

# QUBO を用いた論理ゲートイジング計算機における ビット間結合の高階調化とグラフ彩色問題の検討

## Ising Spin Computing Using QUBO with High-Resolution Bit Connection for Graph Coloring Problems

東京農工大 ○三木司、島田萌絵、平田鷹介、白樫淳一

Tokyo University of Agriculture & Technology

○T. Miki, M. Shimada, Y. Hirata and J. Shirakashi

E-mail: s197706y@st.go.tuat.ac.jp

近年、交通渋滞の解消や物流コスト低減といった実社会の複雑な問題を高速に解くことが求められており、この問題は一種の組合せ最適化問題と等価である。そこで、イジングモデルを用いた組合せ最適化問題専用機が注目を集めている[1-3]。これまで我々は、論理表現されたイジングモデル[4]に Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO)を導入し、巡回セールスマン問題の検討を行ってきた[5]。今回は、QUBO を用いたイジング計算機におけるビット間結合を高階調化し、組合せ最適化問題の1つであるグラフ彩色問題を検討した。

本実験では、ソフトウェア上にエミュレートされたイジングモデルを用いて、10州と3準州の計13の地域からなるカナダを4色で塗り分けるグラフ彩色問題を解いた。カナダは、13の頂点と20本の辺からなるグラフで表現され、共通の辺を持つ頂点同士が同色の状態をとらない制約下で配色する必要がある。そこで、この制約を満たした際にコストが下がる QUBO 関数を作成し、関数の最小値(最適解)がイジングモデルの基底状態に対応するよう計算機上にマッピングした。スピン判定論理には多数決論理[1]を用い、揺らぎがスピン更新回数に対して線形に減少するスケジュールを採用した。図1に、ビット間結合の階調数が64-bitのイジング計算機を用いてグラフ彩色問題を解いた場合のエネルギー収束動作を示す。横軸はスピンの更新回数である Iteration  $N$ 、縦軸はイジングモデルの系全体におけるハミルトニアン  $H$ を示す。図1より、イジング計算機は  $N=996$  にて基底状態( $H=-1,776$ )に到達しており、隣接した領域同士が異なる色で配色されたことから、グラフ彩色問題での制約を満たす解を得られたことが分かる。一方、ビット間結合の階調数がより小さい32-bitの場合、制約を満たす解を得ることができなかった。これより、QUBO を用いた論理ゲートイジング計算機のビット間結合を高階調化することで、より効率的な解探索が可能と示唆された。

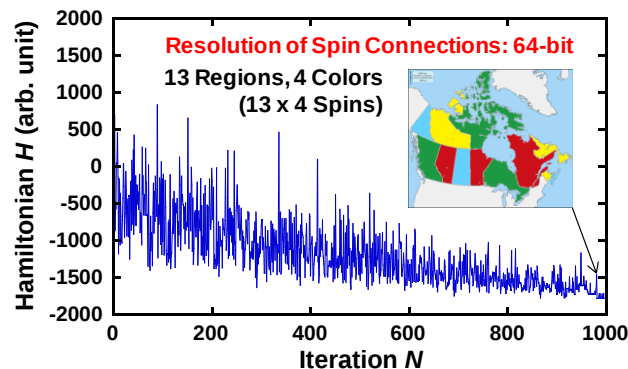


Fig. 1 Energy convergence properties and color arrangement for graph coloring problem using Ising spin computing with 64-bit resolution.

### References

- [1] M. Yamaoka, C. Yoshimura, M. Hayashi, T. Okuyama, H. Aoki, and H. Mizuno, IEEE J. Solid-State Circuits 51 (2016) 303.
- [2] H. Goto, K. Tatsumura and A. R. Dixon, Sci. Adv. 5 (2019) eaav237.
- [3] M. Aramon, G. Rosenberg, E. Valiante, T. Miyazawa, H. Tamura, and H.G. Katzgraber, Front. in Phys. 7 (2019) 48.
- [4] T. Miki, M. Ito, Y. Hirata, Y. Kushitani, M. Shimada and J. Shirakashi, presented at IEEE NANO 2019, July, Macao, China (2019).
- [5] 三木、島田、平田、伊藤、白樫: 第80回応用物理学会秋季学術講演会 20p-F211-5 (2019).