

Quantum Logistics Simulator: 社会実装 へ向けた提案書



1. 社会課題の背景

物流クライシスと「2024年問題」

現代社会において、物流は生命線ですが、深刻なドライバー不足や長時間労働の規制強化（2024年問題）により、「運べないリスク」が現実のものとなっています。特に

都市部のラストワンマイル配送においては、複雑な道路事情や再配達の増加により、従来の配送計画では限界が見えています。

- **ドライバー不足:** 労働力人口の減少と高齢化。
- **効率化の限界:** 熟練ドライバーの勘に頼ったルート作成は属人化しており、継承が困難。
- **CO₂削減:** 無駄な移動は燃料消費を増やし、環境負荷を高める。

私たちが解決すること

配送車両（全エージェント）の動きを「**全体最適（Global Optimization）**」の視点で制御し、総移動距離と時間を最小化することで、限られたリソースでの最大効率化を実現します。

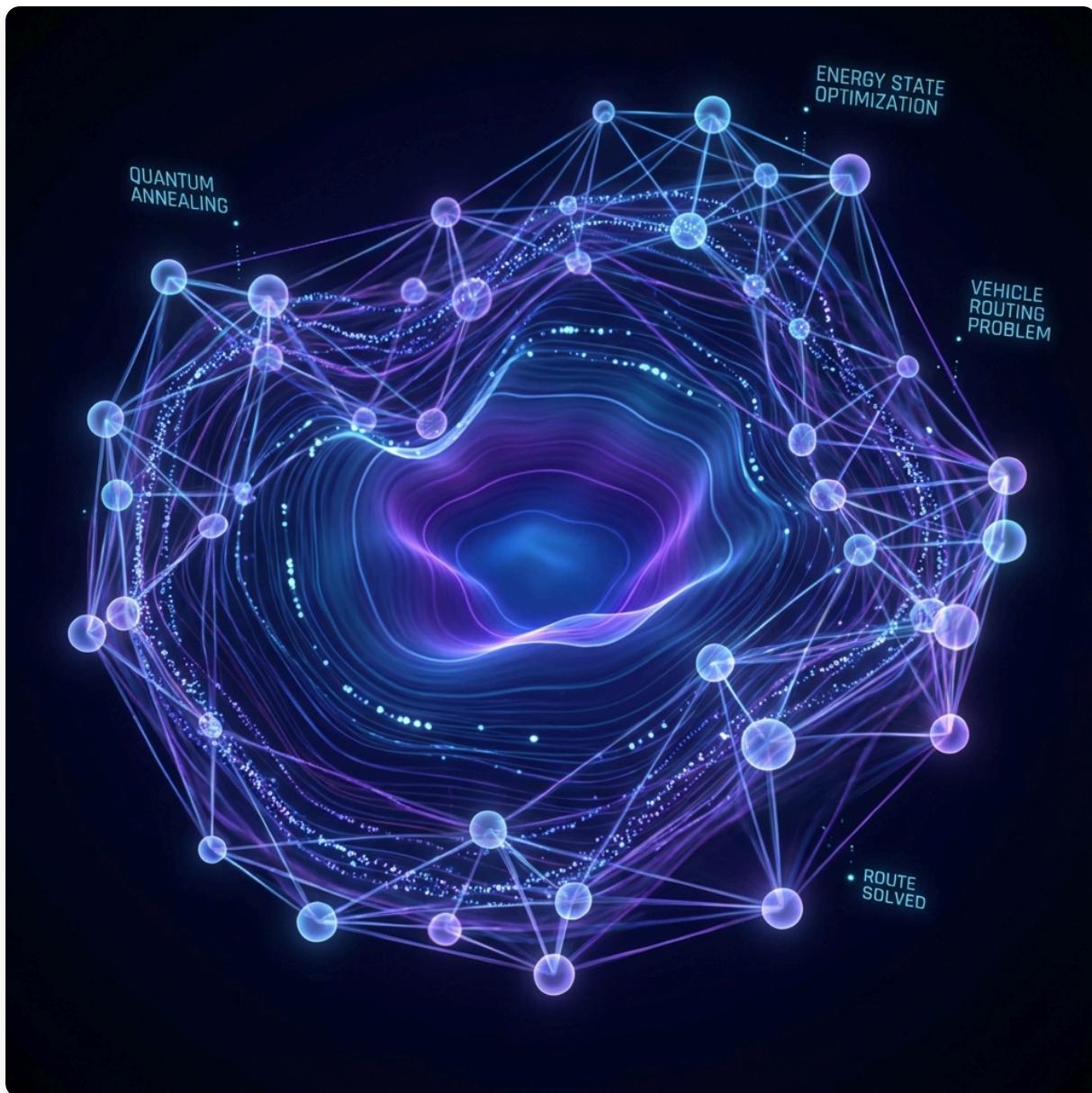
2. 提案するソリューション

Quantum Logistics Simulator は、量子アニーリング技術を活用した次世代の配送管理システムです。従来の手法では計算量が爆発してしまう「複数車両の配送計画問題（VRP）」を、量子コンピュータ（およびそのシミュレータ）上で高速に解くことを目指しています。

主な特徴

1. **リアルタイム全体最適化:** 状況の変化（新たな配送依頼、渋滞、車両の故障など）に応じて、瞬時に全車両のルートを再計算します。
2. **マルチエージェント協調:** 個々の車両が勝手に最短経路を選ぶのではなく、システム全体として最も効率が良いように「役割分担」と「経路選択」を行います。
3. **確実な配送と帰還:** 全ての目的地を確実に訪問し、配送完了後は全エージェントがデポ（出発地点）へ帰還します。

3. 技術的アプローチ: 二段階QUBO最適化



本プロジェクトでは、VRPを2つのサブ問題に分解し、それぞれをQUBOで解く二段階最適化アプローチを採用しました。

Phase	問題	定式化	保証
Phase 1	割り当て (Clustering)	Assignment QUBO	全目的地が必ず誰かに割り当てられる
Phase 2	巡回順序 (Routing)	Position-based TSP QUBO	全目的地を1回ずつ訪問し、デポへ帰還

Phase 1: 割り当て問題 (Assignment QUBO)

各目的地 i を、どのドライバー k が担当するかを決定します。

決定変数:

$$y_{k,i} \in \{0, 1\}$$

($y_{k,i} = 1$ ならドライバー k が目的地 i を担当)

制約: 各目的地は必ず1人に割り当て (One-Hot)

$$H_{\text{assign}} = A \sum_{i=1}^N \left(\sum_{k=1}^K y_{k,i} - 1 \right)^2$$

目的: 割り当ての距離最小化 + 負荷分散

$$H_{\text{dist}} = B \sum_k \sum_i d(\text{pos}_k, i) \cdot y_{k,i}$$

$$H_{\text{balance}} = C \sum_k \sum_{i < j} y_{k,i} \cdot y_{k,j}$$

Phase 2: 巡回問題 (TSP QUBO - Closed Loop)

各ドライバーに割り当てられた目的地群に対して、Position-based TSP を解きます。

決定変数:

$$z_{i,p} \in \{0, 1\}$$

($z_{i,p} = 1$ なら目的地 i を訪問順序 p で訪れる)

制約1: 各目的地は1回だけ訪問 (Row One-Hot)

$$H_{\text{row}} = A \sum_{i=1}^n \left(\sum_{p=1}^n z_{i,p} - 1 \right)^2$$

制約2: 各順序には1つの目的地 (Column One-Hot)

$$H_{\text{col}} = A \sum_{p=1}^n \left(\sum_{i=1}^n z_{i,p} - 1 \right)^2$$

目的: 総移動距離の最小化 (帰還込み)

$$H_{\text{tsp}} = B \left[\sum_i d(\text{start}, i) z_{i,0} + \sum_{p=0}^{n-2} \sum_{i \neq j} d(i, j) z_{i,p} z_{j,p+1} + \sum_i d(i, \text{depot}) z_{i,n-1} \right]$$

最終項 $d(i, \text{depot}) z_{i,n-1}$ により、最後の目的地からデポへの帰還コストが明示的に最小化されます。

実装構成

- **言語:** Python (FastAPI Backend, Vanilla JS Frontend)
- **ソルバ:** OpenJij (Simulated Annealing) + Dimod (BQM Construction)
- **分割統治:** 大規模問題 (9目的地以上/ドライバー) は Greedy 法にフォールバック

4. デモンストレーション

本デモアプリでは、この技術をブラウザ上で視覚的に体験できます。

- **Scenario:** センター (DEPOT) から出発する複数の配送トラック。
- **Action:** 目的地はランダムに生成され、量子モデルが瞬時に最適ルートを割り当てます。
- **Responsiveness:** エージェントが移動するたびに再計算が走り、動的な最適化が可視化されます。
- **Completion:** 全配送完了後、全エージェントがデポへ帰還します。

5. 今後の展望

現在はシミュレータ (OpenJij) 上で動作していますが、このQUBOモデルはそのまま実機の量子アニーリングマシン (D-Wave等) に送信して解かせることができます。物流だけでなく、ドローンの群制御、災害時の避難誘導、工場のAGV搬送など、あらゆる「移動と割当の最適化」に応用できる基盤技術となります。