

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「Society 5.0 を支える革新的
コンピューティング技術」
研究課題「地理空間情報を自在に操る
イジング計算機の新展開」

研究終了報告書

研究期間 2019年10月～2025年03月

研究代表者：戸川 望
(早稲田大学 理工学術院 教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究では、Society5.0 の実現に不可欠な「地理空間情報処理」の高度化に焦点をあて、これをイジング計算機によって解決することを目的とする。現実の地理空間情報処理問題を論理イジング模型にマッピング、実イジング計算機にエンベッドし、実規模・実制約を持った地理空間情報処理問題を解法・評価する。特に産官学が共同し、実地理空間情報処理をキラーアプリケーションとそのためのイジング計算理論を確立することを目指すものである(図 1)。

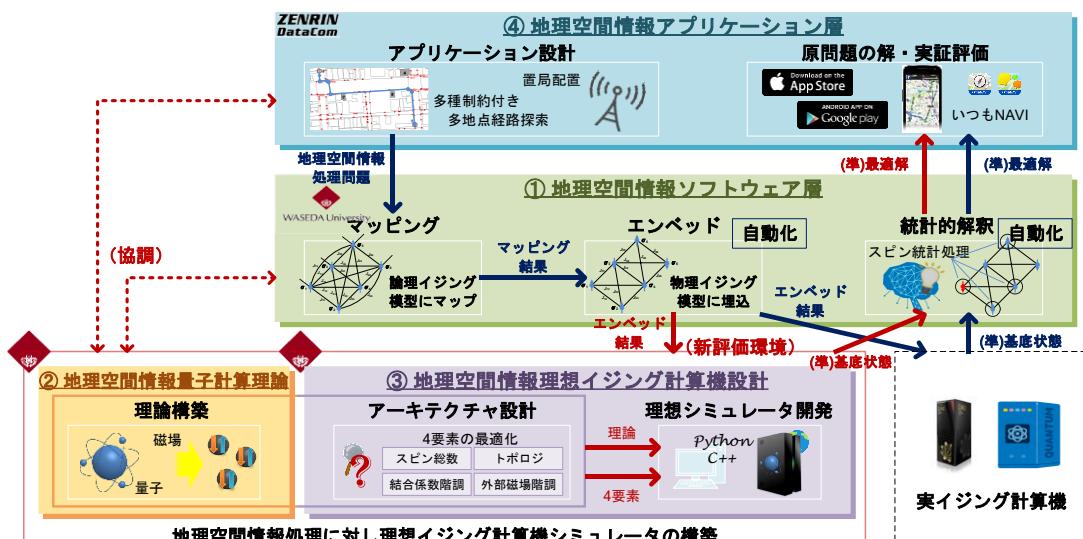


図 1: 研究提案の全体構想

2019 年度～2024 年度にかけて、戸川グループでは(1)複数の集積所を持つ容量制約付き配送計画問題、(2)アミューズメントパーク経路最適化問題、(3)複数日にまたがる旅行計画問題、(4)「新しい生活様式」のための密回避経路最適化問題、(5)インターモーダルを考慮した複数日にまたがる旅行計画問題等のさまざまな実地理空間情報処理問題を取り上げ、これらを論理イジング模型にマッピング、物理イジング模型にエンベッドすることで実イジング計算機によって解法した。全ての問題にて既存計算に比較して高速化・解品質の向上が確認でき、最大 2 枠以上の高速化を達成した。さらに部分アニーリング、係数最適化など論理イジング模型から物理イジング模型にエンベッドする基礎理論も確立した。また量子計算理論として新規量子ゆらぎ理論の導入、理想イジング計算機設計として多スピンドリップやスピンドルマージ手法、制約を考慮し最適性を失わない変数削除手法等を考案し、その有効性を確認している。さらに高山グループでは、上記成果を活用することで、イジング計算機による実地理空間情報処理の社会実装を進め、自治体と連携した旅程最適化アプリケーションの試験公開や、最適配置アプリケーション API を開発した。

これらの成果は研究代表者らが設立したスタートアップ会社や、共同提案グループ(ゼンリンデータコム)により実応用される予定である(一部はすでに実応用されている)。

大学と産業界が連携することで、基礎理論から実応用に至るまで、「地理空間情報処理」を足がかりにイジング計算機の活用方法に関する研究が実施されたと言える。

(2) 顕著な成果

＜優れた基礎研究としての成果＞

1. 論文成果

Tatsuhiko Shirai and Nozomu Togawa, "Multi-spin-flip engineering in an Ising machine," IEEE Transactions on Computers, vol. 72, no. 3, pp. 759-771, 2023, DOI: 10.1109/TC.2022.3178325.

概要: イジング模型ならびにこれと等価な QUBO 模型の複数のスピンを「縮退」させることによって、同時スピンフリップを実現し評価を行っている。同様に、地理空間情報処理問題のさまざまな場面で見られる制約条件を満足したまま、エネルギー地形を変形させ短時間で最適解への収束を可能とする。既存イジング計算機にそのまま適用できるほか、新たなイジング計算機アーキテクチャの基盤となる重要な成果となる。本成果は IEEE Computer Society のトップ論文誌に採択され、JST をはじめ、国内外で報道発表している。

- ・(JSTによる報道発表)<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20220530/index.html>
- ・(海外報道発表)<https://www.eurekalert.org/news-releases/954300>

2. 論文成果

Tatsuhiko Shirai and Nozomu Togawa, "Spin-variable reduction method for handling linear equality constraints in Ising machines," IEEE Transactions on Computers, vol. 72, no. 8, 2023, DOI: 10.1109/TC.2023.3239539.

概要: 地理空間情報アプリケーションをはじめ、多くの現実的な組合せ最適化問題が持つ「線形制約」(1 ホット制約は線形制約の一例)に注目し、線形制約が持つ条件と変数消去の関係を解明し、原問題の最適性を失うことなく、スピン変数を削除することを可能であることを見出した。イジング計算機のハードウェアを全く変化させることなく、ソフトウェア最適化によってスピン変数削除を可能とする重要な成果となる。本成果も IEEE Computer Society のトップ論文誌に採択され、JST をはじめ、多くの報道発表をしている。

- ・(JSTによる報道発表)<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20230126-2/index.html>

3. 論文成果

Tatsuhiko Shirai and Nozomu Togawa, "Post-processing variationally scheduled quantum algorithm for constrained combinatorial optimization problems," IEEE Transactions on Quantum Engineering, vol. 5, Article Sequence Number: 3101114, 2024, DOI: 10.1109/TQE.2024.3376721.

概要: 量子アニーリングマシンを対象に、変分スケジュール量子アルゴリズムを取り入れ、短時間で最適解に収束する仕組みを構築した。この際、原問題の「制約」に着目し、得られた解分布において、制約を満足しない解から制約を満足する解に変形することで解分布を調整し、これによりより高速に原問題の最適解に収束することを確認している。今後、研究が進む量子計算機にも適用できる基盤技術であり、量子計算機のための基本ソフトウェアとして重要な成果となる。本成果は IEEE が発行する量子計算のトップ論文誌に採択され、JST をはじめ、国内外で報道発表している。

- ・(JSTによる報道発表)<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20240314-3/index.html>
- ・(海外報道発表)<https://www.eurekalert.org/news-releases/1038734>

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. アプリケーション試験公開

自治体(静岡県熱海市)の協力のもと「実イジング計算機の旅程最適化サイト」の試験公開

概要: 自治体(静岡県熱海市)の協力のもと、実地理情報と実イジング計算機を利用し、ゼンリンデータコム「いつも NAVI ラボサイト」において「旅程最適化サイト」を構築した。これは、与えられた時間や交通手段のもと、満足度を最大化した個々人のための観光プランを生成するもので、実際に Web サイトを公開し評価を行った。本成果について報道発表を行い、世界に先駆けて「実イジング計算機の旅程最適化応用」を実現した。基礎研究の発展とともに、社会・経済に大きく波及する重要な成果と考えている。

- ・(試験公開 Web ページ)<http://at-lab.its-mo.com/trip/atami/>

- ・(報道発表) https://www.zenrin-datacom.net/newsrelease/20210329_01.html

2. スタートアップ会社の起業

本 CREST の研究成果のもと、スタートアップ会社 Quanmatic を起業

概要:これまで本 CREST の研究成果で得た成果(特に、以下の<代表的な特許>の 1~3)を中心に、研究成果を実用化するため、研究代表者の戸川望は、研究参加者の田中宗らとともに、2022 年 10 月に株式会社 Quanmatic を起業した(<https://www.quanmatic.com/>)。戸川が最高科学責任者(CSO)を務め、田中が最高技術責任者(CTO)を務める。

Quanmatic は、本 CREST で得られた知財等をもとに、量子計算技術のソフトウェア開発を行うものである。同時に大学で研究開発されたアルゴリズム・ソフトウェア技術をとして実現し、広く社会に還元することを目的としている。前述のように、すでに Quanmatic は半導体製造会社とともに世界で初めて大規模半導体製造工場の半導体製造工程に量子技術を導入することに成功し、さらに物流業者に対して量子技術を導入することにも成功している。

- ・(ローム社と Quanmatic 社の共同発表)https://www.rohm.co.jp/news-detail?news-title=2023-12-05_news&defaultGroupId=false
- ・(カインズ社と Quanmatic 社の発表)
<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000023.000117406.html>

3. 大学内拠点の設立

早稲田大学量子技術社会実装拠点の設立

概要:早稲田大学では、量子アプリケーション、量子ソフトウェア、量子ハードウェア、量子ネットワークを横串に、学内外の産官学が協力することで、2024 年 1 月に早稲田大学量子技術社会実装拠点(<https://www.waseda.jp/inst/qri/>)を設立した。研究代表者・戸川望は当拠点の拠点長を務める。

本拠点は量子技術のすべてのレイヤにわたり研究開発すると同時に、いち早くこれらの技術を社会に還元することで、量子技術の研究者だけでなく社会のさまざまな領域・分野で量子技術の普及促進を目指すものである。

本 CREST の成果は、個別の研究室にとどまらず、オープンな場(早稲田大学量子技術社会実装拠点をもとにオープンに産官学が連携)と、クローズな場(スタートアップ会社を通じて個別の産業界での取り組み)の双方で、今後も広く活用される見込みであり、双方の相乗効果により科学技術イノベーションに大きく寄与する成果を生み出す。

<代表的な論文>

本研究では、多くの研究成果を達成しており、上記<優れた基礎研究としての成果>で挙げた論文のほか、以下のような論文成果がある。

1. Siya Bao, Masashi Tawada, Shu Tanaka, and Nozomu Togawa, "An Ising-machine-based solver of vehicle routing problem with balanced pick-up," IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 10, no. 1, pp. 445-459, 2024, DOI: 10.1109/TCE.2023.3335392.

概要:現実的かつ難しい地理空間情報アプリケーションの 1 つとして、複数の集積所を持つ容量制約付き配送計画問題に関して、イジング計算機を利用して効率よく求解する手法を提案している。2 段階定式化によりイジング計算機を利用した求解により、シミュレーティッドアニーリングや数理最適化手法に比較して、2 衍以上の高速化を達成している。難しい地理空間情報アプリケーションであっても、イジング計算機で効率的に求解できることを示す重要な成果である。本成果は IEEE CT Society のトップ論文誌に採択されている。

2. Tatsuya Noguchi, Keisuke Fukada, Siya Bao, and Nozomu Togawa, "Trip planning based on subQUBO annealing" IEEE Access, vol. 11, pp. 100383-100395, 2023, DOI:

概要: 現実的かつ難しい地理空間情報アプリケーションの 1 つとして、旅程最適化を取り上げ、量子アニーリングマシンを含むイジング計算機を利用して効率よく求解する手法を提案している。特に、量子アニーリングマシンに入力できる問題サイズに比較して、旅程最適化の問題サイズは 2 衍以上大きいが、問題を小問題(部分 QUBO と呼ぶ、QUBO は 2 値変数で制約なしの最適化問題を指す)に効率良く分割しながら良解を求めている。ハードウェアの制約によりイジング計算機が適用できない分野においてもイジング計算機が適用可能であり、アプリケーション領域を格段に広げる重要な成果となる。

3. Satoru Jimbo, Tatsuhiko Shirai, Nozomu Togawa, Masato Motomura, and Kazushi Kawamura, "A GPU-based Ising machine with a multi-spin-flip capability for constrained combinatorial optimization," IEEE Access, vol. 12, pp. 43660-43673, 2024, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3380479.

概要: 本 CREST では、アプリケーション、アーキテクチャ、ハードウェア、ソフトウェアの融合を目指すものであるが、本 CREST 内部の複数のチーム(本村チームと戸川チーム)が連携することにより、これら 4 要素が一気通貫した研究成果を得ることができた。

戸川チームでは、これまで地理空間情報アプリケーションを対象に、これらのアプリケーションで多く見られる 1 ホット制約に対して、イジング計算機のアニーリングプロセスにおいて、同時に複数のスピンが変化する仕組みの理論を解明した。一方、これらの仕組みをハードウェアとして、イジング計算機に実装するためには、行列表現、その最適性の評価など、さらなる研究が必要であり、本村チームと戸川チームとが、特に中間評価以降、多くの議論を重ねてこれらの仕組みを解明し、実際に GPU イジング計算機として実現した。本論文発表はこれらの成果によるものであり、理論と実践が融合した重要な成果となる。

なお本成果は知財化を行い、産業化につながる準備をしている

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

・「戸川」グループ

研究代表者: 戸川望(早稲田大学理工学術院 教授)

研究項目:

- ① 地理空間情報ソフトウェア層
- ② 地理空間情報量子計算理論
- ③ 地理空間情報理想イジング計算機設計

・「高山」グループ

主たる共同研究者: 高山敏典(株式会社ゼンリンデータコム エキスパートエンジニア)

研究項目:

- ④ 地理空間情報アプリケーション層

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

• CREST チーム間連携

戦略目標「Society5.0 を支える革新的コンピューティング技術の創出」の達成を目指し、アプリケーション、ミドルウェア、計算機アーキテクチャの各技術レイヤーを連携・協調させた高効率コンピューティング技術の開発のため、戸川・高山グループによるアプリケーション層、ミドルウェア層と、計算機アーキテクチャそのものを研究している、東京科学大学・本村チームと

が連携し、これまでの研究成果の有効性を確認している。

- 産学連携

本研究は、研究当初から産官学（JST、早稲田大学、ゼンリンデータコム）が連携する体制をとり、CREST のスキームのもと（官）、大学で研究されたアルゴリズムを（学）、産業界が実用化することを目指している（産）。前述の通り、スタートアップや大学拠点を含めて、他社を含めた広がりもあり、産官学の強力なネットワークが形成されていると言える。

- 海外ネットワーク構築

本CRETを通じて海外ネットワークも構築している。例えば、早稲田大学は、本CREST研究成果を含むさまざまなアルゴリズム評価において、量子計算機ハードウェアのスタートアップ会社、英国 Oxford Quantum Circuits 社と量子コンピュータのアルゴリズム開発における基本合意書を締結している。

- （量子コンピュータのアルゴリズム開発）<https://www.waseda.jp/top/news/93459>

本ネットワークのもと、本 CREST 研究成果のもと、広く海外研究者ともネットワークを構築している。

- 大学量子拠点による成果普及

前述の通り、早稲田大学内に量子技術社会実装拠点を構築し、産官学が連携しながらネットワークを構築し、本 CREST 研究成果の普及を図っている。