

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14477

研究課題名（和文）オービフォールド特異点の解消とその現象論的応用

研究課題名（英文）Resolution of orbifold singularities and its phenomenological application

研究代表者

大塚 啓 (Otsuka, Hajime)

九州大学・理学研究院・助教

研究者番号：80777988

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、オービフォールド特異点が解消された余剰次元空間上の超弦理論の有効理論を解析し、特異点解消に付随して現れるブローアップモードの物理を介して超弦理論の痕跡を探ることを目的としていた。

研究期間全体を通じて、実施した主な研究成果は以下の4点である：i) オービフォールド上の指数定理に関する統一的理解、ii) カラビ・ヤウ多様体において初めて自発的なCP対称性の破れが実現可能であること、iii) ブローアップモード間のフレーバー対称性は、カラビ・ヤウ多様体の持つシンプレクティックモジュラー対称性に埋め込まれること、iv) モジュラー対称性の部分対称性が弦理論のランドスケープに現れることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

理論的・実験的問題点が指摘されている素粒子物理学における標準模型（素粒子標準模型）の拡張に当たり、ゲージ及び重力相互作用を統一的に記述する超弦理論は素粒子統一理論の有力な候補である。本研究は、オービフォールド特異点の解消された余剰次元空間上の超弦理論の有効理論に注目することで、これまで明らかにされていなかった特異点解消に付随して現れるブローアップモードの有効理論の構造を解明した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to search for traces of superstring theory through the physics of blowup modes by analyzing the effective field theory of superstring theory on extra-dimensional spaces with resolved orbifold singularities.

Throughout the research period, I found the following results: i) a unified understanding of the index theorem on orbifolds, ii) spontaneous CP symmetry breaking is possible in Calabi-Yau manifolds, iii) flavor symmetry between blowup modes is embedded in symplectic modular symmetries of Calabi-Yau manifolds, and iv) partial modular symmetries appear in the string landscape.

研究分野：素粒子理論

キーワード：超弦理論  
ブランド  
モジュライ  
ブローアップ  
オービフォールド  
素粒子現象論  
モジュラー対称性  
スワン  
CP対称性の破れ

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子標準模型 (SM) には、素粒子の世代間の質量階層性、強い CP 問題、宇宙のバリオン数非対称の起源、暗黒物質候補や重力相互作用を含まないといった理論的・実験的問題点が存在するため、SM の背後に基本理論の存在が示唆されている。SM の諸問題を解決する上で、ゲージ及び重力相互作用を統一的に記述する超弦理論は素粒子統一理論の有力な候補である。超弦理論は 6 次元の余剰次元空間を予言し、4 次元有効理論の真空構造は余剰次元空間のコンパクト化によって決定される。超弦理論が SM や我々の宇宙を内包するのかわかりやすくするため、これまで主に二つのアプローチが用いられてきた。

(I) 滑らかなカラビヤウ多様体を余剰次元空間とし、代数幾何学的手法を用いた現象論

(II) 特異構造を持つオービフォールドを余剰次元空間とし、微分幾何学的手法を用いた現象論

(I) はカラビヤウ多様体のコンパクト化に応じて 4 次元有効理論に現れるモジュライ・アクシオン場が A) SM の強い CP 問題の解決、B) 初期宇宙の加速膨張期の存在により標準宇宙論の理論的問題点を解決する機構(インフレーション機構)、C) 暗黒物質候補を担うため、様々な高エネルギー実験・宇宙論観測において注目を集めている。しかしながら、カラビヤウ多様体上の弦理論に基づく有効理論において、代数幾何学的手法を用いた SM の結合定数の定量的な評価は困難であることが指摘されている。

一方(II) は、共形場理論及び微分幾何学的手法を用いた SM の結合定数の導出が定量的に行われており、これまで多くの SM を導く模型構築が提案されてきた。素粒子間のフレーバー構造、質量階層構造を導く様々なフレーバー対称性の提案が行われ、実験値を導くなど多くの成功を収めている。しかし、トロイダルオービフォールド特異点に局在した無質量の弦のモード(ブローアップモード)を固定する機構が明らかにされておらず、SM の結合定数の値を決定するモジュライ・アクシオン場の決定機構を含めた統一的な議論には未だ至っていない。

弦の現象論を究明するこれまでの二つのアプローチ(I)、(II) は、互いに相反する問題を抱えている。(I) では宇宙論的な諸問題を克服する際に重要なモジュライ・アクシオン場の決定機構は構築されているが、素粒子現象論を議論する際に必要な定量的な解析手法が欠如している。一方、(II) では SM の結合定数を導く定量的な解析手法は確立されているが、モジュライ・アクシオン場の決定機構が未開拓であるといった問題がある。それ故、(I)、(II) の問題点を回避する新たな弦の現象論を展開し、超弦理論の痕跡を探ることが可能かという本研究課題の核心をなす学術的「問い」が存在する。

## 2. 研究の目的

理論的・実験的問題点が指摘されている素粒子標準模型の拡張に当たり、ゲージ及び重力相互作用を統一的に記述する超弦理論は素粒子統一理論の有力な候補である。本研究は、オービフォールド特異点の解消された余剰次元空間上の超弦理論の有効理論に注目する。特異点解消に付随して現れるブローアップモードの物理を介して超弦理論の痕跡を探ることを目的とし、以下の4点の研究課題【1、2、3、4】を設定した。

- 【1】特異点解消されたカラビヤウ空間上の超弦理論に基づく有効理論の導出
- 【2】ブローアップモードがもたらす素粒子間混合(フレーバー混合)の検証
- 【3】ブローアップモードの固定機構の解明と初期宇宙論
- 【4】ブローアップモードの固定機構とスワンプランド問題の関連性の解明

## 3. 研究の方法

トロイダルオービフォールド上の IIB 型超弦理論とヘテロ型超弦理論において、オービフォールド特異点に局在するブローアップモードの存在が指摘されている。我々は、オービフォールド特異点が解消されたカラビヤウ多様体の有効理論とその現象論的研究を探求するにあたり、上記の主要課題【1、2、3、4】を設定した。これらの課題を解決するにあたり、以下の研究手法を用いる。

課題【1、2】における研究手法：

(i) 微分幾何学的手法

我々は、 $T2/ZN$  オービフォールド特異点を解消した余剰次元空間において、ブローアップモードに依存する素粒子の波動関数並びに湯川結合の導出方法を提案していた[1]。ここでは、素粒子の世代数を決定するゲージ背景磁場を導入し、3世代模型構築が可能である。より高次の  $T2/ZN(N \geq 2)$  オービフォールド特異点を解消したカラビヤウ多様体においては、微分幾何学的

手法を用いた余剰次元空間の計量、背景磁場の計算手法が確立されている。しかし先行研究[2]では、素粒子の波動関数並びに湯川結合の導出が行われていない。そこで、我々の先行研究[1]の手法を参考にし、 $T2N/ZN(N \geq 2)$  オービフォルド上の IIB 型超弦理論とヘテロ型超弦理論の有効理論において、湯川結合の導出を行う。得られた湯川結合は、素粒子の世代数を決定するゲージ背景磁場と特異点解消された空間の大きさを決定するブローアップモードに依存している。このブローアップモードの真空期待値は、湯川結合の世代間の質量階層構造だけでなく、フレーバー構造を担う。そのため、ブローアップモードのモジュライ空間を調べ、湯川結合のフレーバーを調べる。

[1] T. Kobayashi, H. Otsuka, H. Uchida, JHEP **08** (2019) 046.

[2] S. Groot Nibbelink, M. Trapletti and M. Walter, JHEP **0703**, 035 (2007).

(ii) 代数幾何学的手法

その後、ブローアップモードの真空期待値の決定機構を議論するために、先行研究[3]で提案されたミラー対称性を用いた代数幾何学的手法に注目する。先行研究では、 $T6/Z3$  オービフォルド特異点を解消したカラビヤウ多様体において、ブローアップモードの有効理論の導出が行われた。そこで、我々はカラビヤウ多様体上の周期積分をミラー対称性を用いて計算し、そのサイクルに背景磁場を導入する。そして、背景磁場を用いたブローアップモードのフラックスコンパクト化を精査する。

[3] P. Candelas, E. Derrick and L. Parkes, Nucl. Phys. B **407**, 115 (1993).

課題【3】ブローアップモードの固定機構の解明と初期宇宙論における研究手法：

課題【1、2】で取り上げた湯川結合を初め 4 次元有効理論に現れる結合定数は、モジュライ場の真空期待値によって決定されるため、モジュライ場の決定機構は重要であるが、ブローアップモードを含む全てのモジュライ場の決定機構は明らかにされていない。そこで、(ii) 代数幾何学的手法で得たブローアップモードのフラックスコンパクト化に注目する。背景磁場によって生成されたポテンシャルに基づき、ブローアップモードの期待値の決定機構を数値解析を用いて明らかにする。そして、ブローアップモードが引き起こすインフレーション機構や重力波生成の実現可能性を検証し、プランク衛星を初め、LIGO、KAGRA、LISA、DECIGO 等の重力波観測における観測可能性を探る

課題【4】ブローアップモードの固定機構とスワンプランド問題の関連における研究手法：

近年、量子重力理論の有効理論には非自明な制限があり、それを明らかにしようとするスワンプランド問題が注目を集めている。超弦理論の真空として表現されないスワンプランドを理解することで、超弦理論の予言能力が高まると期待されているからである。しかし、これまで特異点解消された空間上の有効理論に基づく全てのモジュライを摂動的に固定する系に対しては、スワンプランド問題は議論されていない。そこでスワンプランドの非自明な制限を明らかにするにあたり、我々は【3】で解析したブローアップモードを含む全てのモジュライ場の固定機構を基に、(I) 真空からプランク長を超えて離れていくと、無限個の無質量粒子が現れるという距離予想、(II) 安定なドジッター空間が得られないというドジッター予想の検証を行う。これらの距離予想、ドジッター予想の検証結果は、超弦理論の有効理論の真空構造に対する新たな知見を与えると期待される。

#### 4. 研究成果

2020 年度は、湯川結合のもつ対称性を明らかにするあたり、近年発展が著しいモジュラー対称性に基づくフレーバー模型 (“モジュラーフレーバー模型”) に注目した。モジュライ場の期待値が素粒子のフレーバー構造・CP 対称性の破れを決定する重要な役割を果たすことが知られていたが、その固定機構は明らかにされていない。本研究では、フラックスコンパクト化を用いたモジュライ固定機構に注目した。現象論的に好ましいモジュライ場の期待値の導出に成功し、超弦理論のランドスケープにおけるモジュラーフレーバー模型の統計的性質を明らかにした。トラスコンパクト化において自発的な CP 対称性の破れは困難であり、カラビ・ヤウ多様体において初めて自発的な CP 対称性の破れが可能になる。弦理論のランドスケープにおいて、統計的に有意に好まれるモジュライ期待値と現象論的に好まれるモジュライ期待値はほぼ一致しており、一連の研究は、弦理論に基づくトップダウンアプローチと現象論的な観点に基づくボトムアップアプローチの架け橋になることが期待される。

2021 年度は、オービフォルド特異点の解消された余剰次元空間上の超弦理論の有効理論において、特異点解消に付随して現れるブローアップモードの湯川結合に注目した。特に、様々な 6 次元オービフォルド上のヘテロ型超弦理論の有効理論に基づき、ブローアップモード間のフレーバー対称性を解析した。ブローアップモードの期待値が小さく、オービフォルド極限に対応する場合、ブローアップモード間のフレーバー対称性は非可換離散対称性で与えられ、滑らかなカラビヤウ多様体の持つシンプレクティックモジュラー対称性に埋め込まれることを明ら

かにした。ブローアップモードの期待値が大きく幾何学的な描写が可能な場合は、ブローアップモード間のフレーバー対称性はより大きな非可換対称性で与えられることを、様々な6次元オービフォールドの特異点解消を行った余剰次元空間上の弦理論の有効理論で確認した。また、CP対称性を余剰次元空間の向き付け反転と対応させることにより、フレーバー対称性はより大きな離散対称性に拡張されることを指摘した。

2022年度は、磁場が導入されたオービフォールドを余剰次元空間とする場の理論において、フェルミオンの世代数を決定する指数定理を解析した。特に、特異点をもつオービフォールド上のフェルミオンの世代数を調べるにあたり、特異点解消された余剰次元空間上の指数定理に注目した。特異点解消された空間上の解析により、オービフォールド上の指数定理は、バルク上の磁場と局在化した磁場と曲率の寄与で決定されていることを明らかにした。その際、オービフォールドと特異点解消された空間での波動関数の境界条件および接続条件が重要な鍵になることを指摘した。また、局在化した磁場は新たなカイラルで無質量モードの存在を予言し、特異点付近に局在する。それらの余剰次元空間上の波動関数、バルクモードと局在化したモードの湯川結合を計算した結果、湯川結合には非自明な選択則が存在することが判明した。これらの局在化した無質量モードは、ヘテロ型弦理論において twisted モードであることが期待される。

次に、IIA型超弦理論とIIB型超弦理論の有効理論における物質場の運動項に相違があることが知られていた。IIB型超弦理論において局在化した磁場はIIA型超弦理論におけるブレーンの交差角に対応している可能性があり、これらの局在化した磁場が物質場の運動項の違いを説明する際に重要な役割を持つことを指摘した。

2023年度は、近年発展が著しいモジュラー対称性に基づくフレーバー模型(“モジュラーフレーバー模型”)に注目した。特に、IIB型超弦理論に基づく3世代模型において、フレーバー対称性、CP対称性、モジュラー対称性がエクレティックフレーバー対称性の枠組みで統一的に記述されることを明らかにした。そして、IIB型超弦理論に基づく3世代模型において、モジュライ場の期待値がモジュラー対称性の固定点に固定されることを指摘した。このことは、モジュラー対称性の離散対称性が超弦理論の有効理論に現れることを示唆している。

本研究は、オービフォールド特異点が解消された余剰次元空間上の超弦理論の有効理論を解析し、特異点解消に付随して現れるブローアップモードの物理を介して超弦理論の痕跡を探ることを目的としていた。研究期間全体を通じて実施した主な研究成果は以下の4点である：i)オービフォールド上の指数定理は、バルク上の磁場と局在化した磁場と曲率の寄与で決定され、局在化した磁場は新たなカイラルで無質量モードの存在を予言すること、ii)トーラスコンパクト化において自発的なCP対称性の破れは困難であり、カラビヤウ多様体において初めて自発的なCP対称性の破れが実現可能であること、iii)特異点に局在化するブローアップモード間のフレーバー対称性は非可換離散対称性で与えられ、滑らかなカラビヤウ多様体の持つシンプレクティックモジュラー対称性に埋め込まれること、iv)超弦理論のコンパクト化を通じて、3世代模型にモジュラー対称性の部分対称性が弦理論のランドスケープに現れることを示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計27件（うち査読付論文 27件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 27件）

1. 著者名 Ishiguro Keiya, Kai Takafumi, Nishimura Satsuki, Otsuka Hajime, Takeuchi Maki	4. 巻 2024
2. 論文標題 Upper bound on the Atiyah-Singer index from tadpole cancellation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2024)200	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 Nishimura Satsuki, Miyao Coh, Otsuka Hajime	4. 巻 2023
2. 論文標題 Exploring the flavor structure of quarks and leptons with reinforcement learning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP12(2023)021	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 Ishiguro Keiya, Kai Takafumi, Kobayashi Tatsuo, Otsuka Hajime	4. 巻 2024
2. 論文標題 Flux Landscape with enhanced symmetry not on $SL(2, Z)$ elliptic points	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2024)099	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 Kobayashi Tatsuo, Nomura Takaaki, Okada Hiroshi, Otsuka Hajime	4. 巻 2024
2. 論文標題 Modular flavor models with positive modular weights: a new lepton model building	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2024)121	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 Cicoli Michele, Cotellucci Alessandro, Otsuka Hajime	4. 巻 2024
2. 論文標題 Sequestered string models imply split supersymmetry	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2024)059	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 Ishiguro Keiya, Kai Takafumi, Okada Hiroshi, Otsuka Hajime	4. 巻 2023
2. 論文標題 Flavor, CP and metaplectic modular symmetries in Type IIB chiral flux vacua	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP12(2023)136	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 Abe Yoshihiko, Higaki Tetsutaro, Kaneko Fumiya, Kobayashi Tatsuo, Otsuka Hajime	4. 巻 2023
2. 論文標題 Moduli inflation from modular flavor symmetries	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP06(2023)187	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 Otsuka Hajime, Sakamura Yutaka	4. 巻 2023
2. 論文標題 Full higher-dimensional analysis of moduli oscillation and radiation in expanding universe	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 231
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP05(2023)231	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 Kobayashi Tatsuo, Otsuka Hajime, Sakamoto Makoto, Takeuchi Maki, Tatsuta Yoshiyuki, Uchida Hikaru	4. 巻 107
2. 論文標題 Index theorem on magnetized blow-up manifold of T2/ZN	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 75032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.075032	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 Kikuchi Shota, Kobayashi Tatsuo, Otsuka Hajime, Tanimoto Morimitsu, Uchida Hikaru, Yamamoto Kei	4. 巻 106
2. 論文標題 4D modular flavor symmetric models inspired by a higher-dimensional theory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 035001-035001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.035001	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 Kikuchi Shota, Kobayashi Tatsuo, Nasu Kaito, Otsuka Hajime, Takada Shohei, Uchida Hikaru	4. 巻 2022
2. 論文標題 Modular symmetry of soft supersymmetry breaking terms	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 123B02-123B02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac152	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 Kobayashi Tatsuo, Otsuka Hajime, Tanimoto Morimitsu, Yamamoto Kei	4. 巻 2022
2. 論文標題 Lepton flavor violation, lepton $(g - 2)_\mu$ , e and electron EDM in the modular symmetry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 001-033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2022)013	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 Otsuka Hajime, Sakamura Yutaka	4. 巻 2022
2. 論文標題 Spacetime evolution during moduli stabilization in radiation dominated era beyond 4D effective theory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 001-028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2022)120	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 Ban Kayoung, Cheong Dhong Yeon, Okada Hiroshi, Otsuka Hajime, Park Jong-Chul, Park Seong Chan	4. 巻 2023
2. 論文標題 Phenomenological implications on a hidden sector from the festina lente bound	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 013B04-013B04
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac176	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 Ishiguro Keiya, Okada Hiroshi, Otsuka Hajime	4. 巻 2022
2. 論文標題 Residual flavor symmetry breaking in the landscape of modular flavor models	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 001-029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2022)072	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 Kobayashi Tatsuo, Nishimura Satsuki, Otsuka Hajime, Tanimoto Morimitsu, Yamamoto Kei	4. 巻 2023
2. 論文標題 Generalized matter parities from finite modular symmetries	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 043B02-043B02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptad041	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 Otsuka Hajime, Shimomura Takashi, Tsumura Koji, Uchida Yoshiki, Yamatsu Naoki	4. 巻 106
2. 論文標題 Pseudo-Nambu-Goldstone dark matter from non-Abelian gauge symmetry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 115033-115033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.115033	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 Kikuchi Shota, Kobayashi Tatsuo, Nasu Kaito, Otsuka Hajime, Takada Shohei, Uchida Hikaru	4. 巻 2023
2. 論文標題 Remark on modular weights in low-energy effective field theory from type II string theory	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 001-021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2023)003	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 Kobayashi Tatsuo, Otsuka Hajime, Tanimoto Morimitsu, Yamamoto Kei	4. 巻 105
2. 論文標題 Modular symmetry in the SMEFT	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 055022 ~ 055022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.055022	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 Kobayashi Tatsuo, Otsuka Hajime	4. 巻 82
2. 論文標題 On stringy origin of minimal flavor violation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 001 ~ 006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-022-09986-4	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 Ishiguro Keiya, Kobayashi Tatsuo, Otsuka Hajime	4. 巻 2022
2. 論文標題 Symplectic modular symmetry in heterotic string vacua: flavor, CP, and R-symmetries	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 001 ~ 020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2022)020	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 Ishiguro Keiya, Otsuka Hajime	4. 巻 2021
2. 論文標題 Sharpening the boundaries between flux landscape and swampland by tadpole charge	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 001 ~ 017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP12(2021)017	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 Ishiguro Keiya, Kobayashi Tatsuo, Otsuka Hajime	4. 巻 2021
2. 論文標題 Hierarchical structure of physical Yukawa couplings from matter field Kaehler metric	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 001 ~ 025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2021)064	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 Honma Yoshinori, Otsuka Hajime	4. 巻 103
2. 論文標題 Small flux superpotential in F-theory compactifications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 126022 ~ 126022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.126022	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 Kobayashi Tatsuo, Otsuka Hajime	4. 巻 102
2. 論文標題 Challenge for spontaneous CP violation in Type IIB orientifolds with fluxes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 26004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.026004	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 Kikuchi Shota, Kobayashi Tatsuo, Otsuka Hajime, Takada Shintaro, Uchida Hikaru	4. 巻 2020
2. 論文標題 Modular symmetry by orbifolding magnetized $T2 \times T2$ : realization of double cover of $N$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 001-027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2020)101	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 Ishiguro Keiya, Kobayashi Tatsuo, Otsuka Hajime	4. 巻 2021
2. 論文標題 Landscape of modular symmetric flavor models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 001-036
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2021)161	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33件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 Hajime Otsuka
2. 発表標題 Upper bound on the Atiyah-Singer index from tadpole cancellation
3. 学会等名 String phenomenology 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hajime Otsuka
2. 発表標題 Upper bound on the Atiyah-Singer index from tadpole cancellation
3. 学会等名 場の理論と弦理論 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大塚啓
2. 発表標題 Open challenges for string phenomenology
3. 学会等名 Particle Physics and Cosmology from String Compactification
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大塚啓
2. 発表標題 Upper bound on the Atiyah-Singer index from tadpole cancellation
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hajime Otsuka
2. 発表標題 Flavor, CP and Modular Symmetries from the top down and the bottom up
3. 学会等名 KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hajime Otsuka
2. 発表標題 Sequestered String Models imply Split Supersymmetry
3. 学会等名 KEK Theory Workshop 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大塚啓
2. 発表標題 Sequestered String Models imply Split Supersymmetry
3. 学会等名 第129回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大塚啓
2. 発表標題 Modular forms and hierarchical Yukawa couplings in heterotic Calabi-Yau compactifications
3. 学会等名 "Particle Physics and Cosmology from String Compactification" 2nd meeting
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 大塚啓
2. 発表標題 Sequestered String Models imply Split Supersymmetry
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 大塚啓
2. 発表標題 弦理論から迫るフレーバーとCPの物理
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大塚啓
2. 発表標題 モジュラー対称性に基づくフレーバー模型のランドスケープによる補正
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大塚啓
2. 発表標題 Sharpening the Boundaries Between Flux Landscape and Swampland by Tadpole Charge
3. 学会等名 場の理論と弦理論2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hajime Otsuka
2. 発表標題 Modular flavor symmetry in the string EFT
3. 学会等名 Recent development of modular flavor symmetry（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hajime Otsuka
2. 発表標題 Modular symmetry in the SMEFT
3. 学会等名 KEK-PH 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hajime Otsuka
2. 発表標題 Hierarchical structure of physical Yukawa couplings from matter field Kaehler metric
3. 学会等名 KEK-TH 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hajime Otsuka
2. 発表標題 Modular flavor symmetry in the string EFT
3. 学会等名 Bethe Forum “Modular Flavor Symmetries” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大塚啓
2. 発表標題 高次元理論におけるモジュライ安定化機構と時空の発展
3. 学会等名 第128回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大塚啓
2. 発表標題 Discrete symmetries in Type IIB MSSM flux vacua
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大塚啓
2. 発表標題 機械学習を用いた弦理論の真空構造解明
3. 学会等名 数理・データサイエンスに関する教育・研究支援プログラム 研究成果発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大塚啓
2. 発表標題 Modular symmetry in the string EFT
3. 学会等名 Kagoshima Workshop on Particles, Fields and Strings 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hajime Otsuka
2. 発表標題 Small flux superpotential in F-theory compactifications
3. 学会等名 KEK Theory Workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Hajime Otsuka
2. 発表標題 Stringy Origin of Minimal Flavor Violation
3. 学会等名 Recent development of flavor symmetry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hajime Otsuka
2. 発表標題 Small flux superpotential in F-theory compactifications
3. 学会等名 Dark World to Swampland 2021, The 6th IBS-IFT-MultiDark Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hajime Otsuka
2. 発表標題 Hidden structures in the landscape of heterotic line bundle models
3. 学会等名 Strings and Fields 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hajime Otsuka
2. 発表標題 Stringy origin of modular flavor symmetry and spontaneous CP violation
3. 学会等名 SUSY 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hajime Otsuka
2. 発表標題 Symplectic modular symmetry in heterotic string vacua: flavor, CP, and R-symmetries
3. 学会等名 Asia-Pacific Workshop on Particle Physics and Cosmology 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大塚啓
2. 発表標題 Stringy Origin of Minimal Flavor Violation
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 大塚啓
2. 発表標題 Stringy Origin of Minimal Flavor Violation
3. 学会等名 素粒子物理学の進展 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大塚啓
2. 発表標題 Stringy Origin of Minimal Flavor Violation
3. 学会等名 Flavor Physics Workshop 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hajime Otsuka
2. 発表標題 Hidden structures in the landscape of heterotic line bundle models
3. 学会等名 KEK Theory Workshop 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hajime Otsuka
2. 発表標題 Spontaneous CP violation and symplectic modular symmetry in Calabi-Yau compactifications
3. 学会等名 Strings and Fields 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大塚啓
2. 発表標題 Spontaneous CP violation and symplectic modular symmetry in Calabi-Yau compactifications
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 大塚啓
2. 発表標題 Deep learning and k-means clustering in heterotic string vacua with line bundles
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 大塚啓	4. 発行年 2021年
2. 出版社 サイエンス社	5. 総ページ数 7
3. 書名 数理科学 2021年 1月号	

〔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	西村 皐 (Nishimura Satsuki)		
研究協力者	甲斐 貴文 (Kai Takafumi)		
研究協力者	小林 達夫 (Kobayashi Tatsuo)		
研究協力者	石黒 圭弥 (Ishiguro Keiya)		
研究協力者	竹内 万記 (Takeuchi Maki)		

## 6. 研究組織（つづき）

	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	岡田 寛  (Okada Hiroshi)		
研究協力者	檜垣 徹太郎  (Higaki Tetsutaro)		
研究協力者	阿部 慶彦  (Abe Yoshihiko)		
研究協力者	内田 光  (Uchida Hikaru)		
研究協力者	谷本 盛光  (Tanimoto Morimitsu)		
研究協力者	山本 恵  (Yamamoto Kei)		
研究協力者	本間 良則  (Honma Yoshinori)		
研究協力者	那須 海渡  (Nasu Kai to)		

6. 研究組織（つづき）

	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	菊地 渉太  (Kikuchi Shota)		
研究協力者	高田 翔平  (Takada Shohei)		
研究協力者	阪村 豊  (Sakamura Yutaka)		

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			
韓国	Yonsei University	APCTP	Chungnam National University	他1機関
イタリア	University of Bologna	INFN		
ドイツ	Humboldt University			