

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17649

研究課題名(和文)波動関数と複合性から迫るハドロン共鳴状態の分子的構造の研究

研究課題名(英文) Studying molecular structure of hadron resonances from wave function and compositeness

研究代表者

関原 隆泰 (Sekihara, Takayasu)

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 先端基礎研究センター・研究職

研究者番号：20635693

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)：ハドロンのエキゾチックな構造のうち、ハドロン分子状態を識別するための量である複合性を研究した。複合性の理論的整備を行い、リップマン-シュウィンガー方程式の解である散乱振幅から束縛状態の波動関数を引き出す利点を明らかにした。また、 $(1232)$ 、 $N(1535)$ 、 $N(1650)$ 、 $a_0(980)$ 、 $f_0(980)$ 、 $(1690)$  など現実のハドロン分子状態候補に対して、実験量から複合性を評価した。

研究成果の概要(英文)：The compositeness was studied to distinguish the molecular structure of hadrons among other exotic structure. The theoretical framework of the compositeness was reinforced, and it was found that to extract the wave function from the scattering amplitude, which is the solution of the Lippmann-Schwinger equation, has an advantage. In addition, the compositeness was evaluated from experimental data for the hadronic molecule candidates such as  $(1232)$ ,  $N(1535)$ ,  $N(1650)$ ,  $a_0(980)$ ,  $f_0(980)$ , and  $(1690)$ .

研究分野：ハドロン原子核物理学

キーワード：ハドロン分子状態 複合性 波動関数 共鳴状態 エキゾチックハドロン 強い相互作用 量子色力学  
カイラル対称性

## 1. 研究開始当初の背景

我々の世界には、ハドロンと呼ばれる互いに強い相互作用をする粒子が存在する。ハドロンは、その動力学が QCD (量子色力学) に支配されるクォークで構成される。

通常のハドロンは、クォーク-反クォーク束縛状態の中間子と 3 クォーク束縛状態のバリオンに分類される。しかしながら、QCD 自身はもっとエキゾチックな構造 --- 4 個以上のクォークを含むマルチクォーク状態や 2 個ハドロンで構成されるハドロン分子状態 --- のハドロンの存在を否定してはいない。

このようなエキゾチックハドロンの存在を示すはっきりした実験的証拠は未だ得られていないが、これまでにいくつかのエキゾチックハドロン候補が発見・報告されており、これらエキゾチックハドロン候補の内部構造を調べる事は重要な課題であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、2012 年頃から活発に議論され始めた、ハドロン分子状態を識別するための物理量「複合性 (compositeness)」をより深く探究した。

複合性は、全波動関数の規格化条件  $\langle \Psi | \Psi \rangle = 1$  に寄与する 2 体状態波動関数のノルムで定義される。私は、研究開始当時には不十分だった複合性の理論的整備を行った。又、複合性は実験量から適切な模型を介して決定できるので、様々な実験量から、興味ある現実のハドロン分子候補の複合性を評価した。

## 3. 研究の方法

具体的な研究は、以下の観点に注目して推進した。

- 1) 複合性の理論的整備: 特に、一般の相互作用の場合に、複合性がどう計算できるかを系統的に調べた。
- 2) 実験量による複合性の決定: ハドロン分子状態の候補である  $a_0(980)$ 、 $f_0(980)$  などに対して、その崩壊分岐比など、実験量と複合性とを結び付け、適切な模型の元、実験量から複合性を決定した。

## 4. 研究成果

まず複合性の理論的整備であるが、一般の相互作用の場合に、2 体状態波動関数とそのノルムである複合性を評価する方法を確立した。その方法とは、リップマン-シュウィンガー方程式の解である散乱振幅の共鳴極の留数から、2 体状態波動関数を引き出す、というものである。

この手法の興味深い点として、散乱振幅の留数から波動関数を引き出すと、その波動関数の規格化が自動的になされる事を示した。特に、相互作用がエネルギー依存性を持つと、複合性が 1 からずれる事を発見した。この 1

からのずれは、模型空間に入っていないミッシングチャンネルからの寄与と解釈できる。又、1 からずれの大きさは、エネルギー依存のポテンシャル問題で導かれる解と一致する事を見た。

一般に、シュレーディンガー方程式を解いて波動関数を求める時、相互作用がエネルギーに依存するかどうかに関わらず、波動関数を手で 1 に規格化する。一方で、今回のアプローチで散乱振幅から波動関数を抜き出すと、規格化が自然と行われる。この点において「一般の束縛状態の波動関数を、従来のシュレーディンガー方程式ではなくリップマン-シュウィンガー方程式を解いて求める方が都合が良い」という量子力学の基礎的性質につながった。

又、実験量による複合性の決定を、いくつかの興味あるハドロン分子状態候補に対して行った。

まず、 $\Delta(1232)$ 、 $N(1535)$ 、 $N(1650)$  共鳴に関して、 $\pi N$  散乱振幅の実験値を再現する相互作用を用意し、これら共鳴の複合性を求めた。結果として、 $N(1535)$  と  $N(1650)$  は中間子-バリオンの成分は小さいが、一方で  $\Delta(1232)$  には  $\pi N$  分子的成分が 1 と比べて無視できない程に大きい事を示した。

スカラー中間子  $a_0(980)$  と  $f_0(980)$  は K Kbar 分子状態の可能性が指摘されている。これらに対し、最近観測された  $a_0(980)$ - $f_0(980)$  混合現象を用いて K Kbar 分子的成分の大きさの制限を行った。 $a_0(980)$ - $f_0(980)$  混合の強さとこれら共鳴の K Kbar 複合性の大きさを関係付け、混合の強さの実験値では「どちらも K Kbar 分子状態である」という可能性が排除される事を示した。

バリオン共鳴状態  $\Xi(1690)$  が Kbar 中間子と  $\Sigma$  バリオンとの分子状態である可能性を、実験データと照らし合わせて示した。Kbar 中間子と  $\Sigma$  バリオンとの相互作用に対しては、南部理論に基づくいわゆるカイラル動力学が有効である。カイラル動力学では Kbar  $\Sigma$  相互作用が束縛状態を作る程に引力である事を示した。そして、Kbar  $\Sigma$  散乱に関する実験データと照合した所、その束縛状態がまさに  $\Xi(1690)$  であり、その Kbar  $\Sigma$  複合性が 1 に充分近い事を明らかにした。特に、 $\Xi(1690)$  は Kbar  $\Sigma$  閾値の近傍に存在するので、Kbar  $\Sigma$  複合性が 1 に充分近い事は模型に非依存な主張となりうる。

これらのテーマに加えて、ハドロン分子状態に関連する仕事をいくつか行った。まず、重いクォークを含む中間子のセミレプトニック崩壊を用いて、崩壊先のスカラー中間子の分子的構造との関連に言及した。いくつかの模型計算で存在が予言されている  $\eta' N$  分子状態を発見・観測するために、重陽子標的による光生成反応を用いる事を提案した。そして、J-PARC E15 実験で発見された Kbar

中間子と 2 個の核子との束縛状態 --- 3 個のハドロンが束縛した、広義のハドロン分子状態 --- かも知れないシグナルに対して、J-PARC E15 実験に対応する反応計算を世界に先駆けて行った。結果として、 $\bar{K}$  NN 束縛状態が生成されたと仮定すると実験のスペクトルをよく再現する事が分かった。つまり、理論計算は、実験で得られたシグナルが実際に  $\bar{K}$  NN 束縛状態のものである事を支持した。これは、ハドロン分子状態の概念を、2 体系から 3 体系へと拡張する、という重要なステップとなった。

これらの研究成果に関して、国際学術雑誌に掲載しただけでなく、国際会議「HYP2015 (仙台)」「INPC 2016 (オーストラリア・アデレード)」「Hadron 2017 (スペイン・サラマンカ)」などで成果報告を行い、国際的にも広く公表した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① "Two-body wave functions and compositeness from scattering amplitudes: General properties with schematic models", T. Sekihara, Phys. Rev. C 95 (2017) 025206, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.95.025206.
- ② "Exotic Hadrons from Heavy Ion Collisions", S. Cho, T. Hyodo, 他 12 名 (T. Sekihara 11 番目) Prog. Part. Nucl. Phys. 95 (2017) 279, 査読有, DOI: 10.1016/j.pnpnp.2017.02.002.
- ③ "On the structure observed in the in-flight  $3\text{He} (K^-, \Lambda p) n$  reaction at J-PARC", T. Sekihara, E. Oset and A. Ramos, Prog. Theor. Exp. Phys. 2016 (2016) 123D03, 査読有, DOI: 10.1093/ptep/ptw166.
- ④ "Theoretical study of photoproduction of an  $\eta' N$  bound state on a deuteron target with forward proton emission", T. Sekihara, S. Sakai and D. Jido, Phys. Rev. C 94 (2016) 025203, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.94.025203.
- ⑤ "Compositeness of baryonic resonances: Application to the  $\Delta(1232)$ ,  $N(1535)$ , and  $N(1650)$  resonances", T. Sekihara, T. Arai, J. Yamagata-Sekihara and S. Yasui, Phys. Rev. C 93 (2016) 035204, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.93.035204.
- ⑥ "Constituent-counting rule in photo-

production of hyperon resonances", W.-C. Chang, S. Kumano and T. Sekihara, Phys. Rev. D 93 (2016) 034006, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.93.034006.

⑦ "Weak decays of heavy hadrons into dynamically generated resonances", E. Oset, W.-H. Liang, 他 25 名 (T. Sekihara 8 番目) Int. J. of Mod. Phys. E 25 (2016) 1630001, 査読有, DOI: 10.1142/S0218301316300010.

⑧ "Investigating the nature of light scalar mesons with semileptonic decays of D mesons", T. Sekihara and E. Oset, Phys. Rev. D 92 (2015) 054038, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.92.054038.

⑨ " $\Xi(1690)$  as a  $\bar{K} \Sigma$  molecular state", T. Sekihara, Prog. Theor. Exp. Phys. Letters 2015 (2015) 091D01, 査読有, DOI: 10.1093/ptep/ptv129.

⑩ "Constraint on K  $\bar{K}$  compositeness of the  $a_0(980)$  and  $f_0(980)$  resonances from their mixing intensity", T. Sekihara and S. Kumano, Phys. Rev. D 92 (2015) 034010, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.92.034010.

⑪ "Testing the molecular nature of  $D_s0^*(2317)$  and  $D_0^*(2400)$  in semileptonic Bs and B decays", F. S. Navarra, M. Nielsen, E. Oset and T. Sekihara, Phys. Rev. D 92 (2015) 014031, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.92.014031.

⑫ "Comprehensive analysis of the wave function of a hadronic resonance and its compositeness", T. Sekihara, T. Hyodo and D. Jido, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015 (2015) 063D04, 査読有, DOI: 10.1093/ptep/ptv081.

[学会発表] (計 24 件)

① T. Sekihara, E. Oset and A. Ramos, "On the structure observed in the in-flight  $3\text{He} (K^-, \Lambda p) n$  reaction at J-PARC" [invited], Hadron 2017 - XVII International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure (Salamanca, Spain, 2017.9.25-29).

② 関原 隆泰, 神谷 有輝, 兵藤 哲雄, "中間子交換模型で  $N\Omega$  ダイバリオン系は束縛するか?", 日本物理学会 2017 年秋季大会 (宇都宮大, 2017 年 9 月 12-15 日).

- ③ T. Sekihara, "Compositeness for the  $N^*$  and  $\Delta^*$  resonances from the  $\pi N$  scattering amplitude", 11th APCTP-BLTP JINR- PNPI NRC KI-SPbU Joint Workshop "Modern problems in nuclear and elementary particle physics" (Petersburg, Russia, 2017.7.24-28).
- ④ T. Sekihara, "Compositeness of dynamically generated resonances", ECT\* workshop "The Charm and Beauty of the Strong Interactions" (Trento, Italy, 2017.7.17-28).
- ⑤ T. Sekihara, E. Oset and A. Ramos, "On the structure observed in the in-flight  $^3\text{He} (K^-, \Lambda p) n$  reaction at J-PARC" [invited], 2nd Jagiellonian Symposium on Fundamental and Applied Subatomic Physics (Krakow, Poland, 2017.6.4-9).
- ⑥ T. Sekihara, E. Oset and A. Ramos, "On the structure observed in the in-flight  $^3\text{He} (K^-, \Lambda p) n$  reaction at J-PARC" [invited], Strangeness and charm in hadrons and dense matter (Kyoto, Japan, 2017.5.15-26).
- ⑦ T. Sekihara, "Compositeness for the  $N^*$  and  $\Delta^*$  resonances from the  $\pi N$  scattering amplitude", Strangeness and charm in hadrons and dense matter (Kyoto, Japan, 2017.5.15-26).
- ⑧ T. Sekihara, E. Oset and A. Ramos, "On the structure observed in the in-flight  $^3\text{He} (K^-, \Lambda p) n$  reaction at J-PARC" [invited], International Workshop on Strangeness Nuclear Physics 2017 (Osaka, Japan, 2017.3.12-14).
- ⑨ T. Sekihara, " $\Xi(1690)$  as a  $K\bar{p}$   $\Sigma$  molecular state" [invited], Hadron productions: Theory and Experiment (Pohang, Korea, 2016.11.25-26).
- ⑩ T. Sekihara, "Two-body wave functions and compositeness from scattering amplitudes" [invited], 2016 JAEA/ASRC Reimei Workshop: New exotic hadron matter at J-PARC (Incheon, Korea, 2016.10.24-26).
- ⑪ 関原 隆泰, 荒井 啓志, 山縣-関原 淳子, 安井 繁宏, "Compositeness of the  $\Lambda(1232)$  resonance in  $\pi N$  scattering", 日本物理学会 2016 年秋季大会 (宮崎大, 2016 年 9 月 21-24 日).
- ⑫ 関原 隆泰, E. Oset and A. Ramos, "On the structure observed in the in-flight  $^3\text{He} (K^-, \Lambda p) n$  reaction at J-PARC", 日本物理学会 2016 年秋季大会 (宮崎大, 2016 年 9 月 21-24 日).
- ⑬ 関原 隆泰, 酒井 俊太郎, 慈道 大介, "Theoretical study of photoproduction of  $\eta' N$  bound state on deuteron target", 日本物理学会 2016 年秋季大会 (宮崎大, 2016 年 9 月 21-24 日).
- ⑭ T. Sekihara, T. Hyodo, D. Jido, J. Yamagata-Sekihara and S. Yasui, "Two-body wave functions, compositeness, and the internal structure of dynamically generated resonances", INPC2016 - 26th International Nuclear Physics Conference (Adelaide, Australia, 2016.9.11-16).
- ⑮ T. Sekihara, E. Oset and A. Ramos, "On the structure observed in the in-flight  $^3\text{He} (K^-, \Lambda p) n$  reaction at J-PARC", The 10th APCTP-BLTP/JINR-RCNP-RIKEN Joint Workshop on Nuclear and Hadronic Physics (RIKEN, Japan, 2016.8.17-21).
- ⑯ T. Sekihara, "Two-body wave functions and compositeness from the scattering amplitude", Resonance and non-Hermitian quantum mechanics 2016 (Osaka, Japan, 2016.8.3-5).
- ⑰ T. Sekihara, S. Sakai and D. Jido, "Theoretical study of photoproduction of an  $\eta' N$  bound state on a deuteron target with forward proton emission", MIN16 - Meson in Nucleus 2016 (Kyoto, Japan, 2016.7.31-8.2).
- ⑱ T. Sekihara, E. Oset and A. Ramos, "On the structure observed in the in-flight  $^3\text{He} (K^-, \Lambda p) n$  reaction at J-PARC", MENU2016 - The 14th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (Kyoto, Japan, 2016.7.25-30).
- ⑲ 関原 隆泰, "The fate of the dynamically generated  $N(1535)$ ,  $N(1650)$ ,  $\Lambda(1405)$ , and  $\Xi(1690)$  resonances in chiral dynamics", 日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大, 2016 年 3 月 19-22 日).
- ⑳ T. Sekihara, "Wave functions and compositeness for hadron resonances from the scattering amplitude" [invited], The 31st Reimei Workshop on Hadron Physics in Extreme Conditions at J-PARC

(JAEA, Japan, 2016.1.18-20).

⑳ T. Sekihara, " $\Xi(1690)$  as a  $K\bar{b}$   $\Sigma$  molecular state", HYP2015 - The 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (Tohoku, Japan, 2015.9.7-12).

㉑ T. Sekihara, " $\Xi(1690)$  as a  $K\bar{b}$   $\Sigma$  molecular state", Hadron Nuclear Physics 2015 (Krabi, Thailand, 2015.7.7-11).

㉒ T. Sekihara, " $\Xi(1690)$  as a  $K\bar{b}$   $\Sigma$  molecular state", 1st Hadron Spanish Network Days and Spanish-Japanese JSPS Workshop (Valencia, Spain, 2015.6.15-17).

㉓ T. Sekihara, T. Arai, J. Yamagata-Sekihara and S. Yasui, "Compositeness of the  $\Delta(1232)$  resonance in  $\pi N$  scatterings", NSTAR2015 - The 10th International Workshop on the Physics of Excited Nucleons (Osaka, Japan, 2015.5.25-28).

[その他]

ホームページ等

<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~sekihara/>

/

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

関原 隆泰 (Sekihara Takayasu)

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 先端基礎研究センター・研究職

研究者番号：20635693