

Title	量子古典ハイブリッド計算技術による物質シミュレーション高速化手法の研究
Sub Title	High performance computing for materials simulation by quantum-classical hybrid algorithms
Author	田中, 宗(Tanaka, Shu) 白井, 達彦(Shirai, Tatsuhiko)
Publisher	
Publication year	2024
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2023.)
JaLC DOI	
Abstract	物質シミュレーションの高速化を目指し，量子古典ハイブリッド計算技術の研究を実施した．第一に，物質シミュレーションの高速化につながることが期待される，量子アニーリングマシンを含むイジングマシンやゲート式量子コンピュータの性能を引き出すアルゴリズム開発を行った．第二に，量子アニーリングマシンを含むイジングマシンによるブラックボックス最適化手法である，Factorization Machine with Quantum Annealing (FMQA) について，適用範囲を広げるための方法を検討した． We conducted research on quantum-classical hybrid computation techniques to speed up materials simulations. First, we developed algorithms to exploit the performance of Ising machines, including quantum annealing machines and gated quantum computers, which are expected to speed up materials simulations. Second, we studied how to extend the application of Factorization Machine with Quantum Annealing (FMQA), a black-box optimization method that uses Ising machines, to quantum annealing machines.
Notes	研究種目：基盤研究 (C) (一般) 研究期間：2021～2023 課題番号：21K03391 研究分野：量子コンピューティング, イジングマシン, 統計力学, 計算物理学
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_21K03391seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

令和 6 年 5 月 2 4 日現在

機関番号：3 2 6 1 2

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021 ~ 2023

課題番号：2 1 K 0 3 3 9 1

研究課題名（和文）量子古典ハイブリッド計算技術による物質シミュレーション高速化手法の研究

研究課題名（英文）High Performance Computing for Materials Simulation by Quantum-Classical Hybrid Algorithms

研究代表者

田中 宗（TANAKA, Shu）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・准教授

研究者番号：4 0 5 0 7 8 3 6

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）：物質シミュレーションの高速化を目指し、量子古典ハイブリッド計算技術の研究を実施した。第一に、物質シミュレーションの高速化につながることが期待される、量子アニーリングマシンを含むイジングマシンやゲート式量子コンピュータの性能を引き出すアルゴリズム開発を行った。第二に、量子アニーリングマシンを含むイジングマシンによるブラックボックス最適化手法である、Factorization Machine with Quantum Annealing (FMQA) について、適用範囲を広げるための方法を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子コンピューティング技術の計算性能は強く期待されており、その有望な応用先として物質シミュレーションの高速化が挙げられる。従来コンピューティング技術と量子コンピューティング技術のそれぞれの良さを活かしたハイブリッド計算手法の構築ならびに、提案手法の性能の高さを理論付ける数理的背景の解明が重要な課題である。本研究成果は、今後、物質シミュレーションの高速化を本格的に実施するための基盤となるものである。

研究成果の概要（英文）：We conducted research on quantum-classical hybrid computation techniques to speed up materials simulations. First, we developed algorithms to exploit the performance of Ising machines, including quantum annealing machines and gated quantum computers, which are expected to speed up materials simulations. Second, we studied how to extend the application of Factorization Machine with Quantum Annealing (FMQA), a black-box optimization method that uses Ising machines, to quantum annealing machines.

研究分野：量子コンピューティング，イジングマシン，統計力学，計算物理学

キーワード：量子コンピューティング イジングマシン 量子古典ハイブリッド計算 ブラックボックス最適化

1. 研究開始当初の背景

マテリアルズ・インフォマティクスは情報科学の技術を活用し、材料科学における諸問題を解決する学問分野である。マテリアルズ・インフォマティクスの主たる課題は3つあり、(A)機械学習等データ処理技術によるデータの精密化、(B)大量の計算結果や実験結果からのデータベース生成、(C)所望の物性値を発現する物質構造の予言を目指したシミュレーションの試行回数削減、が挙げられる。(A)および(B)については様々な適用事例が豊富に存在する。一方(C)については、以下に述べる本質的困難が内在するため、現段階では限定的な成果が得られているのみである。

(C)における本質的困難は2つある。第一の困難は、物質構造が複雑になるに従い、探索空間が巨大化されるため、シミュレーションの計算時間が増大すること、第二の困難は、物質構造と物性値をつなぐ明確な関係(関数)が未知であるということである。これらの課題に対応する新しい計算技術を構築する必要があると考え、本研究の着想に至った。

以下、本研究の準備状況について述べる。田中(研究代表者)と白井(研究分担者)は、量子アニーリングやゲート式量子コンピュータによって温度効果を模倣する方法を提案し、量子コンピューティング技術を用いた量子シミュレーションの適用範囲を拡大することに成功した[T. Shirai, S. Tanaka, T. Kadowaki, Japan-Netherlands Quantum Conference 2019]。これは上記の第一の課題に密接に関係する。また、田中(研究代表者)は、量子アニーリングを元にブラックボックス最適化を実行する方法を構築し、量子アニーリングマシンを用いて提案手法が正しく動作することを確認することに成功した[K. Kitai, S. Tanaka, et al., Phys. Rev. Research, 2, 013319 (2020)]。これは上記の第二の課題に密接に関係する。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、量子古典ハイブリッド計算技術による物質シミュレーション手法を確立し、マテリアルズ・インフォマティクスの知見を組み合わせることで、物質シミュレーションの高速化を実現することである。

3. 研究の方法

本研究課題では大きく分けて2つのトピックに対する研究を行った。第一に、物質シミュレーションの高速化につながることを期待される、量子アニーリングマシンを含むイジングマシンやゲート式量子コンピュータの性能を引き出すアルゴリズム構築である。これを実施するにあたり、量子コンピューティングの動作を模倣するシミュレータを作成した。また、数理的あるいは理論物理的手法を取り入れることにより、新規アルゴリズムの構築を行った。第二に、量子アニーリングマシンを含むイジングマシンによるブラックボックス最適化手法の構築である。これを実施するにあたり、量子アニーリングマシンを含む各種イジングマシンの実機を用いた。また、機械学習部分についてはソフトウェアを作成した。

4. 研究成果

2021年度は主に以下の研究を行った。第一に、量子コンピューティング技術の一つである量子アニーリングの性能を理論的に検討するための研究、第二に、ブラックボックス連続最適化に対する量子アニーリング等イジングマシンの適用手法の提案の研究である。

第一の研究では、相互作用が非一様な1次元イジングモデルに対し、相互作用の非一様性と相関のある非一様性を課した横磁場を印加した統計力学モデルを用いた解析を行った。量子アニーリングにおいては、エネルギーギャップが小さくなることにより、その性能が低減してしまうという課題がある。エネルギーギャップが小さくなる問題は様々なものが知られているが、中でも、量子相転移を引き起こす系については、系統的な解析が可能であるため、理論的に量子アニーリングの検討を進める上での雛形となる。そのような背景から、上記のモデルを取り扱った。本研究で取り扱うモデルは、自由フェルミオン系に変換することが可能である。そのため、大規模数値計算により、エネルギーギャップのシステムサイズ依存性、ならびに、動的臨界指数を得ることが可能である。その結果、相互作用の非一様性と相関のある非一様性を横磁場に課した場合、相互作用の非一様性とは相関の無い非一様性を横磁場に課した場合と量子相転移のユニバーサリティクラスが変わったことを見出した。また、動的臨界指数の上限並びに下限を解析的に得ることに成功した。この結果は、Annals of Physicsにて報告した。

第二の研究では、ブラックボックス連続最適化に対し量子アニーリング等イジングマシンを適用する手法を新たに提案した。本研究成果は、本研究課題で狙う物質シミュレーションの高速化につながると期待される。本研究成果は、プレプリントサーバ (arXiv:2104.14778) や国際会議 AQC2021 にて報告した。

2022 年度は、主に以下の 2 点の研究を行った。

第一に、物質シミュレーションの高速化につながることが期待される、量子アニーリングマシンを含むイジングマシンやゲート式量子コンピュータの性能を引き出すアルゴリズム開発を行った。具体的には、対象とする問題に含まれる制約条件を満たす状態間を量子遷移する方法の検討や、イジングモデルの固有エネルギーを変えずに、状態間のハミング距離のみ変える「エネルギー地形変換」、また、以下に述べる「マージ手法」や「スピン変数消去法」を提案した。「マージ手法」とは、局所解から効率よく脱出する手法として、単スピントリップを動作原理とするイジングマシンにおいてマルチスピントリップと等価な状態遷移を可能にする手法である。これを典型的な組合せ最適化問題に対して適用し、従来手法に対して残留エネルギー（イジングマシンの評価指標の一つ）を削減することに成功した。「スピン変数消去法」とは、線形制約をもつ組合せ最適化問題を効率的かつ高精度に解くための手法である。イジングマシンは入力可能な変数の個数に制限があるため、組合せ最適化問題を少ない変数の個数で定式化することが重要となる。標準的に用いられているペナルティ法と比較して、スピン変数消去法はより少ない変数の個数で組合せ最適化問題を定式化できる。この手法により、より大規模な組合せ最適化問題をイジング計算機で取り扱うことが可能となった。

第二に、量子アニーリングマシンを含むイジングマシンによるブラックボックス最適化手法について、我々の提案手法の適用範囲を広げるための方法を検討した。複数の目的関数からなる多目的ブラックボックス最適化や、多値変数の場合についてのブラックボックス最適化に対応可能な方法を構築した。本研究成果は、プレプリントサーバ (arXiv:2209.01016) や、国際会議 AQC2022 等で報告した。

2023 年度は、2022 年度までに得られた成果を総仕上げすることに専念した。具体的には以下の通りである。第一に、物質シミュレーションの高速化につながることが期待される、量子アニーリングマシンを含むイジングマシンやゲート式量子コンピュータの性能を引き出すアルゴリズム構築を行った。具体的には、対象とする問題に含まれる制約条件を満たす状態間を量子遷移する方法の検討や、イジングモデルの固有エネルギーを変えずに、状態間のハミング距離のみ変える「エネルギー地形変換」、また、「マージ手法」や「スピン変数消去法」を提案した。また、制約条件付き問題に対する量子古典ハイブリッドアルゴリズムとして、「巨大近傍探索アルゴリズム」や「サンプルパーシステンスに基づく固定アルゴリズム」、「制約適合処理手法を組み込んだ量子アルゴリズム」の構築と評価を行った。このうち、「マージ手法」、「スピン変数消去法」、「制約適合処理手法を組み込んだ量子アルゴリズム」については、所属機関からそれぞれの成果についてプレスリリースを発出し、新聞等で取り上げられた。

第二に、量子アニーリングマシンを含むイジングマシンによるブラックボックス最適化手法について、我々の提案手法の適用範囲を広げるための方法を検討した。複数の目的関数からなる多目的ブラックボックス最適化や、多値変数の場合についてのブラックボックス最適化に対応可能な方法を構築した。加えて、材料科学分野の課題に対し我々の提案手法を適用し、その評価を行った。その結果、従来手法に比べて優位性があることを確認した。本研究成果は、国際論文誌や国際会議 AQC2023 等で報告した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shirai Tatsuhiko, Togawa Nozomu	4. 巻 72
2. 論文標題 Multi-spin-flip engineering in an Ising machine	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Computers	6. 最初と最後の頁 759 ~ 771
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TC.2022.3178325	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 Shirai Tatsuhiko, Togawa Nozomu	4. 巻 -
2. 論文標題 Spin-Variable Reduction Method for Handling Linear Equality Constraints in Ising Machines	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Computers	6. 最初と最後の頁 1 ~ 14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TC.2023.3239539	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 Shirai Tatsuhiko, Tanaka Shu	4. 巻 435
2. 論文標題 Exact bounds for dynamical critical exponents of transverse-field Ising chains with a correlated disorder	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Annals of Physics	6. 最初と最後の頁 168483 ~ 168483
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.aop.2021.168483	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 Tamura Kensuke, Shirai Tatsuhiko, Katsura Hosho, Tanaka Shu, Togawa Nozomu	4. 巻 9
2. 論文標題 Performance Comparison of Typical Binary-Integer Encodings in an Ising Machine	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 81032 ~ 81039
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2021.3081685	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 -

〔学会発表〕 計65件（うち招待講演 22件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Shuta Kikuchi, Nozomu Togawa, and Shu Tanaka
2. 発表標題 Performance of quantum annealing with pre-processing by a non-quantumtype Ising machine
3. 学会等名 Adiabatic Quantum Computing Conference 2022 (AQC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuya Seki, Ryo Tamura, and Shu Tanaka
2. 発表標題 Performance Analysis of Factorization Machine with Annealing using Integer-Encoding Methods
3. 学会等名 Adiabatic Quantum Computing Conference 2022 (AQC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Kanai and Shu Tanaka
2. 発表標題 Energy Landscape Transformation of Ising Problem in Quantum Annealing and Simulated Annealing
3. 学会等名 Adiabatic Quantum Computing Conference 2022 (AQC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuta Otsubo, Tatsuhiko Shirai, and Shu Tanaka
2. 発表標題 An additional quantum fluctuation improves quantum annealing for problems with an equality constraint
3. 学会等名 Adiabatic Quantum Computing Conference 2022 (AQC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1．発表者名 Kotaro Takahashi, Shuta Kikuchi, and Shu Tanaka
2．発表標題 Properties of integer-binary encodings for simulated-annealing based Ising machines
3．学会等名 Adiabatic Quantum Computing Conference 2022 (AQCC2022) (国際学会)
4．発表年 2022年

1．発表者名 Tatsuhiko Shirai and Nozomu Togawa
2．発表標題 Ising machine multi-spin flip method
3．学会等名 Adiabatic Quantum Computing Conference 2022 (AQCC2022) (国際学会)
4．発表年 2022年

1．発表者名 田中 宗
2．発表標題 製造領域における量子コンピューティング応用事例探索の研究開発の現状と今後の課題
3．学会等名 Biz/Zine Day 2022 Summer (招待講演)
4．発表年 2022年

1．発表者名 田中 宗
2．発表標題 量子アニーリング等イジングマシンの研究開発の現状と今後の課題
3．学会等名 AI20T人材育成スクール (招待講演)
4．発表年 2022年

1．発表者名 田中 宗
2．発表標題 量子アニーリング技術の現状と今後の課題
3．学会等名 2022年度産応協対話交流会講習会（招待講演）
4．発表年 2022年

1．発表者名 田中 宗
2．発表標題 量子アニーリング等イジングマシンを用いた応用研究
3．学会等名 QPRACワークショップ（招待講演）
4．発表年 2022年

1．発表者名 白井 達彦，戸川 望
2．発表標題 イジング計算機向け変数消去法
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 金井 博志，田中 宗
2．発表標題 各種アニーリングにおけるイジング模型に対するエネルギーランドスケープ変換の効果
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 菊池 脩太, 戸川 望, 田中 宗
2. 発表標題 量子アニーリングマシンと非量子イジングマシンを利用したハイブリッド最適化手法に向けた解析
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 関 優也, 田村 亮, 田中 宗
2. 発表標題 グラフ上の Factorization Machine とイジングマシンを用いたブラックボックス最適化
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 福田 瞳輝也, 山下 将司, 関 優也, 田中 宗
2. 発表標題 制約条件を有するブラックボックス最適化問題に対するイジングマシン適用手法
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 高橋 虎太郎, 菊池 脩太, 田中 宗
2. 発表標題 イジングマシンにおける整数・バイナリ変換の有限温度特性
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 大坪 優太，白井 達彦，田中 宗
2．発表標題 量子揺らぎ追加による等式制約問題に対する量子アニーリングの改善
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 田中 宗
2．発表標題 量子アニーリング等イジングマシン研究の現状と今後の課題
3．学会等名 第34回RAMP数理最適化シンポジウム（RAMP 2022）（招待講演）
4．発表年 2022年

1．発表者名 田中 宗
2．発表標題 量子コンピューティングとAIの融合によるスマート製造
3．学会等名 イノベーション・ジャパン2022
4．発表年 2022年

1．発表者名 田中 宗
2．発表標題 量子コンピューティング技術の現在地と今後の展望
3．学会等名 石油学会第10回次世代天然ガス利用を考える若手勉強会（招待講演）
4．発表年 2022年

1．発表者名 金井 博志，田中 宗
2．発表標題 イジングマシンに対するエネルギー地形変換の適用
3．学会等名 第7回量子ソフトウェア研究発表会
4．発表年 2022年

1．発表者名 田中 宗
2．発表標題 量子アニーリング等イジングマシンの研究開発の現状と展望
3．学会等名 中部大学2022年度第5回CMSAI コロキウム（招待講演）
4．発表年 2022年

1．発表者名 網野 あかね，服部 智大，菊池 脩太，田中 宗
2．発表標題 異種イジングマシンによるハイブリッドアルゴリズムの提案
3．学会等名 第47回量子情報技術研究会（QIT47）
4．発表年 2022年

1．発表者名 日野 幹太，田中 宗
2．発表標題 イジングマシンに対する誤り緩和手法の静的・動的特性
3．学会等名 第47回量子情報技術研究会（QIT47）
4．発表年 2022年

1. 発表者名 田中 宗
2. 発表標題 量子アニーリング・イジングマシンの基礎と応用
3. 学会等名 第12回量子化学スクール（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 宗
2. 発表標題 次世代アクセラレータと社会実装
3. 学会等名 第2回メディカル・エマージングテクノロジーフォーラム（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 宗，関 優也
2. 発表標題 量子コンピューティング技術とAIの融合による最適化処理の高速化
3. 学会等名 KEIO TECHNO MALL 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 宗
2. 発表標題 量子アニーリングの基礎と社会応用
3. 学会等名 NICT Quantum Camp 2022年度セミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shuta Kikuchi, Nozomu Togawa, and Shu Tanaka
2. 発表標題 PERFORMANCE EVALUATION OF HYBRID METHOD USING DIFFERENT TYPES OF ISING MACHINES
3. 学会等名 Qubits 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中 宗
2. 発表標題 量子アニーリングの研究開発最前線
3. 学会等名 海上技術安全研究所 知識・データシステム系講演会「量子コンピュータの基礎と研究の動向」（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中 宗
2. 発表標題 次世代アクセラレータを用いたスマート製造領域最適化
3. 学会等名 量子アニーリング及び関連技術の基礎から社会実装まで
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 関 優也, 田村 亮, 田中 宗
2. 発表標題 アニーリングマシン実機に向けたFactorization Machineによるハミルトニアン学習
3. 学会等名 量子アニーリング及び関連技術の基礎から社会実装まで（招待講演）
4. 発表年 2023年

1．発表者名 金井 博志，田中 宗
2．発表標題 量子アニーリング及びシミュレーテッドアニーリングに対するエネルギー地形変換の効果
3．学会等名 量子アニーリング及び関連技術の基礎から社会実装まで
4．発表年 2023年

1．発表者名 田中 宗
2．発表標題 量子コンピューティング技術の現在地と未来像
3．学会等名 量子ICTフォーラム第2回Quantum Cafe
4．発表年 2023年

1．発表者名 田中 宗
2．発表標題 量子アニーリング等イジングマシンの研究開発動向と今後の展望
3．学会等名 MPC第7回量子コンピュータ推進セミナー（招待講演）
4．発表年 2023年

1．発表者名 関 優也，田村 亮，田中 宗
2．発表標題 グラフ構造を持つ Factorization Machine とアニーリングマシンによるブラックボックス離散最適化
3．学会等名 第8回量子ソフトウェア研究発表会
4．発表年 2023年

1．発表者名 田中 宗
2．発表標題 量子アニーリング技術の現状と今後の課題
3．学会等名 第6回CAEワークショップ（招待講演）
4．発表年 2023年

1．発表者名 田中 宗
2．発表標題 量子アニーリング技術の現状と今後の課題
3．学会等名 中四国地区CAE懇話会（招待講演）
4．発表年 2023年

1．発表者名 田中 宗
2．発表標題 量子アニーリングや関連技術の研究開発の現状と今後の展望
3．学会等名 令和5年電気学会全国大会（招待講演）
4．発表年 2023年

1．発表者名 大坪 優太，白井 達彦，田中 宗
2．発表標題 制約条件のある組合せ最適化問題における量子最適化
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 福田 瞳輝也，山下 将司，関 優也，田中 宗
2．発表標題 多目的ブラックボックス最適化問題に対する分離学習を用いたイジングマシン適用手法
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 田中宗
2．発表標題 量子アニーリングの基礎と応用探索
3．学会等名 第17回AMO討論会（招待講演）
4．発表年 2021年

1．発表者名 田中宗
2．発表標題 量子アニーリング技術の基礎と応用探索事例の最新動向
3．学会等名 技術情報協会セミナー
4．発表年 2021年

1．発表者名 田中宗
2．発表標題 量子コンピュータ最前線とイジングマシンの可能性
3．学会等名 LINK-J第13回オンライン・ネットワーキング・トーク
4．発表年 2021年

1．発表者名 田中宗
2．発表標題 量子アニーリングやイジングマシンの基礎と応用
3．学会等名 第11回Quantum Computational Material Science Roundtable (QCMSR)
4．発表年 2021年

1．発表者名 田中宗
2．発表標題 Quantum annealing and its related technology
3．学会等名 東京大学FoPM 4PMセミナー
4．発表年 2021年

1．発表者名 田中宗
2．発表標題 物理現象にヒントを得た計算技術：量子アニーリング
3．学会等名 The 66th Scienc-ome
4．発表年 2021年

1．発表者名 白井達彦，田中宗
2．発表標題 相関のあるランダムネスをもつ横磁場イジング鎖の動的臨界指数の解析
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 白井達彦, 戸川望
2. 発表標題 イジング計算機のためのマルチスピンフリップ法とその応用
3. 学会等名 システムとLSIの設計技術研究会 (IPSJ-SLDM)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 白井達彦, 戸川望
2. 発表標題 イジング計算機向けマルチスピンフリップ法
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsuhiko Shirai and Shu Tanaka
2. 発表標題 Quantum annealing in transverse-field Ising chains with a correlated disorder
3. 学会等名 AQ2021 - Adiabatic Quantum Computing Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関優也, 田村亮, 田中宗
2. 発表標題 Factorization machine とイジングマシンを利用した整数変数最適化
3. 学会等名 情報処理学会第5回量子ソフトウェア研究発表会
4. 発表年 2022年

1．発表者名 大坪優太，白井達彦，田中宗
2．発表標題 追加操作を施した量子アニーリングの性能評価
3．学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4．発表年 2022年

1．発表者名 菊池脩太，戸川望，田中宗
2．発表標題 ビット幅削減イジングモデルのシミュレーテッドアニーリングにおける動的プロセスの解析
3．学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4．発表年 2022年

1．発表者名 関優也，田中宗
2．発表標題 整数変数最適化問題に対する factorization machine を利用した最適化手法
3．学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4．発表年 2022年

1．発表者名 田中宗
2．発表標題 量子アニーリング等イジングマシンの研究開発の現状と今後の課題
3．学会等名 九州大学量子コンピューティングシステム研究センター開所記念シンポジウム（招待講演）
4．発表年 2022年

1．発表者名 田中宗
2．発表標題 量子アニーリング等イジングマシンの現状と展望：社会実装の基盤を目指した研究開発の実際
3．学会等名 Data Science Forum 2021（招待講演）
4．発表年 2021年

1．発表者名 田中宗
2．発表標題 量子アニーリング等イジングマシンの現状と展望
3．学会等名 DAシンポジウム2021（招待講演）
4．発表年 2021年

1．発表者名 Shun Izawa, Koki Kitai, Shu Tanaka, Ryo Tamura, and Koji Tsuda
2．発表標題 Continuous black-box optimization with quantum annealing and random subspace coding
3．学会等名 AQC2021 - Adiabatic Quantum Computing Conference（国際学会）
4．発表年 2021年

1．発表者名 Yuta Otsubo, Tatsuhiko Shirai, and Shu Tanaka
2．発表標題 Effect of additional operations for constrained quantum annealing
3．学会等名 AQC2021 - Adiabatic Quantum Computing Conference（国際学会）
4．発表年 2021年

1．発表者名 Shuta Kikuchi, Nozomu Togawa and Shu Tanaka
2．発表標題 Dynamical process on the bit-width-reduced Ising model and tuned method in simulated annealing
3．学会等名 AQC2021 - Adiabatic Quantum Computing Conference (国際学会)
4．発表年 2021年

1．発表者名 大坪優太, 白井達彦, 田中宗
2．発表標題 量子アニーリングに対する追加操作の効果
3．学会等名 第45回量子情報技術研究会 (QIT45)
4．発表年 2021年

1．発表者名 菊池脩太, 戸川望, 田中宗
2．発表標題 イジングマシン向けビット幅削減アルゴリズムの動的プロセスの解析
3．学会等名 第24回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2021)
4．発表年 2021年

1．発表者名 田中宗
2．発表標題 量子アニーリングの現状と展望
3．学会等名 FINOLABセミナー：金融分野での量子コンピュータ#12 (招待講演)
4．発表年 2021年

1．発表者名 田中宗
2．発表標題 量子アニーリングの適用事例：量子アニーリング×AIの手法によるマテリアル探索
3．学会等名 NEC Visionary Week 2021（招待講演）
4．発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

慶應義塾大学理工学部物理情報工学科 田中宗研究室webサイト https://shutanaka.appi.keio.ac.jp/ 田中宗webサイト https://shutanaka.com/ 量子コンピューティングとAIの融合によるスマート製造：その1 https://www.youtube.com/watch?v=FOvGFwVsZt0 量子コンピューティングとAIの融合によるスマート製造：その2 https://www.youtube.com/watch?v=pUW0Fgiy0lg 慶應義塾大学理工学部物理情報工学科 田中宗研究室webサイト https://shutanaka.appi.keio.ac.jp/ 田中宗webサイト https://shutanaka.com/ 白井達彦webサイト https://sites.google.com/view/tatsuhiko-shirais-websitete/%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%83%A0

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
研究分担者	白井 達彦 (SHIRAI Tatsuhiko) (20816730)	早稲田大学・理工学術院・講師（任期付） (32689)	

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