

パズルを用いた高校生向けの量子人材育成教材の提案

福永 智渉^{†1} 湯瀬 裕昭^{†1} 大久保 誠也^{†1}

概要: 本研究の目的は、高校生を対象として量子人材を育成することである。そこで、目標達成の第一歩として、パズルと量子アニーリングを題材とした教材を提案する。提案する教材は、問題解決のプロセスを体験させることにより、量子情報処理に興味を持たせることに主眼をおいている。作成した教材では、条件ブロックを組合せることで、量子アニーリングを利用して身近なパズルを解くことができる。このことにより、数学や物理の前提知識を必要とせずに、量子アニーリングを体験することができる。

キーワード: 量子コンピュータ, 量子アニーリング, 量子人材育成, 組合せパズルゲーム

Proposal of quantum human resource development materials for high school students using puzzles

FUKUNAGA CHIHO^{†1} YUZE HIROAKI^{†1} OKUBO SEIYA^{†1}

1. はじめに

量子コンピュータは従来の古典コンピュータが数万年以上かかる計算を、現実的な時間で行うと期待されている。そして、量子計算機の実現について、数多くの研究が行われている。その中でも、いくつかの実現手法については、既に実機が存在しており、企業が活用を進めている。具体的な活用例として、新しい薬の組合せの発見や交通最適化などが挙げられる [5, 13]。量子技術への期待は国内外で高まっており、様々な国家戦略やプログラムが行われている。それらは技術の開発や活用だけでなく、量子技術を使いこなす人材である量子人材を育成することにも言及している。日本では、2022年に内閣府から量子未来社会ビジョンが発表され、2030年までに量子技術を利用する人材を1,000万人にする目標が掲げられた [15]。具体的な取組としては、文部科学省が光・量子飛躍フラッグシッププログラムで、高校生以上に量子人材を育成するためのプログラムを行っている [20]。その他にも、産学官民間問わずいくつかの育成プログラムが行われている [10, 21, 31]。

量子未来社会ビジョンで掲げられた量子技術を活用する人材には、一般の高等学校で教育を受けて社会に出た人間も含まれる。実際に量子人材を増やしていくには、情報技術や量子コンピュータに早くから興味を持って自主的に勉強を行う高校生だけでなく、一般の高校生にも中等教育課程で量子技術に親しみを持ってもらう必要がある。しかし、現在の日本の量子人材育成の取組は、一般の高校生まで広がっていない。また、一般の高校生を対象とした量子人材育成の教材の開発や研究もほとんど行われていない。

本研究の目的は、高校生を対象とした量子人材の育成である。特に、人材育成の第一歩として、量子計算に興味を持たせることに主眼をおく。そのために、扱う内容が身近で、かつ数学や情報の高度な知識を必要とせずに、量子計算機を使った問題解決プロセスを体験できる教材を提案する。具体的には、パズルと量子アニーリングを題材とする教材を提案する。

2. 諸定義

2.1 量子コンピュータ

量子コンピュータとは、重ね合わせの状態やエンタングルメントなどの量子力学の現象を利用して計算を行うコンピュータである。一方、現在多く利用されているコン

^{†1} 静岡県立大学大学院経営情報イノベーション研究科
Graduate School of Management, Informatics and Innovation.
University of Shizuoka

コンピュータは古典力学をベースとしているため、量子情報科学分野では、古典コンピュータと呼ばれる。

量子コンピュータは、古典コンピュータが数万年など現実的な時間で解けないと考えられている問題について、効率的に解くことが期待されている。その理由のひとつは、古典コンピュータが解の候補を1つずつ計算する必要があるのに対し、量子コンピュータは量子重ね合わせにより解の候補全てを並列で計算できるためである。このように、量子コンピュータを利用するためのアルゴリズムの研究が進められている。一方、量子コンピュータの物理的実現の研究も進められており、様々な実装方法が提案されている。量子コンピュータの研究当初から研究されている方式として、量子ゲート方式がある。これは、古典コンピュータで使用されている論理ゲートの代わりに量子ゲートを用いて汎用的な計算を行う。理想的に実現できた場合、いくつかの問題に対し、現在知られている古典アルゴリズムよりも高速に問題を解くことができる。IBMや大阪大学など様々な企業や研究機関が研究開発を行っており、約400量子ビットと小規模ではあるが、実機も存在する[11,25]。しかし、基本素子である量子ビットを多数利用して安定した演算を行う必要があり、その技術は発展途上である。また、現実的な問題を解くには、大規模化が必要である。

量子ゲート方式とは異なる実現方法として、量子アニーリングが存在する。これは基本素子として量子ビットを使う点は量子ゲート方式と同様であり、理論的には量子ゲート方式と等価である[1]。しかし、実現方法や目的が異なる。量子アニーリングはイジングモデルの基底状態探索問題の求解に特化した専用機であり、汎用性はない。しかし、装置がシンプルで比較的安定して大規模化することが可能である。こちらも実機が存在しており、代表例としてD-Wave社の量子アニーリング機械がある[7]。D-Wave社の量子アニーリング機械であるAdvantageは約5000量子ビットを有しており、量子ゲート方式よりも大規模な実機となる[8]。これらを用いて工場の業務改善や広告の最適化が行われるなど、実用化され、企業で活用されている[4,6]。D-Wave社は、条件付ではあるが、量子アニーリング機械を無償で利用可能にしている。さらに、古典と量子のハイブリッドソルバーなど様々なライブラリを提供している。

2.2 国内外の量子人材育成に関する取組

量子技術を扱える人材である、量子人材育成の取組は、国内外で様々行われている。米国では、2018年に国家戦略として、高校生以下を対象に量子科学教育に取り組んでいる[14]。その他諸外国においても、初等教育から中等教育、高等教育と様々な教育段階において量子人材育成のための研究が行われている[2,12]。国内においても、1節で取り上げたように、物理分野や情報分野に興味を持つ高校生以上を対象に、内閣府が掲げる量子未来社会ビジョンに

おける具体的な取組がいくつか行われている。また、高等専門学校や文系学部・大学院で量子コンピュータを扱うための研究がいくつか存在する[19,23,24]。

国内外での取組は物理分野におけるアプローチが主であり、量子力学を教えるためのツールとして捉えられている場合もある。しかし、内閣府が掲げる量子未来社会ビジョンでの量子技術を活用する人材には、データサイエンティストやSEなどの物理分野に明るくない、情報分野の人材も含まれると考えられる。現在の量子人材育成の課題として、情報分野からの量子人材育成のアプローチがほとんど存在しないこと、高等教育や理系学生を対象とした人材育成が主であることが挙げられる[2,12,19,23,24]。

2.3 組合せパズルゲーム

ある盤面が与えられたとき、盤面にあるヒントを手がかりに問題に書き込みを行っていき、最終的に条件を満たす組合せ方を発見するパズルを、組合せパズルゲームという。組合せパズルゲームの例として、数独やサムラインが挙げられる。どちらも株式会社ニコリが出版するパズル雑誌に掲載されたパズルである[16,17]。また、組合せパズルゲームには様々な種類が存在する。答えの書き込み方で分類すると、数字を書き込むものや領域を分割するものなどがある。例として挙げた数独とサムラインは、数字をマスに書き込むタイプのパズルである。

組合せパズルゲームのいくつかは、NP困難問題であることが既に示されている。NP困難問題は、古典コンピュータでは現実的な時間で解けない問題であると考えられている。具体的には、数独やサムライン、フィロミノなどのパズルについて証明が行われている[28,29]。よって、これらのパズルゲームは難しい問題であるといえる。その他にも、コンピュータを用いた自動解法についてもいくつか研究されている。古典コンピュータを用いた解法では、スリザードリンクやナンバーリンクなどについて提案されている[22,26]。量子アニーリングについても、バトルシップや四角に切れ、数独、サムラインについて解法が提案されている[3,9,29,30]。

組合せパズルゲームを実問題に応用する研究も行われている。具体的には、NP困難性を利用したセキュリティ分野への応用や、ラテン方阵の実験計画法への応用などが存在する[18,27]。このように組合せパズルゲームは身近な問題であるだけでなく、実問題への応用も可能な問題である。

3. 提案する教材とその教授方法

3.1 教材の目的とアイデア

本研究の目的は、高校生に量子計算への興味を持たせることである。そこで、量子計算で問題を解くプロセスを高校生に体験させる教材を提案する。そのプロセスを通じて、高校生が興味を持つとともに、その応用可能性を知る

ことを試みる。

そこで、まず教材に必要な条件を検討した。現在の国内における量子人材育成は、2.2節で言及したように、高等教育以上を対象としたものや、物理分野や情報分野に興味を持つ高校生を対象としたものがほとんどで、一般の高校生までは広がっていない。一般の高校生を対象に量子人材を育成するための課題として、以下の2点が考えられる。

(a) 扱う題材が高校生にとって身近でないこと

量子コンピュータで扱う問題は、機械学習や経路の最適化などであり、身近でない題材が多い。また、このような問題では、出た答えが直感的に正しい解であるかの判断が難しい。よって、高校生が問題解決を行って、十分な達成感を得ることが難しいと考えられる。

(b) 数学や情報の高度な知識が必須であること

量子コンピュータはクラウド上やシミュレータなどで利用することができる。しかしながら、実際に使用するには行列などの数学的な知識や、重ね合わせなどの量子力学に関する知識、プログラミングが必須である。一般の高校生には、高校数学以上の知識を必要とする問題解決は難しい。また、コードを記述するタイプのプログラミングでは、コードのミスや文法に注意が向いてしまい、量子コンピュータを用いた問題解決に集中できないことが考えられる。量子ゲート方式については、GUIで回路を組むこともできるが、ゲートや量子ビット単位の操作となる。よって、具体的な問題を解こうとすると、非常に多くのゲートを使って複雑な回路を生成することになる。したがって、高校生に身近な問題を扱わせるのは難しい可能性がある。

以上の課題に対し、以下の解決方法を提案する。

(a) 数字をマスに入れるタイプのパズルを題材とする

数独をはじめとするパズルは、新聞やアプリなどで高校生にとって身近な存在である。また、機械学習や経路の最適化に比べ、答えが出たときにそれが正しい解であることが簡単に判断できる。特に数字をマスに入れるタイプのパズルは、組合せパズルゲームの代表例である。そして、四則演算や同じ数字を同じ行・列に入れないなど、他のタイプに比べてルールが単純である。そのため、高校生が問題解決を行って達成感を得られる題材である。また、パズルは現実的な問題への適用も考えられ、応用可能性なども検討しやすい。

(b) ブロックプログラミングで量子アニーリングを実行させる

量子アニーリングは、イジングモデルの基底状態探索問題に特化した計算機である。問題を解く際には、対象の問題をイジングモデルの形で表現することになる。解きたい問題に他の問題と同様の要素があった場合、その要素の部分も同様のイジングモデルの式を用いることができる。特に、数字をマスに入れるタイプ

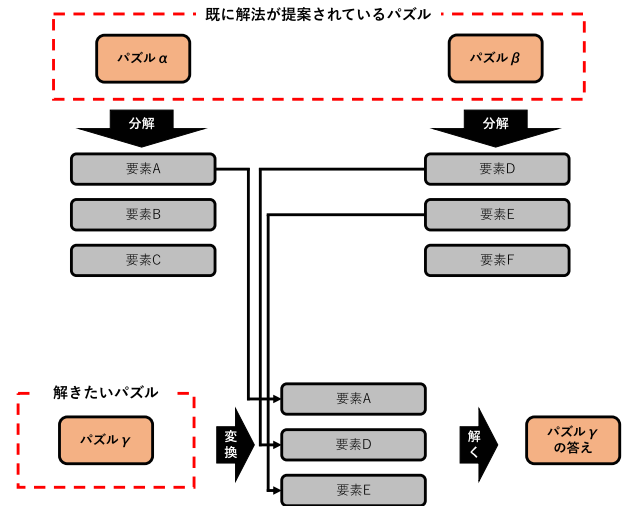


図 1: 要素を組合わせて問題を解くイメージ

Fig. 1 Image of combining elements to solve a problem

のパズルでは、同様の要素が出現することが多い。つまり、図1のように既知の要素を組み合わせることにより、新しいパズルを解くことができる。よって、本研究ではこれらの要素をブロックとし、これらのブロックを組合わせて問題を解くことができるブロックプログラミング教材とする。これにより、一般の高校生でも数式やプログラミングを意識せずに問題解決を行うことができる。

以上のことを踏まえて、数字を入れるタイプのパズルと、量子アニーリングを題材として、高校生向けの量子人材育成教材を提案する。

3.2 教材の概要と設計

提案する教材では、ブロックを選択することにより、量子アニーリングによってパズルを解くことになる。その教材は、以下の4つからなる。

- (1) 条件ブロック群
- (2) 解かせるパズルの問題群
- (3) ブロックの組合せ方の正答例
- (4) 実行させるためのシステム

図2に全体の概要を示す。以降、それぞれの要素について説明する。

(1)の条件ブロック群は、パズルに共通する要素が書かれたブロックの集合である。1つのブロックに、1つの共通要素が書かれている。それぞれのブロックには、細かいパラメータを入力する欄がある。これらのブロック群は、パズルに関する研究成果から作成した。例えば、先行研究にて、数字を入れるタイプのパズルである数独やサムライのイジングモデルが提案されている [9,29]。これらのパズルのルールを分解し、一般化すると共通部分があることが分かる。この共通部分のイジングモデルを条件ブロックとして日本語で表現する。学習者は、このブロックを組合

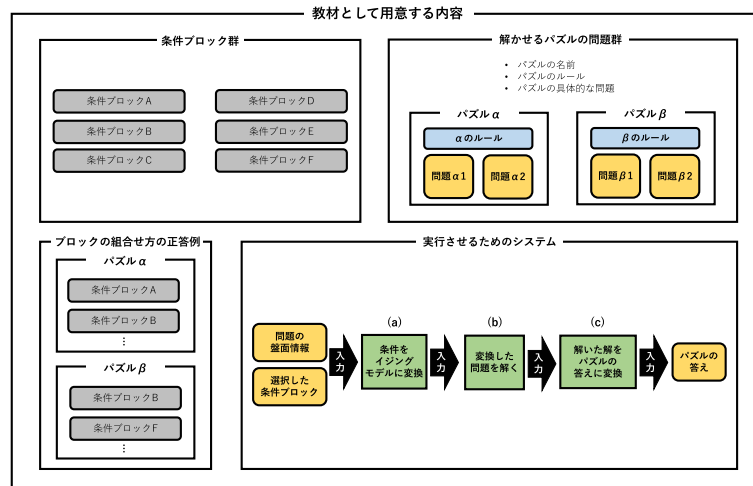


図 2: 教材として用意する内容

Fig. 2 Contents to be prepared as teaching materials

せ、適宜パラメータを入力してパズルの問題を解いていく。

(2) のパズルの問題群は、パズルの具体的な問題の群である。複数のパズルについて、そのパズルの名前とルール、そのパズルについての複数の問題と解答例を含んでいる。また、それらのパズルの問題には一意の答えが存在する。学習者はこれらの情報を元に、(1) のブロック群からブロックを選択し、パズルに合わせたパラメータを設定する。

(3) のブロックの組合せ方の正答例は、(2) の問題群の中で使用するブロックの組合せの正答例である。各パズルで必要となるブロックとパラメータが書かれている。学習者に組合せ例を示すときに使用される。

(4) の実行させるためのシステムは、生徒が使用することにより、一連の体験ができるようなソフトウェアである。このシステムでは、学習者がパズルの問題に合った条件ブロックを選択するインタフェースと選択された条件ブロックから問題を解く機能、解いた結果を出力するインタフェースが提供される。

まず、各インタフェースについて説明する。各インタフェースのイメージを図 3 に示す。図 3 の入力画面では、学習者が解きたいパズルを選択する。また、入力画面には事前に用意された条件ブロックを提示され、学習者はその中から必要な条件ブロックを選択して入力部分に配置する。出力画面では、学習者が選択したパズルの問題と実際に得られた答えを出力する。

次に、選択された条件ブロックから問題を解く機能について説明する。この機能は、条件ブロックとパズルの問題が入力されると、必要な変換を行って量子アニーリングを実行し、その結果をパズルの解として出力する。具体的には、以下の (a)~(c) の処理を行う。

(a) 条件をイジングモデルに変換

入力として、解きたい問題の問題盘面と、学習者が入力した条件ブロックを受け取る。それらの条件を元

に、条件ブロックをイジングモデルに変換する。これは、古典コンピュータ上で動作する。

(b) 変換した問題を解く

(a) で作成されたイジングモデルを、量子アニーリングを用いて解く。この実行には、量子アニーリングの実機や、量子アニーリングのシミュレータを用いる。

(c) 解いた解をパズルの答えに変換

(b) で解いた結果はイジングモデルの答えとして出力される。そのため、出力された答えをパズルの答えに変換する必要がある。入力として受け付けた問題盘面の情報を元に、パズルの答えに変換して盤面上に配置する。最後に出力として図 3 の出力画面にパズルの答えを表示する。これは古典コンピュータ上で動作する。

これらの教材を使用した際の流れを、図 4 に示す。図 4 では、サムラインの問題を選択して、問題を解く様子を示している。それぞれのステップでは、具体的には以下のことを行っている。

Step1: 解きたいパズルを選択する。

3.2 節で示したように、教材として事前にパズル名やルールなどの情報が与えられている。そこから、学習者が図 3 に示したインタフェースを用いて、解きたいパズルの問題を選択する。

Step2: 条件ブロックを選択する。

Step1 で選択したパズルのルールを元に、図 3 に示したインタフェースを用いて、提示された条件ブロック群から、適切なものを選択する。また、適宜条件ブロックにパラメータを入力する。最後に画面上の実行ボタンを押す。実行ボタンを押すと、実行させるためのシステムが条件ブロックやパズルの情報を元に計算を行い、実行結果を図 3 の出力画面に出力する。

Step3: 出力された答えを確認する。

出力がパズルの答えと合っているか確認する。

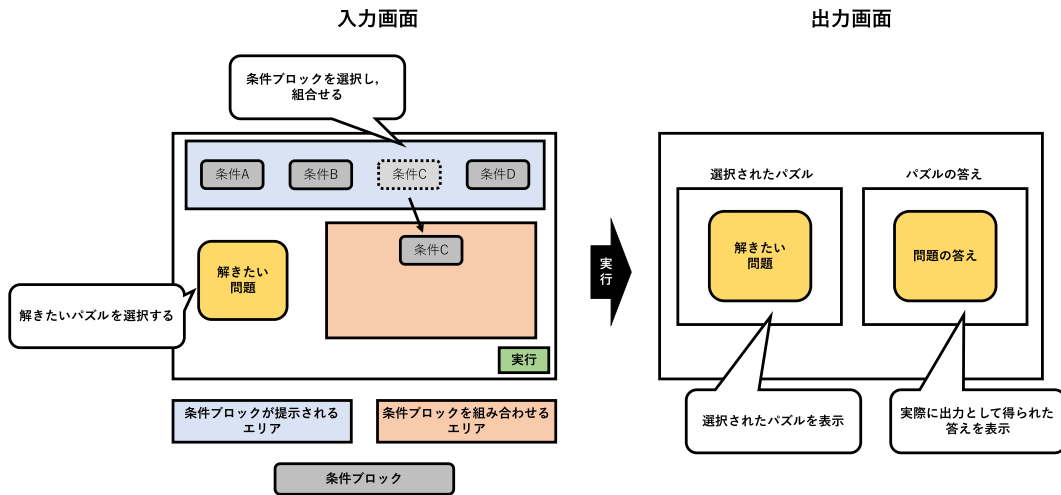


図 3: 実際に提示される画面のイメージ

Fig. 3 Image of the screen

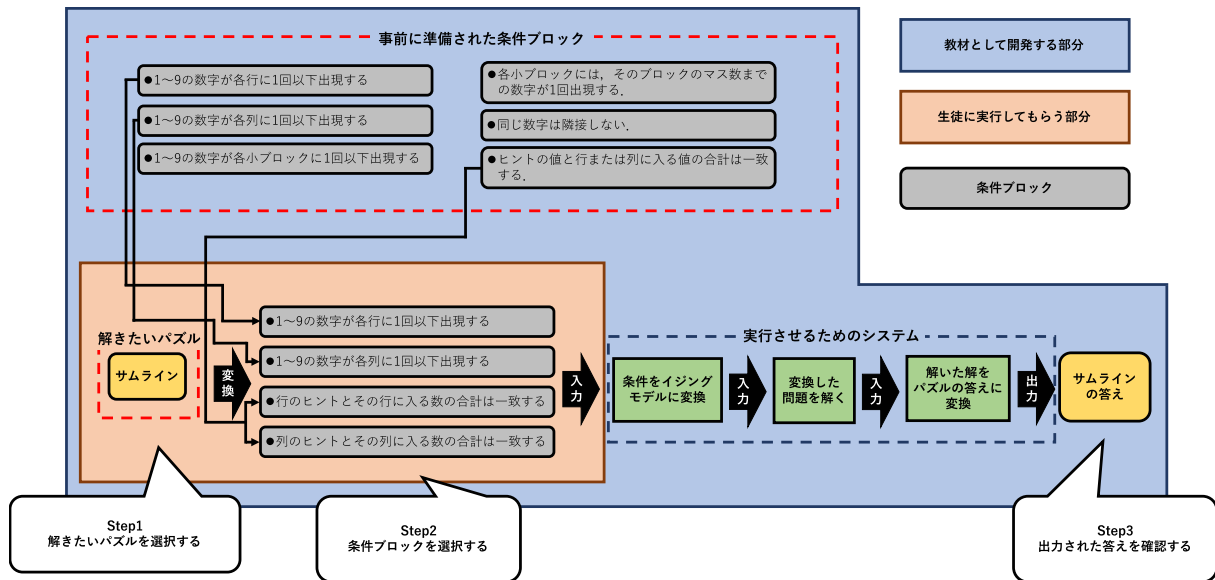


図 4: 提案教材の使用の流れ

Fig. 4 Flow of using the proposed teaching materials

3.3 教授方法

提案教材は、高等学校の「総合的な探求の時間」において、量子アニーリングによる問題解決のプロセスを体験するために使用することを想定する。実際には、量子コンピュータや量子アニーリングの簡単な概要や応用例などを理解したうえで使用することが望ましい。よって、本教材を使った授業の流れとして、以下を提案する。

- (1) 学習者に学習のねらいを説明する。具体的なねらいは、量子情報処理への興味を養うことである。
- (2) 量子コンピュータや量子アニーリングの概要、応用例について説明する。また、応用例の1つとして、パズルゲームを紹介する。
- (3) 例として、1つのパズルを教材を用いて解いてみせる。
- (4) グループや個人単位で教材を用いてパズルを解かせる。出力された答えが、パズルの正答と異なった場合

には、試行錯誤を行わせる。

- (5) グループや個人単位で解いたパズルのいくつかについて、どのように解いたか発表を行わせる。
- (6) 解説を行い、全体を総括する。

3.1節で示したように、パズルは現実的な問題への応用も考えられる。よって、解説の際に現実的な問題への応用例を紹介し、次のステップへの導入を行うことも考えられる。

4. おわりに

本研究の目的は、高校生を対象とした量子人材の育成である。そのために、パズルと量子アニーリングを題材として、高校生向け量子人材育成の教材と教授方法を提案した。この教材を使用して問題解決のプロセスを体験することで、量子技術に興味を持つことができれば、量子未来社会ビジョンの量子技術を利用する人材 1,000 万人への足が

かりの1つとなる。

今後の課題として以下の2つを挙げる。まず1つ目は実際の教材開発である。現在は設計に留まっているため、高校生が利用できる形にする必要がある。2つ目は教材、教授法の評価である。本論中に言及したように、高等学校の「総合的な探求の時間」にて実践を行うことを予定している。そして、実践を通して事前・事後アンケートやパズルを解く課題の取組状況により、教材を用いて量子技術に興味を持つことができるかを評価する。実践校との連携や授業計画、具体的な評価指標などを今後提案する予定である。

参考文献

- [1] Aharonov, D., van Dam, W., Kempe, J., Landau, Z., Lloyd, S. and Regev, O.: Adiabatic quantum computation is equivalent to standard quantum computation, *45th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, pp. 42–51 (online), DOI: 10.1109/FOCS.2004.8 (2004).
- [2] Carrascal, G., del Barrio, A. A. and Botella, G.: First experiences of teaching quantum computing, *The Journal of Supercomputing*, Vol. 77, pp. 2770–2799 (online), DOI: 10.1007/s11227-020-03376-x (2021).
- [3] Casper, W. R. and Grimes, T.: Battleship, tomography and quantum annealing, *European Journal of Applied Mathematics*, Vol. 34, No. 4, pp. 758–773 (2023).
- [4] D-Wave: デンソー：量子コンピューティングによってモビリティの未来を変革, https://dwavejapan.com/app/uploads/2019/12/Final_D-Wave_DENS0_case_study_2019_11_22.pdf [アクセス 2024年06月14日].
- [5] D-Wave: フォルクスワーゲンは交通最適化研究に実量子コンピュータをどのように使用しているか, https://dwavejapan.com/app/uploads/2019/12/Final_Dwave_VW_Case_Study_2019_11_13.pdf [アクセス 2024年06月14日].
- [6] D-Wave: プロダクションにおける量子：テレビコマースのリーチの最大化, https://dwavejapan.com/app/uploads/2023/06/DWave_Recruit_Japan_v4.2.pdf [アクセス 2024年06月14日].
- [7] D-Wave: 量子コンピューティング, <https://dwavejapan.com/system/> [アクセス 2021年12月2日].
- [8] D-Wave: D-Wave Advantage システム: 概要, https://dwavejapan.com/app/uploads/2020/12/14-1049A-A_J-The_D-Wave_Advantage_System_An_Overview_0-.pdf [アクセス 2024年06月14日] (2020).
- [9] FIXSTARS Amplify: 数独, <https://amplify.fixstars.com/ja/techresources/application/sudoku/> [アクセス 2024年06月12日].
- [10] IBM: IBM Quantum Challenge 2024, <https://challenges.quantum.ibm.com/2024> [アクセス 2024年06月12日].
- [11] IBM: IBM、400量子ビット超えの量子プロセッサと次世代 IBM Quantum System Two を発表, <https://jp.newsroom.ibm.com/2022-11-10-IBM-Unveils-400-Qubit-Plus-Quantum-Processor-and-Next-Generation-IBM-Quantum-System-Two> [アクセス 2024年06月12日].
- [12] Koczka, F., Prantner, C. and Biro, C.: Educational Issues Raised by the Availability of the Quantum Computer, *Central-European Journal of New Technologies in Research, Education and Practice*, Vol. 5, pp. 1–17 (online), DOI: 10.36427/CEJN-TREP.5.1.5051 (2023).
- [13] Polarisqb: <https://polarisqb.com/#homePage> [アクセス 2024年06月14日].
- [14] National strategic overview for quantum information science: Subcommittee on quantum information science, https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2020/10/2018_NSTC_National_Strategic_Overview_QIS.pdf [アクセス 2024年04月15日] (2018).
- [15] 内閣府科学技術・イノベーション推進事務局: 量子未来社会ビジョン～量子技術により目指すべき未来社会ビジョンとその実現に向けた戦略～概要, https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/ryoshi_gaiyo_print.pdf [アクセス 2024年06月11日] (2022).
- [16] 株式会社ニコリ: サムライン, <https://www.nikoli.co.jp/ja/puzzles/sumline/> [アクセス 2023年3月24日].
- [17] 株式会社ニコリ: 数独, <https://www.nikoli.co.jp/ja/puzzles/sudoku/> [アクセス 2024年04月04日].
- [18] 広岡博之: ラテン方格法の有用性に関する評価法, *日本畜産学会報*, Vol. 93, No. 1, pp. 1–3 (2022).
- [19] 江見圭司: 量子コンピュータ教育に関する考察, *研究報告コンピュータと教育 (CE)*, Vol. 2022, No. 8, pp. 1–4 (2022).
- [20] 国立研究開発法人科学技術振興機構: 光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP), <https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/> [アクセス 2024年06月11日].
- [21] 国立研究開発法人情報通信研究機構: NICT QUANTUM CAMP, <https://nqc.nict.go.jp/> [アクセス 2024年06月12日].
- [22] 石濱友裕, 久野誉人: 整数計画法を用いた高速な Slitherlink パズルの解法, *情報処理学会論文誌*, Vol. 54, No. 8, pp. 2103–2108 (2013).
- [23] 村田嘉弘: 量子コンピュータのプログラミング教育に向けて (1), *埼玉学園大学紀要. 経済経営学部篇*, Vol. 22, pp. 67–77 (2022).
- [24] 村田嘉弘: 量子コンピュータのプログラミング教育に向けて (2), *埼玉学園大学紀要. 経済経営学部篇*, Vol. 23, pp. 15–28 (2023).
- [25] 大阪大学: 大阪大学に設置した超伝導量子コンピュータ国産3号機のクラウドサービスを開始, https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2023/20231220_1 [アクセス 2024年06月12日] (2023).
- [26] 田中雄一郎, 高橋篤司: 領域分割を用いた CHORD-LAST 法に基づくナンバーリンク解法, *DA シンポジウム 2014 論文集*, Vol. 2014, pp. 221–226 (2014).
- [27] 藤家一夢, 安細勉: ヘルゴルフパズルの情報セキュリティ技術への応用, *研究報告数理モデル化と問題解決 (MPS)*, Vol. 2021-MPS-135, No. 8, pp. 1–2 (2021).
- [28] 八登崇之: 別解問題の計算論的複雑さと完全性及びパズルゲームへの応用, *東京大学修士論文* (2003).
- [29] 福永智渉, 大久保誠也: サムラインの NP 完全性の証明と量子アニーリングを用いた解法について, *研究報告数理モデル化と問題解決 (MPS)*, Vol. 2023-MPS-146, No. 9, pp. 1–6 (2023).
- [30] 福永智渉, 大久保誠也: 四角に切れの量子アニーリングを用いた解法について, *第 85 回全国大会講演論文集*, Vol. 2023, No. 1, pp. 323–324 (2023).
- [31] QSRH 量子ソフトウェア研究拠点: SEMINAR 量子ソフトウェア勉強会, <https://qsrh.jp/seminar/> [アクセス 2024年06月12日].