

## 量子アニーリングによる多目的最適化の災害復興への応用

株式会社日建設計総合研究所 齋藤悠宇

株式会社シーイーシー 大和田健太

### 1. 背景・目的

災害からの復興プロセスでは迅速性が重視され、環境影響評価が省略される場合がある[1]。特に仮設住宅の建設は公園・緑地を暫定使用し、その後用地が災害公営住宅に転用される等、恒常的な緑地の減少を招く可能性がある。

一方で、これまで量子アニーリング(QA)<sup>†</sup>を用いて災害復興の課題に対応した研究は、車両・資源配分[2]、避難経路計画[3]、交通網・送電網復旧[4][5][6]、患者アロケーション[7]等、多数存在するが、復興過程の土地利用と都市緑量の確保を同時にモデル化した例はない。

そこで本研究では、QA 多目的最適化を用いて、生活の復興と生物多様性の回復を両立する復興計画の立案手法を提案し、復興計画への QA の活用可能性を検証する。なお本研究においては、量子アニーリングマシンへのアクセスが限られていることから、シミュレーテッドアニーリング(SA)を代替として用いて QA の有効性を間接的に評価した。

### 2. 研究の仮説

本研究では以下の(1)と(2)の観点で QA による多目的最適化を行い、復興計画への QA の活用可能性を検証する。

- (1) 被災前の都市配置および緑量保持を考慮した緑地 / 宅地配置の最適化
- (2) 被災前の住民コミュニティを考慮した住民の仮設住宅への割当最適化

本研究の新規性は、上記(1)(2)の 2 段階に分けて QA による復興計画の多目的最適化を行う点、実際の被災状況データを用いて QA による多目的最適化の有用性を検証する点にある。

### 3. 実験の方法

#### ・最適化フロー

前項(1)(2)で示した 2 段階の最適化を実施する(図 1)。

(1)緑地 / 宅地配置の最適化にあたっては、①宅地化・緑化の候補地データ、②被害状況データ、③既存市街地の分布データをインプットとして、QA により緑地 / 宅地の配置最適化を実施する。次に、(2)住民の仮設住宅への割当最適化にあたっては、(1)で求めた宅地の配置を用いて、住民を割当可能な仮設住宅の絞りこみを行う。③既存市街地の分布データ、および、住民を割当可能な仮設住宅の立地データを用いて、QA により住民 - 仮設住宅の割当最適化を行う。

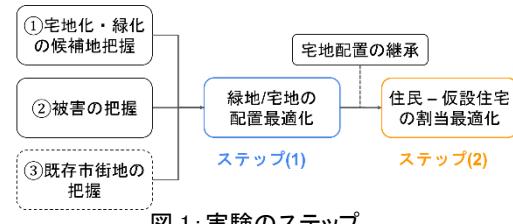


図 1: 実験のステップ

#### ・ステップ(1): 宅地/緑地ゾーニングの最適化

ステップ(1)では、各区画を緑地にするか宅地候補にするか最適化を実施する。宅地を密集させながら、既存緑地を考慮して緑地が繋がるようにゾーニングを行う。ステップ(1)に対応した QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization) 定式化を以下に示す。

【変数】  $x_{i,j}$  : 区画変数  $d_{j,m}$ : 区画間距離  $\text{co\_pairs}$  :隣接区画集合  
 $\text{gr\_spots}$  : 既存緑地区画  $c_j$  : 区画使用可否(0:使用不可、1:使用可能)

$M, L, R$  : 宅地数、緑地数、緑地隣接数

**【コスト関数】**

$$\sum_j \min(d_{j,s})x_{1,j} - \sum_{(p_0p_1) \in co\_pairs} x_{2,p_0}x_{2,p_1}$$

**【制約条件】**

$$\sum_j x_{i,j} = \begin{cases} M & (i=1) \\ L & (i=2) \end{cases} \quad : \text{緑地数/宅地数制約}$$

$$\sum_i x_{i,j} = 1 \quad : \text{区画種類one-hot制約}$$

$$\sum_j \sum_{m \in f(j)} x_{2,m} \leq R \quad : \text{隣接緑地数制約}$$

$$x_{2,j} = 1 \quad \forall j \in gr\_spots \quad : \text{既存緑地制約}$$

#### ・ステップ(2):住民 - 仮設住宅割当の最適化

ステップ(2)では、各区画の住民をどの宅地区画に避難させるかについての最適化を実施する。移動距離を短くしつつ既存コミュニティも維持することを目的関数とする。ステップ(2)に対応した QUBO 定式化を以下に示す。

**【変数】**

$x_{j,k}$	: 避難先変数	$S_j$	: 世帯数	$D_{j,k}$	: 区画と避難先の距離
$d'_{k,l}$	: 避難先間距離	$cap_k$	: 収容世帯上限		
$p_{j,m}$	: コミュニティ行列 (0:別コミュニティ、1:同一コミュニティ)				

**【コスト関数】**

$$\sum_{j,k} D_{j,k}x_{j,k} + \sum_{j,m,k,l} p_{j,m}d'_{k,l}x_{j,k}x_{m,l}$$

**【制約条件】**

$$\sum_j x_{j,k}S_j \leq cap_k \quad : \text{収容世帯制約}$$

$$\sum_j x_{j,k} = 1 \quad : \text{避難先one-hot制約}$$

#### ・使用データ

本研究では実際の災害データを用いて QA による最適化を試行した。2025 年 2 月に岩手県大船渡市にて発生した火災災害に着目した。FIRMS[8]が提供する火災発生地点のポイントデータを国勢調査[9]の 250m メッシュにより集計して被害エリアのメッシュデータを作成した。人口が 1 以上のメッシュを既存の宅地、国土数値情報[10]の土地利用細分メッシュで森林に分類されるエリアを既存の緑地とした。国土数値情報[11]の小地域単位を住民の既存コミュニティとした。

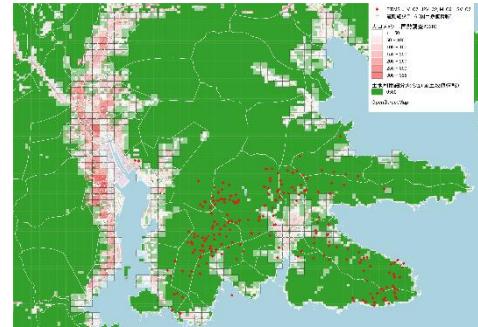


図 2: 被災前の既存宅地・既存緑地および火災による被害エリア

## 4. 実験の結果

実験の結果をまとめて図 3 に示す。

#### ・ステップ(1): 宅地/緑地ゾーニングの最適化

被災後の復興計画における緑地 / 宅地の配置を QA により最適化できた(図 3)。具体的には、①被災前と緑地の総量を変えず、既存緑地と繋がるように緑地を配置できた。②被災前と宅地の総量を変えず、被災していない既存宅地と繋がるように宅地を配置できた。図 2 と図 3 を比較すると、概ね被災前の土地利用の状況を反映した宅地/緑地ゾーニングの結果となっていることが分かる。

#### ・ステップ(2): 住民 - 仮設住宅割当の最適化

ステップ(1)において宅地のゾーニングとなったエリアに含まれる仮設住宅の候補地を対象に、住民の

被災前居住区域と最も近く、住民の既存コミュニティ単位のまとまりを最も保つことができる住民-仮設住宅の割当を QA により最適化できた(図 3)。同じ色のメッシュは同じコミュニティに所属していることを表しており、白丸は避難所を表す。図 3 では、同じコミュニティから 1 つの避難所に避難するという制約条件を反映した傾向が見られる。一方で、最も近くの避難所に避難するという制約条件は必ずしも守られていないことが観察される。

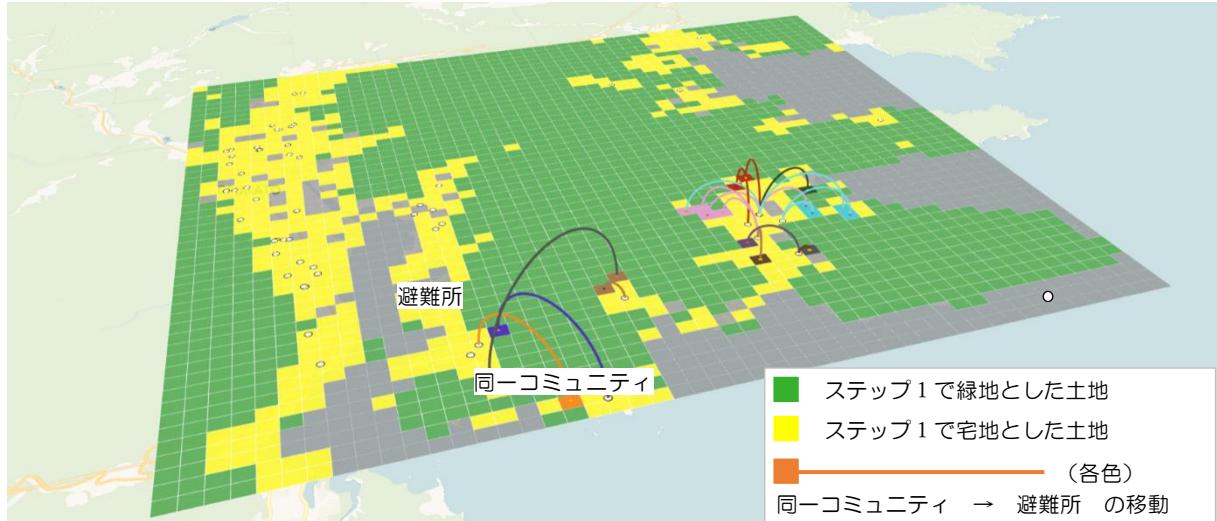


図 3:ステップ1による宅地/緑地ゾーニングの最適化結果の図示  
およびステップ2による住民-仮設住宅割当の最適化結果の図示

## 5. ステップ(1)に対する追加実験

ステップ(1)において、前項に示した実データを用いた実験では被災していない既存緑地が面的に広がっており、緑地の形状について自由度が低かった。そのため追加実験を実施し、仮想的な都市の条件設定で、項目 3(2)で示した QA の制約条件を用いて緑地を連続的に配置することが可能であることを検証した(図 4)。

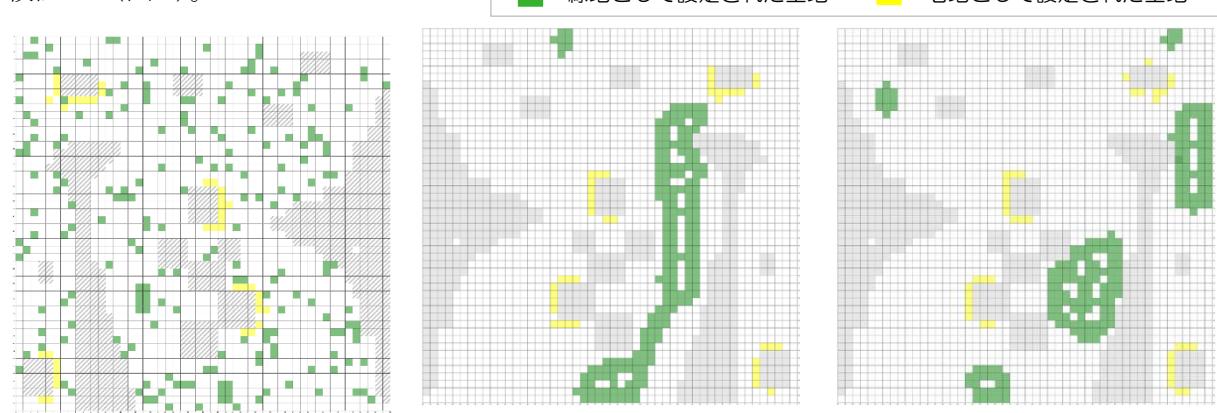


図 4:制約条件なしで離散した緑地(左)および制約条件ありで連続した緑地(中、右)

## 6. 考察

本研究を通して、復興の初期プロセスにおいて迅速に決定すべき緑地 / 宅地のゾーニングおよび住民 - 仮設住宅割当の複合的課題について、QA を用いて、迅速に最適化が可能であることを検証できた。一方で、森林火災災害では緑地の連続性が最適化なしでも保たれる条件であった。緑地が分散的に配置する都市部における QA 最適化の活用可能性は今後の検討を要する。

## 【参考文献】

- 1) 西廣 淳:災害復興事業と生物多様性保全 [Disaster reconstruction and biodiversity conservation]. IATSS Review = 國際交通安全学会誌, 39(3), 248-255, 2015
- 2) Cadeliña, A. R., Cuevas, M. A., Kallos, M., Montemayor, M. J., Uy, R. J., Rodriguez, J. B., & Tubola, O.:D-Wave Implementation of Quantum Annealing for Optimal Resource Allocation in Disaster Response Operation of Marikina City. ECTI-CIT Transactions, 18(1), 24-33, 2024.1
- 3) Haboury, N., Kordzanganeh, M., Schmitt, S., Joshi, A., Tokarev, I., Abdallah, L., Kurkin, A., & Melnikov, A.:A supervised hybrid quantum machine learning solution to the emergency escape routing problem [Preprint]. arXiv, 2023
- 4) Udekwe, D., Ke, R., Lu, J., & Guo, Q.-w.:Q-RESTORE: Quantum-Driven Framework for Resilient and Equitable Transportation Network Restoration [Preprint]. arXiv, 2025.1
- 5) Nikmehr, N., Zhang, P., Zheng, H., Wei, T.-C., He, G., & Shamash, Y. A.:Quantum Annealing-Infused Microgrids Formation: Distribution System Restoration and Resilience Enhancement. IEEE Transactions on Power Systems, 40(1), 463-475, 2025
- 6) Nikmehr, N., Zhang, P., Zheng, H., Shamash, Y. A.: “*Quantum Annealing for Distribution System Restoration via Resilient Microgrids Formation*,” in 2023 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Orlando, Florida, 2023.
- 7) C. -H. Ou *et al.*: “A Quantum-Inspired Approach to Emergency Patient Allocation Using Digital Annealing,” 2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), Bellevue, WA, USA, 2023, pp. 340–341.
- 8) MODIS Collection 6 NRT Hotspot / Active Fire Detections MCD14DL. Available on-line <https://earthdata.nasa.gov/firms>. doi:10.5067/FIRMS/MODIS/MCD14DL.NRT.006
- 9) 「国勢調査（2020 年，250m メッシュ）に関する地域メッシュ統計」（総務省統計局）(<https://www.e-stat.go.jp/gis/statmap-search?type=1>)を加工して作成
- 10) 国土数値情報土地利用細分メッシュデータ <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html>
- 11) 国土数値情報行政区域データ [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3\\_1.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3_1.html)

---

### ■量子アニーリングについて

量子アニーリングは組合せ最適化問題を効率的に解く計算手法の 1 つで、量子の重ね合わせやトンネル効果を利用して局所解にとらわれにくく、より良い解を探索できる可能性がある。しかし、現状では量子アニーリングマシンへのアクセスが限定的であり、課題に対する量子アニーリング (QA) の適用可能性を簡易に検証することは困難となっている。

そこで本研究では、古典計算機上で実行可能なシミュレーテッドアニーリング (SA) を用い、QA と同様のアニーリング過程を模倣することで、対象問題に対する QA の有効性や特性を間接的に評価した。SA は焼きなまし過程を模倣した確率的最適化手法であり、確率的な受け入れと温度制御により、局所最適解からの脱出が可能となり、最終的に大域的最適解に近い解を得ることが期待できる。