

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13551

研究課題名（和文）変分法による超新星爆発計算用核物質状態方程式のラムダハイペロン混合系への拡張

研究課題名（英文）Extension of the supernova equation of state to Lambda hypernuclear system by using a variational method

研究代表者

富樫 甫 (Togashi, Hajime)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：70733939

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,600,000円

研究成果の概要（和文）：従来の一様核物質に対する変分法を拡張し、ラムダハイペロン粒子が混合した核物質（ラムダハイペロン物質）の状態方程式を生のパリオン間相互作用に基づいて作成した。この際、ラムダハイペロンが関連する3体バリオン間相互作用を導入することで、重い中性子星の質量とも無矛盾な状態方程式を得ることができた。さらに、有限温度低密度領域におけるアルファ粒子の混合も考慮して、広範囲の密度・温度・陽子混在度をカバーしたラムダハイペロン物質状態方程式の数値テーブルを構築し、大質量星の重力崩壊シミュレーションのテスト計算に適用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で構築したラムダハイペロン物質の状態方程式は、生のパリオン間相互作用から出発した多体変分計算に基づいて作成されており、現象論的モデルに基づく従来の状態方程式に比べてその信頼性が高いだけでなく、重力崩壊型超新星爆発や連星中性子星合体などの動的なコンパクト天体現象の数値シミュレーションにも適用可能なものである。今後、コンパクト天体現象から生じた重力波・電磁波・ニュートリノなどの同時観測によるマルチメッセンジャー天文学によって高密度物質内部の理解が急速に進展した際、本研究を通して、コンパクト天体とバリオン間相互作用を関連して論ずる世界に先駆けた新しい道筋を切り開くことが可能となる。

研究成果の概要（英文）：By extending the variational method for uniform nuclear matter, we constructed the equation of state for nuclear matter with Lambda hyperons (Lambda hypernuclear matter) based on bare baryon interactions. Owing to the three-body repulsive forces within the three-baryon systems including Lambda hyperons, we obtained the results that are reasonably consistent with the observational data on massive neutron stars. Furthermore, we considered the contribution from alpha-particles in the low-density region at finite temperature. We finally tabulated the resultant equation of state for Lambda hypernuclear matter in a wide range of the density, temperature, and particle fractions, and applied it to the simple core-collapse simulation.

研究分野：原子核理論

キーワード：核物質 状態方程式 ハイペロン 超新星爆発 中性子星 変分法

## 1. 研究開始当初の背景

中性子星や重力崩壊型超新星爆発などのコンパクト天体の研究では、原子核密度の数倍以上にも及ぶ高密度核物質の状態方程式 (EOS) が重要な役割を担う。十分に冷えた中性子星の場合、その質量や半径は絶対零度核物質 EOS によって決まるため、これまで数多くの EOS が理論計算によって提案され、中性子星の質量や半径に関する観測データと比較されてきた。特に、2010 年以降に発見された太陽質量の 2 倍近い質量を持つ複数の重い中性子星の観測データは、絶対零度核物質 EOS に強い制限を与えており、そのひとつに「ハイペロンパズル」と呼ばれるものがある。この「ハイペロンパズル」とは、中性子星の中心付近の高密度コアにおいて、核子やレプトンに加えてハイペロンが出現することにより、それに伴う EOS の軟化現象が生じて、中性子星最大質量の理論予想値が、上述の重い中性子星の観測データよりも小さくなってしまいう問題である。本研究開始当初、このようなハイペロンパズルは、現象論的模型に基づく手法と現実的な相互作用から出発した多体計算の両方から研究が行われており、後者の多くは、ハイペロンパズルを解決するために、ハイペロンが関連する 3 体バリオン間相互作用の必要性を示唆していた。ハイペロンパズルは依然として未解決の問題であり、様々な手法によって精力的に研究されている。

一方、重力崩壊型超新星爆発や連星中性子星合体などの動的なコンパクト天体現象の数値シミュレーションでは、有限温度核物質の EOS が重要なインプットデータの一つとなる。このようなシミュレーションでは、コンパクト天体内部に現れる核物質の熱力学状態が時間発展とともに変化するため、広範囲の密度・温度・粒子混在度に対する核物質の様々な熱力学量をあらかじめ数値データとして用意しておく必要がある。このような理由から、シミュレーションに適用可能な EOS の作成は非常に困難であり、現在までに作成されたコンパクト天体シミュレーション用 EOS の数は限られている。近年の精力的な研究によってその数は増えつつあるが、それらは現象論的な核力模型に基づくものがほとんどであり、唯一の「現実的核力に基づくコンパクト天体シミュレーション用 EOS」は現在まで、本研究課題の研究代表者が構築した EOS (Togashi EOS) のみである。さらに、動的なコンパクト天体現象におけるハイペロン混合の影響を調べるためには、ハイペロンの自由度まで考慮したシミュレーション用 EOS が必要となるが、研究開始当初、そのような EOS は現象論的模型に基づく 5 つのモデルしか提案されておらず、上述の重い中性子星の観測データと矛盾しない EOS はそのうち 1 種類に留まっていた。

## 2. 研究の目的

上述の状況を踏まえ、本研究課題では従来の Togashi EOS を拡張し、絶対零度及び有限温度において、ハイペロンが混合した核物質 (ハイペロン物質) の EOS を生のバリオン間相互作用から構築する。なお本研究では、高密度物質内部で最も出現が期待されており、かつ地上でのハイパー核実験データも比較的豊富なラムダハイペロン粒子の混合のみに着目する。そして、ラムダハイペロン物質の EOS を広範囲の密度・温度・陽子混在度に対して完備することで、コンパクト天体シミュレーション用の EOS テーブルを作成することを目指す。さらに、得られた EOS テーブルを中性子星の構造計算や大質量星の重量崩壊シミュレーションに適用することで、ラムダハイペロン混合がコンパクト天体現象に与える影響を明らかにする。特に本研究課題では、従来の Togashi EOS で用いた 3 体核力の取り扱いを踏襲し、ラムダハイペロンが関連する 3 体バリオン間相互作用まで考慮することで、重い中性子星の質量と矛盾しない絶対零度ラムダハイペロン物質 EOS を構築し、それを有限温度シミュレーション用 EOS へと拡張する。加えて、本研究で構築するコンパクト天体シミュレーション用 EOS の数値テーブルは、従来の Togashi EOS 同様、web 上で公開することも予定している。

## 3. 研究の方法

絶対零度ラムダハイペロン物質に対しては、Jastrow 波動関数を用いた 2 体クラスター近似によって、2 体相互作用までを含む 2 体ハミルトニアンを期待値を計算する。この際、2 体核力は従来の Togashi EOS と同じ Argonne v18 ポテンシャルを採用し、ラムダハイペロン-核子間及びラムダハイペロン-ラムダハイペロン間の 2 体相互作用は、軽いハイパー核に対する第一原理計算から決定した中心力ポテンシャルを採用する。そして、Jastrow 波動関数に含まれる複数の状態依存性を持つ 2 粒子間相関関数について、2 体ハミルトニアンを期待値を最小化し、これを 2 体力エネルギーとする。一方で、3 体力ポテンシャルの不定性は非常に大きいため、従来の Togashi EOS の手法に倣い、Fermi 気体波動関数によるエネルギー期待値に調節パラメータを導

入することで3体力エネルギーを評価する。具体的には、3核子間に働く3体力の寄与は、従来の手法に従って3体力 Urbana IX ポテンシャルに基づいて計算を実行するのに対し、ラムダハイペロンが関連する3体力については、Urbana IX ポテンシャルに含まれる状態依存性の無い現象論的斥力項を利用し、これをラムダハイペロンが含まれる3粒子間に働く3体力ポテンシャルとする。ただし、3体力ポテンシャルの強さは、3粒子対のストレンジネス量子数に依存する調節パラメータによって補正する。本研究では、1つのラムダハイペロンと2核子の間に働く3体力の強さは、対称核物質の飽和密度におけるラムダハイペロンの単一粒子ポテンシャルが標準的な経験値 (-30 MeV) を再現するように調整する。一方で、2つのラムダハイペロンと1核子の3粒子間及び3つのラムダハイペロン間に働く3体力の強さは同じと仮定し、その強さを調節パラメータによって変化させる。そして、上記の手順で求めた2体力エネルギーと3体力エネルギーの和を絶対零度における1バリオンあたりの全エネルギーとして、中性子星構造とその内部組成にハイペロン3体力が与える影響を系統的に調べる。

次に、有限温度ラムダハイペロン物質に対しては、1バリオンあたりの自由エネルギーをSchmidt-Pandharipandeの変分法を拡張することによって計算する。ここでは、一核子あたりの内部エネルギーとエントロピーを、陽子・中性子・ラムダハイペロンそれぞれの有限温度平均占有確率を用いて表し、それらの平均占有確率に含まれる各粒子の有効質量について自由エネルギーを最小化する。この際、2粒子間相関関数と3体力エネルギーに関しては、絶対零度の場合と等しいと仮定し、有限温度ラムダハイペロン物質の自由エネルギー及び関連する熱力学量を求める。

そして、上記手法によって求めた絶対零度及び有限温度ラムダハイペロン物質のEOSを利用して、実際のコンパクト天体シミュレーションで必要となる広範囲の密度・温度・陽子混在度をカバーしたEOSの数値テーブルを作成する。この際には、高温低密度領域におけるアルファ粒子の混合まで考慮する。そのため、従来の手法に従い、アルファ粒子は有限体積を持つ古典的粒子として扱い、各密度・温度・陽子混在度におけるアルファ粒子が混合したラムダハイペロン物質の自由エネルギー密度を、アルファ粒子とラムダハイペロン粒子の混在度について最小化することで、熱力学的に安定な解を求める。なお、原子核が現れる非一様核物質相については、ラムダハイペロン混合の影響は考慮せず、従来のTogashi EOSの非一様相における熱力学量をそのまま代用することで、最終的なシミュレーション用EOSを完成させる。そして、得られたEOSテーブルを実際の天体シミュレーションへと適用し、ラムダハイペロン混合がコンパクト天体の諸性質に与える影響を解析する。

#### 4. 研究成果

本研究課題で得られた主な研究成果を以下に示す。

##### (1) ハイペロン3体力を考慮した絶対零度ハイペロン物質状態方程式と中性子星構造

2018年度から2019年度の研究では、上述の通り、3体力モデルのひとつであるUrbana IXポテンシャルに含まれる状態依存性の無い現象論的斥力項を利用して、ハイペロンが関連する3体力まで考慮した絶対零度ラムダハイペロン物質EOSを構築し、それを用いてハイペロン3体力が中性子星構造に与える影響を系統的に調べた。その結果、1つのラムダハイペロンと2核子の間に働く3体力に関しては、その斥力効果が大きくなるにつれて、対称核物質の飽和密度におけるラムダハイペロンの単一粒子ポテンシャルが上昇する傾向を示した。さらに、この斥力効果によって中性子星の最大質量は増加し、中性子星内部におけるラムダハイペロンの混合開始密度は高密度側に移動することもわかった。一方で、2つ以上のラムダハイペロンを含む3粒子間に働く3体力の強さを変化させた場合には、中性子星の最大質量は増加するのに対し、対称核物質中におけるラムダハイペロンの単一粒子ポテンシャルや中性子星内部における混合開始密度は大きく変化しないことも明らかになった。以上の結果に基づいて、本研究では、対称核物質の飽和密度におけるラムダハイペロン単一粒子ポテンシャルの経験値 (-30 MeV) を再現するように、1つのラムダハイペロンと2核子の間に働く3体力の強さを決定した。この結果、中性子星内部におけるラムダハイペロンの混合開始密度はおおよそ  $0.5 \text{ fm}^{-3}$  となった。

上記手順によって、1つのラムダハイペロンと2核子の間に働く3体力を決定した。そこで次に、2つ以上のラムダハイペロンを含む3粒子間に働く3体力が、中性子星構造に与える影響も詳細に調べた。この際には、当該3体力の強さをゼロにした場合から、それらの強さが3体力の斥力項と同じ強さになるまで調節パラメータを変化させた。この結果、当該3体力の斥力効果は、ラムダハイペロンが十分に混在した高密度領域において、ラムダハイペロン混在度を徐々に減少させる傾向を示した。すなわち、2つ以上のラムダハイペロンを含む3粒子間に働く3体力効果の増加は、中心密度が非常に高密度となる重い中性子星において、その内部のラムダハイペロン混在度を抑制し、その結果としてEOSが支えられる中性子星質量を増加させることがわかった。さらに本研究では、中性子星内部の高密度物質における因果律を保証し、物質中の音速が高速を超えないという条件を課すことで、これらの3体力の強さを調整し、熱力学条件を破らない妥当なラムダハイペロン物質EOSを構築した。

## (2) 有限温度ハイペロン物質状態方程式への拡張と原始中性子星への適用

2018年度から2019年度の研究では、Schmidt-Pandharipandeの変分法を用いて、上記(1)の研究成果で得られた絶対零度ラムダハイペロン物質 EOS を有限温度へと拡張する研究にも取り組んだ。当該研究で得られた有限温度における1バリオンあたりの自由エネルギーは、様々な密度・温度・粒子混在度に対して妥当な振る舞いを示し、熱力学関係式を用いて導出したエントロピーや内部エネルギー等の関連する熱力学量についても、従来の核子のみで構成された有限温度核物質 EOS と自己無矛盾な結果が得られた。さらに当該研究では、(1)の研究成果と同様に、2つ以上のラムダハイペロンを含む3粒子間に働く3体力に関して、その強さを変化させた複数の有限温度 EOS を作成し、これらを用いて重力崩壊型超新星爆発直後に中心部で形成される原始中性子星の静的構造におけるハイペロン3体力の影響を調べた。ここで、原始中性子星物質は、多くの研究で採用されている処方に従い、等エントロピーの静的な物質であると仮定する。そして、レプトン混在度を一定にした下で、ニュートリノが捕獲された状態でのバリオン、レプトン、光子で構成された荷電中性かつベータ安定な物質であると見なす。このような原始中性子星物質の内部組成に対して、ハイペロン3体力が与える影響を調べたところ、前述の冷えた中性子星の場合と同様に、2つ以上のラムダハイペロンを含む3粒子間に働く3体力は、中性子星内部におけるラムダハイペロンの混合開始密度に大きく影響しないことがわかった。さらに、原始中性子星内部のエントロピーが増加するにつれて、ラムダハイペロンの混合開始密度は低くなり、原始中性子星のレプトン混在度が小さいほど、大きいラムダハイペロン混在度を示す結果となった。すなわち、超新星爆発後に形成される原始中性子星のような高温高密度物質においては、エントロピー(または温度)が高く、よりレプトン混在度が小さい中性子過剰な物質であるほど、その内部に多くのラムダハイペロンを含んでいることが示された。

## (3) 高温低密度領域におけるアルファ粒子混合の考慮とシミュレーション用テーブルの構築

2020年度から2021年度の研究では、実際のコンパクト天体シミュレーションで必要となる広範囲の密度・温度・陽子混在度をカバーした EOS の数値テーブルを完成させるために、高温低密度領域におけるアルファ粒子の混合まで考慮したラムダハイペロン物質の熱力学量を求めた。この際には、様々な密度・温度・陽子混在度において、アルファ粒子とラムダハイペロン粒子の組成を変化させ、熱力学的に安定した解を得る必要がある。そのため、従来よりも多くの数値計算コストが必要となる。当該研究では、これまでに作成した数値計算コードの高速化と精密化に取り組み、高温低密度領域においても妥当な振る舞いを示す EOS を完成させた。そして、低密度一様ガス相と高密度一様物質相において、ラムダハイペロン混合を精度良く考慮した EOS テーブルを構築した。この際、一般的な天体シミュレーション用ハイペロン EOS の構築手順に倣い、原子核が現れる非一様相についてはラムダハイペロン混合を考慮せず、従来の核子のみを考慮した Togashi EOS の非一様相 EOS をそのまま代用した。ただし、この処方については、完成した EOS テーブルに含まれるラムダハイペロンの粒子組成を詳細に解析することで、その妥当性を確認することができた。そして、構築した EOS テーブルを用いて、重い親星モデルから出発した簡易的な重力崩壊シミュレーションを実行した。ここではテスト計算として、ニュートリノが関連する弱い相互作用を無視し、断熱的な重力崩壊の流体シミュレーションのみを行った。その結果、通常の Togashi EOS を用いたシミュレーションに比べて、ラムダハイペロンの自由度を含む EOS の場合には、ハイペロン混合に伴う EOS の軟化現象によって、コアバウンスからブラックホール形成までに要する時間が短くなるという結果が得られた。

## (4) まとめと今後の展望

本研究課題では、「生のバリオン間相互作用に基づくコンパクト天体シミュレーション用のラムダハイペロン物質 EOS」を構築した。本研究で構築した EOS は、重い中性子星の観測結果と矛盾せず、動的なコンパクト天体現象の研究にも利用できる最新の EOS として、今後の様々な天体シミュレーションへの利用が期待される。特に、近年のコンパクト天体観測は目覚ましい発展を遂げており、近い将来にコンパクト天体から生じた重力波・電磁波・ニュートリノなどの同時観測によって、高密度物質の理解が急速に進展した際には、本研究の成果を通して、コンパクト天体現象というマクロな現象とバリオン間相互作用というミクロな性質を関連して論ずる新たな研究が可能となる。なお、本研究で構築した天体シミュレーション用 EOS テーブルは、実際の数値シミュレーション中のトラブルを回避するため、全ての物理量が滑らかに推移している必要がある。今後は、EOS テーブルに含まれる様々な熱力学量の振る舞いを十分な精度で確認し、その作業が終了次第、数値テーブルを web 上で公開することを予定している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Nakazato Ken'ichiro, Sumiyoshi Kohsuke, Togashi Hajime	4. 巻 73
2. 論文標題 Numerical study of stellar core collapse and neutrino emission using the nuclear equation of state obtained by the variational method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 639 ~ 651
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab026	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 Kojo Toru, Hou Defu, Okafor Jude, Togashi Hajime	4. 巻 104
2. 論文標題 Phenomenological QCD equations of state for neutron star dynamics: Nuclear-2SC continuity and evolving effective couplings	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 063036-1 ~ 24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.063036	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 Sotani Hajime, Togashi Hajime	4. 巻 105
2. 論文標題 Neutron star mass formula with nuclear saturation parameters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 063010-1 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.063010	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 Baym Gordon, Furusawa Shun, Hatsuda Tetsuo, Kojo Toru, Togashi Hajime	4. 巻 885
2. 論文標題 New Neutron Star Equation of State with Quark-Hadron Crossover	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 42-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab441e	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 Togashi Hajime、Takano Masatoshi	4. 巻 26
2. 論文標題 Cluster Variational Method for Hyperonic Nuclear Matter with Coupled Channels	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceeding	6. 最初と最後の頁 031024-1~3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.26.031024	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 Togashi Hajime	4. 巻 31
2. 論文標題 Nuclear Equation of State Based on the Many-Body Calculation with Realistic Nuclear Forces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceeding	6. 最初と最後の頁 011022-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.31.011022	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 富樫 甫	4. 巻 30
2. 論文標題 3体力を考慮した絶対零度及び有限温度ハイペロン物質の状態方程式	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 素粒子論研究・電子版	6. 最初と最後の頁 060~062
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 無
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24件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Hajime Togashi
2. 発表標題 Effects of symmetry energy on inhomogeneous nuclear matter in core-collapse supernovae
3. 学会等名 Pioneer Symposium for Nuclear Experiment in 2021 Spring Meeting of the Korean Physical Society (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富樫甫、鷹野正利
2. 発表標題 低密度領域におけるアルファ粒子混合を考慮した有限温度ハイペロン物質状態方程式
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富樫甫、鷹野正利
2. 発表標題 変分法による絶対零度及び有限温度ハイペロン物質の研究
3. 学会等名 ストレンジネス核物理の将来を考える会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富樫甫
2. 発表標題 新物理探査に向けた中性子星状態方程式の現状と課題
3. 学会等名 素粒子現象論研究会2021（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富樫甫
2. 発表標題 原子核物理から紐解く重力崩壊型超新星爆発
3. 学会等名 ワークショップ「数理で紡ぐ素粒子・原子核・宇宙、そして社会科学」（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hajime Togashi
2. 発表標題 Hyperon mixing in astrophysical compact objects
3. 学会等名 Workshop PPPY- $\Lambda$ 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hajime Togashi
2. 発表標題 Dense matter equation of state with bare baryon forces
3. 学会等名 2nd International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 富樫甫、鷹野正利
2. 発表標題 結合チャンネル相互作用のテンソル力成分を考慮したクラスター変分法による中性子星物質状態方程式
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hajime Togashi
2. 発表標題 Microscopic equation of state for hyperon matter with $\Lambda$ - $\Sigma$ N coupling
3. 学会等名 Workshop on Electro- and Photoproduction of Hypernuclei and Related Topics (国際学会)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 富樫甫
2. 発表標題 微視的多体理論に基づく状態方程式を用いた重力崩壊型超新星爆発シミュレーション
3. 学会等名 第3回理研-九大ジョイントワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 富樫甫、鷹野正利
2. 発表標題 拡張したMayer条件を考慮したクラスター変分法によるハイペロン物質状態方程式
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Togashi, K. Nakazato, Y. Takehara, S. Yamamuro, H. Suzuki and M. Takano
2. 発表標題 Microscopic equation of state for nuclear matter with the variational many-body theory
3. 学会等名 MOST/RIKEN Workshop on ab initio theory in nuclear physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hajime Togashi
2. 発表標題 Microscopic equation of state for astrophysical simulations
3. 学会等名 8th Huada school on QCD (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富樫甫、鷹野正利、肥山詠美子
2. 発表標題 3 体力を考慮した絶対零度及び有限温度ハイペロン物質の状態方程式
3. 学会等名 高塚さんを偲ぶ会 -高密度ハドロン・クォーク物質の諸相と中性子星の構造・進化-
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hajime Togashi
2. 発表標題 Nuclear Equation of State Based on the Many-Body Calculation with Realistic Nuclear Forces
3. 学会等名 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Togashi, M. Takano, K. Nakazato, Y. Takehara, S. Yamamuro, H. Suzuki, K. Sumiyoshi, and E. Hiyama
2. 発表標題 General purpose equation of state for astrophysical simulations with bare nuclear forces
3. 学会等名 International Workshop on Nuclear Physics for Astrophysical Phenomena (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Togashi, M. Takano, K. Nakazato, Y. Takehara, S. Yamamuro, H. Suzuki, K. Sumiyoshi, and E. Hiyama
2. 発表標題 Hyperon mixing in hot and dense matter with the variational method
3. 学会等名 Theia-Strong2020 Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富樫 甫
2. 発表標題 高密度物質の状態方程式と高エネルギー天体現象
3. 学会等名 理研 - 九大ワークショップ 「数理が紡ぐ素粒子・原子核・宇宙」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hajime Togashi
2. 発表標題 Variational study for hyperon mixing in hot and dense matter
3. 学会等名 Mini-Workshop on Baryon Interactions and Neutron Stars (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 富樫 甫、肥山 詠美子、鷹野 正利
2. 発表標題 バリオン間相互作用に基づく核物質の状態方程式と天体物理への応用
3. 学会等名 研究会「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 H. Togashi, E. Hiyama and M. Takano
2. 発表標題 Hyperon equation of state for core-collapse simulations based on the variational many-body theory
3. 学会等名 HYP2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Togashi
2. 発表標題 Equation of state for hyperonic nuclear matter and its application to compact astrophysical objects
3. 学会等名 International workshop on "Hadron structure and interaction in dense matter" (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Togashi and M. Takano
2. 発表標題 Cluster variational method for hyperonic nuclear matter with coupled channels
3. 学会等名 QNP2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富樫 甫
2. 発表標題 核物質状態方程式と高密度天体現象
3. 学会等名 理研 - 九大ワークショップ ~素粒子・原子核から宇宙へ~ (招待講演)
4. 発表年 2018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
---------------------------	-----------------------	----

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0件

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
---------	---------