

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Simulation of quantum Griffiths singularity using a programmable quantum annealer
著者(和文)	西村光嗣
Author(English)	Kohji Nishimura
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11369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,村上 修一,樺島 祥介,田中 秀数,西田 祐介
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11369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	西村 光嗣		
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	西田 祐介	准教授
	審査員	村上 修一	教授			
		樺島 祥介	教授			
		田中 秀数	教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は Simulation of quantum Griffiths singularity using a programmable quantum annealer と題し、6つの章と4つの付録から構成されている。グリフィス特異性と呼ばれる特異な相転移現象を量子アニーリングマシンで実験的に検証し、古典計算機上でのシミュレーションと比較した研究の報告である。

第1章 Introduction では、量子力学の歴史に触れた後、量子計算全般の状況を概観している。そして、量子アニーリングの量子シミュレーションへの応用の意義について述べ、グリフィス特異性の理論を量子アニーリング装置 (D-Wave マシン) で検証する意味について論述している。

第2章 Quantum annealing and its physical implementation では、量子アニーリングへの一般的な導入を記述するとともに、D-Wave マシンの特徴を解説している。ランダムな相互作用を持つイジング模型で表されるスピングラスの性質を簡単に述べたあと、典型的な組み合わせ最適化問題である巡回セールスマン問題をイジング模型で表現して、これらに代表される困難な組み合わせ最適化問題を解くための汎用近似解法である量子アニーリングを導入している。そして、量子アニーリングをハードウェアとして実装した D-Wave マシンの特性、利用法、注意点などを今回のグリフィス特異性の実験の視点から述べている。

第3章 Griffiths-McCoy singularity では、本論文の中心課題であるグリフィス特異性を解説するとともに、その実験的な検出法を述べている。まず、古典イジング模型で相互作用がランダムに希釈されているとき、希釈される前の強磁性相転移点以下の温度では、希釈により常磁性状態になっている温度領域でも磁化や磁化率に磁場の関数としての特異性 (グリフィス特異性) が現れるが、極めて弱いために実験的な検出が困難であるとしている。ところが横磁場を導入した量子イジング模型になると、トロッター方向の有効相互作用が大きいためにグリフィス特異性の効果が大きくなり、磁化率や非線形磁化率に温度や外部磁場の関数としてべき的な特異性が現れるとしている。そして、数値シミュレーションや量子デバイスなどでの実験でこの特異性を確認するには、磁化率や非線形磁化率の分布関数のすそ野のべきを測定すればよいことを導いている。

第4章と第5章が本論文の中心をなす。第4章 Quantum Monte Carlo simulation では、D-Wave マシンで実現されているキメラグラフという特別な形の格子上で量子モンテカルロ シミュレーションを実行し、相転移やグリフィス特異性の有無を検証した結果を記述している。問題設定と解析法を述べた後、ビンダー比と磁化のデータから転移点と臨界指数を決めている。さらに、局所磁化率、局所非

線形磁化率、磁化率、非線形磁化率の度数分布に前章の理論を適用して、グリフィス特異性の指標となる指数 d/z' を評価している。この指数が 1 あるいは 3 を下回るかどうかを見ることにより、常磁性相内で線形磁化率は発散せず、非線形磁化率が発散する領域、すなわちグリフィス相が存在すると結論している。これは、キメラグラフ上でグリフィス特異性の存在が指摘された最初の例である。

第 5 章 Experiments on the D-Wave quantum annealer では、D-Wave マシン上の実験について記述している。測定する物理量やデータのとり方を解説した後、磁化、ビンダー比、磁化率のデータを示し、デバイス上の量子ビットの操作特性、特にアニーリングを途中で停止して急激に横磁場を消して測定するアニール・クエンチというプロトコルが完全に実施するのが難しいため、どうしても強磁性側へのデータの系統誤差が出ると述べている。これを踏まえたうえで、磁化率及び非線形磁化率のピークの位置のサイズ依存性から転移点を推定し、それが量子モンテカルロの転移点に近い値であるとしている。そして、磁化率の分布の解析からグリフィス特異性を特徴づける指数を推定し、誤差が大きいながらグリフィス相を特徴づける非線形磁化率の発散が存在するとしても矛盾がないと結論付けている。

第 6 章 Conclusion では全体を振り返って要約を述べるとともに、D-Wave マシンによるデータだけからグリフィス相（グリフィス特異性を伴う常磁性相）の存在を断定するのが容易ではない理由について考察し、超伝導量子ビットのもつバイアスや制御性の限界を指摘している。さらに、古典コンピュータ上でシミュレートできる問題を量子デバイス上で実行する意義について検討し、後者が実際の量子現象を物理的に引き起こしている側面を強調するとともに、将来的には古典コンピュータでシミュレート出来ない領域にまで拡張される可能性も指摘している。

以上の通り、本論文は量子コンピューティングの主要な目的である量子シミュレーションを実デバイス上で実行し、グリフィス特異性という異常な現象が実際に起きている可能性を指摘した研究成果を報告している。量子デバイス上での量子シミュレーションは立ち上がったばかりの分野であり、定量的な正確さを達成するまでにはまだ越えなければならない壁があるが、定性的にせよこの方向に向けての第 1 歩を記した重要な研究である。論文の記述も申請者の幅広い知識を反映した明快な文章であり、博士（理学）の称号を授与するにふさわしいと判断される。