



アナログ量子シミュレータは人工的な量子系を用いて対象の量子系をシミュレートする技術である.従 来のコンピュータでは困難な量子系のシミュレーションを効率的に実行することができ,ゲート方式の量 子コンピュータよりも早い時期に従来のコンピュータを超える計算性能を獲得しうると期待されている. 本稿では,近年急速な進展を遂げているアナログ量子シミュレータの研究開発動向と,その応用先につい て述べる.また,現状最も実用化に近い位置にあると思われるリュードベリ原子方式のアナログ量子シミ ュレータについて触れ,開発に取り組む企業の状況や,特徴的な応用先について紹介する.

1 はじめに

創薬や新規機能性材料の開発といった社会に大き な価値を還元しうる産業領域において,量子力学で 記述されるようなミクロな系(量子系)をシミュレー トする技術は極めて重要な役割を担っている.例と して,光触媒や太陽電池といった光との反応で機能 を発現する素子の動作機構では,反応に寄与する電 子・原子の量子性が重要な役割を持ち,その反応を正 確に解析するためには量子力学的な効果を考慮した シミュレーションが必要となる.

しかし,量子系には,状態の"重ね合わせ"といった 古典系にない量子力学的な効果が存在し,大規模な 系を従来のコンピュータで厳密に扱うことは極めて 困難である.このため,過去数十年の間に様々な近似 的計算手法が開発されてきた.例えば,局所密度近似, 一般化勾配近似といった密度汎関数理論に基づく近 似手法は,効率の良さから化学・材料科学といった分 野においてかなりの成功を収めていると言える.し かしながら,個々の粒子が互いに強く影響を及ぼし 合っているような量子系(強相関電子系など)ではこ のような手法が上手く機能しない場合が多く,この ような系をどのように効率的にシミュレートするか が重要な研究課題となっている.

このような課題の解決策の一つとして,物質の量子性を活用して計算を行う「量子コンピュータ」に大きな期待が寄せられている.量子コンピュータは重

ね合わせや干渉といった量子力学的な現象を上手く 利用することで,量子系のシミュレーションを効率 的に実行できると考えられている¹⁾.

特に近年では、量子コンピュータと同様に量子性 を活用した計算技術である「アナログ量子シミュレ ータ」が大きな注目を集めている. アナログ量子シミ ュレータは、

人工的に制御可能な量子系を用いて対 象の量子系の振る舞いをシミュレートする計算技術 である. 2023 年1月には、アナログ量子シミュレー タを開発するフランスのスタートアップ企業である PASQAL が1億ユーロの資金調達を発表し、話題と なった²⁾. アナログ量子シミュレータは早期実用化と いう観点から非常に有望視されている量子技術であ る. 2022 年 7 月には, Microsoft の研究員を含む研究 チームがアナログ量子シミュレータに関する論文を Nature 誌で発表し、「アナログ量子シミュレータは現 状のゲート方式の量子コンピュータよりも少ないエ ラーで量子系のシミュレーションを実行でき、早期 に従来のコンピュータを上回る計算性能を獲得しう る」と主張している 3.

本稿では、このようなアナログ量子シミュレータ について、その優位性や応用先について議論し、研究 開発動向にも触れながら今後の発展を展望する.また、複数ある実装方式の中から、現状最も実用化に近 い位置にあると思われる「リュードベリ原子方式」の アナログ量子シミュレータにフォーカスし、各社の 開発動向や特徴的な応用先について紹介する.

2 アナログ量子シミュレータの概要

2.1 アナログ量子シミュレータの実装

アナログ量子シミュレータは、図1に示すように、 対象の量子系をモデルハミルトニアンHによって表 現(モデル化)し、人工的に制御可能な量子系を用いて 模擬することで、その振る舞いをシミュレートする 計算技術である.



表1に示すように、様々な量子系を用いたアナロ グ量子シミュレータが開発されている.実装方式の 違いによってシミュレーション可能な量子系のモデ ル(モデルハミルトニアン)が異なるため、シミュレー ションを行う際には対象とする量子系に対応してい る実装方式を選ぶ必要がある.代表的なモデルハミ ルトニアンと対応する実装方式を**表2**に示す.

表 1 アナログ量子シミュレータの実装方式例

実装方式	概要	
光格子	レーザー光が作る格子上のポテンシャル(光 格子)中に原子を保持し,量子系を形成する. 光格子をコントロールして量子ビット間の相 互作用を調整する.	
リュードベリ原子	光ピンセットを用いて冷却原子を配置し,量 子系を形成する.レーザー光や Ry 状態と呼 ばれる高励起状態の効果を用いて量子ビット 間の相互作用を調整する.	
イオントラップ	電磁場により荷電粒子(イオン)を空間中に固 定し,量子系を形成する.レーザー光により 相互作用を制御する.	
超伝導	超伝導量子回路上で構成される量子ビットを 用いて量子系を形成する.マイクロ波共振器 により相互作用を制御する.	

なお, **表 2** に示した代表的なモデルハミルトニア ン以外にも,アナログ量子シミュレータでシミュレ ート可能なモデルハミルトニアンの表式が提案され ている.一つの例が次式のような MQB (Mixed quditboson)モデルと呼ばれるモデルハミルトニアンであ る⁹.

$$H(t) = \sum_{n} \sum_{j} \Theta_{n,j} |n\rangle \langle n| (\hat{a}_{j}^{\dagger} e^{i\delta_{j}t} + h.c.)$$

+
$$\sum_{n \neq m} \sum_{k} \Omega_{n,m,k} |n\rangle \langle m| (\hat{a}_{k}^{\dagger} e^{i\delta_{k}t} + h.c.) + \frac{1}{2} \sum_{n} \chi_{n} |n\rangle \langle n| \qquad (1)$$

$$\Theta_{n,j}, \Omega_{n,m,k}, \chi_{n}, \delta_{j}:$$
定数, $|n\rangle:$ 電子の量子状態,
 $\hat{a}_{j}^{\dagger}, \hat{a}_{j}:$ 原子振動の生成・消滅演算子

一般に,量子化学計算ではボルン-オッペンハイマ ー近似によって電子と原子の運動を分離して考える 場合が多いが,MQB モデルは原子の振動を考慮した 多電子系の振る舞いを表現できる.原子振動が重要 な役割を果たすケースとして,光化学反応が挙げら れる.光化学反応では,原子座標の変化によって異な

モデル	モデルハミルトニアンの表式 ※ i.j はサイトのインデックスであり、〈i.j〉は最近接サイトのペアを表す	対象の量子系	実装方式
フェルミーハバードモデル	$ \begin{aligned} H &= -\sum_{\langle i,j \rangle} \sum_{\sigma} \left(t_{ij} f_{i\sigma}^{\dagger} f_{j\sigma} + \text{h.c.} \right) + U \sum_{i} n_{i\uparrow} n_{i\downarrow} \\ t_{ij}, U: 定数, f_{i\sigma}^{\dagger}, f_{i\sigma}: 電子(スピン\sigma) の生成・消滅演算子, n_{i\sigma=\uparrow,\downarrow}: 数演算子 \end{aligned} $	強相関電子系	光格子 ⁴⁾
ボースーハバードモデル	$H = -\sum_{\langle i,j \rangle} (t_{ij} b_i^{\dagger} b_j + \text{h.c.}) + \frac{U}{2} \sum_i n_i (n_i - 1)$ $t_{ij}, U: 定数, b_i^{\dagger}, b_i: ボソンの生成・消滅演算子, n_i: 数演算子$	ポラリトン系 光子・原子相互 作用系	光格子 ⁴⁾ 超伝導 ⁵⁾
ハイゼンベルクモデル	$H = -\sum_{\alpha,\langle i,j \rangle} J^{\alpha} S_{i}^{\alpha} \cdot S_{j}^{\alpha} - \sum_{\alpha,i} h^{\alpha} S_{i}^{\alpha}$ J ^{\alpha} , h ^{\alpha} : 定数, S_{i}^{\alpha}: パウリ演算子, \alpha = x, y, z	磁性体	光格子 ⁴⁾ トラップイオン ⁶⁾ リュードベリ原子 ^{7,8)}
横磁場イジングモデル	$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} S_i^z \cdot S_j^z - h^x \sum_i S_i^x$ J, h ^x : 定数, S_i^{x,z}: パウリ演算子	磁性体	光格子 ⁴⁾ トラップイオン ⁶⁾ リュードベリ原子 ⁷⁾

る電子状態間のエネルギーが交差する「円錐交差(コ ニカルインターセクション)」が重要な役割を果たし ている.アナログ量子シミュレータを用いることで, このような現象の詳細な解析が可能となる.なお,原 子振動の効果はシミュレータ上のボソンによって表 現されるため,シミュレータの実装方式としては,ボ ソンの制御が可能な光格子・超伝導・トラップイオン といった方式が対応する.また,電子の状態数は各サ イトにおける量子状態の準位の数に対応しており,3 つ以上の電子状態を考慮する場合には2準位で表現 される量子ビット("qubit")ではなく"qudit"と呼ばれ る d 個(d ≥ 3)の準位を持つ量子状態の操作が必要で ある.

実験的にもアナログ量子シミュレータを用いた MQB ハミルトニアンのシミュレーションが行われ ている.イオントラップ方式のアナログ量子シミュ レータを用いた実験では,円錐交差が生じる場合の 電子状態のシミュレーションにより,その結果が理 論的予測と一致することが確認されている¹⁰⁾.

2.2 量子コンピュータ・量子アニーラとの違い

アナログ量子シミュレータは、同じように物質の 量子性を活用した計算技術であるゲート方式の量子 コンピュータとは異なる技術である.量子コンピュ ータが離散的(デジタルな)ゲート操作の組み合わせ で様々なアルゴリズムを実行するのに対し、アナロ グ量子シミュレータは人工的な量子系に対する連続 的な操作によって所望の量子系の時間発展をシミュ レートすることを目的とした実装となっている.

「量子アニーラ」も物質の量子性を活用した計算 技術として挙げられる.量子アニーラは,制御可能な 量子系を用いて所望の条件下におけるイジングモデ ルの基底状態を探索する計算機である.量子アニー ラと比較すると,アナログ量子シミュレータは「(1) 実装方式によってはイジングモデル以外の様々なモ デルハミルトニアンに対応している」,「(2)基底状態 探索に限らずダイナミクスのシミュレーションを実 行できる」という2点が異なる.

2.3 アナログ量子シミュレータによる計算

アナログ量子シミュレータを用いたシミュレーションは,基本的には図2に示すような手順で行われる.

みずほリサーチ&テクノロジーズ技報 Vol.3 No.1



図 2 アナログ量子シミュレータを用いた計算の流れ

このようなシミュレーションにより,あるハミルト ニアンのもとで量子状態の時間変化を定量的に解析 することが可能となる.

2.4 従来型コンピュータに対する優位性

量子系の時間発展の厳密なシミュレーションは. 一部のシンプルなモデルを除いて従来のコンピュー タでは実行困難であり、テンソルネットワークなど を用いた近似的な計算手法が利用されている³⁾.これ らの手法は,対象の量子系において粒子間の量子力 学的な相関(エンタングルメント)が弱い場合には高 精度に量子状態を近似することが可能である. しか しながら,多くの量子系では時間発展に伴って系全 体のエンタングルメントが強くなるため,近似誤差 が大きくなってしまう.また、ゲート方式の量子コン ピュータを用いて量子系の時間発展をシミュレート する場合には、トロッター分解による近似が必要と なる.アナログ量子シミュレータではこのような近 似を必要としないため、ゲート方式の量子コンピュ ータと比較してトロッター分解に伴う近似誤差がな いという利点がある.以上の理由から、アナログ量子 シミュレータは長時間の時間発展であっても少ない 誤差でシミュレートすることが可能である³⁾.

衣 3 国内の研究機関の取り組み (公開情報に基づさ作成)					
組織	実装方式	取り組み			
自然科学研究機構 分子科学研究所	光格子 リュードベリ原子	リュードベリ原子・光格子方式の量子シミュレータの素子・動作方式の研究 JST が主導する「光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)」 に採択 ¹¹⁾			
京都大学	光格子	光格子方式の量子シミュレータを用いた量子多体系の研究			
理化学研究所 量子コンビュータ研究センター 量子多体ダイナミクス研究チーム	光格子	光格子方式の量子シミュレータの制御・測定技術の研究			
電気通信大学	リュードベリ原子	リュードベリ原子方式の量子シミュレータの素子・動作方式の研究			
理化学研究所 量子コンビュータ研究センター 超伝導量子シミュレーション研究チーム	超伝導	超伝導方式の量子シミュレータの素子・動作方式の研究			
大阪大学	イオントラップ	イオントラップ方式の量子シミュレータを用いたシミュレーション手法の研究 JST が主導する「光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)」 に採択 ¹¹⁾			

3 国内・海外の研究開発動向

3.1 国内の動向

国内では、大学・研究機関を中心にアナログ量子シ ミュレータの実験的な構築について研究が進められ ている.実装面での各組織の取り組みを表3に示す. 特に、2018年からは、科学技術振興機構(JST)が主導 する「光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)」の中でアナログ量子シミュレータ関係のプ ロジェクトが複数立ち上がっており、重点的に取り 組まれている技術となっている¹¹⁾.

3.2 海外の動向

海外では、日本と同様に大学・研究機関による研究 が盛んに行われているほか、複数のスタートアップ 企業によって商用機の開発が進められている。特に、 リュードベリ原子方式のアナログ量子シミュレータ の開発に着手している企業が多く、すでに一部の企 業は実機を公開している。4章では、このリュードベ リ原子方式のシミュレータについて紹介する。

4 リュードベリ原子方式の開発動向・アプ リケーション

4.1 開発動向

複数あるアナログ量子シミュレータの実装方式の 中で、特にハードウェアの実装が進んでいるのが、リ ュードベリ原子方式である.この実装方式では、「リ ュードベリ状態」と呼ばれる電子の高励起状態を用 いて粒子間の相互作用を表現する.リュードベリ原 子方式のシミュレータの特徴として、量子ビットの 配置を柔軟に変更できるという点が挙げられる.こ れにより、後述する最適化問題やグラフカーネルと いったアプリケーションにおいて,問題が持つ幾何 学的な特徴を上手く捉えることができ,優れた計算 性能を示すことが期待されている.

2023 年 12 月時点で商用機を公開している企業は, 1 章で触れたフランスの PASQAL や,アメリカの QuEra である.いずれの企業も 2021~2023 年の間に 1000 万~1億ドル規模の資金調達を発表しており^{2,12)}, 有望性が高く評価されている.各企業の商用機につ いて,詳細を表 4 に示す.他の実装方式については 2023 年 12 月時点では商用機が公開されておらず,ハ ードウェアの開発状況を見るとリュードベリ原子方 式は最も実用化に近い実装方式といえる.

表 4 クラウド上で利用可能なリュードベリ原子方式の アナログ量子シミュレータ(2023 年 12 月 31 日時点)

開発企業	ビット数	利用方法
PASQAL	100	Microsoft Azure より利用可能(プライ ベート公開) ¹³⁾
QuEra	256	Amazon Braket より利用可能 ¹⁴⁾

4.2 アプリケーション例

本節では、リュードベリ原子方式のアナログ量子 シミュレータのアプリケーションについて紹介する. 量子系の解析(4.2.1 項)以外にも、最適化問題(4.2.2 項) や機械学習(4.2.3 項)などの広範な応用が提案されて いる.

4.2.1 量子系(イジングモデル)のシミュレーション

リュードベリ原子方式のシミュレータでは、イジ ングモデルで記述される量子系のシミュレーション を行うことが可能である.先行研究では、従来のコン ピュータでは計算が困難な規模の系を対象に、256量 子ビットのシミュレータを用いたシミュレーション が行われており、数値計算で予測されていた量子相

転移現象の観測に成功したと報告されている 15).

4.2.2グラフカーネル

"グラフ"は、図3に示すような点と辺で表現されるデータ構造を意味する.化学物質の分子構造や 社会ネットワークといった様々な種類のデータがグ ラフとして表現できる.



グラフカーネルは、このようなグラフデータに対 してデータ間の類似度を測る手法であり、グラフデ ータの分類に広く利用されている.

アナログ量子シミュレータをグラフカーネルに応用する手法が提案されており、以下のような手順で グラフ間の類似度を評価する¹⁶. 図 4 に手順の概要 を示す. なおここでは、図 3 に示すように、ある2 点間の距離が一定よりも近い場合に辺を形成するよ うな「ユニットディスク(UD) グラフ」を対象としてい る.

- グラフデータの構造を模擬するように量子ビットを配置し、適当な時間発展を与える.
- ②時間発展後の量子系の状態を測定し,測定結果 を取得する.
- ③全てのグラフデータに対して①,②の手順を行って各グラフにおける測定結果の確率分布を取得し,確率分布間の距離(Jensen-Shannon divergence など)を用いてグラフ間の類似度を評価する.

アナログ量子シミュレータにおいて,時間発展 後の量子状態(終状態)は量子ビットの初期配置に 強く依存するため,時間発展後の量子状態にはグ ラフの構造に関する情報が埋め込まれる.これに より,同じ時間発展を与えたとしても取得される 確率分布はグラフによって異なる.



先行研究では、リュードベリ原子方式のシミュレ ータを用いたグラフカーネルの性能が検証されている¹⁷⁾.量子シミュレータを用いたグラフカーネルで は、グラフが持つ局所的な特徴(各ノードが持つエッ ジの数など)だけでなく、大域的な特徴(ループ構造の 有無など)も終状態のプロパティに大きく影響すると いう結果が示されており、従来手法では捉えること が困難なグラフの特徴を上手く処理し、分類精度を 向上できる可能性があると議論されている.どのよ うなグラフ構造に対して優位性があるのか、理論・実 験の両面からの詳細な解析が課題である.

4.2.3最大独立集合問題

最大独立集合問題は,図5に示すように,あるグ ラフにおいて互いに隣接していない複数の点を選ぶ 際に,最大でいくつの点を選択することができるか を求める問題である.



交通最適化や通信ネットワークの配置といった 様々な産業上の課題を最大独立集合問題に帰着させ ることが可能である¹⁷⁾.しかしながら,一般に大規 模なグラフにおける最大独立集合問題は求解が困難 (最悪の場合には NP 困難)であることが知られており ¹⁸⁾,通常は何らかの近似解法を用いる必要がある.

このような最大独立集合問題に対して、リュード ベリ原子方式のシミュレータを用いた求解手法が提 案されている^{19,20)}.この手法では、グラフカーネルの 手法と同様に UD グラフを対象とし、グラフを模擬 するように量子ビットを配置し、量子アニーリング で用いられるような断熱時間発展などの手法を用い て、次式のようなハミルトニアンに対する基底状態 を求める.ここでn_iは i 番目の量子ビットが Ry 状態 のときに 1 となり、基底状態のときには 0 をとる. h, V_{ii} は適当な定数を表す.

$$H = -h\sum_{i} n_i + \sum_{i < j} V_{ij} n_i n_j \tag{2}$$

ハミルトニアンの表式において、第1項は個々の 量子ビットがリュードベリ状態の場合にエネルギー が小さくなるような効果を表す. 第2項は、グラフ 上で隣接する点がリュードベリ状態を取る場合にエ ネルギーが大きくなる効果を表す.したがって,この ようなハミルトニアンの基底状態は、「隣接する点を 同時に選択しないように(第2項に対応)」、「できるだ け多くの点を選択(第1項に対応)」した場合のパター ンを表しており,これは求めたい最大独立集合の一 つとなっている. 特に, リュードベリ原子方式のシミ ュレータは、量子ビットの配置を自由に調整できる ため, 第二項目が表す「グラフ上で隣接する点が同じ 状態を取らない」という制約条件を実装上効率的に 取り込むことが可能である.このため,従来のコンピ ュータにおける近似解法よりも精度・計算速度の面 で優位性を示しうると考えられている 19.20).

289 量子ビットのシミュレータを用いた実験では, 80~289 個の頂点を持つランダムなグラフを対象に, 従来手法(シミュレーティッドアニーリング)との比 較を行い,従来手法では求解が困難なグラフの一部 に対して量子シミュレータが優れた求解性能を示す ことが数値的に確認されている²⁰⁾.また,UD グラフ を超えた幅広いグラフ構造に対するマッピング手法 も提案されている^{21,22)}.具体的にどのような最大独 立集合問題に対して優位性を持ちうるか²³⁾,どのよ うな問題を苦手とするか²⁴⁾に関する研究も進められ ており、実問題における優位性と実用性について更 なる検証が求められる.

5 今後の展望

本稿では、近年注目を集めているアナログ量子シ ミュレータについて概観した.冒頭に述べた通り、量 子系のシミュレーションは様々な産業領域において 重要な役割を果たすと考えられる.アナログ量子シ ミュレータの活用により、これまで困難であった量 子系の解析が実現すれば、社会全体に大きなインパ クトを与えることが期待できる.国内外で研究開発 が加速しており、リュードベリ原子方式を中心に、実 用化に近いポジションにあるということが見えてき ている.

量子コンピュータなどの量子技術は、アカデミア と産業界の双方で今最も盛んに研究開発が進められ ている技術の一つといえる.日本では、2021~2023年 の間に量子技術の研究開発・産業応用に関わる 3 つ の国家戦略が策定された.国家戦略の一つである「量 子未来産業創出戦略」では、2030年までに量子技術 の利用者を1000万人にすることを目標に掲げており ²⁵⁾、多種多様な産業領域において量子技術を活用して いくことが求められている.このような背景も踏ま えると、ゲート方式の量子コンピュータよりも早期 に実用化されうるアナログ量子シミュレータは極め て重要な技術であるといえる.アカデミアと産業界 の双方の視点から、ハードウェアの進展と平行して 有用なアプリケーションの創出に取り組んでいくこ とが重要であると思われる.

引用文献

- Lloyd S.: Universal quantum simulators, *Science*, 273 (1996) 1073–1078.
- PASQAL Raises €100 Million Series B Funding t
 o Advance Neutral Atoms Quantum Computing, <u>h</u>
 ttps://www.pasqal.com/articles/pasqal-raises-eu100-mi
 llion-series-b-funding-to-advance-neutral-atoms-quant
 um-computing (参照 2023-10-31)
- Daley, A. J. & Bloch, I. & Kokail, C. *et al.*: Practical quantum advantage in quantum simulation, *Nature*, 607 (2022) 667–676.
- 4) Gross, C. & Bloch, I.: Quantum simulations with ultracold atoms in optical lattices, *Science*, 357 (2017)

995-1001.

- Kjaergaard, M. & Schwartz, M. E. & Braumüller, J. *et al.*: Superconducting qubits: Current state of play, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.*, 11 (2020) 369-395.
- 6) Blatt, R. & Roos, C. F.: Quantum simulations with trapped ions, *Nat. Phys.*, 8 (2012) 277-284.
- Browaeys, A. & Lahaye, T.: Many-body physics with individually controlled Rydberg atoms, *Nat. Phys.*, 16 (2020) 132-142.
- Scholl, P. & Williams, H. J. & Bornet, G. *et al.*: Microwave Engineering of Programmable X X Z Hamiltonians in Arrays of Rydberg Atoms, *PRX Quant.*, 3 (2022) 020303.
- MacDonell, R. J. & Dickerson, C. E. & Birch, C. J. T. et al.: Analog quantum simulation of chemical dynamics, *Chem. Sci.* 12 (2021) 9794.
- Valahu, C.H. & Olaya-Agudelo, V.C. & MacDonell, R.J. *et al.*: Direct observation of geometric-phase interference in dynamics around a conical intersection, *Nat. Chem.* 15 (2023) 1503–1508.
- 11)光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP), <u>https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/</u>, (参照 2023-10-31)
- 12)A new quantum computer startup from Harvard, MIT raises \$17M, https://www.reuters.com/technology/new-quantumcomputer-startup-harvard-mit-raises-17m-2021-11-17/, (参照 2023-10-31)
- 13)Azure Quantum の量子コンピューティング プロ バ イ ダ ー , <u>https://learn.microsoft.com/ja-</u> jp/azure/quantum/qc-target-list, (参照 2023-10-31)
- 14)Amazon Braket Quantum Computers QuEra, https://aws.amazon.com/jp/braket/quantumcomputers/quera/, (参照 2023-10-31)
- 15) Ebadi, S. & Wang, T. T. & Levine, H. et al.: Quantum

phases of matter on a 256-atom programmable quantum simulator, *Nature*, 595 (2021) 227–232.

- 16) Albrecht, B. & Dalyac, C. & Leclerc, L. *et al.*: Quantum feature maps for graph machine learning on a neutral atom quantum processor, *Phys. Rev. A*, 107 (2023) 042615.
- 17) Wurtz, J. & Lopes, P. L. S. & Gemelke, N. *et al.*: Industry applications of neutral-atom quantum computing solving independent set problems, *arXiv*:2205.08500 (2022).
- 18)Karp, R. M.: Reducibility among Combinatorial Problems, *Complexity of Computer Computations*, Springer (1972) 85-103.
- 19)Pichler, H. & Wang S. T. & Zhou L. *et al.*: Quantum Optimization for Maximum Independent Set Using Rydberg Atom Arrays, *arXiv*:1808.10816 (2018).
- 20) Ebadi, S. & Keesling, A. & Cain, M. *et al.*: Quantum optimization of maximum independent set using Rydberg atom arrays, *Science*, 376 (2022) 1209-1215.
- 21) Nguyen, M.-T. & Liu, J.-G. & Wurtz, J. *et al.*: Quantum Optimization with Arbitrary Connectivity Using Rydberg Atom Arrays, *PRX Quant.* 4 (2023) 010316.
- 22) Lanthaler, M. & Dlaska, C & Ender, K. *et al.*: Rydberg-Blockade-Based Parity Quantum Optimization, *Phys. Rev. Lett.* 130 (2023) 220601.
- 23)Cain, M. & Chattopadhyay, S. & Liu, J.-G. *et al.*: Quantum speedup for combinatorial optimization with flat energy landscapes, *arXiv*:2306.13123v2 (2023).
- 24) Schiffer, B. F. & Wild, D. S. & Maskara, N. *et al.*: Circumventing superexponential runtimes for hard instances of quantum adiabatic optimization, *arXiv*:2306.13131 (2023).
- 25)量子未来産業創出戦略概要,<u>https://www8.cao.go.j</u> p/cstp/ryoshigijutsu/230414_mirai_gaiyo.pdf (参照 2 023-09-26)