

# 巡回セールスマン問題における Coherent Ising Machine と D-Wave 量子アニーリングの性能評価

## Performance Comparison of Coherent Ising Machine and D-Wave for the Traveling Salesman Problem

ケイカロ<sup>1</sup> 武居弘樹<sup>2</sup> 合原一幸<sup>3</sup> 長谷川幹雄<sup>1</sup>

Xing Jialu<sup>1</sup> Hiroki Takesue<sup>2</sup> Kazuyuki Aihara<sup>3</sup> Mikio Hasegawa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京理科大学大学院工学研究科

<sup>2</sup> NTT 物性科学基礎研究所

Graduate School of Engineering, Tokyo University of Science NTT Basic Research Laboratories, NTT Corporation

<sup>3</sup> 東京大学ニューロインテリジェンス国際研究機構

International Research Center for Neurointelligence, The University of Tokyo

### 1. まえがき

近年、高速に組合せ最適化問題を解くことに特化した物理計算機の研究が進められている。文献[1,2]では、Ising Model を人工的に再現した Coherent Ising Machine (CIM) を用いて組合せ最適化問題を高速に解く研究が進められ、その手法の有効性が示されている。一方、D-Wave 社の Advantage System は、組合せ最適化問題を解くために開発された量子アニーリングであり、従来の 2000Q システムより大規模な問題を直接解くことが可能となる。文献[3]では、制約関数を持たない MAX-CUT 問題を対象とした CIM と D-Wave の比較が行われており、結合が密な問題に対して CIM がより高い性能を持つことが示されている。

本稿では、制約条件が存在する NP-hard 問題である巡回セールスマン問題 (TSP) に着目し、D-wave と CIM を比較する。D-Wave と CIM を用いて TSP を解き、各々の性能を明らかにすることを目的とする。

### 2. イジングハミルトニアン

イジングマシンや量子アニーリングは、以下に示すイジングハミルトニアンを最小化する状態に高速に収束する。

$$H(\sigma) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N J_{ij} \sigma_i \sigma_j + \sum_{i=1}^N h_i \sigma_i, \quad (1)$$

ただし、 $\sigma_i$  は  $i$  番目のスピンの向き、 $J_{ij}$  は  $i$  番目と  $j$  番目のスピン間にはたらく相互作用、 $h_i$  は  $i$  番目のスピンの外部磁場である。多くの組合せ最適化問題は、イジングモデルで表現が可能である。最小化する目的関数を、このイジングハミルトニアンの形となるように、 $J_{ij}$  および  $h_i$  を設定することにより、イジングマシンや量子アニーリングによって高速に解を得ることができるようになる。

### 3. TSP へのイジングマシンの応用

ここでは、文献[4]の総結合ニューラルネットワークを用いる手法をベースに、TSP 問題を解くイジングモデルを構築する。TSP を解く相互結合型ニューラルネットワークの相互結合  $w_{ij,kl}^{\text{TSP}}$  および閾値  $\theta_{ij}^{\text{TSP}}$  は、以下のように導出されている。

$$w_{ij,kl}^{\text{TSP}} = -A d_{i,k} (\delta_{j+1,l} + \delta_{j-1,l}) - B \delta_{i,k} (1 - \delta_{j,l}) - C \delta_{j,l} (1 - \delta_{i,k}), \quad (2)$$

$$\theta_{ij}^{\text{TSP}} = -\frac{B+C}{2}, \quad (3)$$

ただし、 $d_{ik}$  は都市  $i$  と都市  $k$  の間の距離、 $\delta_{i,k}$  はクロネッカーデルタ、 $A$  は目的関数、 $B$ 、 $C$  は制約項の重み係数である。ニューラルネットワークは 0,1 の変数で問題を解くが、イジングスピンは -1, 1 である。そこで、以下の式により、 $w_{ij,kl}^{\text{TSP}}$  および  $\theta_{ij}^{\text{TSP}}$  から、TSP を解くイジングモデルの  $J_{ij}$  および  $h_i$  を得ることができる。

$$J_{ij,kl} = \frac{w_{ij,kl}}{2}, \quad (4)$$

$$h_{ij} = \theta_{ij} - \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \frac{w_{ij,kl}}{2}. \quad (5)$$

### 4. D-wave システムと CIM シミュレーションプログラムとの性能比較

D-wave システムと CIM シミュレーションにより、性能比較を行う。ここでは、小規模であるが、5都市から8都市までの問題に適用している。D-wave は全結合を実現できないため、これ以上の規模の問題に適用できないためである。各都市数について 10 回の実験を行い、CIM は各実験で 1 回、D-Wave は都市数 6, 7, 8 に対し、それぞれ 10 回、100 回、1000 回実行する。D-Wave が CIM よりも多くの実行回数を要したにもかかわらず、図 1 に示すように、CIM の正答率は D-Wave を上回っている。

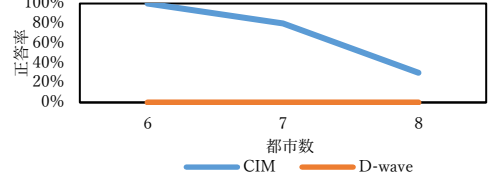


図 1 D-wave と CIM との性能比較

### 5. まとめ

TSP においても CIM はより高い性能を持つことを示した。文献[6]では、既に 100,000 スピンの CIM が開発されている。今後は、さらに大規模な問題における CIM の有効性を示していきたい。

### 参考文献

- [1] Z. Wang et al., Physical Review A, vol. 88, no. 6, pp. 063853, 2013.
- [2] S. Utsunomiya et al., Optics Express, vol. 19, no. 19, pp. 18091–18108, 2011.
- [3] R. Hamerly et al., Science Advances, vol. 5, no. 5, eaau0823, 2021.
- [4] J. J. Hopfield and D. W. Tank, Biological Cybernetics, Vol. 52, No. 3, pp. 141–152, 1985.
- [5] M. Hasegawa et al., IEICE Trans. Communications, vol. 104.B, no. 3, pp. 210–216, Mar. 2021.
- [6] T. Honjo et al., Science Advances, vol. 7, no. 40, eabh0952, 2021.