

量子コンピューティング技術を用いた 未来のモビリティ社会創造への挑戦*

A Challenge toward the Next-generation of Mobility Services via Quantum Computing

入江 広隆
Hiroataka IRIE

門脇 正史
Tadashi KADOWAKI

高橋 俊輔
Shunsuke TKAKAHASHI

栗島 亨
Toru AWASHIMA

Goragot Wongpaisarnsin

Quantum computing is largely gathering attention as a promising candidate for the next computational technology. In this article, we review our current trials utilizing quantum computing for the future of mobility services. In particular, the formulation and its results of multiple-vehicle routing optimization are presented with various real-world situations including association with traffic conditions. After showing the recent advance in quantum hybrid systems, we discuss the future perspective of quantum computing for the next-generation of mobility services.

Key words :

Quantum Computing, Logistics, Quantum Annealing, Vehicle Routing Problem

1. まえがき

今日、量子コンピュータが次世代の計算技術として脚光を浴びている。ここではまず、そもそも量子コンピューティング技術とは何であるかというところから始め、中でも量子アニーリング・マシンが、我々の社会生活に現れる最適化問題において古典コンピュータに対する優位性がどのように現れうるかを議論する。特に量子コンピュータを用いた未来のモビリティ社会創造の可能性として、配車経路計画問題の量子コンピューティング技術を用いた計算法を述べる。ここでは、交通事情など現実に想定される様々な時系列情報を取り入れた配車経路計画問題を始めとして、様々な付加的条件を同時に加味した最適化が量子コンピュータを用いて可能であること¹⁾、更には近年の量子古典ハイ

ブリッド技術を用いてどの程度の規模の問題までが解けるようになってきたのか²⁾を紹介する。その上で、今後の可能性について議論したい。

2. 量子コンピュータへの期待

2.1 量子コンピュータとは何か

量子コンピュータとは何であるか。そもそも量子コンピュータという概念を始めて提案したのは、理論物理学者のリチャード・ファインマンである。ファインマンは日本の朝永振一郎、そしてジュリアン・シュウィンガーと同時に、当時量子力学と電磁気学との融合で現れた量子電磁気学の発散の問題を「くりこみ理論」によって回避できることを示し、ノーベル物理学賞を受賞している。そのような当時最先端の量子物理学を熟知

したファインマンが考え出したのが「量子コンピュータ」である³⁾。ファインマンは基礎物理の様々な要素が、現在「デジタル・コンピュータ」と呼ばれる枠組み（以下、「古典コンピュータ」と呼ぶ）を用いてシミュレーション可能であるかを議論し、量子力学に基づく物理が古典コンピュータによって計算困難に陥ることを指摘している。即ち、シミュレーション困難に陥る物理現象があるならば、その物理現象に依拠した「新しい種類の計算機」を作れば、古典コンピュータを補完する能力を持ちうると考えたからであった。この考察が、量子物理、更には量子力学的情報操作に基づいた「量子コンピュータ」を考える契機となった訳である。

その後、古典的チューリングマシンの自然な量子版に当たる計算機がドイッチュによって提案された⁴⁾。基本的な発想としては、古典計算機における「0」及び「1」の信号を量子力学的に重ね合わせることを可能とした「量子ビット」

$$|q\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$$

を導入し、その量子ビットを基本単位とする計算機である。特に、複数（例えばN個）の量子ビット達の状態を遷移させるユニタリー変換を正確に制御することで計算を実行する。このユニタリー変換は、古典コンピュータの論理ゲート操作の量子版と考えられるため、ゲート型量子コンピュータとも呼ばれる。この「量子的重ね合わせを保ったまま計算する」ことから、「2^N個という膨大な入力を並列計算できる」ということがその発想段階において考えられたと思われるが、「重ね合わせ＝確率的」という量子力学の基本原則を考えれば、それほど単純な話ではないことがすぐに分かる。膨大な状態数によって薄められた正解確率を同様に「膨大な観測」で回収する必要があるからである⁵⁾。それでもうまくアルゴリズムを組むことで正解確率の極端な減少を抑えることができ、古典コンピュータでは事実上計算不可能である巨大な整数の素因数分解の問題を多項式時間で解けることがショアのによって示された⁶⁾。その「量子超越性」の可能性こそが現在のゲート方式の量子計算及び量子情報の理論の発展を支えてきたと言える。

その一方で、ゲート方式の量子コンピュータの発展

とは全く異なる形で現れたのが現在「量子アニーリング・マシン」呼ばれるアニーリング方式の量子コンピュータである。これはイジング模型と呼ばれる磁性を表す統計力学模型を最適化問題として活用する流れで提案された手法である。

2.2 イジング模型と量子アニーリングの登場

ここではまずイジング模型が何であるかを思い出ししておく⁷⁾。イジング模型とは、「磁性」の物理を理解するための数理模型であった。我々が普段目にする「磁性」とは、金属物質中の荷電粒子（電子や核子）の「スピン」を由来とする。スピンは「粒子の自転」とも思える物理量である一方、純粋に量子力学的な特性であり、例えばz軸方向で「上向き（左回り）」及び「下向き（右回り）」の離散2状態しか取らない。正確には、角運動量が $\pm \hbar/2$ （ \hbar はプランク定数）の離散2値しか取らない不思議な性質を持っている。そして量子力学の「状態」は、一般にその2状態の重ね合わせの状態と与えられる：

$$|q\rangle = a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle \quad \dots (1)$$

これだけでは「重ね合わせ」の必要性がわかりにくいだが、z軸とは異なる方向（例えばx軸方向）のスピンを考えるとその必然性が顕著になってくる。

今z軸方向を定めて2状態を与えたが、x軸方向を考えても良く、x軸方向も同様に2状態「右向き $|\rightarrow\rangle$ 」及び「左向き $|\leftarrow\rangle$ 」が存在する。それでもやはり「スピン」の独立自由度は先の2状態しかなく、x軸方向の2状態はz軸方向の2状態の重ね合わせとして表される：

$$|\rightarrow\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle), \quad |\leftarrow\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle)$$

即ち、x方向スピンの確定した値を取った状態は、必然的にz方向のスピンを重ね合わせの状態であり、逆もまた正しい。ということは、任意の異なる2方向の自転（スピン）は、同時に確定することが出来ない互いに重ねあった状態である。また、上記(1)式で与えられる任意の量子的重ね合わせ状態は、ある特定の方向に向いたスピンの確定状態と一致する。即ち、上記重ね合わせ状態は必然的に存在せねばならない。

*（公社）自動車技術会の了承を得て2019年自動車技術会春季大会講演予稿集（文献番号：20195061）を修正・加筆の上転載

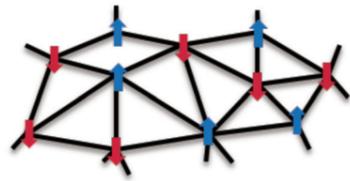


Fig.1 イジング模型の例

イジング模型は、これらの2状態「スピン」が離散的な格子($i=1,2,\dots,N$)に点在する磁性の物理を記述する模型である (Fig. 1参照)。特に、各格子上のスピンの値 s_i が

$$s_i = +1 \Leftrightarrow |\uparrow\rangle_i, \quad s_i = -1 \Leftrightarrow |\downarrow\rangle_i$$

の値を取るに応じて、次のエネルギー (ハミルトニアン H) を持つ数理模型をイジング模型という:

$$H = \sum_{1 \leq i \leq N} h_i s_i + \sum_{1 \leq i < j \leq N} J_{ij} s_i s_j$$

h_i は各スピンにかかる磁場に相当し、 J_{ij} は各スピン間の相互作用である。 J_{ij} が負の時は互いの向きを揃える強磁性相互作用と言い、正の時は互いに向きが反発し合う反磁性相互作用と言う。このイジング模型は、磁性体の統計力学模型というだけでなく、解析的に最も理解されている場の量子論の例として現代物理学を支える最も重要な模型の一つでもある。

この数理模型は当初、磁性体の物性を理解する模型として、低次元の規則正しい格子の上の理論を考えることが普通であったが、物理における無秩序系の重要性が着目されると共に⁸⁾、複雑な (J_{ij} , h_i) 及び高次元で複雑なグラフ上のイジング模型 (すなわちスピングラス模型) の研究が盛んになる⁹⁾。その後、スピングラス模型のハミルトニアン H は2値変数間の最適化問題におけるコスト関数とも見ることができることから、イジング模型を理解するために開発された統計物理の手法を最適化問題を解く方法として活用しようという考えが生まれた¹⁰⁾。その発展の先に「量子アニーリング (以下QAとも書く)」が門脇・西森によって提案されたのである¹¹⁾。

量子アニーリングは当時知られていた「シミュレーティット・アニーリング (以下SAとも書く)¹⁰⁾」から

発想を得た手法である。ここで「アニーリング」とは、金属精錬における「焼きなまし」から来ている。焼きなましとは、一度高温で熱して叩くことで金属の歪みを解消する方法である。従ってSAとは、最適化問題のコスト関数をハミルトニアンと見なして、「温度」を仮想的に (つまりシミュレーションとして) 導入し、温度を高温から低温に変化させながら最適解を探索する方法である。温度を上げる理由は、様々な状態を探索範囲に考慮するために導入するのであり、温度を下げる理由は徐々に探索領域を狭めて無駄な探索を除くためである。その初めのランダム状態を量子的重ね合わせで与えてみようというのが量子アニーリングであった。

その量子的重ね合わせを作る方法として採用されたのが、スピンの不確定性関係である。すなわち x 方向に大きな磁場をかけることで x 方向のスピンを揃え、 z 方向スピンの2状態が最も均等に重ね合わさった状態を作り、 x 方向の磁場を小さくすることで「量子的なアニーリング」を実現しようとしたわけである。実際、QAとSAとを比較して、QAの方が速くより確実に最適解を見つけ出すことが指摘されたのである¹¹⁾。

ここでイジング模型の量子的なスピンは量子ビットそのものであり、量子アニーリングとは量子ビットの量子情報を連続操作によって計算を行う量子計算アルゴリズムである。即ち、量子アニーリングは連続操作型量子コンピュータとして実現することができる。これをアニーリング型量子コンピュータという。

この様にアニーリング型量子コンピュータは、ゲート型量子コンピュータとは全く違う発想の元で与えられたが、量子ビットの量子情報を連続操作するか逐次離散操作するかの違いであると言える。連続操作と言えば「アナログ・コンピュータ」が類推されるが、量子ビットやユニタリー変換、波動関数自体がアナログ情報で制御されるため、どちらの形式の量子コンピュータにおいてもアナログ計算機の一つであることには違いはない。実際、どちらの計算機も「確率何%で確かな計算」と表され、この確率というアナログ値を完全に制御する計算ができるわけではない。

量子アニーリング・マシンの実機に関しては、超伝導磁束量子ビットによってスケールするアーキテクチャーとして作成可能であることも指摘される中¹²⁾、カ

ナダのベンチャー企業 D-Wave Systems 社によって世界初の商用量子コンピュータとして販売されるまで至っている¹³⁾。現在 D-Wave Systems 社が提供する量子アニーリング・マシンは5,000量子ビットという規模に至っても安定に動作し、世界初のビジネス利用量子コンピュータとして¹⁴⁾、多くの大学・企業がクラウドサービスを用いて基礎研究から実用化への研究を行っている。

2.3 量子アニーリングに対する期待

この量子アニーリング・マシンがどのような領域で古典コンピュータを凌駕する能力を持っているか (又は持っていないか) どうかは、今現在も活発な研究の対象である (例えば¹⁵⁾ を参照)。それらの発展についてここでは深く追求しないが、量子アニーリングが最適化手法として機能することに対する理論的な説明方法として「断熱量子計算¹⁶⁾」の考え方が多くの場合に採用されているので、本稿でもそれに基づいて述べる。

現行の D-Wave マシンで実装されている量子アニーリングのハミルトニアン H_{QA} は時間 t と共に、

$$H_{QA}(t) = A(t) H_T + B(t) H$$

と与えられる。 H は最適化問題のコスト関数 (イジング・ハミルトニアン) であり、 H_T は x 方向の磁場の項である。量子アニーリングは、係数 ($A(t)$, $B(t)$) を初めは $A(t)$ が大きく、最後は $B(t)$ が大きくなるように時間発展させる。

断熱とは難しい概念のように聞こえるが、要は「情報が逃げない」ということができる。すなわち、初めの H_T として、自明に「最適解 (基底状態)」が分かる最適化問題を用意し、その基底状態を量子計算の初期状態として準備をする。そして系を量子系として熱的ゆらぎを抑え、十分ゆっくりハミルトニアン H_{QA} の時間変化 (ユニタリー変換) として変化させ、最終的な最適化問題 H に変形する。この変化が十分ゆっくりであれば、系の状態は変化中のハミルトニアン H_{QA} の基底状態を辿りながら、最終的には H の基底状態を得ることができる。Fig. 2 は H_{QA} の各時刻 (各瞬間) で (対角化した) 配位空間に着目した際のコスト関数の移り変わりを表した図である。



Fig. 2 断熱量子過程としての量子アニーリング

この「十分ゆっくり」という操作が「断熱」という意味である。速く計算したいのに「ゆっくり」とは幾分おかしげなことではあるが、D-Wave Systems 社による実機では $20 \mu\text{sec}$ であり、(ハミルトニアンが 12GHz 程度¹⁴⁾ で変化することから) 理想的に動いていればそれで十分であると思われる。この様に基底状態の確率を蒸発させることなく、最終的な最適化問題 H に変形することができれば、最適化問題の膨大な状態を探索することなく、直接最適解にめがけて計算する手法を与える。

断熱量子計算のアイデアは素晴らしいが、実際はそんなに単純な話ではない。まずは断熱変形の方法が悪いと、準安定状態が、時間発展と共に基底状態になってしまう場合がある (Fig. 3 参照):



Fig. 3 新しい基底状態の発生 (一次転移)

この場合は、状態が壁を超えるまで待つ必要があり、基底状態の確率が極端に減少してしまう。この「壁越え」が必要な状況は「一次転移」と呼ばれ、壁越えを待つことが叫ばなければ「過冷却」と同じ状況が起こって、準安定な状態のまま留まってしまう。従って量子アニーリングが避けるべき状況だと言われる。ただし、イジング型スピングラス模型においては大部分の模型においてそれが起こらないことが示されている¹⁷⁾。

また、 15mK という極低温で時間発展が行われるわけであるが、完全に閉じた系ではないので、量子力学的状態は「熱的散逸」の環境下にある。この散逸効果によって、量子ビットの状態は、元の状態から変化してしまう。その状態を保てる時間のことを「コヒーレン

ス時間」というが、D-Wave マシンのコヒーレンス時間は、およそ 150nsec もない¹⁸⁾。この時間はアニーリング時間 (20 μsec) に比べて十分小さいので、「十分ゆっくり」時間変化を行った「準静的等温過程」になっている。その場合、系はエネルギーの最小値ではなく、「自由エネルギー F」の最小値を目指すようになる。ここで自由エネルギー F とは次で与えられる：

$$F = E - TS$$

E はエネルギー、T は温度、S はエントロピーである。従って、エネルギーが多少高くともエントロピーが大きい方に流れていきやすいことに注意するべきである。そのような場合、圧倒的な状態数を持った励起状態に基底状態の確率が吸収されて薄まってしまう可能性がある。

このような状況のハードウェア側からの打開策としては、「コヒーレンス時間を延ばす」ことで断熱系に近づける方法と「より低温で稼動する」ことでエントロピーの影響を小さくする方法の 2 点がまず考えられる。その一方でソフトウェア側からは、そのような状況を作らないイジング定式化、又はこれを積極的に利用するイジング定式化も考えることが出来る。また量子アニーリングの相互作用の種類を増やすことや、必ずしも断熱とは限らない時間発展により量子的優位性が見られるのではないか、という研究もある。

以上の様に、今後量子ビット数の増加に伴って、量子コンピュータのプログラミングには量子系としての統計物理的な背景を理解した上での構成が重要となる。また一方で、現在の量子アニーリング・マシンは、ゲート型量子コンピュータもそうであるように、ノイズを持った量子計算機 (NISQ) であり、その潜在能力を十分には発揮できていない。これに関しては今後の量子デバイス製造技術の向上によって大きく性能を向上させる可能性もある。

3. モビリティ社会への挑戦

3.1 配車経路計画問題

さて、以下ではこの量子アニーリング・マシンの実社会への応用をめざして、我々が行っている取り組

みについて紹介する。豊田通商株式会社と TOYOTA TSUSHO NEXTY ELECTRONICS (THAILAND) CO. LTD. が運用する商用 MaaS アプリケーションである T-SQUARE¹⁹⁾ は、バンコク市内のタクシー及びトラック延べ 13 万台に取り付けてある位置情報発信機によって、その時刻と位置データを 24 時間取得しており、高精度な渋滞情報を提供している。そしてそのデータを活用し、タクシー会社への配車アプリケーションや運送会社への配送経路計画アプリケーションの提供も行っている。この「配車経路計画」の最適化ソルバーを量子アニーリングによって行うことを考える。

最短経路を探索する数理問題として「巡回セールスマン問題」という問題が知られているが、その経路探索を複数台の車でシェアして行う問題が「配車経路計画問題」である。これは配達・運輸の最適化問題であり、今後のモビリティ社会を支える技術の一つであると言える。

ただし複雑な制約問題のない場合においては、古典コンピュータによる近似アルゴリズムの発達により、非常に高速な計算を行えるようになってきている。例えば単純な地図上の巡回セールスマン問題においては、近似的結果で良ければ多項式時間で解くことができる^{20) 21)}。それは経路計画の局所探索で十分であることが一因であるともいえる。

一方で、実社会における配車経路計画問題は、複数台で探索先共有が行われ、さらに交通事情の時間変化や、時間帯指定等の局所探索が行えない状況が多く発生する。その様に複雑な問題を考えれば考えるほど、「イジング定式化」による優位性が出てくると考えられる。まずは、その様な複雑で時間変化を含む制約を含んだ配車経路計画問題を量子アニーリングの取り扱える形での定式化する方法¹⁾を紹介する。

3.2 イジング定式化が可能になった配車問題

今現在、我々が提案するイジング定式化は、以下のような配車経路計画問題が可能である¹⁾：

1. 時刻を記述する配車経路計画問題
 - (ア) 刻一刻と変化する交通事情を考慮した最適化
 - (イ) 配達先の時間帯指定。特に複数の時間帯を跨いだ定式化が可能

(ウ) ドライバーの勤務時間、休憩時間、配達先での業務時間も含んだ最適化が可能

2. 容量制限を含んだ配車経路計画問題

- (ア) 収容人数制限を含んだ複数台による送迎最適化
- (イ) 配達と集荷を同時にこなす配達経路計画問題

3.3 時間を含むイジング定式化

次にこれらの問題を我々がどのように解決し、実現していったかを紹介する (詳しくは本論文¹⁾を参照)。従来の定式化と同じところは、イジングと等価なバイナリ変数による非成約二次最適化 (QUBO) 問題として定式化するところである。QUBO 変数によって、どの顧客に何番目に訪れるかを表すことができる (Fig. 4 の左参照)。我々の定式化のポイントは、この「何番目」を表すステップ数を「何時から何時まで」という時間帯にアップグレードさせたことにある (Fig. 4 の右参照)：

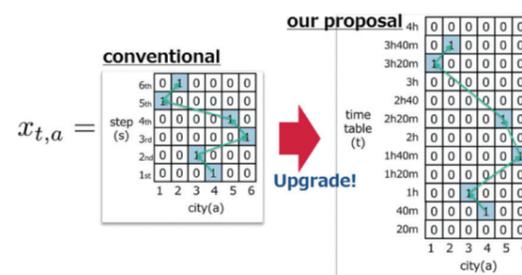


Fig. 4 時刻表を持った QUBO 変数を考案

ただし顧客間の移動時間に応じてジャンプする機構を入れなければならない。これを可能にした方法が、出発地点に依存した斥力相互作用の導入である。これによって移動時間の記述が可能となり、上記の時刻表を用いた記述が可能となった。これに関しては、Fig. 5 に示す：

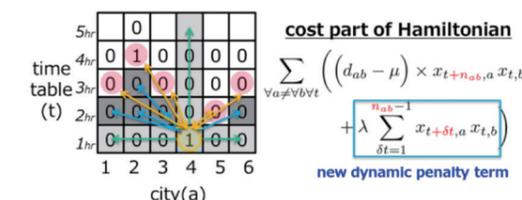


Fig. 5 斥力相互作用の導入と移動時間記述

ここで面白いことに、「時間」の記述というものは「所要時間内にどのように配車スケジュールをこなすか」と言い換えることもできる。すなわち、この「所要時間」を「積載容量」とみなすことで、我々の時間を含んだ

配車経路計画問題の定式化は収容限界を含んだ配車経路計画問題の定式化にもなっている。これによって例えば、「空港へ (又は空港から) の送迎サービス」の最適化にも応用できる (Fig. 6)。

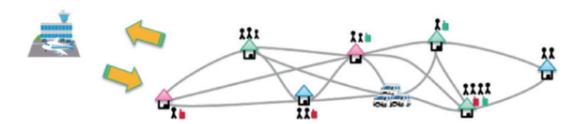


Fig. 6 時間を容量と解釈することも可能

3.4 複数の収容限界及び、状態の記述

上記の時間を含んだ定式化は、収容限界の記述にも応用できたが、変数としては 1 つしか扱えない。また、その変数も単調増加又は減少する変数しか扱えない。我々は、時間も収容限界も両方を記述でき、かつ収容限界内での変数の増減を可能とした定式化も提案している。それは配車問題に仮想的な余剰次元を付加することで実現する。すなわち、配車経路計画問題の各状態に対して、「内部空間」として容量を記述する QUBO 変数を導入することである (Fig. 7)。

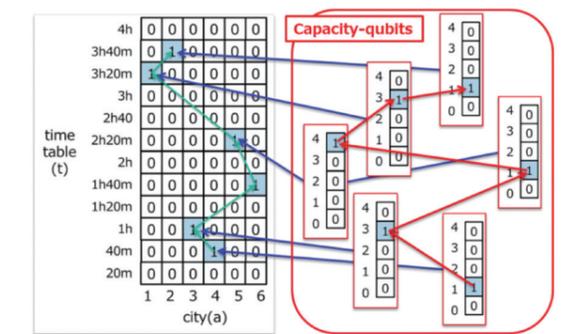


Fig. 7 容量量子ビットの導入と CVRP

一方で、この収容限界を記述するために導入した「内部空間」は、各車の状態を与えると考えても良い。例えば、内部空間が 2 量子ビットで与えられる場合に、「到達状態」と「出発状態」を各車に充てることできる。到達状態から出発状態への遷移は、同一の顧客にとどまったまま行われ、出発状態から到達状態へは通常の移動が行われるように相互作用を置くことができ、「滞在時間」の精密な記述が可能となる (Fig. 8)。

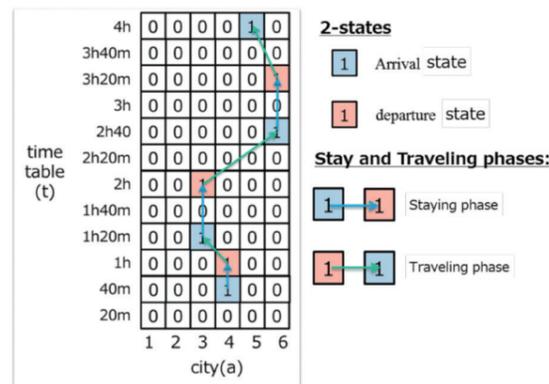


Fig. 8 状態量子ビットと滞在時間の記述

4. 量子古典ハイブリッドの進展

4.1 量子古典ハイブリッド技術と量子優位性

以上までの配車経路計画問題の定式化について発表した段階(2019年3月)での量子アニーリング・マシン D-Wave 2000Q では、2時間(15分単位スケジュール)、6箇所の配達を3台でシェアする配達問題が計算限界であった。確かに、D-Wave Systems社の量子演算装置の量子ビット開発は2年で2倍のペースで行われており、指数関数的に増加することは分かるが、このペースでは実用的な規模に成長するまでには相当な時間がかかる。

一方で、実際の問題を見てみれば、古典コンピュータで自明に解決できる部分問題を多く含んでおり、巨大なサイズの問題を量子コンピュータ単独で一度に解くことが現状の適切な使い方であるようには思えない。我々は古典コンピュータが得意な部分は古典コンピュータで解き、量子コンピュータが得意な部分は量子コンピュータで解くハイブリッド機構を考えることが必要であると考え。これは一見実現が難しい機構であるように思えるが、例えば²²⁾でその一端が実現できている。

また現在の数理最適化技術において、線形計画法に基づく手法が多くの場合で扱われており、さまざまな実用的な場面で使われている。そのような実用的な問題に対して量子ソルバーがその優位性の一端を發揮するためには、以上で述べたようなハイブリッド機構を使いつつ、ある程度の規模で量子ソルバーが優位に計算できる状況を見出す必要がある。線形ソルバーが計

算困難になる複雑な状況が解けるようになるからこそ新しい最適化が可能になり、新しい価値・新しいサービスが生まれるからである。本稿で紹介した複雑な配車経路計画問題を一つのイジング定式化として与えて大規模問題で解くことは、量子技術の真価を探し出す上で、重要な問題のひとつであると考え。

4.2 量子ハイブリッド技術による実装

2020年秋にD-Wave Systems社は新機種D-Wave Advantageと共にそのD-Wave Advantageを用いた新しいハイブリッド・システムD-Wave Leap Hybrid Solver (version 2)をリリースした¹⁴⁾。このソルバーシステムは全結合で20,000変数、疎結合であれば1,000,000変数まで扱えるとしている。実際、我々の配車経路計画問題において、非常に複雑な多重時間帯指定制約の下で20台160か所5時間(10分単位スケジュール)の経路計画(44,520変数)であっても問題なく解を算出することが分かっている²⁾。実際、100変数以下の世界でしかこれまで確認できていなかったイジング形式が、数万変数の規模でうまく機能することが確認できた初めての例の一つである(Fig. 9)。

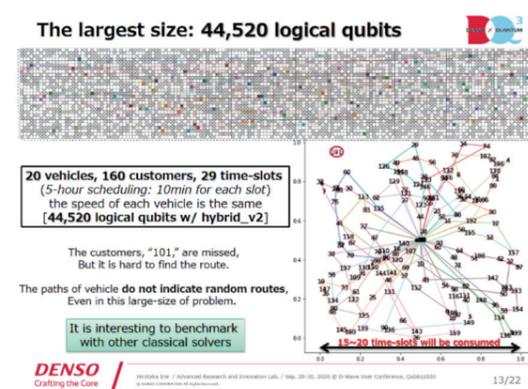


Fig. 9 量子古典ハイブリッドによる44,520変数での解

ここで、この44,520変数はソルバーの限界ではなく、更なる大規模変数でも有用な解が算出できることに注意しておく。特に最大変数の1,000,000変数を使えば、40台400か所8時間に相当する問題を扱うことが可能となり、より産業スケールの問題に近づいてきたともいえる。大規模イジング定式化が機能することが確認出来てきた現在、数万から数百万規模における算出時間及び解精度が既存の計算技術と比べどの程度であるか、

今後の量子コンピューティング技術の進展でどれほどの加速が期待できるのかが重要となってくる。もちろん、量子技術そのものの熟度がまだ未完成の時期に、完全な量子優位性がすぐに確認できるかどうかはわからないが、参考文献22のような手法をLeap Hybrid Solver等と組み合わせることで、大規模イジング形式による量子ソルバーでなければできない新たな領域を見出すことが出来るようになることを期待している。我々は現在この産業スケールでの有用性、量子ソルバーでしかできない未来のモビリティ社会の新しい価値創造のために、現在も検討を行っているところである。

5. まとめ

本稿では、量子コンピュータ、特に量子アニーリング・マシンの可能性及び、それを用いた新しい未来のモビリティ社会の可能性について議論してきた。量子アニーリング・マシンの実問題における量子優位性を実現するためには、量子古典ハイブリッド技術の進展が不可欠であり、その基本的機構さえ整えば、今現在有用なシステムとして活用でき、今後の量子技術の発展、あわよくば超越的な力をそのまま実用につなげることができる。

近年の量子コンピューティング技術の進展は凄まじいもので、毎年新しい発展が現れ、常に可能性が広がってきている。今難しいと思うことも来年には可能になっているかもしれない。量子コンピュータが実社会でその真価を發揮する時代も、それほど遠い未来ではないと考えている。

参考文献

- 1) H. Irie, G. Wongpaisansin, M. Terabe, A. Miki, S. Taguchi: Quantum Annealing of Vehicle Routing Problem with Time, State and Capacity, published in Feld S., Linnhoff-Popien C. (eds), Quantum Technology and Optimization Problems (QTOP 2019), Lecture Notes in Computer Science, vol 11413, Springer, 2019.
- 2) H. Irie: Vehicle Routing Problems and Quantum Hybrid Systems, D-Wave User Conference, Qubits 2020, Sep.28-30, Online Conference.
- 3) R. P. Feynman: Simulating Physics with Computers, International Journal of Theoretical Physics, Vol. 21, Iss. 6-7,

- 4) D. Deutsch: Quantum Theory, the Church-Turing Principle and the Universal Quantum Computer, Proceedings of the Royal Society A, Vol.400, Iss.1818, pp.19 (1985)
- 5) C. H. Bennet, E. Bernstein, G. Brassard, U. Vazirani: Strengths and Weaknesses of Quantum Computing, SIAM J. Comput., Vol.26, Iss.5, p.1510-1523 (1997)
- 6) P. W. Shor: Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer, SIAM J. Comput., Vol.26, Iss.5, p.1484-1509 (1997)
- 7) 近角 聡信: 強磁性体の物理(上)物質の磁性, 物理学選書4, 裳華房, pp.299 (1978)
- 8) S. F. Edwards, P. W. Anderson: Theory of Spin Glasses, J. Phys. F: Metal Phys., Vol.5, p.965-974 (1975)
- 9) M. Mezard, G. Parisi, M. Virasoro: Spin Glass Theory and Beyond, An Introduction to the Replica Method and its Applications, World Scientific Lecture Notes in Physics, Vol.9, pp. 461 (1987)
- 10) S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, Jr., M. P. Vecchi: Optimization by Simulated Annealing, Science Vol.220, No.4598, p.671-680 (1983)
- 11) T. Kadowaki, H. Nishimori: Quantum Annealing in the Transverse Ising Model, Phys. Rev. E, Vol.58, No.5, p.5355-5363 (1998)
- 12) W. M. Kaminsky, S. Lloyd, T. P. Orlando: Scalable Superconducting Architecture for Adiabatic Quantum Computation, arXiv:quantum-ph/0403090v2 (2004)
- 13) M. W. Johnson, M. H. S. Amin, S. Gildert, T. Lanting, F. Hamze, N. Dickson, R. Harris, A. J. Berkley, J. Johansson, P. Bunyk, E. M. Chapple, C. Enderud, J. P. Hilton, K. Karimi, E. Ladizinsky, N. Ladizinsky, T. Oh, I. Perminov, C. Rich, M. C. Thom, E. Tolkacheva, C. J. S. Truncik, S. Uchaikin, J. Wang, B. Wilson, G. Rose: "Quantum Annealing with Manufactured Spins," Nature 473, p.194-198 (2011)
- 14) D-Wave Systems, Inc.: <https://www.dwavesys.com/>
- 15) E. J. Crosson, D. A. Lidar: Prospects for Quantum Enhancement with Diabatic Quantum Annealing, arXiv:2008.09913 pp.26 (2020).
- 16) E. Farhi, J. Goldstone, S. Gutmann, M. Sipser: Quantum Computation by Adiabatic Evolution, quant-ph/0001106 (2000)
- 17) S. Morita, H. Nishimori: Convergence of Quantum Annealing with Real-Time Schroedinger Dynamics, J. Phys. Soc. Jpn. 76, 064002, pp.3 (2007)
- 18) R. Harris, J. Johansson, A. J. Berkley, M. W. Johnson, T. Lanting, Siyuan Han, P. Bunyk, E. Ladizinsky, T. Oh, I. Perminov, E. Tolkacheva, S. Uchaikin, E. M. Chapple, C. Enderud, C. Rich, M. Thom, J. Wang, B. Wilson, and G. Rose: Experimental Demonstration of a Robust and Scalable Flux Qubit, Phys. Rev. B 81, 134510, pp.20 (2010)
- 19) TOYOTA TSUSHO NEXTY ELECTRONICS p.467-488 (1982)

(THAILAND) CO. LTD.: T-SQUARE, <https://tsquare.rtic-thai.info/>

- (20) S. Sahni, T. Gonzalez: P-Complete Approximation Problems, Journal of the Association for Computing Machinery, Vol. 23, No. 3, pp. 555-565 (1976)
- (21) S. Arora: Polynomial Time Approximation Schemes for Euclidean Traveling Salesman and other Geometric Problems, Journal of the Association for Computing Machinery, Vol. 45, pp. 753-782 (1998)
- (22) H. Irie, H. Liang, T. Doi, S. Gongyo, T. Hatsuda: Hybrid Quantum Annealing via Molecular Dynamics, arXiv:2004.03972 pp.14 (2020).

著者



入江 広隆
いりえ ひろたか

AI 研究部
量子コンピューティングの実社会活用の
研究に従事



門脇 正史
かどわき ただし

AI 研究部
量子コンピューティングの実社会活用の
研究に従事



高橋 俊輔
たかはし しゅんすけ

豊田通商株式会社
コンピューティングの革新に基づく新事業
開発に従事



栗島 亨
あわしま とおる

豊田通商株式会社
コンピューティングの革新に基づく新事業
開発に従事



Goragot Wongpaisarnsin
ゴラゴット ウォンバイサンシン

Toyota Tsusho Mobility Informatics
Pte. Ltd.
コンピューティングの革新に基づく新事業
開発に従事