

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05440

研究課題名(和文)有限レンジ3体力を用いた原子核や中性子核物質の研究

研究課題名(英文)The study on nuclear structure and matter using finite-range three-body interaction

研究代表者

板垣 直之 (Itagaki, Naoyuki)

京都大学・基礎物理学研究所・准教授

研究者番号：70322659

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：原子核の構造を量子多体問題として解き上げる際に、原子核の持つクラスター的側面とシェルの側面を統合し、両者の競合を評価可能な、AQCMと呼ばれる新たな核構造モデルの構築した。最近、安定な原子核より中性子数の多い中性子過剰核の構造が大きな注目を集めている。このような未知の構造を記述するためには、軽い核から重い原子核や核物質まで、さまざまな対象の性質を再現する核力が必要である。このため、有限レンジの3体力を含む核力を用いた核構造計算の手法を開発した。また、クラスター模型、平均場模型、シェル模型の結果を比較し、それらの長所を組み合わせることで、模型依存性を可能な限り省いた計算を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中性子過剰な原子核は、天然に存在する安定な原子核とは異なる。しかしながら、我々の身近に存在する元素が、どこでどのように作られたのかを明らかにする上で、こちらが決定的な役割を果たしてきたと考えられている。例えば、金やウランが宇宙のどこでどのように作られたかは大きな問題として知られている。このような問題の解決のためには、未知の原子核を精度よく記述するモデルの構築が必要である。本研究では、原子核のさまざまな模型を統合することを目指し、新たな原子核構造モデルを構築した。さらに、幅広い原子核領域に適用可能な、有限レンジ3体力と呼ばれる項を含む、非常に汎用性の高い核力を計算に用いた。

研究成果の概要(英文)：The idea of combining the shell and cluster models has been one of the most important subjects of the nuclear physics for decades. Here, the big obstacle comes from the fact that the contribution of the spin-orbit interaction, quite important in the shell model, vanishes when we introduce simple alpha cluster wave functions.

We have developed antisymmetrized quasi cluster model (AQCM), where the wave functions of the cluster models are continuously transformed to the jj-coupling shell model ones, which allows us to describe both shell and cluster aspects of the nuclear systems.

Recently, the structure of neutron-rich nuclei, which do not exist in nature but played essential roles in forming elements in the Universe, has been attracting attention. To describe the structure of such exotic nuclei, we have utilized finite-range three-body interaction for the central part of the nucleon-nucleon interaction, which allows satisfying the saturation property of the nuclear systems.

研究分野：原子核理論

キーワード：原子核構造 核力 非中心力 中性子過剰核

1. 研究開始当初の背景

原子核の研究分野では、天然には安定に存在しない、中性子過剰核などの不安定原子核の研究が大きな注目を集めている。それらの未知の構造を議論するためにも、原子核の統一的な構造モデルの構築は非常に重要である。

原子核系に対して、なぜシェル模型やクラスター模型のような異なった模型が提案されてきたのか、その大きな理由が、原子核系で非常に強く作用する非中心力の貢献が、異なった描像を可能にすることである。具体的には、スピン・軌道力はシェル模型の対称性を促進し、テンソル力はクラスターの束縛を強め、この描像を堅固にする。原子核構造の統一的な描像を確立する上で、これら非中心力の効果を適切に取り入れることが最も中心であり、それこそが本研究の中心課題である。

さらに、軽い原子核から重い原子核、さらに核物質などさまざまな領域の原子核を精度よく記述するためには、汎用性の高い核力が必要となる。通常の2核子間の核力に加え、有限レンジな3体力の導入が有望であると考えられてきた。

2. 研究の目的

本計画の中心的な課題は、原子核の構造を記述する2つの基本的な模型、すなわちシェル模型とクラスター模型を統一する模型の構築である。原子核は、陽子・中性子といった核子からなる有限量子多体系であり、その構造を記述するために様々な模型が提案されてきた。これは、原子核が、核子数、あるいは励起エネルギーの関数として、様々な異なった様相を見せるためである。原子核構造の最も一般的な模型は、原子核を構成するこれらの核子が自分たちである一体のポテンシャル場を形成し、その中を独立に運動するというjj-couplingシェル模型の描像である。例えば、特に原子核を安定化する核子数である魔法数のうち、数の大きい28, 50, 82, 126はjj-couplingシェル模型の閉殻の核子数に対応している。このことは、jj-couplingの対称性を作り出す、核力の一成分であるスピン・軌道力の効果が、原子核を構成する核子数(質量数)の増加と共に重要になることを示している。

一方で、 α 粒子や ^{16}O などを原子核中の部分系として取り扱うクラスター模型も、主に軽い原子核に有効である。特に、星の中での軽い核の元素合成においては、クラスター構造が決定的に重要である。しかし、jj-couplingシェル模型の対称性を作り出すスピン・軌道力は、これまで提案されてきた、 α などのクラスターを崩す方向に作用する。そのため、「どの原子核のどの状態においてどの模型が優勢となるのか、あるいは模型や描像同士が競合するのか、統一的な見解を確立する」ということが、理論家に宿命づけられた長年の課題となっている。

これら2つの描像を包含し、原子核構造の統一した模型を提案し、確立することが、本研究の目的である。

3. 研究の方法

原子核の標準的な見方であるシェル模型から出発して、クラスターの構造をも記述可能にしようという取り組みは、現在世界各地でさかんに行われている。これは非常に高度で大規模な数値計算であり、代表者のここでの研究の方向性は、どちらかと言えばこれとは逆である。代表者はまずクラスター模型を用意し、それをシェル模型方面へと拡張するという逆の方向性を辿ることとした。これは非常に簡便な手法であり、したがって応用性に優れている。スタートラインをクラスター模型とした際、それを拡張して新たに取り入れるべき最も重要なシェル模型の要素は、原子核系で非常に強い、スピン・軌道力と呼ばれる非中心力の効果である。代表者は、Antisymmetrized Quasi-Cluster Model (AQCM)を提案し、クラスター構造を仮定した波動関数にクラスターの崩れのパラメータを持ち込み、これを連続的に変化させ、波動関数をシェル模型へと変換することに成功した。

さらに、もうひとつの中心力である、テンソル力の効果を取り入れるために、新しい手法の構築が求められている。そもそも α 粒子をクラスターとして取り扱うことが可能である事実の背景には、テンソル力の効果が非常に重要であることが知られている。しかしながら、そうした粒子を複数用意するクラスター模型では、 α をクラスターとして固めて扱うことを仮定し、煩雑なテンソル力の効果を他の部分に繰り込む処理がなされている。このため、テンソル力の効果を正しく扱ったクラスター模型の構築が必要である。

4. 研究成果

(1) クラスター模型とシェル模型の統合に関する研究 (AQCMの構築)

AQCM の開発により、クラスター構造とシェル構造の統一的な記述が可能となり、そこではスピン軌道力の効果も取り込むことが可能となった。例えば、シェル模型に特徴的な魔法数 2, 8, 20, 28, 50 を、本来逆のクラスター模型から出発して記述した。また、現実の原子核ではシェル構造とクラスター構造の混合がしばしば重要となる。このような異なる描像や模型の競合に対しても、両者と同じ枠組みで記述し、その結合を評価することが簡単に可能となった。これにより、微視的クラスター模型の長年の課題であった、 ^{12}C と ^{16}O のコンシステントな記述を、クラスター模型をシェル模型と統合し、両者の特徴を同時に取り入れることで解決した。

さらに、この AQCM と、空間的に広がったクラスター状態の記述に適した、THSR 波動関数との結合を行った。典型的なクラスター状態である ^{12}C の second 0^+ 状態は Hoyle state と呼ばれ、星の中で炭素が 3 つの粒子から合成される過程で決定的に重要な役割を果たすことが知られている。この状態は、3 つの α が、緩く相互作用しながら広い空間に分布するクラスター状態であり、しばしばガスのクラスター状態と形容される。このガスのクラスター状態を記述するために、2000 年に THSR 波動関数が提案されたが、代表者はこれと AQCM を結合し、スピン・軌道力によるクラスターの崩れをも取り入れることに成功した (N. Itagaki, H. Matsuno, A. Tohsaki, Phys. Rev. C **98** 044306 (2018))。また、THSR 波動関数に表れる多重積分をモンテカルロ積分に置き換えることで、その汎用性を大幅に高め、従来よりも重い原子核領域におけるクラスター構造を研究可能とした。

(2) jj-coupling シェル模型波動関数複数からなる新しいクラスター状態の研究 (AQCM の利用)

前項で述べた AQCM の応用方法のひとつとして、シェル模型の波動関数を単位とした、新しいクラスター構造の研究を行った。これまで、原子核におけるクラスター構造を研究する際に、そのクラスターの単位としては、 ^4He (α 粒子) や ^{16}O (酸素) など、3 次元調和振動子の閉殻に対応した原子核が考えられてきた。しかし、より重い原子核では、jj-coupling シェル模型の対称性が重要になる。そのため、これまでの軽い原子核を越え、より重い領域において一般的にクラスター構造が現れる可能性を示すためには、jj-coupling シェル模型の対称性を持つ、これまでと異なった新しい部分系がクラスターとなりうるかどうかを検討すべきである。このような研究は当然必要であるにもかかわらず、これまでほとんど行われてこなかった。

最初の例として、例えば ^{14}C を部分系 (クラスター) として 2 つ用意した ^{28}Mg の研究が挙げられる。陽子数 6 (jj-coupling シェル模型の $p_{3/2}$ 閉殻) 中性子 8 (jj-coupling シェル模型の $p_{1/2}$ 閉殻) を持つ ^{14}C は、中性子過剰核ではあるものの、年代測定に用いられるほど寿命の長い原子核である。この原子核は、励起エネルギーにして 6 MeV 以下には励起状態を持たず、ちょうど、最も典型的な安定核である ^{16}O と同じ状況が実現している。これらの事実は、 ^{14}C が非常に結合の強い原子核であり、それ自体を単位として考えるにふさわしい、部分系足りえることの有力な状況証拠となっている。前項の AQCM を用い、この ^{14}C 原子核を 2 つ用意し、 ^{28}Mg 原子核の励起状態に、 $^{14}\text{C}+^{14}\text{C}$ 構造を持つクラスター状態が出現することを示した (N. Itagaki, A. V. Afanasjev, and D. Ray, Phys. Rev. C **101** 034304 (2020))。ここで特筆すべきことは、同じ論文において、AQCM の結果と並んで、密度汎関数によっても対応した状態が得られることを示したことである。このような特徴的なクラスター構造の出現を、クラスター構造を全く仮定しない模型によっても示すことができた。これは、異なった描像に基づく手法の協働の成果と行うことができる。

また、jj-coupling シェル模型の閉殻をクラスターとした例として、中性子の $p_{3/2}$ 閉殻に対応した中性子過剰核である、 ^8He や ^9Li クラスターの計算が挙げられる。これらが 2 つ、あるいは 3 つ部分系として存在した場合、どのような構造が現れるのか、系統的に分析した (Naoyuki Itagaki, Tokuro Fukui, Junki Tanaka, Yuma Kikuchi, Phys. Rev. C **102** 024332 (2020))。

(3) テンソル力を直接取り扱うクラスター模型の構築

原子核系では、もうひとつの非中心力であるテンソル力の効果も非常に重要である。テンソル力の原子核構造模型への直接的な取り込みには非常に困難な面が存在する。もし、波動関数として通常の Slater 行列式を導入し、これを用いてテンソル力の期待値を評価し、核構造計算に取り入れるだけであれば、その効果は限定的であり、これはそれほど困難な理論計算ではない。しかし、テンソル力には、相互作用する 2 核子をエネルギー的に非常に高い軌道へと励起する性質があり、ひとたびその受け皿として 2 粒子の非常に励起した状態を模型に取り入れた際に、テンソル力は非常に大きな作用を示すのである。そのため、通常の原子核構造を越え、エネルギー的に高い軌道まで含めた模型の導入が不可欠となる。この困難のため、これまで、テンソル力の効果を中心力やスピン・軌道力の中に取り込んだ原子核構造計算が一般的に行われてきた。そうは言っても、最近テンソル力の直接的な取り扱いが世界各地で試みられている。

これまで述べてきた原子核におけるクラスター構造の出現には、実はテンソル力が本質的な役割を果たしている。例えば、 ^4He (α 粒子) が非常に結合の強い原子核であり、これが原子核の中で部分系たりえているのも、テンソル力の効果抜きには全く考えることができない。しかしその一方で、この効果を正しく評価するためには、従来のクラスター模型を越え、2 核子が非常に励起した成分を含んだ、拡張されたクラスター模型の構築が必要になる。また、クラスター同士の相互作用が穏やかなものであり、2 つのクラスターの相対距離がある一定の大きさを

保つというのも、テンソル力の性質によるものであるという指摘が、これまでもなされてきた。これらの効果を、核子-核子の散乱位相差を再現するように決められた、本来の核力(現実的核力)に基づいて示すことは、非常に重要である。

代表者は、AQCMのテンソル版であるAQCM-Tを提案し、 ^4He (ヘリウム、 α 粒子)や ^8Be (ベリリウム)、 ^{16}O (酸素)と言った原子核において、クラスター模型から出発しつつも、非常に簡単な方法によってテンソル力の大きな効果を取り込めることを示した。特に、良く知られているように ^8Be は α - α クラスター構造を持つが、これは、 α と α がある一定距離以下まで接近した際に、それぞれの α の内部で本来作用するはずである、テンソル力の引力の効果を失ってしまうことで説明されることを、現実的な核力を用いて示した(N. Itagaki, H. Matsuno, and Y. Kanada-En'yo, Prog. Theor. Exp. Phys. **2019** 063D02 (2019))。

また、非中心力のみならず、原子核の有効3体力を用いた研究を行なった。今回の有効3核子間のおかげで、原子核の結合エネルギーの飽和性が再現され、従来よりもずっと重い原子核まで原子核構造を研究することが可能となった。この相互作用は、このように重い原子核系に用いることが可能なだけでなく、 ^4He (α 粒子)の結合エネルギーや半径、 ^4He - ^4He の散乱位相差なども再現するように作られており、さまざまな原子核の性質を幅広く再現するためには、このような有効3核子間力の導入が効果的であることを物語っている。代表者の現在のほとんどの計算(AQCMを用いた計算など)は、この相互作用を用いてなされている。さらに、 α 粒子60個がサッカーボール状の形状を持つ場合の安定性を完全微視的な波動関数を用いて分析した例などに見られるように、非常に大きな核子数を持った対象にも、この相互作用は適用可能である(A. Tohsaki and N. Itagaki, Phys. Rev. C **97** 011301(R) (2018))。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 5件）

| | |
|--|--------------------|
| 1. 著者名 Itagaki Naoyuki, Naito Tomoya | 4. 巻 103 |
| 2. 論文標題 Consistent description for cluster dynamics and single-particle correlation | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review C | 6. 最初と最後の頁 1-8 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.103.044303 | 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 - |
| 1. 著者名 Itagaki Naoyuki, Fukui Tokuro, Tanaka Junki, Kikuchi Yuma | 4. 巻 102 |
| 2. 論文標題 He8 and Li9 cluster structures in light nuclei | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review C | 6. 最初と最後の頁 1-8 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.102.024332 | 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 - |
| 1. 著者名 Itagaki N., Afanasjev A. V., Ray D. | 4. 巻 101 |
| 2. 論文標題 Possibility of C14 cluster as a building block of medium-mass nuclei | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review C | 6. 最初と最後の頁 1-9 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.101.034304 | 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 Descouvemont Pierre, Itagaki Naoyuki | 4. 巻 2020 |
| 2. 論文標題 A stochastic microscopic approach to the 10Be and 11Be nuclei | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics | 6. 最初と最後の頁 1-12 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptz169 | 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 Itagaki N, Matsuno H, Kanada-En'yo Y | 4. 巻 2019 |
| 2. 論文標題 Short-range and tensor correlations in 4He and 8Be studied with the antisymmetrized quasi-cluster model | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics | 6. 最初と最後の頁 1-28 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz046 | 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 - |

| | |
|--|--------------------|
| 1. 著者名 Tohsaki Akihiro, Itagaki Naoyuki | 4. 巻 2019 |
| 2. 論文標題 Stability of alpha-chain states against disintegrations | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics | 6. 最初と最後の頁 1-11 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz045 | 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 - |

| | |
|---|--------------------|
| 1. 著者名 ZhengXue Ren, ShuangQuan Zhang, PengWei Zhao, Naoyuki Itagaki, Joachim A. Maruhn & Jie Meng | 4. 巻 62 |
| 2. 論文標題 Stability of the linear chain structure for 12C in covariant density functional theory on a 3D lattice | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Science China Physics, Mechanics & Astronomy | 6. 最初と最後の頁 8-25 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11433-019-9412-3 | 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 Afnasjev A.V., Itagaki N., Ray D. | 4. 巻 794 |
| 2. 論文標題 Rotational excitations in near neutron-drip line nuclei: The birth and death of particle-bound rotational bands and the extension of nuclear landscape beyond spin zero neutron drip line | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Physics Letters B | 6. 最初と最後の頁 7~13 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.05.021 | 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 Itagaki N., Matsuno H., Tohsaki A. | 4. 巻 98 |
| 2. 論文標題 Explicit inclusion of the spin-orbit contribution in the Tohsaki-Horiuchi-Schuck-R?pke wave function | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review C | 6. 最初と最後の頁 44306 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.98.044306 | 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 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Matsuno H., Kanada-En'yo Y., Itagaki N. | 4. 巻 98 |
| 2. 論文標題 Tensor correlations in He4 and Be8 within an antisymmetrized quasicluster model | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review C | 6. 最初と最後の頁 54306 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.98.054306 | 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 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Tohsaki Akihiro, Itagaki Naoyuki | 4. 巻 98 |
| 2. 論文標題 Coulomb energy of α -particle aggregates distributed on Archimedean solids | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review C | 6. 最初と最後の頁 14302 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.98.014302 | 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 - |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Furumoto T., Suhara T., Itagaki N. | 4. 巻 97 |
| 2. 論文標題 Effect of channel coupling on the elastic scattering of lithium isotopes | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review C | 6. 最初と最後の頁 44602 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.97.044602 | 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 - |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Furumoto T., Suhara T., Itagaki N. | 4. 巻 97 |
| 2. 論文標題 Effect of channel coupling on the elastic scattering of lithium isotopes | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review C | 6. 最初と最後の頁 44602 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.97.044602 | 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 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Descouvemont P., Itagaki N. | 4. 巻 97 |
| 2. 論文標題 Be9 scattering with microscopic wave functions and the continuum-discretized coupled-channel method | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review C | 6. 最初と最後の頁 14612 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.97.014612 | 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 Itagaki N., Tohsaki A. | 4. 巻 97 |
| 2. 論文標題 Nontrivial origin for the large nuclear radii of dripline oxygen isotopes | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review C | 6. 最初と最後の頁 14307 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.97.014307 | 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 - |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Itagaki N., Tohsaki A. | 4. 巻 97 |
| 2. 論文標題 Improved version of a simplified method for including tensor effects in cluster models | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review C | 6. 最初と最後の頁 14304 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.97.014304 | 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 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Tohsaki Akihiro, Itagaki Naoyuki | 4. 巻 97 |
| 2. 論文標題 clustering with a hollow structure: Geometrical structure of clusters from platonic solids to fullerene shape | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review C | 6. 最初と最後の頁 11301 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.97.011301 | 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 - |

| | |
|---|----------------------|
| 1. 著者名 Matsuno H, Itagaki N | 4. 巻 2017 |
| 2. 論文標題 Effects of cluster?shell competition and BCS-like pairing in 12C | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics | 6. 最初と最後の頁 123D05 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptx161 | 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 - |

| | |
|---|----------------------|
| 1. 著者名 Matsuno H., Itagaki N., Ichikawa T., Yoshida Y., Kanada-En 'yo Y. | 4. 巻 2017 |
| 2. 論文標題 Effect of 12C+alpha clustering on the E0 transition in 16O | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics | 6. 最初と最後の頁 063D01 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptx065 | 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 - |

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 3件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 板垣直之, 内藤智也, 東崎昭弘 |
| 2. 発表標題 jj-couplingシェル模型波動関数を用いたクラスター構造の研究 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Naoyuki Itagaki |
| 2. 発表標題 ✦Clustering feature of light nuclei and the relation to the tensor force |
| 3. 学会等名 Few-body and cluster problems in nuclear systems (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Naoyuki Itagaki |
| 2. 発表標題 A trial for the general description of shell and cluster structures |
| 3. 学会等名 Recent advances on proton-neutron pairing and quartet correlations in nuclei, Saclay, France (招待講演) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Naoyuki Itagaki |
| 2. 発表標題 Exotic Clustering and Competition with the Shell Structure in Light Neutron-rich Nuclei |
| 3. 学会等名 to International Research Center symposium ``Perspectives of the Physics of Nuclear Structure'', Hongo, Tokyo (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Naoyuki Itagaki |
| 2. 発表標題 Shell and cluster structures in exotic nuclei |
| 3. 学会等名 Lecture at the international school ``Recent development of nuclear structure and reaction physics'', Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto (招待講演) (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 分担者 | 鈴木 昭弘 (東崎昭弘) (Suzuki Akihiro) (20021173) | 大阪大学・核物理研究センター・協同研究員 (14401) | |
| 研究 分担者 | 岩田 順敬 (Iwata Yoritaka) (70707380) | 東京工業大学・科学技術創成研究院・研究員 (12608) | |

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3件

| | |
|--|--------------------|
| 国際研究集会 Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG15) | 開催年 2019年～2019年 |
| 国際研究集会 Recent advances in nuclear structure physics 2018 | 開催年 2018年～2018年 |
| 国際研究集会 International school "Recent development of nuclear structure and reaction physics". | 開催年 2017年～2017年 |

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 | | | |
|---------|------------|--|--|--|
| 中国 | 北京大学 | | | |
| ベルギー | ブリュッセル自由大学 | | | |
| 米国 | ミシシッピ州立大学 | | | |