

# 量子アニーリングマシンを活用した統計データに基づく 交通流最適化の検討

野田佳克<sup>1</sup> 秋山克美<sup>1</sup> 伊原康行<sup>1</sup> 大関真之<sup>2</sup>

**概要**：近年、量子アニーリングと呼ばれる組合せ最適化問題を解く手法が注目されている。量子アニーリングを用いて解くことができる最適化問題の一つとして経路最適化があり、タクシーの交通流最適化や無人搬送車（AGV）の制御などの応用が知られている。本研究では、量子アニーリングによる経路最適化について、都市交通制御への応用可能性を検討した。自治体が公開している交通量の統計データと、現実の都市の道路網をモデル化したグラフを用いて、量子アニーリングマシンによる車両の経路の組合せの最適化を計算したところ、各車両が単純に最短経路で移動する場合に比べて、道路の車両の密度を緩和できることを確認した。今後は経路最適化の発展として、信号機制御を含めた高度な交通制御への応用を目指す。

**キーワード**：量子アニーリングマシン、交通流最適化、経路最適化

## 1. はじめに

近年、量子アニーリングと呼ばれる組合せ最適化問題を解く手法[1]が注目されており、産業界で広く実社会への応用が模索されている[2]。量子アニーリングを用いて解くことができる代表的な最適化問題の一つとして経路最適化があり、タクシーの交通流最適化[3]や無人搬送車（AGV）の制御[4]などの応用が知られている。本研究では、量子アニーリングによる経路最適化について、都市交通制御への応用可能性を検討した。都市交通制御の検討は、自治体が抱える道路交通渋滞の問題を解決するための技術的な課題であり、量子アニーリングをその要素技術として活用することができるか検討することは社会的に有意義と考えられる[5]。

まず、川崎市が公開している交通量の統計データとOpenStreetMap[6]から得た道路情報をモデル化したグラフをベースに、川崎市の内々交通を記述する交通流のモデルを定義した。この交通流のモデルに対して、量子アニーリングマシンによる車両の経路の組合せの最適化を計算したところ、各車両が単純に最短経路で移動する場合に比べて、市内における道路の車両の密度を分散させる結果を得られることを確認した。

今後は経路最適化をベースとした交通流最適化の発展として、信号機制御やリアルタイムの交通状況への対処も含めた高度な交通制御への応用を検討したい。

## 2. 交通流のモデル

本研究では川崎市の交通流のモデルを独自に定義したうえで量子アニーリングマシンを用いた最適化計算を行う。川崎市の交通は内々交通（車両の出発地・目的地がともに

川崎市内の交通）・内外交通（車両の出発地が川崎市内で目的地が川崎市外の交通）・外内交通（車両の出発地が川崎市外で目的地が川崎市内の交通）・通過交通（車両の出発地・目的地がともに川崎市外の交通）からなるが、今回は簡単のため内々交通のみを考慮する交通流のモデルを検討した。交通流のモデルを作るにあたって川崎市交通量図[7]とOSMnx[8]を使用した。その内容は以下の通りである。

### (1) 川崎市交通量図

川崎市交通量図[7]とは、川崎市内の主要道路の交通量に関する統計情報であり、この情報を根拠に川崎市内のエリアごとの車両の発生台数の比率を算出することを検討した。つまり、川崎市を複数エリア（区）に分割し、エリアごとに乱数で車両の位置を決定、車両の目的地も乱数で決定する。この処理を繰り返すことで車両の出発地と目的地の集合を得ることができ、現実の交通流を単純化したモデルが得られる。この考え方を前提に、川崎市交通量図から、川崎市の各区に車両の発生確率（頻度確率）を算出した。

表 1 車両の発生確率

		目的地（区）						
		川崎区	幸区	中原区	高津区	宮前区	多摩区	麻生区
区（発出地）	川崎区	0.0318	0.0318	0.0318	0.0318	0.0318	0.0318	0.0318
	幸区	0.0161	0.0161	0.0161	0.0161	0.0161	0.0161	0.0161
	中原区	0.0156	0.0156	0.0156	0.0156	0.0156	0.0156	0.0156
	高津区	0.0373	0.0373	0.0373	0.0373	0.0373	0.0373	0.0373
	宮前区	0.0182	0.0182	0.0182	0.0182	0.0182	0.0182	0.0182
	多摩区	0.0129	0.0129	0.0129	0.0129	0.0129	0.0129	0.0129
	麻生区	0.0110	0.0110	0.0110	0.0110	0.0110	0.0110	0.0110

算出方法は以下のとおりである。1. 各区の主要道路の12時間の交通量の総和を計算する。2. 各区の交通量の総

<sup>1</sup> NEC ソリューションイノベータ株式会社  
NEC Solution Innovators, Ltd.

<sup>2</sup> 東北大学, 東京工業大学, 株式会社シグマアイ  
Tohoku University, Tokyo Institute of Technology, Sigma-i Co., Ltd.

和を全市の交通量の総和で除算したうえでさらに7(区の数)で除算する(出発地の区が決まれば目的地の区は等確率で決まることを仮定する)。3. 得られた値を各区から各区へ移動する車両の発生確率とする。以上の手順で算出した結果は表1の通りである。

## (2) OSMnx

オープンソースソフトウェアである OSMnx [8]を用いると OpenStreetMap から川崎市の道路情報を入力し、それをモデル化したグラフを得ることができる。図1は得られたグラフを可視化したものである。このグラフを用いることで、車両の経路の組み合わせを最適化する経路最適化の問題を作る。次節では、そのための定式化と量子アニーリングマシンで計算して得られる解に対する精度評価指標を説明する。

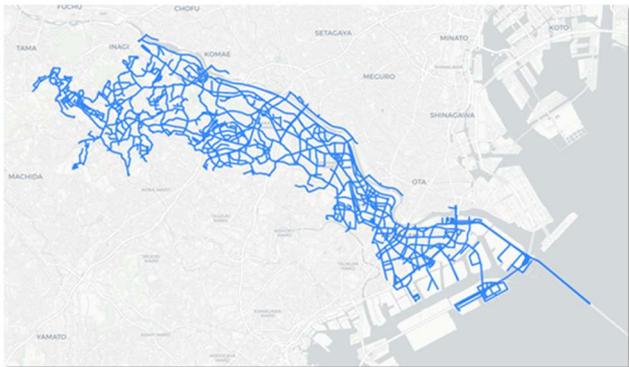


図1 OSMnx を用いて入力した川崎市の主要道路をモデル化したグラフ

## 3. 定式化

### 3.1 経路最適化

量子アニーリングマシンはイジングモデルと呼ばれる磁性体のモデルの最小エネルギー問題を解く装置である。イジングモデルは2次式により記述されることから、解析対象の問題を2次式からなる目的関数として定式化する必要がある。本研究で用いる定式化は以下のとおりである。

川崎市内の各車両*i*と経路の候補*k* ∈ {1,2,3}に対して2値変数を*x<sub>i,k</sub>*としたうえで、以下の式を最小化する最適化問題として定式化する。

$$E(x) = \sum_e \left( \sum_{i,k} C_{e,i,k} x_{i,k} \right)^2 + \lambda \sum_i \left( \sum_k x_{i,k} - 1 \right)^2 \quad (1)$$

ここで、*e*はグラフのエッジであり道路に相当する。*C<sub>e,i,k</sub>* = 1は車両*i*の経路の候補*k*が道路*e*を通ることを示し、*C<sub>e,i,k</sub>* = 0は車両*i*の経路の候補*k*が道路*e*を通らないことを示す。*λ*は正の定数である。

上記の定式化はフォルクスワーゲンによるタクシーの

交通流最適化[3]を参考とした。式(1)の第1項は各道路を通過する車両数の二乗和を示しており、この数値が小さいほど道路全体の混雑が分散されると期待している。第2項は各車両につき1つの経路を選択することを示すもので、組合せ最適化における制約条件相当を2次の罰金項で定式化したものである。第1項と第2項のバランスは*λ*の値で決定する。以上の定式化は初期時刻における車両の発生と経路の候補に対する最適化に関するものである。現実には時間の経過とともに交通状況が変化するため、別に時間変化を考慮した定式化が必要と考えられる。そのような時間変化を含めた経路最適化の問題を量子コンピュータで解いた先行研究もある[4]。また本研究では、簡単なため組合せ最適化問題の制約条件に相当する条件を2次の罰金項として定式化したが、1次式を用いて定式化する方法も存在する[9]。

### 3.2 精度評価指標

量子アニーリングマシンを用いて計算した最適解について、精度評価を行うための指標(精度評価指標)を検討した。先行研究のフォルクスワーゲンの論文[3]では、最適解により指定された経路に含まれる数が一定数以上の道路を「渋滞が起きている」としたうえで「渋滞が起きている道路の数」を精度評価指標としている。しかし、この指標では最適化により渋滞が緩和されているかいないかは判然としない。

そこで本研究では上記精度評価指標を参考に、各々の道路の通過する車両数について分布を計算することを検討した。横軸を通過する車両の数・縦軸を道路の数としたヒストグラムを計算する。最適化前と最適化後で分布の比較・分析を行うことで、渋滞緩和の効果があるか見ることができると考えた。

## 4. 評価結果

以上の問題設定に対して、D-Wave Systems社から提供されている量子アニーリングマシン用のライブラリ Ocean-SDKに含まれる LeapHybridSolver を使用して量子アニーリングマシンと古典コンピュータのハイブリッド計算による最適化計算を行った。量子アニーリングマシンを用いて最適化計算をするにあたり、量子ビット数の制約から最適化問題の変数の数が制限されるが、古典コンピュータによる問題分割等の処理と組み合わせたハイブリッド計算を使うと、ある程度規模の大きい最適化問題も計算可能である。車両の総数は1000とし、*λ* = 10000とした。

図2はすべての車両について、オープンソースソフトウェア NetworkX[10]を用いて計算した最短経路を選択した場合の結果である。図3は各車両について最短経路に比べて迂回する経路を二通り用意して、式(1)の目的関数が最小になるよう経路の組み合わせを選択した場合の結果である。

図 2, 図 3 とともに川崎市の道路網をモデル化したグラフを描いたものである. エッジの色が濃い青である場合, そのエッジは車両の交通量が多い道路に対応していることを示す. エッジの色が白い場合, そのエッジは車両の交通量がほとんどない道路に対応している. したがって最適化前(つまり単純に最短経路を選択した場合) よりも量子アニーリングにより経路の組み合わせを最適化した場合のほうが道路の混雑が分散されていることが確認できる. なお, 1 回の最適化に要する計算時間は安定して約  $7.5 \pm \sigma$  秒 ( $\sigma=0.05$ ) であり, QPU のアクセス時間は約 0.04 秒であった.



図 2 最適化前の道路の混雑の様子



図 3 最適化後の道路の混雑の様子

道路の混雑の分散の度合いを評価するために, 横軸を通過する車両の数・縦軸を道路の数としたヒストグラムを計算した. 図 4 は量子アニーリングにより最適化した結果とランダムに経路を選択した結果と最短経路を選択した結果を比較したものである. 最適化計算はほぼ安定しており計算結果はあまり変わらないため, 繰り返し最適化計算をしたうえで平均化するなどの処理は行っていない. 最短経路を選択するよりも, ランダムに迂回路を選択するほうが道路の混雑具合が解消し, 量子アニーリングで最適化した場合のほうがより混雑が解消されることが確認できる.

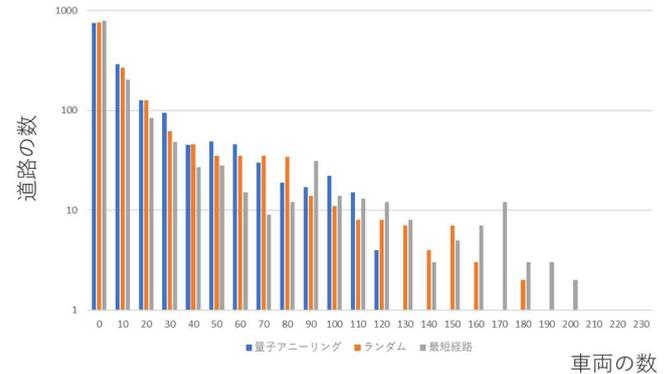


図 4 ヒストグラム

また, ヒストグラムの定量的な特性を評価するために各分布のモーメントを計算した. モーメントの数値から判断しても量子アニーリングによる最適化・ランダムを選択・最短経路の順番で渋滞が生じない評価になっていると考えられる.

表 2 モーメント

	1次	2次	3次	4次	5次
量子アニーリング	20	676	36,523	3,358,177	317,369,245
ランダム	21	876	63,568	7,258,588	865,269,447
最短経路	21	1353	143,636	21,349,286	3,369,808,508

ヒストグラムを見ると通過する車両数が 100 台から 200 台の範囲において, 最適化前後で分布の変化が顕著である. そこで最短経路と比べて 100 台以上通過する車両が減った道路を抽出した. 図 5, 図 6 はその結果を可視化したものである. ランダムに迂回路を選択した場合は市内の南側の主要道路(尻手黒川道路)の渋滞が, 量子アニーリングによる最適化を行った場合はさらに市内の北側の主要道路(南武線沿線道路・府中街道)の渋滞が緩和されている. 東西に走っている道路に対して渋滞緩和の効果が顕著であるが, この理由として, 今回検討した交通流のモデルが内々交通のみ考慮して内外交通や通過交通を考慮していないことで, 東西に移動する車両の数が相対的に多い問題設定になっていることが原因と考えられる. 実際の川崎市の交通では, 内外交通や通過交通があることから南北方向の車両の移動も多い.



図 5 ランダムに迂回路を選択して渋滞が緩和した道路



図 6 量子アニーリングで最適化することで渋滞が緩和した道路

## 5. おわりに

現実の都市において広範囲に交通流計測して得られた統計データを基に交通流のモデルを定義したうえで、量子アニーリングマシンを用いた組合せ最適化を行うと、道路の混雑を分散させることが可能であることを確認した。社会課題の重要な1つである渋滞の解消に向けて一つの知見を得ることができた。今回は川崎市内の内々交通のみを考慮したうえで解析をしたが、現実の応用を念頭に置くと内外交通や外内交通・通過交通についても考慮する必要があると考える。今後はそれに加えて信号制御やリアルタイムの交通状況に対処するなど高度な都市交通制御への量子アニーリングの応用可能性を検討することで、交通シミュレーションを活用した交通需要の調整など、行政や警察の施策に有効活用できるような研究設定を考えていきたい。

**謝辞** 本研究を進めるにあたり、量子コンピュータや交通流に関する情報収集と進捗会議の進行にご協力頂いた NEC ソリューションイノベータ株式会社の大畑純氏、富木毅氏、丸川一志氏、家志門太氏、佐久間渉氏の各氏に、謹んで感謝の意を表す。

## 参考文献

- [1] Andrew Lucas, Ising formulations of many NP problems. CoRR abs/1302.5843 (2013).
- [2] 寺部雅能, 大関真之, 量子コンピュータが変える未来, オ-

ム社, 2019 年.

- [3] Florian Neukart, Gabriele Compostella, Christian Seidel, David Von Dollen, Sheir Yarkoni, Bob Parney: Traffic Flow Optimization Using a Quantum Annealer. *Frontiers ICT* 4: 29 (2017).
- [4] Masayuki Ohzeki, Akira Miki, Masamichi J. Miyama, Masayoshi Terabe: Control of Automated Guided Vehicles Without Collision by Quantum Annealer and Digital Devices. *Frontiers Comput. Sci.* 1: 9 (2019).
- [5] NEC ソリューションイノベータ、川崎市で量子コンピュータを用いた交通流解析の実証実験を開始: プレスリリース | NEC ソリューションイノベータ ([nec-solutioninnovators.co.jp](https://www.nec-solutioninnovators.co.jp)), <https://www.nec-solutioninnovators.co.jp/press/20210721/index.html>.
- [6] Researcher Information - OpenStreetMap Wiki, [https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Researcher\\_Information](https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Researcher_Information).
- [7] 川崎市, 平成 27 年度一般交通量調査 交通量図, [https://www.city.kawasaki.jp/kurashi/category/28-6-2-2-4-0-0-0-0.html](https://www.city.kawasaki.jp/kurashi/category/28-6-2-2-4-0-0-0-0-0.html).
- [8] Geoff Boeing: OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. *Comput. Environ. Urban Syst.* 65: 126-139 (2017).
- [9] Masayuki Ohzeki: Breaking limitation of quantum annealer in solving optimization problems under constraints. CoRR abs/2002.05298 (2020).
- [10] Software for Complex Networks — NetworkX 2.6.2 documentation, <https://networkx.org/documentation/stable/>.