いたフレーバー対称世界における H ダイバリオンの研究」, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011/09/17, 弘前大学

[ワークショップ・研究会]

12. 井上貴史 「格子 QCD を用いた核物質研究の現状と展望」, 九大分野横断型研究会 -クォーク・原子核・中性子星を俯瞰する-, 2014/03/05, 九州大学
13. T. Inoue “Nuclear matter and hyperon in matter from QCD” iTHES & HPCI 滞在型研究会: Nuclear equation of state with strangeness, 2013/11/11, 理化学研究所
14. T. Inoue, “Nuclear matter and Hyperon in medium from Lattice QCD”, International workshop on “Nuclear equation of state and hyper nuclear physics”, 2013/01/18, 京都大学基礎物理学研究所
15. T. Inoue, “Lattice calculation for H-particle”, International Workshop on Strangeness Nuclear Physics, 2012/08/28, 大阪電気通信大学
16. T. Inoue, “Nucleon matter and hyperon in medium from Lattice QCD” 新学術領域「素核宇宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会, 2012/07/12, 名古屋大学
17. T. Inoue, “H-dibaryon from Full QCD Lattice Simulations”, RIKEN, BNL Research Center Workshop on Hyperon-Hyperon Interactions and Search for Exotic Di-Hyperons in Nuclear Collisions, 2012/02/29, RIKEN BNL, New York, USA
18. 井上貴史, 「ハイペロン相互作用と H ダイバリオン」, 新学術領域「素核宇宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会, 2011/06/23, 理化学研究所 計算科学研究機構 神戸

[その他](計 4 件)

[プレスリリース]

1. <http://www.ccs.tsukuba.ac.jp/pr/media/release110421>
  2. <http://www.ccs.tsukuba.ac.jp/pr/media/press130914>
- [新聞報道]
3. [http://www.nikkei.com/article/DGXNASDG20031\\_Q1A420C1CR8000/?dg=1](http://www.nikkei.com/article/DGXNASDG20031_Q1A420C1CR8000/?dg=1)
  4. <http://news.mynavi.jp/news/2013/09/18/206/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 貴史 (Inoue Takashi)  
日本大学・生物資源科学部・准教授  
研究者番号: 80407353