様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　４ 年　６ 月　８ 日現在

機関番号：１１３０１
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2018～2020
課題番号：１８Ｈ０３３０３

研究課題名（和文）量子統計的機械学習システム設計理論の創出とその実践

研究課題名（英文）Creation of design theory of quantum statistical machine learning system and its realization

研究代表者
田中　和之（Kazuyuki, Tanaka）

東北大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：８０２１７０１７

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　13,300,000円

研究成果の概要（和文）：確率伝搬法による確率的グラフィカルモデルの教師あり学習の定式化を一般化された密度行列の教師あり学習への拡張を，量子力学的に拡張されたクラスター変分法の立場から定式化した.さらに従来の潜在変数を伴う確率的グラフィカルモデルによる統計的機械学習理論の量子力学的拡張による再定式化を行い，英文書籍のBook Chapter (https://doi.org/10.1007/978-981-16-4095-7_10)として公開した．さらに，画像生成などの応用例において低次元状態ベクトルの範囲での量子統計的機械学習システムの範囲で良好な性能が期待できることを示すことができたことが主な成果である.

研究成果の学術的意義や社会的意義
近年のD-Waveによる量子コンピュータの開発の成功は，量子力学的効果を取り入れた計算方式に対する期待を大きく加速している．この開発された量子コンピュータは組み合わせ最適化問題に特化した構造に設計され，その最適化問題の解の探索過程においてトンネル現象が確認されたという報告があり，「最適解探索の過程でのトンネル現象の発現の有無」という問いについては確認が進められつつある．その一方で本研究計画の成果により未来の予測を最適化問題として定式化する上での量子力学的重ね合わせをもとに構成された状態を本質的に取り込んだ問題設定とその解法の構築を行うことができたことが学術的・社会的意義と位置付けている.

研究成果の概要（英文）：Some formulations of supervised learning of probabilistic graphical models by conventional belief propagation methods have extended to supervised learning by means of density matrices from the standpoint of quantum mechanical version of cluster variational method. The formulations for quantum statistical supervised learning was released as the book chapter of English book (https://doi.org/10.1007/978-981-16-4095-7_10). Furthermore, we have shown that good performance can be expected in the quantum statistical machine learning systems with low-dimensional state vectors for some application examples such as image generation.

研究分野：確率的情報処理

キーワード：確率的情報処理　統計的機械学習理論　情報統計力学　マルコフ確率場　ベイズ統計

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

計算理論，学習理論に量子力学的重ね合わせの効果を応用する試みは 1980 年代に「エネルギーを消費なしの計算の可能性」,「計算量爆発を起こす問題設定に対する有効性」などが指摘される中，1994 年の P. W. Shor 氏による素因数分解のアルゴリズムの登場により学術的関心が急速に高まることとなる．

1997 年の東京工業大学の西森秀稔氏らによる量子アニーリング法の考案により，これまで解決困難とされてきた計算科学の諸問題の突破口を見出す可能性を膨らませることとなる．計算科学の諸問題の多くは最適化問題として定式化する事が可能であり，そのような問題を問題の数理構造に合わせて高速のアルゴリズムを考案するか，最適化問題として捉えるかによりそのあとのアプローチは大きく異なることとなる．最適化問題として捉える場合，アルゴリズムの視点は最適解探索という１点に絞られるため汎用性のある形に構成されるが，その一方で，個々の問題の特性に合わせたアルゴリズムに比べてどうしても高速化という点で劣らざるを得ない側面がつきまとっていた．西森氏の量子アニーリング法はこのような計算理論の限界を打破する革新的な手法として国内外から常に注目され続けていた．

西森氏の量子アニーリング法が高速のアルゴリズムを提供できる大きなポイントはトンネル現象（すなわち探索空間においてある解から全く異なる解に元々の問題設定では見えていなかった異次元的空間を通って移り変わる）という量子力学特有の現象が高速化を引き起こすという革新的な考え方がその根底にあったが，「実際の計算過程でどのようにトンネル現象が起こっているのか？」という「問い」が常につきまとった．そしてそれ以上に核心的な問いは「そもそも量子力学的な重ね合わせにより構成された解といいものは問題設定上，解を探索する上での一時的なものであり，実際の問題設定における最終的な解において消滅させてしまって良いものなのか？」という問いである．量子力学が出現した時に「シュレディンガーの猫」というパラドックスがある．「箱の中の猫は生きているのか？死んでいるのか？」というものである．観測できない状況，例えば我々の未来もその一つである．１時間後に自分は何をしているのか？「お茶を飲んでいるかもしれない」,「突然の来客と話をしているかもしれない」という様々の可能性が想定されるがそのどの状態かを確定はできない．できることはそれぞれの可能性を考えることだけである．このような未来の予測を最適化問題として定式化するならいくつかの可能性のある状態の重ね合わせという形で考えることはごく自然な発想ではないだろうか．

近年の D-Wave による 1000qubit クラスの量子コンピュータの開発の成功は，量子力学的効果を取り入れた計算方式に対する期待を大きく加速している．そしてこの開発された量子コンピュータは組み合わせ最適化問題に特化した構造に設計され，その最適化問題の解の探索過程においてトンネル現象が確認されたという報告があり，上述の前者の「最適解探索の過程でのトンネル現象の発現の有無」という問いについては確認が進められつつある．その一方で未来の予測を最適化問題として定式化する上での量子力学的重ね合わせをもとに構成された状態を本質的に取り込んだ問題設定とその解法の構築という「問い」に対する答えは得られていないのが現状であり，これを本研究の核心をなす学術的「問い」として位置付けている．

２．研究の目的

本研究の目的は量子力学的重ね合わせにより構成された状態をもとに構成された解空間における最適化問題と最尤推定の定式化を出発点として，その解探索アルゴリズムの構築と量子コンピュータへの実装に向けての基盤整備を行うことを目的とする．

その学術的独自性は，量子力学的解空間を本質的に取り込んだ評価関数の構築を通して，量子力学的状態を我々の未来の状態として受け入れた問題設定を行う点にある．現在，進められている量子コンピュータの研究は既存の最適化問題を高速に解くアルゴリズムとしての量子アニーリング法を如何に実装するかという視点で進められている．このこと自身は最適化問題を基盤とする人工知能システムを量子コンピュータにより如何に加速するかという点で革新的な展開が期待される．しかしながら，量子コンピュータは我々に「速さ」だけをもたらす存在なのであろうか？我々が異なる状態の重ね合わせの状態を受け入れた時，そこから広がる計算パラダイムの本質はそれだけではないのではないだろうか？そして，現在進められている量子アニーリング法の研究そのものも実はその計算過程の中に我々が本当に必要とする多くの情報が隠されているのではないだろうか？本研究課題では，量子コンピュータに，単なる高速の計算マシンではなく，我々の未来を複数の未来の重ね合わせというこれまでにない形で予測する預言者としての地位を与えるという創造性を有するものである

３．研究の方法

本研究は教師あり量子統計的機械学習理論の定式化を出発点として潜在変数を伴う確率的グラフィカルモデルの量子統計的機械学習理論の確立へと展開し，最終的に量子力学的自由度の機械学習システムにおける有効性を明らかにし，この従来にはない自由度を有する革新的機械学習システムの設計理論の基盤整備を行おうとするものである．具体的には以下の段階を踏むこ

とでこれらを明らかにしようとするものである.
[A] 教師あり量子統計的機械学習理論の定式化

- M. Yasuda, S. Kataoka and K. Tanaka: Inverse Problem in Pairwise Markov Random Fields using Loopy Belief Propagation, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.81, No.4, Article ID.044801, 2014.

において定式化された確率伝搬法による確率的グラフィカルモデルの教師あり学習の定式化を一般化された密度行列の教師あり学習へと拡張する.
[B] 潜在変数を伴う確率的グラフィカルモデルの量子統計的機械学習理論の確立

- K.Tanaka and K. Tsuda: A Quantum-Statistical-Mechanical Extension of Gaussian Mixture Model, Journal of Physics: Conference Series, Vol.95, Article ID.012023, 2008

において潜在変数間に相互作用のない確率的グラフィカルモデルに対して提案した量子力学的に拡張された EM アルゴリズム（期待値最大化アルゴリズム, Expectation Maximization Algorithm）の潜在変数間に相互作用を持つ量子統計的グラフィカルモデルへの拡張を量子統計的クラスター変分法, すなわち一般化された量子統計的確率伝搬法をもとに定式化する.
[C] 実データに基づく量子統計的機械学習理論の有効性の検証
上記[A], [B]の定式化をもとに公開されたデータベースシステムによるパターン認識, ゲノム解析などの学術的データからに対する検証にも展開する. さらに災害時の避難計画を視野に入れた交通予測, 破壊検査を伴わない都市インフラ設備の老朽化予測などの熟練技能を要しながらこれまで専門技能を要する人手に頼ってきた様々の問題への適用の可能性を検討する.

４．研究成果

2018 年度は研究代表者および分担者の学術論文「M. Yasuda, S. Kataoka and K. Tanaka: Inverse Problem in Pairwise Markov Random Fields using Loopy Belief Propagation, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.81, No.4, Article ID.044801, 2014.」において定式化された確率伝搬法による確率的グラフィカルモデルの教師あり学習の定式化を一般化された密度行列の教師あり学習へと拡張することで教師あり量子統計的機械学習理論の定式化を行った. その定式化は一般化された確率伝搬法に拡張できる高度の汎用化された数理構造を持つことが解明された. 同時に研究代表者が潜在変数間に相互作用のない確率的グラフィカルモデルに対して提案した量子力学的に拡張された EM アルゴリズム（期待値最大化アルゴリズム, Expectation Maximization Algorithm）の潜在変数間に相互作用を持つ量子統計的グラフィカルモデルへの拡張についての定式化も並行して進めた. 量子力学的に拡張された EM アルゴリズムの安定性は事前分布としての密度行列における相転移の発現機構と密接な関係があり, 安定性保証の観点からいくつかの基本的な量子統計的グラフィカルモデルの相転移の発現メカニズムについての解析も重ない, その成果の一部は Journal of the Physical Society of Japan,Physical Review E などに公開済みである, また, King's Colledge London の Ton Coolen 教授, University of Roma La Sapienza の Federico Ricci-Tersenghi 准教授, 台湾国立清華大学の Chiou-Ting Candy Hsu 教授から助言を受け, 2019 年度に向けての計画遂行のための方針を確認しながら進めることができた. 現在, これらの研究者の助言をもとに本研究計画を起点とする国際共同研究への展開を検討するに至っている.
2019 年度は研究代表者および分担者の学術論文「M. Yasuda, S. Kataoka and K. Tanaka: Inverse Problem in Pairwise Markov Random Fields using Loopy Belief Propagation, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.81, No.4, Article ID.044801, 2014」において定式化された確率伝搬法による確率的グラフィカルモデルの教師あり学習の定式化を一般化された密度行列の教師あり学習へと拡張することで教師あり量子統計的機械学習理論の実装を行いつつ, 同時に研究代表者が潜在変数間に相互作用のない確率的グラフィカルモデルに対して提案した.量子力学的に拡張された EM アルゴリズム（期待値最大化アルゴリズム）の潜在変数間に相互作用を持つ量子統計的グラフィカルモデルへの拡張を進めた. これらの実装を進める上で, 将来的に量子アニーリングマシンへの実装の検討も進めており, 特に現在実用化されている量子アニーリングマシンのフェアサンプリングのメカニズムについても検討を合わせて行なっている. また, Ton Coolen 教授(Radboud University)との 2 回の打合せにより量子力学的に拡張された機械学習アルゴリズムの動的性質の統計解析手法を動的レプリカ法の導入による定式化の基本的方針の確認を行うことができたことは当初の計画では想定されなかった特出した成果の一つである. Federico Ricci-Tersenghi 教授（University de Roma, La Sapienza）との打合せにおいて確率的グラフィカルモデルの準安定状態の新しい列挙手法を開発したこともまた, 当初の計画では想定されなかった成果である.
2020 年度は 2019 年度から継続して, 確率伝搬法による確率的グラフィカルモデルの教師あり学習の定式化を一般化された密度行列の教師あり学習へと拡張することで教師あり量子統計的機械学習理論の実装を行いつつ, 同時に研究代表者が潜在変数間に相互作用のない確率的グラフィカルモデルに対して提案した量子力学的に拡張された EM アルゴリズム（期待値最大化アルゴリズム, Expectation Maximization Algorithm）の潜在変数間に相互作用を持つ量子統計的グラフィカルモデルへの拡張を継続して進めた. さらに 2019 年度において Ton Coolen 教授

(Radboud University, Netherlands)との協力関係のもとで行った量子力学的に拡張された機械学習アルゴリズムの動的性質の統計解析手法を動的レプリカ法の導入を継続して行う予定であったが，新型コロナ感染拡大のためオランダへの渡航が困難となり，2021 年度への繰越により持ち越さざるを得なかった．また，2019 年度の Federico Ricci-Tersenghi 教授（University de Roma, La Sapienza, Italy）との研究打ち合わせにより着想を得た確率的グラフィカルモデルの一次相転移の発現機構の準安定状態の列挙を通しての解析法を量子統計的機械学習理論にも展開することも同様の状況により 2021 年度に持ち越さざるを得なかった．2021 年度も新型コロナ感染状況は改善しなかったため，リモートによる打ち合わせの中で計画を続行し，量子力学的に拡張された機械学習アルゴリズムの動的性質の統計解析手法および確率的グラフィカルモデルの一次相転移の発現機構の準安定状態の列挙を通しての解析法について定式化を行った．

統計的機械学習および漁師統計的機械学習において本研究計画で得られた成果の一部を体系化し，書籍「Naoki Katoh, Yuya Higashikawa, Hiro Ito, Atsuki Nagao, Tetsuo Shibuya, Adnan Sljoka, Kazuyuki Tanaka, Yushi Uno (Editors): Sublinear Computation Paradigm Algorithmic Revolution in the Big Data Era, Springer, 2020 (ISBN: 978-981-16-4095-7, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-4095-7)」の「Part IV: Sublinear Modelling」における

- Chapter 10 Review of Sublinear Modeling in Probabilistic Graphical Models by Statistical Mechanical Informatics and Statistical Machine Learning Theory (Kazuyuki Tanaka,pp.165–275),
- Chapter 11. Empirical Bayes Method for Boltzmann Machines (Muneki Yasuda, pp.277-pp.317),
- Chapter 12. Dynamical Analysis of Quantum Annealing (Anthony C. C. Coolen, Theodore Nikoletopous, Shunta Arai, Kazuyuki Tanaka),
- Chapter 13. Mean-Field Analysis of Sourlas Codes with Adiabatic Reverse Annealing (Shunta Arai, pp.319-pp.334)

として出版した．

[A] 教師あり量子統計的機械学習理論の定式化

- M. Yasuda, S. Kataoka and K. Tanaka: Inverse Problem in Pairwise Markov Random Fields using Loopy Belief Propagation, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.81, No.4, Article ID.044801, 2014.

において定式化された確率伝搬法による確率的グラフィカルモデルの教師あり学習の定式化を一般化された密度行列の教師あり学習への拡張を，量子力学的に拡張されたクラスター変分法の立場から定式化し，さらに Adaptive TAP 法を組み合わせる形で，任意のグラフ表現を有する量子統計的グラフィカルモデルの定式化という新たな展開が得られた．この定式化は上述の書籍「Sublinear Computation Paradigm Algorithmic Revolution in the Big Data Era, Springer, 2020」の Chapter 10 において体系化する形で公開した．

[B] 潜在変数を伴う確率的グラフィカルモデルの量子統計的機械学習理論の確立

研究代表者がこれまで進めてきた従来の潜在変数を伴う確率的グラフィカルモデルによる統計的機械学習システムの量子力学的拡張による再定式化を行い，その成果の一部を上述の書籍「Sublinear Computation Paradigm Algorithmic Revolution in the Big Data Era, Springer, 2020」の Chapter 10 において体系化する形で公開した．さらに，Boltzmann Machine を量子力学的に拡張し，Quantum Boltzmann Machine へと拡張し，画像生成における性能評価を行い,低次元潜在変数ベクトルの中でも量子力学的に拡張することで十分に良好な学習を行うことができることを立証したことは特出した成果であり，その成果の一部を

- Takehito Sato, Masayuki Ohzeki and Kazuyuki Tanaka: Assessment of Image Generation by Quantum Annealer, Scientific Reports, Vol.11 (June 2021), Article ID.13523 (10 pages) (DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-021-92295-9).

として公開した．さらに，量子力学的に拡張された 2 値パーセプトロンによる Teacher-Student Learning に定式化を進め，その中で自由エネルギー地形の詳細を解析し，特定のハイパパラメータの方向にその地形がなだらかとなる描像が存在することを発見し，これが学習の性能の向上につながるという知見を得ることができた．その成果の一部は

- Shunta Arai, Masayuki Ohzeki, and Kazuyuki Tanaka: Teacher-Student Learning for a Binary Perceptron with Quantum Fluctuations, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.90, No.7 (July 2021), Article ID.074002 (11 pages) (DOI: https://doi.org/10.7566/JPSJ.90.074002).

として公開している．

[C] 実データに基づく量子統計的機械学習理論の有効性の検証

- 災害時の避難計画を視野に入れた交通予測について
- 量子アニーリングを用いた非負値行列分解による音源分離
- 量子アニーリングによるポートフォリオ最適化のレプリカ解析

- D-Wave Hybrid Solver を用いた「ぐるなび」のレコメンデーション最適化
- 量子アニーリングを用いた信号の最適化

などにおいて実証実験を行い，その成果の一部は日本物理学会年次大会及び秋季大会で公開している．

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計12件（うち査読付論文　12件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　10件）

１．著者名 Ami S. Koshikawa, Masayuki Ohzeki, Tadashi Kadowaki, Kazuyuki Tanaka	４．巻 90
２．論文標題 Benchmark Test of Black-box Optimization Using D-Wave Quantum Annealer	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	６．最初と最後の頁 064001～064001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.90.064001	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 Takehiro Sato, Masayuki Ohzeki, Kazuyuki Tanaka	４．巻 11
２．論文標題 Assessment of image generation by quantum annealer	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Scientific Reports	６．最初と最後の頁 13523～13523
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-92295-9	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 Shunta Arai, Masayuki Ohzeki, Kazuyuki Tanaka	４．巻 90
２．論文標題 Teacher-Student Learning for a Binary Perceptron with Quantum Fluctuations	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	６．最初と最後の頁 074002～074002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.90.074002	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 Shunta Arai, Masayuki Ohzeki, Kazuyuki Tanaka	４．巻 3
２．論文標題 Mean field analysis of reverse annealing for code-division multiple-access multiuser detection	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Physical Review Research	６．最初と最後の頁 033006～033006
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.3.033006	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 Masayuki Yamamoto, Masayuki Ohzeki, Kazuyuki Tanaka	4．巻 89
2．論文標題 Fair sampling by simulated annealing on quantum annealer	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 1-2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.89.025002	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 Kazuyuki Tanaka, Masayuki Ohzeki, Muneki Yasuda	4．巻 13
2．論文標題 Sublinear computational time modeling by momentum-space renormalization group theory in statistical machine learning procedures	5．発行年 2019年
3．雑誌名 The Review of Socionetwork Strategies	6．最初と最後の頁 281-306
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12626-019-00053-1	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 Chako Takahashi, Masayuki Ohzeki, Shuntaro Okada, Masayoshi Terabe, Shinichiro Taguchi, Kazuyuki Tanaka	4．巻 87
2．論文標題 Statistical-Mechanical Analysis of Compressed Sensing for Hamiltonian Estimation of Ising Spin Glass	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 074001～074001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.87.074001	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 Kazuyuki Tanaka, Masamichi Nakamura, Shun Kataoka, Masayuki Ohzeki, Muneki Yasuda	4．巻 87
2．論文標題 Momentum-Space Renormalization Group Transformation in Bayesian Image Modeling by Gaussian Graphical Model	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 085001～085001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.87.085001	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 Masayuki Ohzeki, Chako Takahashi, Shuntaro Okada, Masayoshi Terabe, Shinichiro Taguchi, Kazuyuki Tanaka	4．巻 9
2．論文標題 Quantum annealing: next-generation computation and how to implement it when information is missing	5．発行年 2018年
3．雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6．最初と最後の頁 392～405
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/nolta.9.392	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 Shuntaro Okada, Masayuki Ohzeki, Kazuyuki Tanaka	4．巻 88
2．論文標題 Phase Diagrams of One-Dimensional Ising and XY Models with Fully Connected Ferromagnetic and Anti-Ferromagnetic Quantum Fluctuations	5．発行年 2019年
3．雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6．最初と最後の頁 024802～024802
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.88.024802	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 Shuntaro Okada, Masayuki Ohzeki, Kazuyuki Tanaka	4．巻 88
2．論文標題 Difference between Quantum Annealing by Imaginary-Time and Real-Time Schr?dinger Equations of Grover ’s Search	5．発行年 2019年
3．雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6．最初と最後の頁 024803～024803
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.88.024803	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 Shunta Arai, Masayuki Ohzeki, Kazuyuki Tanaka	4．巻 99
2．論文標題 Dynamics of order parameters of nonstoquastic Hamiltonians in the adaptive quantum Monte Carlo method	5．発行年 2019年
3．雑誌名 Physical Review E	6．最初と最後の頁 032120～032120
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.99.032120	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21件（うち招待講演　0件／うち国際学会　5件）

1．発表者名 Chako Takahashi, Masayuki Ohzeki, Kazuyuki Tanaka
2．発表標題 Statistical-mechanical analysis of restricted Boltzmann machine with transverse field, Adiabatic Quantum Computing 2019 (AQC-19), University Innsbruck, Innsbruck, Austria, 26 July, 2019
3．学会等名 Adiabatic Quantum Computing 2019 (AQC-19), University Innsbruck, Innsbruck, Austria（国際学会）
4．発表年 2019年

1．発表者名 Shunta Arai, Masayuki Ohzeki, Kazuyuki Tanaka
2．発表標題 Mean-field analysis of quantum error-correcting codes with non-stoquastic Hamiltonian
3．学会等名 Adiabatic Quantum Computing 2019 (AQC-19), University Innsbruck, Innsbruck, Austria（国際学会）
4．発表年 2019年

1．発表者名 Shunta Arai, Masayuki Ohzeki, Kazuyuki Tanaka
2．発表標題 Detection of quantum phase transition in D-Wave 2000Q by deep neural network
3．学会等名 Quantum Machine Learning & Biomimetic Quantum Technologies (19-23 March, 2018, University of the Basque Country, Leioa, Spain)（国際学会）
4．発表年 2018年

1．発表者名 Shunta Arai, Masayuki Ohzeki, Kazuyuki Tanaka
2．発表標題 Acceleration of adaptive quantum Monte Carlo Sampling for a class of non-stoquastic Hamiltonian by using D-Wave 2000Q
3．学会等名 Adiabatic Quantum Computing Conference 2018 (25-28 June, 2018, NASA Conference Center, Building 3 Moffett Field, CA 94035, USA)（国際学会）
4．発表年 2018年

１．発表者名 Shunta Arai, Masayuki Ohzeki, Kazuyuki Tanaka
２．発表標題 Detection of quantum phase transition in D-Wave 2000Q by deep neural network
３．学会等名 Quantum Machine Learning & Biomimetic Quantum Technologies (19-23 March, 2018, University of the Basque Country, Leioa, Spain)（国際学会）
４．発表年 2018年

１．発表者名 Shunta Arai, Masayuki Ohzeki, Kazuyuki Tanaka
２．発表標題 Adaptive Quantum Monte Carlo method for a class of non-stoquastic Hamiltonian by using D-Wave machine
３．学会等名 The Third D-Wave Qubits North America Users Conference (25-28 September, 2018, Knoxville, TN 37902, USA)
４．発表年 2018年

１．発表者名 荒井俊太，大関真之，田中和之
２．発表標題 D-Waveマシンにおける量子相転移の解析
３．学会等名 日本物理学会2018年秋季大会（2018年9月10日，同志社大学京田辺キャンパス）
４．発表年 2018年

１．発表者名 越川亜美，大関真之，観山正道，田中和之
２．発表標題 ベイズ的最適化によるスピングラスの基底状態の探索
３．学会等名 日本物理学会第74回年次大会（2019年3月14日，九州大学伊都キャンパス）
４．発表年 2019年

１．発表者名 荒井俊太，大関真之，田中和之
２．発表標題 マスター方程式を用いた非擬似古典確率的なハミルトニアンの秩序変数のダイナミクス
３．学会等名 日本物理学会第74回年次大会（2019年3月15日，九州大学伊都キャンパス）
４．発表年 2019年

１．発表者名 荒井俊太，大関真之，田中和
２．発表標題 量子揺らぎによるイジングパーセプトロンの学習
３．学会等名 日本物理学会2020年秋季大会（2020年9月9日，オンライン）．
４．発表年 2019年

１．発表者名 渡邊大地，大関真之，田中和之
２．発表標題 量子アニーリングによるポートフォリオ最適化のレプリカ解析
３．学会等名 日本物理学会2020年秋季大会（2020年9月9日.,オンライン）
４．発表年 2020年

１．発表者名 秋山登哉，大関真之，田中和之
２．発表標題 D-Wave Hybrid Solverを用いたぐるなびのレコメンデーション最適化
３．学会等名 日本物理学会2020年秋季大会（2020年9月9日，オンライン）
４．発表年 2020年

１．発表者名 佐藤豪人，大関真之，田中和之
２．発表標題 量子アニーリングによる画像生成とその評価
３．学会等名 日本物理学会2020年秋季大会（2020年9月9日，オンライン）
４．発表年 2020年

１．発表者名 川島祐輝，大関真之，田中和之
２．発表標題 Potts模型におけるXYドライバーを用い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76回年次大会（2021年3月13日，オンライン）．
４．発表年 2021年

１．発表者名 丸山尚貴，大関真之，田中和之
２．発表標題 量子モンテカルロ法を用いた縮退のある系における量子アニーリングのサンプリング性能の解析
３．学会等名 日本物理学会第76回年次大会（2021年3月13日，オンライン）
４．発表年 2021年

１．発表者名 亀井秀朔，大関真之，田中和之
２．発表標題 量子アニーリングを用いた信号の最適化
３．学会等名 日本物理学会第76回年次大会（2021年3月13日，オンライン）
４．発表年 2021年

１．発表者名 羽場廉一郎，大関真之，田中和之
２．発表標題 量子アニーリングを用いた無人搬送車経路最適化の代替的手法
３．学会等名 日本物理学会第76回年次大会（2021年3月13日，オンライン）
４．発表年 2021年

１．発表者名 羽場廉一郎，大関真之，田中和之
２．発表標題 二値制約非負値行列分解に対するリバースアニーリングの効果的な初期化手法
３．学会等名 日本物理学会2021年度秋季大会（2021年9月22日，オンライン）
４．発表年 2021年

１．発表者名 漆畑充，大関真之，田中和之
２．発表標題 Associative Adversarial Networkにおいて量子サンプリングによるボルツマンマシンの学習がGANの精度に与える影響
３．学会等名 日本物理学会2021年度秋季大会（2021年9月22日，オンライン）
４．発表年 2021年

１．発表者名 丸山尚貴，大関真之，田中和之
２．発表標題 敵対的訓練におけるパーセプトロンの記憶容量
３．学会等名 日本物理学会第77回年次大会（2022年3月15日，オンライン）
４．発表年 2022年

１．発表者名 羽場廉一郎，大関真之，田中和之
２．発表標題 連続緩和とリバースアニーリングを用いた二値制約非負値行列分解
３．学会等名 日本物理学会第77回年次大会（2022年3月17日，オンライン）
４．発表年 2022年

〔図書〕　計2件

１．著者名 片岡駿，大関真之，安田宗樹，田中和之	４．発行年 2018年
２．出版社 共立出版	５．総ページ数 264
３．書名 画像処理の統計モデリング　--- 確率的グラフィカルモデルとスパースモデリングからのアプローチ ---	

１．著者名 Naoki Katoh, Yuya Higashikawa, Hiro Ito, Atsuki Nagao, Tetsuo Shibuya, Adnan Sljoka, Kazuyuki Tanaka, Yushi Uno (Editors)	４．発行年 2021年
２．出版社 Springer	５．総ページ数 410
３．書名 Sublinear Computation Paradigm Algorithmic Revolution in the Big Data Era	

〔産業財産権〕

〔その他〕

Kazuyuki Tanaka
http://www.smapip.is.tohoku.ac.jp/~kazu/index-j.html
Kazuyuki Tanaka
http://www.smapip.is.tohoku.ac.jp/~kazu/index-e.html

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	安田　宗樹 (Yasuda Muneki) (20532774)	山形大学・大学院理工学研究科・教授 (11501)	
研究分担者	片岡　駿 (Kataoka Shun) (50737278)	小樽商科大学・商学部・准教授 (10104)	
研究分担者	大関　真之 (Ohzeki Masayuki) (80447549)	東北大学・情報科学研究科・教授 (11301)	

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1件

国際研究集会	開催年
2019 Workshop on Statistical Physics of Disordered Systems and Its Applications (SPDSA2019) --- Statistical-Mechanical Informatics and Statistical Machine Learning Theory in Big Data Sciences ---	2019年～2019年

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			
オランダ	Radboud University			
イタリア	University de Roma, La Sapienza			