

量子アニーリングマシンを用いたボルツマンマシンの学習基盤の構築 —スケーラブルかつサステナブルな次世代 AI の実現に向けて—

1. 背景

近年、AI 技術は急速に発展し、我々の生活に深く浸透しつつある。こうした進歩の背景には、高性能な GPU による高速な学習が不可欠であり、大量のデータを処理することで AI の精度向上が実現されている。しかし、AI の学習に伴う消費電力の急増が深刻な課題となっており、国際エネルギー機関 (IEA) の試算によれば、2026 年にはデータセンターの電力消費量が 2022 年の 2.3 倍に達する可能性が指摘されている。

この課題の解決策の一つとして、本プロジェクトでは量子アニーリングマシンに注目する。カナダの D-Wave Systems が提供する量子アニーリングマシンは、現在 5000 以上の量子ビットを備えており、イジングモデルの基底状態探索に用いられるのが一般的である。一方でその物理特性を活用し、ボルツマンマシンの学習への応用が提案されている。近年の研究では、ボルツマンマシンの学習において、古典的なマルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) と比較し、量子アニーリングを活用することで学習精度の向上が期待できることが示されている。

現状では、量子ビット数の制約により適用可能なタスクは小規模に限られるものの、ボルツマンマシンの学習において GPU を用いた従来手法と比較し、効率的かつ低消費電力な学習を実現できる可能性がある。

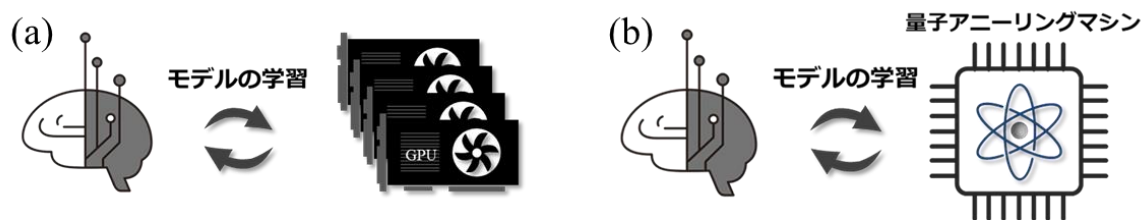


図1. AI の学習方法の概要図. (a): 従来の GPU を用いた学習. (b): 本プロジェクトで取り組む量子アニーリングマシンを用いた学習.

2. 目的

本プロジェクトでは、AI 技術の発展に伴い懸念される消費電力の急増への対処に向け、量子アニーリングマシンを用いたボルツマンマシンの学習基盤を構築し、効率的かつ低消費電力な学習の実現可能性を検証する。

3. ソフトウェア開発内容

本プロジェクトでは、量子アニーリングマシンをボルツマンマシンのサンプラーとして容易に活用できるソフトウェアの開発に取り組んだ。

本来 D-Wave Systems が提供する量子アニーリングマシンを使用するには、Python ライブラリである D-Wave Ocean SDK を用いた制御が必要であり、専門的な知識が求められる。これにより、一般ユーザーが量子アニーリングマシンを AI 学習に適用することは容易ではなく、実用化の大きな障壁となっていた。

本ソフトウェアでは、可視ユニット数や隠れユニット数などの主要パラメータを指定するだけで、量子アニーリング上に適切なボルツマンマシントポロジーを自動でマッピングできる機能を実装した。また、スケーラビリティの観点から、量子アニーリングマシン固有の物理トポロジーを活かした構造に制限することで、計算資源を最適化し、より実用的な学習環境を提供することを目指した。これにより、D-Wave Ocean SDK に詳しくないユーザーでも容易に量子アニーリングマシンを活用できる環境が整い、AI 学習への応用が大幅に促進されることが期待される。特に、エネルギー効率の向上により、AI 学習における消費電力削減が可能となり、持続可能な計算基盤の実現に貢献する。また、本ソフトウェアの導入により、従来は難しかった量子アニーリングの活用がより身近になり、機械学習分野における量子技術の普及が加速することも見込まれる。

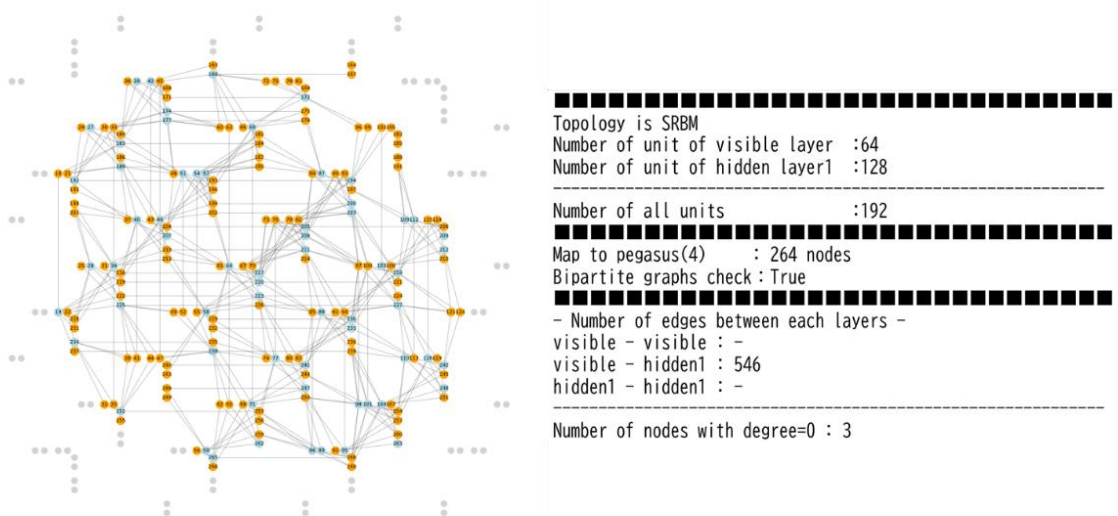


図 2. 開発したソフトウェアを使用して疎結合な制限ボルツマンマシン（SRBM）を実装した例。量子アニーリングマシン固有のペガサスグラフトポロジー上に疎結合な 2 部グラフ構造のボルツマンマシンが実装されている。

4. 新規性・優位性

本プロジェクトでは、量子アニーリングマシン固有の物理トポロジーに着目し、ボルツマンマシンの実装を行った。古典計算機上でのボルツマンマシンでは、計算コストの観点から完全 2 部グラフ構造を持つ制限ボルツマンマシンが広く用いられている。一方、D-Wave Systems が提供する量子アニーリングマシンは、ペガサスグラフと呼ばれる固有の物理トポロジーを有しており、完全 2 部グラフをそのままマップすることはできない。このため、量子アニーリングマシン上で完全 2 部グラフを再現するには、複数の物理量子ビットを 1 つの論理量子ビットとして振る舞うよう制御する必要がある、ボルツマンマシンのサイズが大きくなるにつれて実装が困難になる。

そこで、本プロジェクトでは量子アニーリングマシン固有の物理トポロジーを活かし、疎結合なボルツマンマシンの実装を行った。結果として、古典計算機上に実装した制限ボルツマンマシンと同様に、量子アニーリングマシンを用いた学習においても手書き数字の学習が可能であることを確認した。今後は、より大規模なデータセットに対する評価を進め、量子アニーリングマシンを活用したボルツマンマシンの適用可能性をさらに検証する予定である。

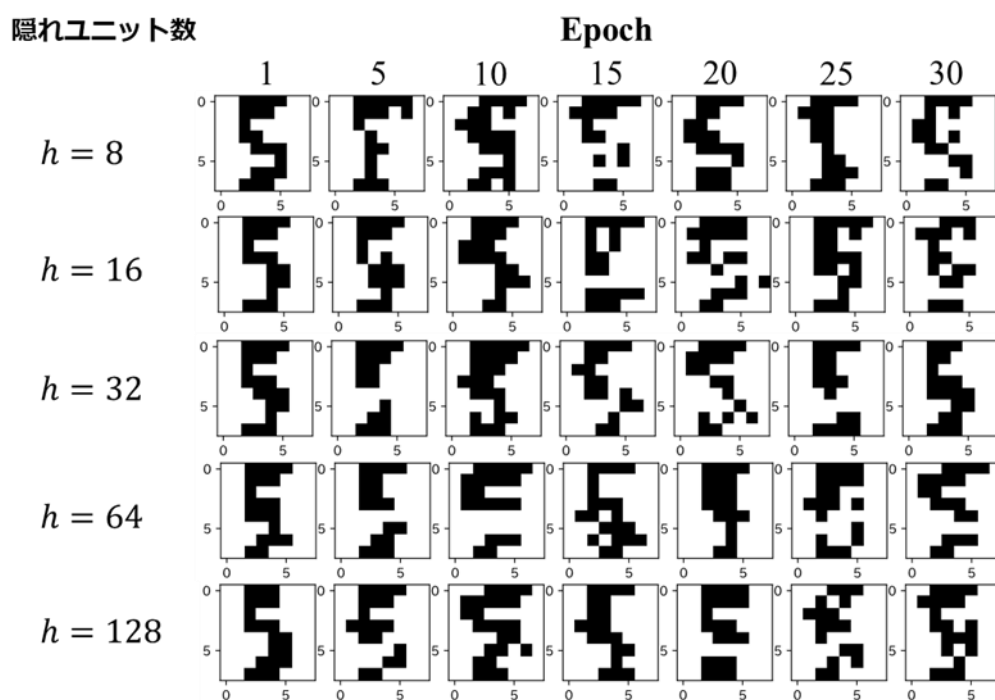


図 3. 量子アニーリングマシン上に実装した SRBM の学習結果。“疎結合な”2 部グラフ構造にも関わらず、少ない隠れユニット数および Epoch 数で学習ができていることが確認できる。

5. 期待されるユーザー価値と社会へのインパクト

本プロジェクトで開発したソフトウェアは、特に機械学習・AI を専門とするユーザーにとって大きな価値をもたらす。従来、量子アニーリングマシンをボルツマンマシンの学習に活用するには、D-Wave Ocean SDK を用いた専門的なコーディングが必要であり、これが一般ユーザーにとって大きな障壁となっていた。しかし、本プロジェクトで開発したソフトウェアを利用することで、専門知識がなくとも、いくつかのパラメータを指定するだけで量子アニーリングをボルツマンマシンの学習に活用できるようになり、より多くのユーザーが量子技術を手軽に利用できる環境が整う。

また、社会に対するインパクトとして、まず、量子アニーリングを活用することで、GPU に依存する従来の AI 学習と比較して消費電力を大幅に削減できる可能性がある。これによりデータセンターの電力負荷を軽減し、カーボンニュートラルな計算環境の実現に貢献することができる。さらに、本ソフトウェアにより、量子アニーリングに関する高度な専門知識がなくても、AI の学習に量子アニーリングマシンを手軽に活用できるようになることで、量子技術の適用分野が拡大し、産業界や学术界での量子古典ハイブリッド技術の研究開発が加速すると考えられる。

このように、本プロジェクトの成果は、AI 学習の計算コスト削減や量子技術の普及など、多方面にわたるインパクトをもたらすことが期待される。特に、量子アニーリングを機械学習に適用することで、持続可能な計算基盤の構築に寄与し、今後の AI 技術の進化に大きく貢献する可能性がある。

6. 氏名（所属）

松浦 巧（北海道大学）

（参考）関連 URL

なし。