

四角に切れの量子アニーリングを用いた解法について

福永智渉[†] 大久保誠也[†]

[†] 静岡県立大学大学院経営情報イノベーション研究科

1 はじめに

古典コンピュータでは、効率的に解けない問題があると考えられており、組み合わせパズルなどもこれに当てはまる。そのような問題への手段として、量子コンピュータの研究が進められている。量子コンピュータが実現できれば、これらの問題が従来よりも高速に解くことができるようになると、期待されている。

本研究では、組合せパズルゲーム「四角に切れ」の量子アニーリングを用いた解法を提案する。また、計算機実験により、提案手法の妥当性を評価する。

2 諸定義

2.1 量子アニーリング

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量子計算機である。量子アニーリングで組み合わせ最適化問題を解く際には、解きたい問題をハミルトニアンとして表す必要がある。また、量子アニーリングの実装例として、D-Wave の量子アニーリングがある [2]。

2.2 四角に切れ

四角に切れとは株式会社ニコリによって考案されたパズルである [3]。四角に切れは以下のように定義される。

Definition 1 マス目状に仕切られた、長方形、もしくは正方形の盤面と、ヒントと呼ばれる数字が入力として与えられる。マス目に沿ってタテヨコ線を引き、盤面をヒントの面積通りに正方形、または長方形に分けることが目的となる。このとき、分割された四角にヒントとなった数字が入るようにしなければならない。

四角に切れの例題とその解答を、図 1 に示す。四角に切れは、ExactCover 問題に帰着できることが知られている [5]。ここで、ExactCover 問題は次のように定義される。

An Algorithm for Shikaku using Quantum Annealing
Chiho FUKUNAGA[†], Seiya OKUBO[†]

[†]Graduate School of Management and Information of Innovation. University of Shizuoka

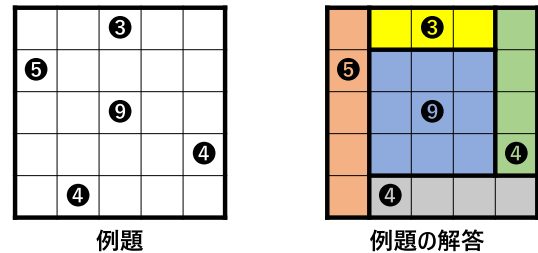


図 1: 四角に切れ問題の例題と解

Definition 2 集合 $U = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$ と、 U の空でない部分集合 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_m$ が与えられる。このとき、集合 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_m$ の組み合わせの和を取ることによって、 U を作ることを考える。ただし、要素に重複があってはならない。 U を作ることができる組み合わせを発見する問題を、ExactCover 問題と呼ぶ。

以降では、与えられる部分集合の数を、 $|S|$ と表す。また、ExactCover 問題を解くためのハミルトニアンが、Lucas によって示されている [1]。

3 提案手法

四角に切れを ExactCover 問題として捉え、量子アニーリングで解く方法を提案する。提案手法は、以下の 4 ステップからなる。

入力：四角に切れの問題

- 1：四角に切れの問題を、ExactCover 問題に変換する。
- 2：ExactCover 問題のハミルトニアンを生成する。
- 3：ハミルトニアンで表される物理系を、量子アニーリングにしたがって変化させる。
- 4：得られたエネルギー状態を、解とする。

4 計算機実験

4.1 実験目的と方法

提案手法で、四角に切れを解くことができるか検証するため、計算機実験を行った。実験は、以下の手順

表 1: 計算機実験の結果

問題	$ S $	成功率	問題	$ S $	成功率
No.1_5*5	15	9.92%	No.8_6*6	25	6.80%
No.2_5*5	17	27.52%	No.10_6*6	23	3.78%
No.3_5*5	19	4.26%	No.11_6*5	25	15.48%
No.3_5*6	18	26.80%	No.12_6*5	17	9.62%
No.4_5*5	16	71.66%	No.13_6*6	13	28.06%
No.4_5*6	18	15.82%	No.14_5*5	22	9.70%
No.4_6*5	17	28.60%	No.14_6*5	28	0.18%
No.7_5*5	17	8.14%	No.22_5*5	17	7.66%
No.7_5*6	23	1.48%	No.69_5*5	18	27.32%

で行った。

1: 問題を生成する。

2: 以下を、各問題について行う。

- a) ExactCover 問題に変換する。
- b) 量子アニーリングを用いて解く。

3: サイズ毎に集計を取る。

四角に切れは、問題を自動生成する手法が提案されている [4]。ステップ 1 の問題の生成は、自動生成プログラムを用いて、ランダムに生成した 18 問を使用した。生成した問題には、盤面のサイズと、サイズ毎の通し番号を、問題名として付与した。例えば、No.1_5*5 は、盤面サイズが 5*5 の 1 番目の問題である。

ステップ 2a では、選んだ各問題を、[5] にしたがって ExactCover 問題に変換した。

ステップ 2b では D-Wave の Advantage_system4.1 を用いた。実行時間は 20 ミリ秒、1 回に出力する解答数は 1000 個とした。その際、dwave-ocean-sdk のバージョン 4.3.0、並びに付属するパッケージを用いた。

ステップ 3 の集計では、1000 個の出力に含まれる正答の個数を、その回の成功率とした。各問題 10 回ずつ実行し、各回の成功率の平均を、その問題に対する成功率とした。

4.2 実験結果

表 1 に各問題の $|S|$ と成功率を示す。また、成功率は小数点第三位で四捨五入を行った。

表 1 より、本実験で取り上げた問題は、全く成功しない問題が無かったことが分かる。また、問題の $|S|$ や、四角に切れのサイズによって成功率が異なることが分かる。

本実験で、最も成功率が高い問題は、No.4_5*5 の $|S| = 16$ の問題で、成功率は 71.66%であった。一方、最も成功率の低い問題は、No.14_6*5 の $|S| = 28$ の問題で、成功率は 0.18%であった。

最も成功率の低い No.14_6*5 は $|S| = 28$ と、本実験の中で最も $|S|$ が大きい問題であった。しかし、最も成功率の高い問題は、No.4_5*5 は $|S| = 16$ であり、扱った問題中で、 $|S|$ が最小な問題ではないことが分かる。また、No.4_6*5 と No.7_5*5 のように、 $|S|$ が同じでも、成功率は異なる。

4.3 考察

計算機実験の結果より、提案手法で小規模な四角に切れを解くことができるということが分かった。また、その成功率が、問題の $|S|$ や、四角に切れ問題のサイズによって異なることが分かった。

問題の $|S|$ に着目を見ると、最小の $|S|$ の問題が最も成功率が高くなるわけでは無いことが分かった。また、同じ $|S|$ であっても成功率が異なることから、 $|S|$ 以外の要因も成功率に影響していることが考えられる。

5 おわりに

本研究では、四角に切れの量子アニーリングを用いた解法を提案した。そして、その有効性を検証するために、D-Wave の量子アニーリングマシンを用いた計算機実験を行った。その結果、小規模な四角に切れでは、提案手法で解けることが明らかになった。

今後の課題としては、四角に切れの成功率に影響する要素の調査が挙げられる。

参考文献

- [1] Andrew, L.: Ising formulations of many NP problems, *frontiers in PHYSICS* (2014).
- [2] 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].
- [3] 株式会社ニコリ: 四角に切れ, <https://www.nikoli.co.jp/ja/puzzles/shikaku/> [アクセス 2021 年 12 月 17 日].
- [4] 佐々木駿: 四角い切れの問題の自動生成に関する研究, 静岡県立大学経営情報学部卒業論文 (2020).
- [5] 鈴木裕也: 四角に切れパズルを高速に解くアルゴリズムの研究, 静岡県立大学経営情報学部卒業論文 (2021).