

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	量子アニーリングにおけるスピン系の相転移に対する非疑似古典効果
Title(English)	Non-Stoquastic Effects on Phase Transitions in Spin Systems for Quantum Annealing
著者(和文)	高田珠武己
Author(English)	Kabuki Takada
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11366号, 授与年月日:2020年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:西森 秀稔,齋藤 晋,笹本 智弘,古賀 昌久,相川 清隆
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11366号, Conferred date:2020/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第 号			学位申請者氏名		高田 珠武己	
論文審査 審査員		氏 名	職 名		氏 名	職 名	
	主査	西森 秀稔	教授	審査員	相川 清隆	准教授	
	審査員	斎藤 晋	教授				
		笹本 智弘	教授				
		古賀 昌久	准教授				

論文審査の要旨（2000 字程度）

本論文はNon-Stoquastic Effects on Phase Transitions in Spin Systems for Quantum Annealingと題し、量子アニーリングにおける非疑似古典効果を解析的に研究した内容の報告である。本文は6章から構成されている。

第1章 Introduction では、まず、統計力学のイジング模型が組み合わせ最適化問題を表現することができ、量子アニーリングによるイジング模型基底状態探索が最適化問題の解を与える汎用的な近似解法になっていることを述べている。横磁場イジング模型で表現される通常の量子アニーリングは、古典コンピュータでシミュレート可能であるという意味の疑似古典性を持ち、本質的な量子効果の導入およびそれによる量子加速を達成するには、非疑似古典効果を取り入れる必要があることを指摘している。こうした背景に基づいて、本論文では、3種類の問題について非疑似古典効果が持つ影響とその限界を解明することが目標であるとしている。

第2章 Quantum annealing では、量子アニーリング全般についての導入と非疑似古典効果の解説を記述している。組み合わせ最適化問題がイジング模型の基底状態探索で表されることを、巡回セールスマン問題の例で解説し、そのエネルギー地形（エネルギーのスピン配位への依存性）が極めて複雑であることを示している。量子効果を横磁場の形で導入する伝統的な量子アニーリングの定式化を述べ、計算の途中で生じる量子相転移の次数が計算量と直接的な関係にあり、1次相転移が存在すると計算が困難になることを指摘している。その解決法の候補として非疑似古典項を導入し、それが計算の困難の回避に成功した例があることを指摘している。

第3章 Mean-field weak-strong cluster model から3章にわたって申請者の研究内容が記載されている。第3章では、平均場的な全結合を持つ強弱クラスター模型を解析している。Albash が提案し、小さな系の数値対角化によって非疑似古典効果の有効性が示唆されているこの問題を、申請者は解析的な方法で包括的に解決している。熱力学的極限での古典解析と、その周りの量子揺らぎを系統的に評価することにより、強クラスター内、弱クラスター内、強弱クラスター間の3種の非疑似古典項の取り入れ方について1次相転移が回避できる条件を解明し、必ずしも非疑似古典的でなくてもある種の相互作用（XX 相互作用）の適切な導入が有効であることを示している。エネルギーギャップも定量

的に求め、数値計算がなされている範囲ではその結果と一致していることを確認している。また、非一様磁場についてもその効果を明らかにしている。

第4章 Weak-strong cluster model with sparse intercluster interactions においては、第3章と同様の全結合相互作用を強弱の各クラスター内に入れると同時に、クラスター間には疎結合の XX 相互作用を入れてその効果を調べている。ここでは第3章と異なり、疎結合を扱うために汎関数積分法を援用した統計力学的な解析を用いている。そして、疎結合の場合も、必ずしも非疑似古典的でなくても XX 相互作用の適切な導入が有効であるが、全結合の場合よりもその有効性の範囲がさらに広がっているとしている。非一様磁場についても、全結合と同様の効果がみられるとしている。

第5章 Frustrated Ising ladder では、第3章、第4章の全結合モデルとは対照的に、より現実問題に近い疎結合の1次元梯子格子上のフラストレートした問題の相転移を扱っている。この問題は、横磁場のみの伝統的な量子アニーリングでは、トポロジカルな起源を持つ1次相転移が生じる非常に困難な問題であることが知られており、非疑似古典項がどのような効果を持つかは興味深い。申請者は、低エネルギー状態を系統的に取り込む実空間繰り込み群をこの問題に適用している。対称性を保つよう巧みな方法で基底を選ぶとともに、それらに現れる係数を変分法で決定するという独自の手法を開発している。その結果、XX 相互作用による非疑似古典項は1次転移を除くことが出来ないという結論に達している。得られた相図を DMRG による大規模な数値計算の結果と比較し、定性的のみならず定量的にも一致が見られることを述べている。そして、XX 型の非疑似古典効果はトポロジカルな起源の1次相転移を解消することは出来ないが、計算量の評価において指数の肩の係数を小さくするという意味で多少の定量的な改善はもたらすと結論している。

第6章 Conclusion ではこれまでの議論を振り返り、非疑似古典効果として XX 型の相互作用を取り入れることの有効性についてまとめ、必ずしも非疑似古典的でなくても XX 相互作用が1次相転移の回避に有効な場合があると指摘し、非一様磁場制御も含めてデバイス上でのこのような効果の実現が望まれるとしている。また、現実問題の表現に近い疎結合の問題の系統的な解析法の確立の必要性にも触れている。

以上の通り、本論文は量子アニーリングの効率向上の視点からの量子1次相転移に対する非疑似古典効果の研究であり、系統的、解析的な研究がほとんど存在せずいくつかの小規模数値計算のみによって手探りで研究が進められているこの分野において重要なステップを築いている。研究内容およびその論文としての表現のいずれにおいても、博士（理学）を授与するにふさわしい水準に達していると判断される。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。