

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 9 月 8 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05455

研究課題名（和文）動力学模型による未知超重元素の新しい生成手法の研究

研究課題名（英文）New approach for synthesis of superheavy elements using dynamical model

研究代表者

有友 嘉浩 (Aritomo, Yoshihiro)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：90573147

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）：ニホニウムなどに代表される新しい新元素合成を目指し、従来の実験手法とは異なる、新しい手法を提案し、それによる合成確率を評価する研究を行った。未知の原子核である119番元素以上の元素合成を目指し、動力学模型を用いて超重元素領域の融合分裂過程を詳細に検討し、どのような状況下であれば融合確率が大きくなるかを分析した。原子核の内部構造による殻補正エネルギーおよびそれによる摩擦係数の影響など、反応機構を調べた。様々な系で試算し、新元素合成の可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人類の文明の発展を支えてきた元素発見の歴史は、現在も続いており、科学文明の根幹をなしている。数年前に日本由来の元素であるニホニウムが周期表に加わり、非常に大きな話題になった。新元素が発見され周期表に新しい名前が加わることは小学生にも理解することができる最先端の科学ニュースである。知的好奇心だけではなく、原子力エネルギーの話題、さらに国際間の共同研究なども新元素合成には深く密接に関係している。

研究成果の概要（英文）：To synthesis of superheavy elements, the shell structure is very important not only in the stability of nuclei, but also the fusion process, especially the cold fusion reaction. We employ the Langevin equation with the microscopic transport coefficients and calculate the fusion cross section for the reaction  $70\text{Zn} + 208\text{Pb}$  as a test. We found the enhancement of the fusion probability due to the small friction. In the dynamical process, the effect of nuclear structure is investigated precisely. We suggest new approach for synthesis of superheavy elements.

研究分野：原子核理論

キーワード：新元素合成 周期表 ニホニウム 動力学模型 揺動散逸定理 殻構造

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

2016年11月の終わりに、周期表に新たに4つの元素が加わった、その一つが日本で合成に成功したニホニウム（113番元素）である、日本初の日本に由来する元素ということで、国内外のニュースでは大きく取り上げられ、話題となった。この時、同時に118番元素であるオガネソンも名前が確定し周期表の第7周期がすべて埋まった段階であった。次の新元素である119番元素は前人未踏である第8周期の元素ということで、話題背の高いチャレンジとなっていた。ニホニウム合成に成功した日本の理化学研究所を始め、ロシア、ドイツなどの国が119番元素合成実験に乗り出していた。

ところが、従来の実験方法では原子番号の増加とともに生成確率が非常に小さくなり、すでに118番元素では、現在の実験装置で1週間に1個程度、119番元素では理論予測として1年から2年に1個程度の合成が成功するか否かといった状況である。現在行われている合成実験は、重イオン融合反応という手法であり、特に119番以降の原子核の実験手法として標的核にアクトノイド原子核を用いるという「熱い融合反応」という手法である。2017年の段階で、標的核にPu, Cm, Bkなどを用いる実験が計画あるいはすでに実行されている段階であった。

このような状況のもと、このような実験に対する理論計算による生成確率の評価が行われ、最適な入射ビームのエネルギーも合わせて議論されていた。ただし、理論モデルの精度は低く、多くの不定性やパラメータを含んでいる状況であり、またそのメカニズムも詳細には解析されていなかった。生成確率の低い現象を扱う実験に対し、高精度の理論計算が必要であり、そのため理論モデルの再構築や検証を行うことが不可欠な状況であった。

### 2. 研究の目的

新元素合成実験において、より高精度な理論計算を行い、実験を支援することが目的である。高い生成確率を得るための入射核と標的核の組み合わせ、入射エネルギーの提案、さらに蒸発残留核断面積の評価を行う。融合分裂過程における反応機構の解明、特に原子核の内部構造が融合過程に与える影響を明らかにすることで、その利点を生かした反応系を考え、より高い確率を得ることを目的とする。

### 3. 研究の方法

揺動散逸定理に基づいた動力学モデルを用いて蒸発残留核断面積を評価する、具体的には、二中心間殻モデルを用いて、原子核の形状を表すパラメータ空間におけるポテンシャルエネルギーを計算する。そのポテンシャル空間内を移動する軌道（すなわち原子核の形状の時間変化）を、ランジュバン方程式を用いて追跡し、球形領域に入った軌道から融合確率を求める。次に統計モデルコードから生き残り確率を計算し、最終的に蒸発残留核断面積を求める。

従来の研究では、ランジュバン方程式の中に現れる摩擦係数と慣性質量（両者を合わせて輸送係数と呼ぶ）を巨視的モデルによって計算していた。しかしこのモデルでは原子核の内部構造の効果は無視されている。

そこで本研究では、融合過程における原子核の内部構造の影響を詳しく調べるために、輸送係数に内部構造を考慮したモデル、すなわち線形応答理論による微視的輸送係数を用いて計算を行う手法を開発した。

### 4. 研究成果

(1) 複合核からの生き残り確率の計算の精度を上げるために、統計モデルコードの開発を実施した。本研究室で開発中の統計モデルコードKiSTATは、より原子番号の大きな元素を合成するために、(HI, xn)反応に焦点を当てたものである。このKiSTATに $\alpha$ 粒子放出および陽子放出過程を取り入れることで、(HI,  $\alpha$ xn)反応および(HI, pxn)の評価を可能とした。これにより(HI, xn)反応では到達できない中性子過剰領域の蒸発残留核生成の定量的な評価が可能となり、「安定な島」への到達可能性も議論できるようになった。

既存の統計モデルコードで荷電粒子放出を考慮したものは存在するが、その中身は明瞭ではなく開発者以外の者が改良を施すのは困難を伴うため、超重元素合成に特化した日本国内の統計モデルコードの必要性が以前から実験研究者を中心に指摘されていた。(HI,  $\alpha$ xn)反応および(HI, pxn)による中性子過剰な未知の超重元素を合成の可能性、特に安定な島への到達可能性を評価することが出来るようになった意義は大きい。

(2) 「粒子放出に伴うポテンシャルの変動を考慮した3次元ランジュバンコードの開発」を行った。既存のランジュバンコードにおいてポテンシャルの読み込み部の変更、それに伴う計算のアルゴリズムを変更しコード全体の改良を実施した。また中性子放出に伴う複数のポテンシャルを計算しデータベースを作成した。超重元素合成に伴う融合分裂反応では、粒子放出に伴う複合核の温度低下、それによる殻補正エネルギーの復活が重要な役割を果たしている。ただしこれらの定量的な議論や検証は行われていない。今回の改良により、融合分裂過程をより現実的に扱うことが可能となった。

(3) 荷電粒子放出過程および角運動量依存を考慮したオリジナルな統計モデルコード(KiSTAT)

の改良を行い、様々な実験データとの比較、パラメータの設定、コードの特性などを調査した。(HI,  $\alpha$  xn) 反応および (HI, pxn) 反応による安定な島への到達可能性において定量的な評価の結果を示した。

(4) 改良したコードを用いて超重元素合成に適用し、安定な島への到達可能性についての計算を行った。実験データとの比較において、不定なパラメータである複合核の回転に対する慣性モーメント、diabatic potential から adiabatic potential に移行する緩和時間、さらに接線方向の摩擦係数などの値を決定し、計算コードの精度を上げた。この結果、fusion-fission process と quasi-fission process の区別や軌道の振る舞いの違いなどを明確に理解することが可能となった。

(5) 改良した統計模型コードをランジュバン方程式のコードに取り入れ、動力学計算中に中性子放出を考慮したコードを完成させた。このコードを用いて、新しい反応メカニズムの構築に取り組み、「動的な殻補正エネルギーの利用による新元素合成」について試算を行った。

(6) 連携研究者の萩野浩一氏（東北大学）とともに入射核が標的核に接触するまでの計算を TDHF 計算で扱い、その後、3次元ランジュバン方程式を用いた計算で複合核を形成する確率を計算する手法を開発し、それを用いて融合確率の計算を行った。

(7) 新元素合成で重要となる中性子過剰な複合核を合成するために入射核・標的核の検討を行った。中性子過剰な複合核を合成するには、従来の重イオン融合反応とは異なった手法である、核子移行反応の可能性についても検討した。合成可能性は、理論計算の結果、大きく二つの不定なパラメータに大きく依存していることが分かった。一つは標的核と入射核が衝突した際に生じる接線方向の摩擦係数、もう一つは一体となった系の慣性モーメントの大きさである。前者は主に移行核子数に影響を与え、後者は主に放出粒子の角度分布に影響を与えることが計算により分かった。また、既存の実験値と比較することで、これら二つのパラメータの値を決定した。さらにこれらの結果を用いて、核子移行反応による新元素の生成評価が可能となるプログラムコードの整備を行った。

(8) 中性子過剰核の核分裂について重要となることから、超重元素領域における中性子過剰核の核分裂片質量分布について系統的な計算を行った。この結果、質量対称分裂と非対称分裂を示す原子核の領域が、一定の中性子数を境に分かれることが分かった。このような計算は原子核の質量テーブルの精度が非常に重要である。さまざま質量テーブルを用いて計算結果がどのように変わるかを調べ、質量テーブル依存性についても検討を行った。

## 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 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Y. Miyamoto, Y. Aritomo, S. Tanaka, K. Hirose, and K. Nishio	4. 巻 99
2. 論文標題 Origin of the dramatic change of fission mode in fermium isotopes investigated using Langevin equations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 051601(R)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Y. Aritomo, N. Liyana, S. Tanaka, Y. Miyamoto, B. Yanagi, K. Hahino, T. Tanaka, K. Nishio and M. Ohta	4. 巻 23
2. 論文標題 Estimation for synthesis of superheavy elements	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 13001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Y. Miyamoto, Y. Aritomo, S. Tanaka, K. Hirose, K. Nishio	4. 巻 2018-001
2. 論文標題 Nuclear fission properties of actinoid isotopes investigated by Langevin equation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JAEA-Conf	6. 最初と最後の頁 93-98
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 S. Tanaka, K. Hirose, K. Nishio, Y. Aritomo	4. 巻 2018-001
2. 論文標題 Study of multi-chance fission in dynamical model calculation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JAEA-Conf	6. 最初と最後の頁 105-110
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Yoshihiro Aritomo	4. 巻 2
2. 論文標題 Dynamical Study on the Synthesis of Superheavy Elements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Nuclear and Particle Physics	6. 最初と最後の頁 255-282
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 S. Tanaka, Y. Aritomo, Y. Miyamoto, K. Hirose, and K. Nishio	4. 巻 100
2. 論文標題 Effects of multichance fission on isotope dependence of fission fragment mass distributions at high energies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 64605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 atsuhisa Nishio, Kentaro Hirose, Mark Vermeulen, Hiroyuki Makii, Riccardo Orlandi, Kazuaki Tsukada, Masato Asai, Atsushi Toyoshima, Tetsuya K. Sato, Yuichiro Nagame, Satoshi Chiba, Yoshihiro Aritomo, Shouya Tanaka, Tsutomu Ohtsuki, Igor Tsekhanovich, Costel M. Petrache, Andrei Andreyev, Andrei Andreyev	4. 巻 169
2. 論文標題 Study of fission using multi-nucleon transfer reactions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計29件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Y. Aritomo, Y. Miyamoto, S. Tanaka, K. Hirose, K. Nishio
2. 発表標題 Fission of Fermium Isotopes using Langevin Calculations
3. 学会等名 Hawaii2018, 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Aritomo, Y. Miyamoto, S. Tanaka, K. Hirose, K. Nishio
2. 発表標題 Fission Dynamics of Fermium Isotopes using Langevin Equations
3. 学会等名 SSNET ' 18 International Conference on Shapes and Symmetries in Nuclei: from Experiment to Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Aritomo
2. 発表標題 A way for synthesizing new elements Z = 119 and approaching to Island of Stability
3. 学会等名 RIBF users meeting 2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Aritomo, H. Hachikubo, Nur Liyana Mohd Anuar
2. 発表標題 DYNAMICAL APPROACH FOR SYNTHESIS OF SUPERHEAVY ELEMENTS
3. 学会等名 IX International Symposium on Exotic Nuclei 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Aritomo, H. Hachikubo, S. Tanaka, N. Liyana, Y. Miyamoto, B. Yanagi
2. 発表標題 Dynamical approach for synthesis of superheavy elements
3. 学会等名 13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Aritomo, Y. Miyamoto, S. Tanaka, K. Hirose, K. Nishio
2 . 発表標題 Fission Dynamics based on Langevin Equations
3 . 学会等名 Tsukuba-CCS workshop on “microscopic theories of nuclear structure and dynamics ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Nur Liyana Mohd Anuar, Yoshihiro Aritomo, Shyoya Tanaka, Baku Yanagi
2 . 発表標題 EVALUATION FOR POSSIBILITY OF SYNTHESIZING NEW SUPERHEAVY ELEMENT
3 . 学会等名 IX International Symposium on Exotic Nuclei 2018 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Hirose, K. Nishio, S. Tanaka, R. Leguillon, H. Makii, I. Nishinaka, R. Orlandi, K. Tsukada, J. Smallcombe, M.;J. Vermeulen, S. Chiba, Y. Aritomo, T. Ohtsuki, I. Tsekhanovich, and A.;N. Andreyev
2 . 発表標題 Fission of Fermium Isotopes using Langevin Calculations Fission yield measurement using multi-nucleon transfer reactions
3 . 学会等名 Hawaii2018, 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Tanaka, K. Hirose, K. Nishio, Y. Aritomo
2 . 発表標題 Effects of Multichance Fission on Fission Fragment Mass Distributions at High Energies
3 . 学会等名 Hawaii2018, 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 Shoya Tanaka, Kentaro Hirose, Katsuhisa Nshio, Yoshihiro Aritomo
2. 発表標題 Role of multichance fission in highly excited heavy nuclei
3. 学会等名 13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Miyamoto, Y. Aritomo, S. Tanaka, K. Hirose, K. Nishio
2. 発表標題 Origin of dramatic change of fission mode in fermium isotopes investigated using Langevin equation
3. 学会等名 13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shoya Tanaka, Kentaro Hirose, Katsuhisa Nshio, Yoshihiro Aritomo
2. 発表標題 Characteristics of nuclear fission at high excitation energy
3. 学会等名 Tsukuba-CCS workshop on "microscopic theories of nuclear structure and dynamics" 10-12, December, 2018, Center for Computational Sciences, (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 有友 嘉浩、天野翔太、宮本裕也、西尾勝久
2. 発表標題 動力学模型を用いた多核子移行反応の解析
3. 学会等名 重力波観測時代のrプロセスと不安定核
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 田中翔也、有友嘉浩、廣瀬健太郎、西尾勝久、太田雅久
2. 発表標題 高励起複合核における核分裂過程の解明
3. 学会等名 重力波観測時代のrプロセスと不安定核
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮本裕也、有友嘉浩、西尾勝久、廣瀬健太郎、田中翔也
2. 発表標題 Theoretical analysis of multi-mode fission in neutron-rich fermium isotopes by dynamical model
3. 学会等名 重力波観測時代のrプロセスと不安定核
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳獫、太田雅久、有友嘉浩
2. 発表標題 超重核領域における複合核の生き残り確率計算により予測できること
3. 学会等名 重力波観測時代のrプロセスと不安定核
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 有友嘉浩
2. 発表標題 超重元素合成における蒸発残留核断面積の理論的評価および課題
3. 学会等名 超重元素研究の新展開
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 有友嘉浩、田中翔也、ヌル リヤナ、宮本裕也、柳 漠
2. 発表標題 新元素Z=119, 120の生成可能性の理論的評価
3. 学会等名 Threshold Rule 50
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Tanaka, K. Hirose, K. Nishio, Y. Aritomo
2. 発表標題 Theoretical study on fission process at high excitation energy with a concept of multi-chance fission
3. 学会等名 2018年度核データ研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 有友嘉浩、鉢窪宏規、田中翔也、Liyana Anuar、宮本裕也、柳 漠
2. 発表標題 超重元素領域の融合過程における微視的効果の影響
3. 学会等名 日本物理学会 2018年 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鉢窪宏規、Nur Liyana、田中翔也、漠、宮本裕也、有友嘉浩
2. 発表標題 動力学模型を用いた超重元素領域における融合分裂過程のメカニズムの解明
3. 学会等名 日本物理学会 2018年 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳 漠, Nur Liyana Mohd Anuar, 萩野浩一, 有友嘉浩, 太田雅久
2. 発表標題 動力学模型による超重元素の蒸発残留核断面積の系統的な評価
3. 学会等名 日本物理学会 2018年 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Aritomo
2. 発表標題 Dynamical calculation for synthesis of superheavy elements
3. 学会等名 3rd International Symposium on Super-Heavy Elements (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Aritomo, R. Amano, S. Tanaka, Y. Miyamoto, K. Nishio
2. 発表標題 Dynamical model of the nuclear transfer reaction in
3. 学会等名 54th ASRC International Workshop Sakura-2019 "Nuclear Fission
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Aritomo, S. Amano, M. Okubayashi, B. Yanagi, K. Nishio, M. Ohta
2. 発表標題 Estimation of Synthesizing New Superheavy Elements using Dynamical Model
3. 学会等名 69th International Conference &laquo;Nucleus-2019&raquo; on Nuclear Spectroscopy
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Aritomo, Y. Miyamoto
2 . 発表標題 Synthesis of Superheavy Elements
3 . 学会等名 Nuclear Fission Dynamics 2019
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Amano, Y. Aritomo, Y. Miyamoto, S. Ishizaki M. Okubayashi
2 . 発表標題 FUSION PROCESS IN TRANSFER REACTIONS WITH
3 . 学会等名 69th International Conference &laquo;Nucleus-2019&raquo; on Nuclear Spectroscopy
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Tanaka, K. Hirose, K. Nishio, and Y. Aritomo
2 . 発表標題 Study of fission fragment angular distribution in heavy-ion multi-nucleon
3 . 学会等名 The 4th International Symposium on Superheavy Elements
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Aritomo, S. Amano, R. Murakami, R. Yamasaki, S. Hamagami, K. Endo, and M. Ohta
2 . 発表標題 Estimation for synthesis of superheavy elements using dynamical model
3 . 学会等名 The 4th International Symposium on Superheavy Elements
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
研究協力者	西尾 勝久  (Nishio Katsuhisa)		
研究協力者	萩野 浩一  (Hagino Kouichi)		