

第Ⅶ部門

量子コンピュータを用いた指定廃棄物の輸送計画最適化に関する研究

大阪大学 大学院工学研究科

学生員 ○牧野 純也

大阪大学 大学院工学研究科

フェロー 矢吹 信喜

大阪大学 大学院工学研究科

正会員 福田 知弘

1. 背景と目的

2011年の東日本大震災により発生した指定廃棄物は、1 kg 当たり 8000 Bq を超える放射性物質を含み、焼却灰や農林業系副産物などの環境大臣が指定したものであり、一時保管場所から十分な放射能汚染対策がされている処理施設へ輸送し集約して処理が行われる¹⁾。輸送にあたっては決められた速度、時間間隔、到着時刻で運搬するために最適な運搬ルートを求める必要がある。しかし、ルートの最適化問題は組み合わせ爆発により、計算時間が非常に長くなる場合があるため、実際は最適近似解を求めることに留まっている。

近年、量子コンピュータに対する投資が急速に増え、米国や中国を中心にハードウェア、ソフトウェアの研究開発が進んでいる。量子コンピュータには、汎用性のある量子ゲート方式と、組み合わせ最適化問題を解くことに特化した量子アニーリング方式²⁾がある。量子ゲート方式の量子コンピュータは現在、量子ビット数やエラーの大きさの観点から、実用化には時間がかかると見込まれている。一方、量子アニーリング方式の量子コンピュータは近年、実問題への応用に向けた検討が進み、Neukart³⁾は量子アニーリング方式の量子コンピュータを用い、交通渋滞の緩和に焦点を当てた検証を行った。

本研究では指定廃棄物輸送にかかる最適なルート選択を組み合わせ最適化問題としてモデル化、定式化を行い、量子コンピュータを用いた最適ルート探索のための基礎的な検討を行う。

2. 理論と最適化モデルの定式化

組み合わせ最適化問題は要素の数が多くなることで組み合わせ爆発が起きることが知られている。これに対応するため量子コンピュータの研究分野では、量子アニーリングや量子ゲート方式の量子コンピュータの QAOA⁴⁾ (Quantum Approximate Optimization Algorithm) が用いられている。この際、問題を QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization) と呼ばれるコスト関数に定式化する必要がある。

本研究では、初期的な検討として、図1に示すようなノード0から出発してノード1, 2, 3をすべて経由してノード4に到達するルートの最適化問題を扱うこととした。本研究では最適なルートの選択のための条件として、各ノード間の距離、速度、想定される住民からの苦情の大きさを考慮した目的関数 $\text{Obj}(m, n)$ を導入した。なお、各地点間における目的関数の大きさを図1の各地点間に示している。式(1)に本モデルにおけるコスト関数 H を示す。

$$H = \sum_{i=1}^3 \text{Obj}(0, m) q_{m,1} + \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \text{Obj}(m, n) q_{m,i} q_{n,i+1} + \sum_{m=1}^3 \text{Obj}(m, 4) q_{m,3} \\ + k \sum_{i=1}^3 \left(\sum_{m=1}^3 q_{mi} - 1 \right)^2 + l \sum_{m=1}^3 \left(\sum_{i=1}^3 q_{mi} - 1 \right)^2 \quad (1)$$

ここに、

$\text{Obj}(m, n)$: 地点 m, n 間の重みを表す目的関数, q_{mi} : 量子ビット, m : 地点, i : 各地点を通る順番,
 k, l : 制約条件の大きさを決定するパラメータ

3. シミュレーテッドアニーリングによる最適化と精度検証

シミュレーテッドアニーリングにより、図 1 におけるルートの最適化計算を各パラメータの値に対して 500 回行った。制約条件の大きさを決定するパラメータ k, l による制約条件を満たさない確率を図 2(a), 最適ルートの検出確率を図 2(b)に示す。なお本研究では、制約条件のパラメータ k, l を常に同じ値とし、最適化を行った。

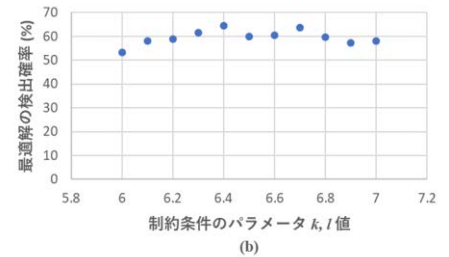
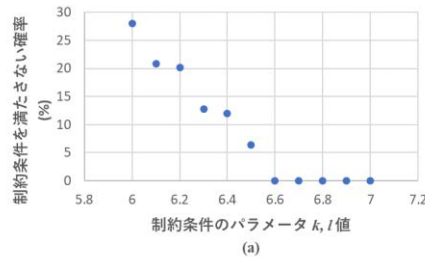
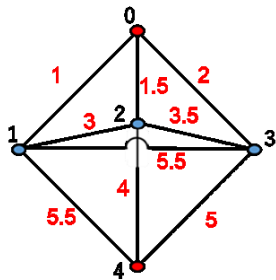


図 1 中継地点(1, 2, 3)をすべて 図 2 パラメータ k, l による制約条件を満たさない確率(a)と、
通る検討対象モデル 最適ルートの検出確率(b)

制約条件のパラメータ k, l が 6.6 以上のとき、すべての検出された解が制約条件を満たすものとなった。これは、式(1)における第 4 項、第 5 項の制約条件の大きさがコスト関数 H 全体の大きさに対して、検出解が制約条件を満たすために必要な割合を占めたことを意味する。

最適解の検出確率は今回実施した制約条件のパラメータすべてにおいて 50 % から 70 % の間を推移した。量子コンピュータでは現在、同じ計算を複数回行うことで量子重ね合わせにより表現される多数ある解の候補から、最適解を高確率で得る。そのため、今回実施した最適化計算では、過半数が最適解を検出しているため、十分な確率で最適解が得られたといえ、従来最適近似解に留まるルートの最適化を行うことができる可能性を示した。また、制約条件のパラメータを 6.6 から大きくするにつれて、制約条件のコスト関数に占める割合が大きくなるため、最適解の検出確率は減少する傾向にあった。従って、本モデルにおける最適な制約条件の大きさを決定するパラメータは 6.7 程度であることが確認された。

4. 結論

本研究の結論を、以下にまとめる。

- 指定廃棄物輸送ルートの量子コンピュータによる最適化に向けた初期的かつ基礎的なモデル化, 定式化を行った。
- 制約条件のパラメータ k, l を変化させシミュレーテッドアニーリングにより最適化を行い, 本モデル, 設定条件における適切な制約条件のパラメータの妥当性を検討した。

今後の課題として、量子コンピュータ実機での最適化の実行することに加え、量子ゲート方式、量子アニーリング方式の量子コンピュータによる最適化精度の比較検証などが挙げられる。

謝辞

本研究を遂行するに当たり協力頂いた株式会社奥村組の関係者に謝意を表す。

参考文献

- 1) 環境省：指定廃棄物関係ガイドライン (平成 25 年 3 月),
https://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/haikibutsu-gl03_ver2.pdf (閲覧：2021.2.16).
- 2) Kadowaki, T. et al.: Quantum annealing in the transverse Ising model, *Phys. Rev. E*, 58, 5355, 1998.
- 3) Neukart et al.: Traffic flow optimization using a quantum annealer, arXiv:1708.01625v2, *quant-ph*, 2017.
- 4) Farhi et al.: A quantum approximate optimization algorithm, arXiv:1411.4028, *quant-ph*, 2014.