HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Generative AI Exploration of MSSM-Like Models in E8×E8 Heterotic String Z6-II Orbifold Compactifications [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	見村, 優太
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第16190号
Issue Date	2024-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/94061
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yuta_Mimura_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 審 査 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（理　学）　　氏　名　　見　村　優　太

審査担当者	主査	教　授　小　林　達　夫
	副査	教　授　鈴　木　久　男
	副査	准教授　瀬　戸　治
	副査	講　師　末　廣　一　彦

学 位 論 文 題 名

Generative AI Exploration of MSSM-Like Models in $E_8 \times E_8$
Heterotic String Z_6-II Orbifold Compactifications
（Z_6-Ⅱオービフォールドコンパクト化における $E_8 \times E_8$ ヘテロ
ティック弦理論での MSSM 様モデルの生成 AI による探索に関する研究）

博士学位論文審査等の結果について（報告）

近年、無矛盾な量子重力理論及び物質と相互作用の統一理論の有力な候補として超弦理論に関する研究が盛んに行われている。しかし、高次元理論としては理論の無矛盾性による強い制限により自由度が極めて限られていたが、現実の４次元時空の理論として表すと無数とも言える可能性が生じることが理論の複雑さと困難につながっている。このことは、可能なモデルの分類や現実の素粒子の標準理論を含む理論がその中にどのように含まれるかという研究課題と無数の可能性から現実世界がどのように実現されるかという研究課題につながるが、本論文はモデル探索に生成 AI を利用することにより前者の研究の進展に寄与することを目的としたものである。

超弦理論を４次元の理論として表すコンパクト化の手続きにおいては多数の離散的パラメーターとそれらの間の無矛盾性条件が現れること、現実の標準理論を含有するための条件が満たされるのは稀であることから手探りでモデル探索を行うのは非効率的である。同じパラメーターセットで記述される一つのタイプのコンパクト化においても膨大な可能性があり、相互作用や粒子の種類についての必要条件を満たすモデルは調べつくされていない。そこで、AI を利用して現実的なモデルを探索して発見するという研究動機が生じるが、条件を満たす既知のモデルの数が機械学習の学習データとしては少数であるという問題がある。これに対し、必要な条件が満たされるようにパラメーターの修正を行っていく強化学習という手法もあるが、著者は条件を満たすモデルに潜在する共通性を見つけ出すという観点から教師なし学習によるアプローチの中で問題を克服する研究に取り組んだ。

著者は、まず少数の学習データに基づく機械学習という、幅広い適用が可能な課題に取り組み、特に先行研究や応用例が多い画像学習において手法開発を行った。教師無し学習のアプローチでは、学習データに回転や変色などの変形を行ったデータを加えて学習データ数を増やす augmentation と呼ばれる手法があるが、学習したデータから類似画像の生成を行う使途においては変形の名残として画像の歪みが生じ、output の画像の質や生成効率の観点から十分な手法ではなかった。そこで、著者は augmentation の手法を改良し、学習過程を複数の段階に分け、変形パラメーターの範囲を段階ごとに変える phased augmentation の手法を開発した。この手法では、学習が、学習データの全体的特徴を捉える段階、学習データの細かい特徴を捉える段階、中間的な段階で学習データの多様性を捉える段階を経て効率的に行われると解釈でき、実際に、少数の画像データの学習による類似画像データの生成において、単純な augmentation による生成を凌駕する性能を示している。この研究は単著論文として査読付き雑誌への掲載が決まっており、この研究自体が生成 AI の応用研究に対し、大きく貢献するものである。

著者はこの phased augmentation の手法を本論文の研究に適用し、学習データには含まれない新たなモデルの発見を行い手法の有用性を示した。弦理論におけるモデル探索に適用するにあたっては、連続量をデジタル化した画像データとは異なりパラメーターが本質的に離散的であること、広大なパラメーター空間の中に学習データが散在しており探索対象の所在は簡単に推測できないという問題がある。著者は他の先行研究と組み合わせることにより、前者については Hierarchical Quantized Autoencoder により離散的データの扱いを可能とし、後者については Variational Auto Encoder により学習データを深層学習で潜在空間にマップするときに既知の現実的データが潜在空間で近傍に集まるように学習することで克服した。後者については、学習データにない現実的なモデルにも潜在的な共通性があり、潜在空間においては近傍に位置することを仮説として期待していることが背景にある。著者はこの仮説に基づき、潜在空間の学習データ集合近傍をランダムスキャンしてモデルの再構成を行うことでモデル探索を行った。第一ステップとして手法の有効性を明らかにするための研究であるため探索数は多くないが、学習データに含まれない新たなモデルを一つ発見するとともに、モデルに対する条件を緩めて探索データを解析すると、単純な augmentation よりはるかに効率的な探索が行えていることや、類似モデルがかなり含まれていることが示され、今後のモデル探索に期待がもたれる結果を示している。

これを要するに、著者は、超弦理論の現実的コンパクト化モデルの探索において生成 AI を用いた有用な手法開発及びモデル探索についての成果を得たものであり、超弦理論のモデル探索の研究に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。