

国立研究開発法人

量子科学技術研究開発機構

高崎量子技術基盤研究所

第73号

高崎研だより

 最近の研究成果 -1 量子技術研究分野における人材育成

 催し物のご案内 The 7th QST International Symposium

 My favorite 違和感のある道

 日本/世界見聞録 東洋と西洋の交差点 トルコ

 最近の研究成果 -2 量子コンピュータとAIの融合研究



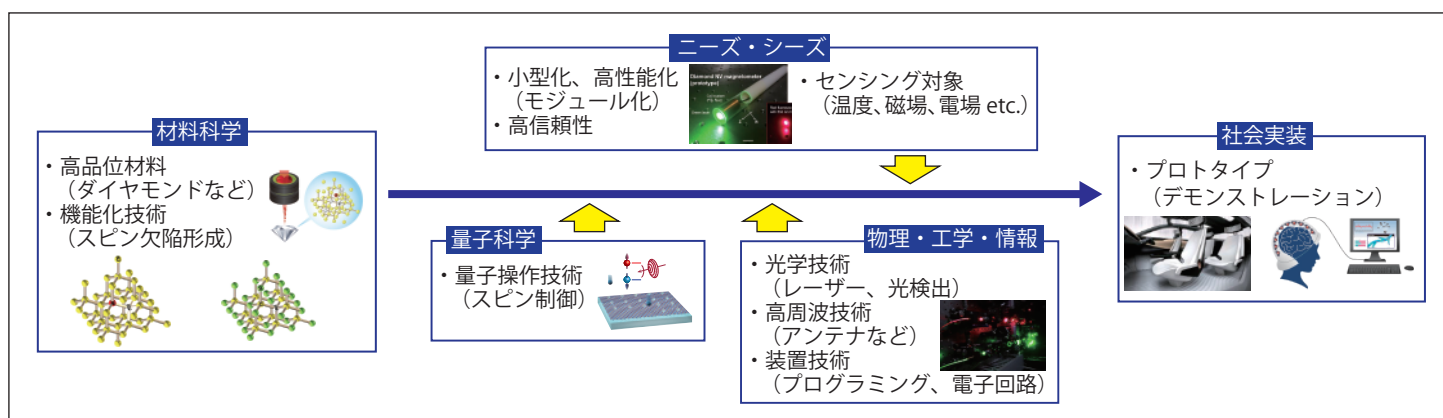
Q1. 今なぜ、量子技術研究分野で人材育成が必要なのでしょう？

量子技術はコンピュータ、通信、センサ等広範な応用が可能であり、また従来技術を凌駕する性能を有すると期待されていることから、次世代の基盤技術として世界レベルで研究開発競争が激化しています。日本においても、近年の量子コンピュータの急速な進展により量子技術への注目度は高く、国家プロジェクトや民間レベルでのコンソーシアムなどで研究開発が進められています。しかし、それらの取り組みは米国、中国、EU と比較するとまだ不十分であり、量子技術研究開発を担う人材不足がその一因と考えられます。

政府はこれを打開するため、「量子技術イノベーション戦略」、「量子未来社会ビジョン」、「量子未来産業創出戦略」と立て続けに3つの推進方策を出し、その中で量子技術に関わる人材を1,000万人まで拡充することを目指す、量子技術開発基盤を整備することを決定しました。そのような背景のもと、量子人材教育を主眼とした国家プロジェクトである「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)」が開始されました。そして、昨年度 QST を代表とする「先進的量子技術基盤への社会課題への応用促進」が採択され、量子センサに特化した人材教育プログラムを担当することになりました。

Q2. SIP で実施する人材育成では、何について学ぶのですか？

本プロジェクトでは、最も実用化に近い量子技術として認識されている量子センサについて学びます。下図に示すように、量子センサが社会実装されるまでには、材料科学、量子科学、物理・工学・情報などさまざまな分野の学問の他、ニーズやシーズなどの知識が必要です。



量子センサの社会実装に向けた道筋

そこで、QST では講義及び実習を通じて、量子センサの基礎から実際のセンシング手法まで、4つのレベルで体験しながら学べる量子人材育成プログラムを用意しています。左下図に示すように、このプログラムのレベル1～3は講義及び実習をセットにした内容で、量子センサの研究開発をスタートさせるための最低限の知識、経験を得ることができます。レベル4はいわゆる共同研究にあたるもので、レベル1～3の教育プログラムを受講した民間の研究者、技術者が主体的に研究開発を進めることができます。

レベル1	レベル2	レベル3	レベル4
講義 & 見学 - 量子センシング概観 - 量子センシング基礎原理 - 装置見学	講義 & 実習 - 量子センシング方法 - 実証評価装置使用方法 - 測定体験	講義 & 実習 - より高度な量子センシング方法 - 実証評価装置使用方法 - 測定実験	実習 - 技術相談 - 実証評価装置※aによる研究開発 ※a 自前装置も可

量子人材育成プログラムの流れ

このプログラムは、多くの応用研究で使用されているダイヤモンド NV センター※1を想定した内容になっていますが、SiC (炭化ケイ素) など他の材料を用いた量子センサ研究についても、それを専門とする QST 研究者がサポートする体制を整えています。

Q3. 人材育成で実施する内容について、もう少し詳しく教えてください

レベル 1 では、量子センサとはどのようなものなのか、従来のセンサとは何が違うのかなど、基本的な情報を習得できます。実習では、電子線照射により作製したダイヤモンド NV センターがセンサとして利用可能であるか評価するため、共焦点顕微鏡^{※2}などの測定装置の構成、組み立て方法について実物に触れながら学びます。レベル2では、センサとして利用可能な NV センターを有するダイヤモンドを対象に、最も簡便に性能を評価できる量子センシング手法である連続光・マイクロ波照射下光検出磁気共鳴^{※3}の原理、測定方法について講義及び実習を行います。

レベル 3 では、連続光・マイクロ波照射下光検出磁気共鳴よりも高感度が期待されるパルス光検出磁気共鳴^{※4}を取り扱います。実習では、量子センサにとって最も重要な要素であるスピン緩和時間^{※5}の測定を体験し、パルス測定の基礎を学びます。レベル 4 は、参加を希望する企業からの相談を受けての対応となるため具体的な内容は個々に異なりますが、民間の研究者、技術者が自立して研究開発を進める中で、必要となる知識、技術を可能な限り学ぶことができます。

【用語解説】

1. ダイヤモンド NV センター

ダイヤモンドは炭素の結晶ですが、結晶中に不純物として窒素（Nitrogen）が存在すると、その隣に空孔（Vacancy）ができることがあります。この窒素と空孔の中心「NV センター」には、周辺環境の温度、電場、磁場など、ごくわずかな変化を敏感に検知して、量子状態が変わる特性があります。この特性をセンサとして利用します。

2. 共焦点顕微鏡

試料の特定範囲に集光して NV センターを励起させ、その発光（蛍光）を光検出器の前に設置したピンホールを通して測定することにより、NV センターの位置を高コントラスト・高解像度で特定できます。

3. 連続光・マイクロ波照射下光検出磁気共鳴

ダイヤモンド NV センターを光励起するための光及び同センター中の電子の状態を操作するためのマイクロ波をともに連続的に照射した状態で、電子状態操作に伴って観察される発光量変化を検出する、最も基本的な量子センサの測定原理です。磁場や温度を測定する際、それらの変化に応じて必要なマイクロ波周波数が変わるため、周波数を変えながら発光量を測定していき、発光量が変化するマイクロ波周波数を調べ、その値から磁場強度や温度を求めることができます。

4. パルス光検出磁気共鳴

3. の光、マイクロ波の両方またはどちらか一方をパルス化することにより、高感度に磁場や温度測定ができます。

5. スピン緩和時間

ダイヤモンド NV センター中の電子の状態を操作した後、操作前の状態に戻るまでの時間です。

催し物のご案内

The 7th QST International Symposium (第7回 QST 国際シンポジウム) "Quantum Technologies towards Harmonious Future"



【Date】 **July 24th(Wed) ~ 25th(Thu), 2024**

【Venue】 G Messe Gunma / Main Hall

【Topic Areas】 **Program**

Quantum Material
Quantum Sensing
Quantum Computer & ICT
Quantum Life Science, etc

【Participation Fee】 Free

【Registration】 Please register [using the online form here](#)



お出かけ前に道路地図で計画を・・・そんな時代は終わり、現在は何でもスマホで調べることができます。私は地図に加えて、航空写真を見るのが好きです。その土地の「昔」を発見できるからです。

高崎研究所はその昔陸軍岩鼻火薬製造所として有名ですが、地図で見ると、北西方向に”違和感のある道”を見つけることができます。この道は JR 貨物倉賀野駅の線路から続く道であり、「もしかして線路が続いていた？」との疑問が出れば、国土地理院のホームページで調べてみることにします。すると、1947 年撮影の米軍の航空写真等から岩鼻軽便鉄道の廃線跡である可能性が高いことが分かります。しかし、1947 年の画像は粗く、不確かな点もあります。そこで、国立公文書館 アジア歴史資料センターのホームページから太平洋戦争前の陸軍省や内務省等の書類を検索し、推理していきます。現地を見ることが出来ればその地に赴き、当時の痕跡からどのような場所であったのかを確定します。高崎研究所内には線路の一部がいまでも残っているのです。



高崎研内に残る岩鼻軽便鉄道の軌条

逆に、昔の航空写真から今まで気づかなかった”違和感のある道”を知ることもあります。例えば、研究所北東にある鎌倉橋は、昔の航空写真ではもう少し南に架けられており、そこが本来の旧例幣使街道だと知ることができます。普段何気なく生活していると気付かない道ですが、よくよく考えると変な道。そんな”違和感のある道”にも歴史が存在し、そして膨らむ妄想・・・よく解らないところもロマンがあっているものです。



現在の高崎量子技術基盤研究所の航空写真

誇大妄想（ペンネーム）

✂️ 日本/世界見聞録

東洋と西洋の交差点 トルコ

2024 年 4 月末にトルコで開催された「9th International Conference on Superconductivity and Magnetism」に参加しました。最近筆者が進めている超電導研究について招待講演のオファーをいただいたの参戦です。

トルコは日本にはやや馴染みが薄い国ですが、ヨーロッパとの関係が深く、国際会議もしばしば開催されます。また、南西の地中海沿岸はリゾート地として人気を博しているようです。今回の学会はそうしたリゾート地の一つ、フェティエという街で開催されました。

トルコといえば食文化が非常に有名で、トルコ料理は世界三大料理の一つに位置付けられています。学会会場のホテルでは参加者向けにビュッフェが提供されており、滞在期間中大いにトルコ料理を楽しむことができました。トルコ料理の素材はイタリアなど他の地中海の国と一見似ていますが、ヨーグルトの使い方に特色があります。塩・ビネガー・唐辛子などで味付けされたヨーグルトがサラダの味付けのみならず、独立した一品としても供されています。羊肉と乳製品が口に合う方には親しみやすい食文化だと思います。



とある日のランチビュッフェ



フェティエ近郊の離島の遺跡

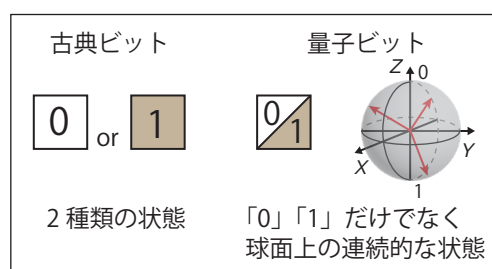
学会では 30 分の発表枠をいただいたので、現在投稿中の論文について理論的背景から詳しく説明しました。数式を主とした抽象度の高い話題でなかなか応用に結びつけにくいのですが、幸い反応は悪くなかった？ようです。こうした機会を活かして、少しでも成果の有用性を広められればと思っています。

Q1. 最近よく耳にする「量子コンピュータ」とは、どのようなものですか？

量子コンピュータは量子力学を使った新しい原理のコンピュータです。量子は波の性質を持ち、水面の波が重ね合うように、重ね合わさったいくつかの状態を利用することができます。この性質から、量子コンピュータは複数の計算を同時に実行する超並列計算が可能になります。例えば、同時に複数の経路を考えながら最適な避難ルートを見つけることができるため、従来のコンピュータに比べ、災害時には避難ルートを高速に探索して人命救助に貢献することが期待されています。また、創薬などの分野では、新しい薬の開発などに量子コンピュータが利用できます。薬の性質を理解するためには、薬を構成する分子の量子力学的な状態を解析する必要があり、量子コンピュータを用いて分子の状態を表現することで高速にシミュレーションを行うことが可能です。

Q2. 量子コンピュータについてもう少し詳しく教えてください

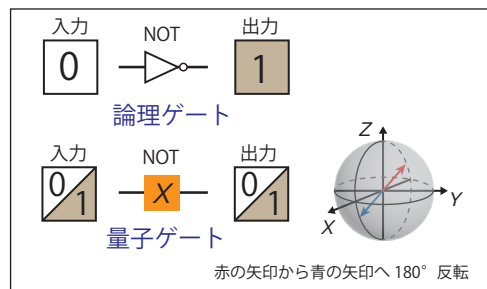
少々専門的な話になりますが、我々が普段使う古典コンピュータでは、「0」と「1」の2つの情報を保持できる古典ビットが用いられます。古典ビットが複数並ぶことによって01001...101のように2進法で情報を保持します。一方、量子ビットの場合は重ね合わせの原理によって「0」と「1」の2つの状態の重ね合わせた状態（例えば、「0」が10%と「1」が90%混ざった状態）を利用することができます。古典ビットは1ビットで「0」と「1」



古典ビットと量子ビット

の2つしか表現出来ませんでしたが、量子ビットは「0」と「1」の状態の混ぜる割合を変えることで、さまざまな状態を表現することができます。量子ビットが複数並んだ場合には、さらに多くの状態を表現できることになり、これを利用して超並列計算が実行されます。

量子ビット状態の操作は量子ゲートによって、また古典コンピュータは論理ゲートによって、演算が実行されます。左図のように、NOTゲートは古典ビットの「0」の状態を「1」に反転させる操作です。量子ゲートにも同様の操作が存在します。例えば、「0」が10%と「1」が90%混ざった状態であれば、それを「0」が90%と「1」が10%混ざった状態に変換します。この他にも量子ゲートには、Hadamardゲート、位相転換ゲート、制御 NOTゲートが存在し、これらの量子ゲートを組み合わせることにより任意の操作が実行可能です。

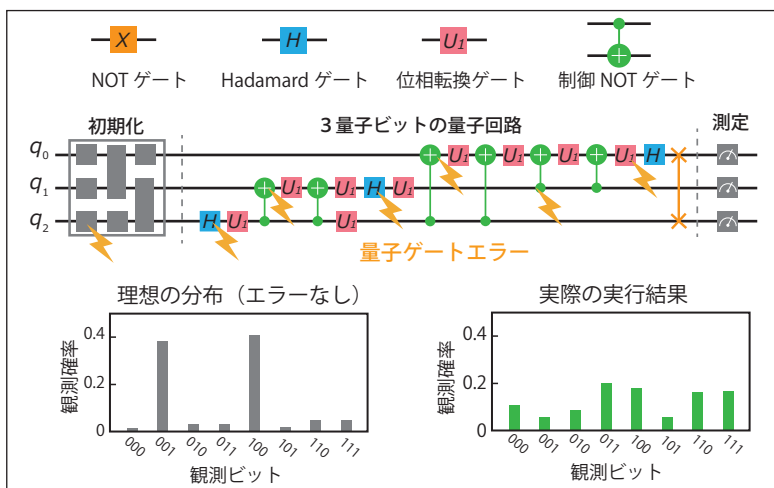


理論ゲートと量子ゲート

Q3. 量子コンピュータと AI の融合とは、どういう意味ですか？

量子コンピュータは、先にご説明しました4種の量子ゲートを多数組み合わせて（長い量子回路）計算を行います。例えば、3量子ビットである計算（量子逆フーリエ変換）を実行させる場合、右図のようなゲートが必要となりますが、現在の技術レベルではゲート数が増えるとエラーの発生も多くなります。その結果、理想とする計算結果から得られる分布と比べ、実際に得られる分布は大きく異なってしまいます。

この問題は、同じ計算を実行する条件の



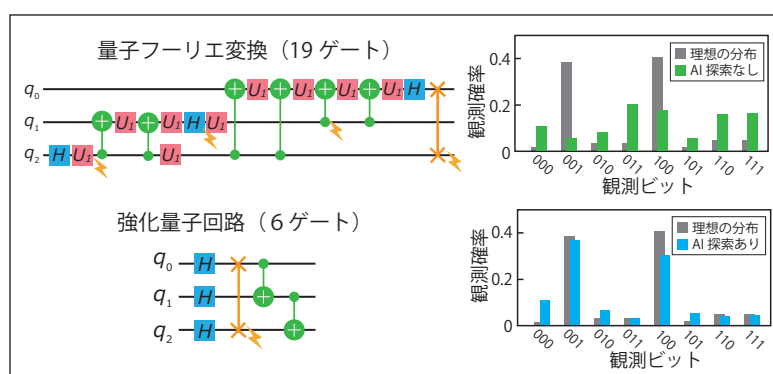
3ビット量子の量子計算結果

もと、量子ゲートの数を減らして（短い量子回路）計算エラーを抑えれば、解決することができます。量子ゲート数の減少は、計算時間の短縮にもつながります。一方、量子ゲートの組み合わせは無数に存在し、その中から所望する操作を実現する量子操作を人間が見つけることは、容易ではありません。そこで、私たちは量子操作（ゲート組み合わせ）を探索する AI 技術を開発しました。

Q4. 具体的には、どのように AI を利用するのでしょうか？

本研究では、強化学習を用いて量子回路の探索を行いました。強化学習とは、自動車の自動運転などに用いられる技術です。自動運転の場合は、現在の車の状態に対してどのような操作（直進、左折、右折など）をしたら安全に走行できるかを学習します。AI による量子回路探索では、現在の量子状態に対してどのような量子ゲート操作を加えたら良い結果が得られるかという問題設定に置き換えます。無数の量子回路を愚直に全て探索するのではなく、AI が良さそうな操作を推定、選択することで効率的に量子操作を探索することができます。

構築した AI の性能を評価するため、前頁で示した量子逆フーリエ変換と呼ばれる操作に対して AI を適用しました。従来よく知られたアルゴリズム（手順）では、3 量子ビットに対する量子フーリエ変換は 19 個の量子ゲートを用いて実行されます。この量子操作に対して私たちが開発した AI を適用すると、たった 6 個の量子ゲートからなる量子操作が出力されました。AI によって出力された量子操作



3 ビット量子逆フーリエ変換の強化学習

を量子コンピュータ上で実際に実行してみると、驚くべきことに、従来の計算方法よりも良い結果が得られることがわかりました。AI を用いることによって、人間では思いつかないような新しい量子操作が発見され、量子コンピュータの計算に生じるエラーを抑制することが出来ることを実証しました。

Q5. この研究は、今後どのように展開していくのでしょうか？

量子コンピュータに限らず、量子センサー、量子通信など、さまざまな量子デバイスの研究開発が進んでいます。このような中で AI を用いて量子デバイスの性能を向上させる研究は、今後不可欠になると予想されます。私たちの研究はこの先駆けとなるものであり、人間の知能に頼らず、AI 自身が考えて最適な制御を見つけ出すことが出来ることを示しました。この研究はセンサー感度や量子通信効率の向上などに繋がるため、量子技術の発展に大きく貢献することができます。

Qメッセージ

本年度から、高崎研だよりは季刊誌（年 4 回発行）として、これまでよりページ数を増やすことでより充実した内容に衣替えしました。高崎研で重点的に取り組んでいます量子材料・デバイス研究をはじめ、これまで多くの実績がある量子ビーム技術の開発から、エネルギー・環境・バイオ材料の創製や医療・農業分野における放射性物質（RI）を利用した研究まで、最新かつ高度な科学技術について、用語説明なども駆使して分かり易く伝える広報誌を目指してまいります。今回は最新の量子技術である量子コンピュータと人工知能（AI）の融合研究を解説するとともに、高崎研の多様な活動として、量子技術分野の社会実装に不可欠な人材育成を紹介しています。

（高崎量子技術基盤研究所長 前川 康成）



クイズです。「渋、梅、北」これらの漢字から連想できるのは？ヒントは「7 月 3 日」です。答えは新紙幣の発行です。7 月 3 日から始まります。2004 年以来、20 年ぶりです。最近はやッシュレスが進んでいますので、お目にかかる機会は先になりそうですが、楽しみです。

（令和 6 年 7 月発行）