

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2019

課題番号：26287086

研究課題名（和文）量子アニーリングにおける非断熱効果と誤り訂正

研究課題名（英文）Diabatic effects and error correction in quantum annealing

研究代表者

西森 秀稔（Nishimori, Hidetoshi）

東京工業大学・科学技術創成研究院・特任教授

研究者番号：70172715

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,200,000円

研究成果の概要（和文）：量子アニーリングの特性を理論的に調べるには、断熱極限においてエネルギーギャップの系の大きさ依存性を明らかにする方法がよく用いられている。本研究では、より現実に近い状況で起きる非断熱効果を明らかにするため、リバースアニーリングの枠組みにおいて断熱および非断熱両方の側面を解析的および数値的に研究した。その結果、断熱条件の下での静的な相図の構造が非断熱なダイナミクスの特性に直接反映されていることが明らかになり、より解析の容易な静的相図の解明の意義が明確になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子アニーリングは組み合わせ最適化問題を解くための量子力学的な手法である。その理論的な研究においては、系のパラメータが十分ゆっくりと変化する極限の解析が主に行われてきたが、現実との対応が必ずしも明らかでない。本研究は、ゆっくりとした極限での解析がより現実的な状況に対しても有用な情報を与えることを明らかにした。これにより、量子アニーリングの理論的解析の基盤がより強化された。

研究成果の概要（英文）：To understand the characteristics of quantum annealing, it is often the case that the size dependence of energy gap is studied in the limit of adiabatic evolution. In the present study, in order to understand diabatic effects, which should correspond to realistic situations, we have studied analytically and numerically both adiabatic and diabatic aspects in the framework of reverse annealing. We have clarified that the structure of static (adiabatic) phase diagram is directly reflected in the dynamic diabatic characteristics. This means that analysis of adiabatic properties, which is easier, is useful to understand diabatic effects.

研究分野：量子アニーリング

キーワード：量子アニーリング 量子断熱計算

1. 研究開始当初の背景

量子アニーリングの性能評価に関する理論的研究は、主に各時刻でのハミルトニアン¹の静的性質の解明を中心に行われてきた。例えば、基底状態と第 1 励起状態のエネルギーギャップのサイズ依存性を調べることで、断熱定理を通して計算時間を評価する。しかし、現実のデバイスは断熱的に動作しているとは限らないため、断熱定理に立脚した理論研究の有用性、適用可能性は必ずしも明らかではない。

2. 研究の目的

同一の問題に対して静的な性質と動的な性質を同時に調べることで、静的な性質と動的な性質の対応関係を明らかにし、非断熱効果が量子アニーリングの特性に及ぼす影響を系統的に明らかにする。

3. 研究の方法

強磁性相互作用を持つ p スピン模型 (p = 3) について、まず、平衡統計力学の手法により平衡状態の相図を描く。静的な性質を解析的手法により明らかにするのである。次に、時間依存シュレディンガー方程式を大規模な系について直接数値的に解くことにより、平衡状態の相図と動的な性質の対応関係を明らかにする。リバースアニーリングの枠組みにおいてサイトの入れ替えに対する対称性を持つ平均場的な p スピン模型を採用することにより、静的および動的な性質に関する解析的、数値的な研究が可能になる。

4. 研究成果

まず、平衡状態の統計力学による解析で相図を描くことにより、初期条件やパラメータの時間依存性に応じてリバースアニーリングが 1 次相転移を解消するかどうか²が明らかになった。最適解にある程度以上近い初期条件を選び、初期条件の影響とコスト関数の影響を適切に制御することにより、通常の量子アニーリングで遭遇する 1 次相転移を回避できる場合があることが分かった (図 1)。

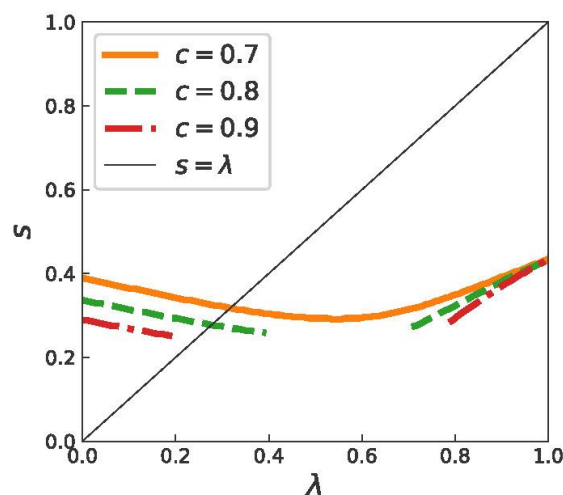


図 1 アニーリングパラメータの関数としての平衡状態の相図

次に同じ問題に対して時間依存シュレディンガー方程式を比較的大規模な系について直接数値的に解き、平衡状態の相図で明らかになった 1 次相転移の消失条件と計算時間の関連を調べた。その結果、平衡相図で 1 次相転移を回避できるパラメータを採用すると計算時間 (Time to solution、TTS) が系のサイズに対して多項式的に増大するのに対して、1 次相転移を通る場合には指数関数的になることが明らかになった (図 2)。

TTS は静的な理論とは直接関係がない動的な指標であり、非断熱性が直接きいていると思われるにもかかわらず、平衡 (静的) な相図とよく対応した結果が得られた。これは、より解析が困難な動的性質に対して、平衡状態の研究が重要な手掛かりを与えることを示唆しており、今後の展開の足掛かりとして重要である。

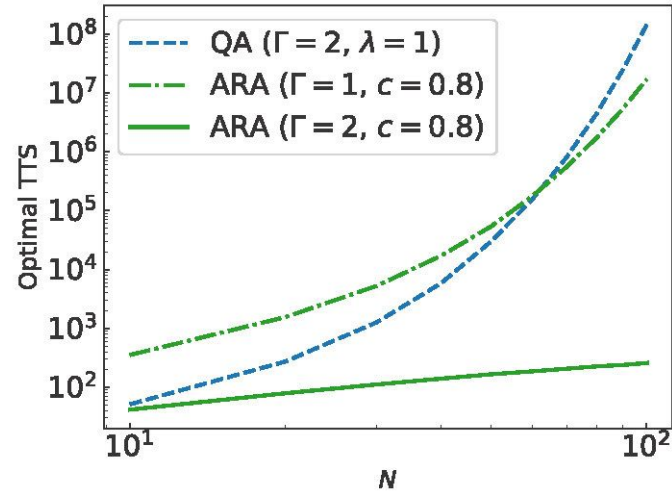


図 2 アニーリングの経路に応じた計算時間 TTS のサイズ依存性。QA は通常の量子アニーリング、ARA ($\Gamma=1$) は 1 次転移を通過する経路での TTS、ARA ($\Gamma=2$) は 1 次転移を通過しない経路での TTS。適切な経路 (ARA ($\Gamma=2$)) の場合には 1 次転移が存在しないことに対応して TTS が指数ではなく多項式的に増大し、計算時間が大幅に緩和していることが分かる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yuki Susa, Yu Yamashiro, Masayuki Yamamoto, Itay Hen, Daniel A. Lidar, and Hidetoshi Nishimori	4. 巻 98
2. 論文標題 Quantum annealing of the p -spin model under inhomogeneous transverse field driving	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 42326
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevA.98.042326	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 Masaki Ohkuwa, Hidetoshi Nishimori, and Daniel A. Lidar	4. 巻 98
2. 論文標題 Reverse annealing for the fully connected p -spin model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 22314
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevA.98.022314	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 Yuki Susa, Yu Yamashiro, Masayuki Yamamoto, and Hidetoshi Nishimori	4. 巻 87
2. 論文標題 Exponential Speedup of Quantum Annealing by Inhomogeneous Driving of the Transverse Field	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 23002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.88.054006	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 Shunji Matsuura, Hidetoshi Nishimori, Walter Vinci, Tameem Albash, and Daniel A. Lidar	4. 巻 95
2. 論文標題 Quantum-annealing correction at finite temperature: Ferromagnetic p -spin models	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 22308
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.95.022308	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 Manaka Okuyama, Yuki Yamanaka, Hidetoshi Nishimori and Marek Rams	4. 巻 97
2. 論文標題 Anomalous behavior of the energy gap in the one-dimensional quantum XY model	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 52116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.92.052116	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 Kazuya Kaneko and Hidetoshi Nishimori	4. 巻 84
2. 論文標題 Adiabatic approximation for the imaginary-time Schrodinger equation and its application to simulated annealing	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 94001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.094001	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 Yuya Seki and Hidetoshi Nishimori	4. 巻 48
2. 論文標題 Quantum annealing with antiferromagnetic transverse interactions for the Hopfield model	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Journal of Physics A	6. 最初と最後の頁 335301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1088/1751-8113/48/33/335301	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 Hidetoshi Nishimori, Junichi Tsuda and Sergey Knysh	4. 巻 91
2. 論文標題 Comparative study of the performance of quantum annealing and simulated annealing	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 12104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.91.012104	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 Yu Yamashiro, Masaki Ohkuwa, Hidetoshi Nishimori, and Daniel A. Lidar	4. 巻 100
2. 論文標題 Dynamics of reverse annealing for the fully connected p-spin model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 2321
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevA.100.052321	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 Kabuki Takada, Yu Yamashiro, and Hidetoshi Nishimori	4. 巻 89
2. 論文標題 Mean-Field Solution of the Weak-Strong Cluster Problem for Quantum Annealing with Stoquastic and Non-Stoquastic Catalysts	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 44001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7566/JPSJ.89.044001	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10件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Hidetoshi Nishimori
2. 発表標題 Performance enhancement of quantum annealing by non-traditional quantum driving
3. 学会等名 Quantum Computing Materials Challenges (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hidetoshi Nishimori
2. 発表標題 Exponential Speedup of Quantum Annealing by Inhomogeneous Driving of the Transverse Field
3. 学会等名 Aspen Winter Conference on Advances in Quantum Algorithms and Computation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hidetoshi Nishimori
2. 発表標題 Quantum annealing: A biased perspective
3. 学会等名 New Horizons of Quantum and Classical Information 2015 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Hidetoshi Nishimori
2. 発表標題 Relation between classical stochastic dynamics and quantum annealing
3. 学会等名 Yukawa International Seminar 2015 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Hidetoshi Nishimori
2. 発表標題 Quantum annealing and quantum phase transitions
3. 学会等名 East Asia Joint Seminar on Statistical Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Hidetoshi Nishimori
2. 発表標題 Bayesian inference of the Ising model ground state out of noisy data
3. 学会等名 New-Generation Computers: Quantum Annealing and Coherent Computing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Hidetoshi Nishimori
2. 発表標題 Mean-field analysis of quantum annealing with XX-type terms
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2016 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hidetoshi Nishimori
2. 発表標題 Is quantum annealing equivalent to simulated annealing?
3. 学会等名 Third International Workshop on Adiabatic Quantum Computing (招待講演)
4. 発表年 2014年

1. 発表者名 Hidetoshi Nishimori
2. 発表標題 Overview of the theory of spin glasses and its applications to quantum codes
3. 学会等名 International workshop on quantum LDPC codes (招待講演)
4. 発表年 2014年

1. 発表者名 Hidetoshi Nishimori
2. 発表標題 Theory and applications of quantum annealing
3. 学会等名 Physics of quantum information processing (招待講演)
4. 発表年 2014年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

西森秀稔
<http://www.qa.iir.titech.ac.jp/~nishimori/>

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