

NTT

ISSN 0915-2318 平成2年3月5日第三種郵便物認可
令和5年9月1日発行 毎月1回1日発行 第35巻第9号(通巻414号)

技術ジャーナル

9 SEPTEMBER
2023
Vol.35 No.9

特集

量子コンピュータの実用化を加速する取り組み

トップインタビュー

岸本 照之
NTTアノードエナジー 代表取締役社長

グループ企業探訪

NTTグリーン&フード

from NTTアノードエナジー

NTTが創る日本の水素サプライチェーンへの挑戦



4 トップインタビュー

NTTグループ、地域社会に活力を提供する
「エネルギー源」となる。
カーボンニュートラルを実現するエネルギー
流通のリーディングカンパニーへ

岸本 照之

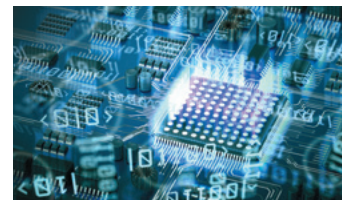
NTTアノードエナジー 代表取締役社長



8 特集

量子コンピュータの実用化を加速する
取り組み

- 10 量子コンピュータのシステムアーキテクチャ実現に向けて
- 13 イジングマシン活用アプリケーションの開発を支援するコンピューティングシステム
- 17 超伝導量子コンピュータのシステムの設計と開発
- 21 量子エラー抑制とその進展
- 26 誤り耐性量子コンピュータの早期実現に向けた取り組み
- 30 主役登場 鈴木 泰成 NTTコンピュータ&データサイエンス研究所



31 挑戦する研究者たち

山本 秀樹

NTT物性科学基礎研究所 上席特別研究員

独自の薄膜合成法で高温超伝導体の創製や新物性の発現に挑む



特集

36 挑戦する研究開発者たち

野々垣 翠

NTTアノードエナジー 技術戦略部 技術開発部門 企画担当課長

ペロブスカイト太陽電池と水素でカーボンニュートラルをめざす



For the Future

特別企画

39 明日のトップランナー

宇治土公 雄介

NTTコミュニケーション科学基礎研究所 特別研究員

本当に「触りたい」触覚コンテンツの新たな地平へ「触りたさの科学的理解とクロスモーダル知覚に基づく触覚提示法の提案」



挑戦する研究者たち

42 グループ企業探訪

NTTグリーン&フード株式会社

自然の恵みを技術で活かし、地球と食の未来をデザインする会社



挑戦する研究開発者たち

46 from NTTアノードエナジー

NTTが創る日本の水素サプライチェーンへの挑戦

明日のトップランナー

50 Webサイト オリジナル記事の紹介

10月号予定
編集後記

グループ企業探訪

本誌掲載内容についてのご意見、ご要望、お問い合わせ先

日本電信電話株式会社 NTT技術ジャーナル事務局
E-mail journal@ml.ntt.com

本誌ご購入のお申し込み、お問い合わせ先

日本電信電話株式会社 電気通信協会 ブックセンター
TEL (03) 3288-0611 FAX (03) 3288-0615
ホームページ http://www.tta.or.jp/

NTT技術ジャーナルは
Webで閲覧できます。

<https://journal.ntt.co.jp/>



from
NTTアノードエナジー



NTTアノードエナジー
代表取締役社長

岸本 照之 Teruyuki Kishimoto

PROFILE

1986年日本電信電話株式会社に入社。
2014年NTTフィールドテクノ代表取締役社長、
2017年西日本電信電話株式会社 関西事業本部長 大阪支店長、
2019年同社常務取締役 設備本部長 設備本部ネットワーク部長を経て、
2022年6月より現職。



NTTグループ、地域社会に活力を提供する「エネルギー源」となる。 カーボンニュートラルを実現するエネルギー流通のリーディングカンパニーへ

徹底したESG経営の下、再生可能エネルギーのポテンシャルを最大限に引き出し、地球にやさしい経済活動を推進するNTTアノードエナジー。エネルギー分野における新しいプレーヤーとして、NTTグループの環境負荷低減の取り組みを牽引しています。フラットでスピードある組織運営でエネルギー事業に挑む岸本照之 NTTアノードエナジー代表取締役社長に、主力事業とトップとしての心構えを伺いました。

ICTとエネルギー事業を「つなぐ」

社長に就任されて1年余りが経ちました。この1年を振り返り、ご心境やNTTアノードエナジーの置かれている状況をお聞かせいただけますか。

23年間を過ごしたNTT西日本を離れ、2022年6月にNTTアノードエナジーの代表取締役社長に就任しました。通信から電力へと取り扱い業務が大きく変わり、私が長年従事した通信業界とは変化のスピード感や投資規模、そして設備投資のあり方には違いがありますから、まるで転職したような感もあります。しかし、NTT西日本で長年担ってきました通信設備事業の知見や経験を活かしつつ、これまで同様にアンテナを高くしてビジネスや社会の動向等について勉強しています。

電力エネルギー事業を取り巻く環境は、世界的な脱炭素化の流れや不安定なエネルギー資源価格、再生可能エネルギー導入拡大と火力発電減退による電力システムの改革等に代表されるように、大きく変化して

います。

日本の電力事業を取り巻く環境においても、2023年6月に脱炭素成長型経済構造への円滑な移行の推進に関する法律、GX（グリーン・トランスフォーメーション）推進法が施行され、エネルギーの安定供給と脱炭素の実現をめざすGXの取り組みがさらに加速し、電力システムをはじめ脱炭素化につながる取り組みを後押ししています。

こうした現状において、私たちNTTアノードエナジーは、NTTグループにおけるエネルギー電力分野のエキスパート集団として、ICTとエネルギーの橋渡しを担います。

このため、私たちは4つの事業を柱に、NTTグループ各社やパートナー企業と連携して、脱炭素化とエネルギーの地産地消の推進に向けたチャレンジを加速させていきます。これは2023年5月に発表したNTT新中期経営戦略の循環型社会実現を見据えた、日本における2050年のカーボンニュートラルを実現する取り組みで、NTTグループの掲げる環境エネルギービジョンを実現

すること、国内外におけるスマートエネルギービジネスの創造、グループのみならず社会への貢献が期待されています。プレッシャーも大きいのですが、非常にやりがいを感じています。

エネルギー業界はどのような局面を迎えているのでしょうか。また、NTTアノードエナジーはその局面にどのような体制で臨んでいるのですか。

エネルギー業界におけるこの10年、20年にはさまざまな課題が凝縮されています。通信は日進月歩ならぬ秒進分歩の変化ですが、エネルギー事業もこの20年ほど前から大きく変化しています。夏冬の電力不足に備えて、一部で計画停電を呼びかけるなどエネルギーの安定供給が叫ばれています。発電形態は再生可能エネルギーへの変革が求められ、発電事業・送配電事業・電力小売り事業の分離、電力事業やガス事業の自由化など規制緩和が進みました。エネルギー業界には、これらを解決し、環境に対応した新しいビジネスを創ることを求めら

れているのです。

こうした動きに対応していくために、NTTグループの中からエネルギー電力のエキスパート約3000名を私たちNTTアノードエナジーに集約しました。加えて、社外、国内外のスペシャリストも中途採用しました。まさに、ダイバーシティ&インクルージョンを体現した組織であり、社員一丸となって進む方向を示す羅針盤として、「技術力と探求心でエネルギーに新常識を」というパーパス「Anode Way」を掲げました。「Anode Way」は社員自らが考えて作成したのですが、極力横文字を使わず、使う場合は日本語で分かりやすく意味を添えてあります。

また、私たちの歴史「Our Story」も作成し、社員全員で共有することにしました。足跡をたどって改めて気付いたのですが、1962年に公衆電話の上に小さい太陽光発電機を搭載して、実用化に向けて試験をしていたのです。その後も東日本大震災時に大規模太陽光発電による電力を供給し、その後はそれを事業として参入する等、今日に至るまでに先輩方が築き、挑戦してきたことが大きなアセットになっていると改めて実感する機会になりました。

主要4事業のバリューチェーンでスマートエネルギー事業を展開

設立から4年目を迎え、エネルギー事業を担う企業としてのアイデンティティを着実に確立していらっしゃるのですね。推進している4事業についてお聞かせいただけますか。

現在、推進しているのは「グリーン発電事業」「地域グリッド事業」「需要家エネルギー事業」「構築・保守オペレーション事業」の4事業です。これらによりバリューチェーンを構築し、スマートエネルギー事業として展開しています。



まず、「グリーン発電事業」では、お客さまやNTTグループ各社のグリーン電力ニーズにこたえるために太陽光、風力、地熱、バイオマス、水力などの再生可能エネルギー発電所の開発を進めています。私たちは大規模な森林伐採等を行わず、生態系や住環境に配慮した発電所の構築に取り組んでおり、2023年8月には株式会社JERAと共同で、株式会社グリーンパワーインベストメントの株式を取得しました。

続いて2番目の「地域グリッド事業」では、地域の安定した再生可能エネルギー電源を活用してエネルギーの自立化と地産地消を推進しています。各地域が抱える課題はさまざまですから、それぞれの状況にマッチした方法で課題解決に臨み、カーボンニュートラルの目標達成と同時に、地域経済の循環・活性化に貢献します。ちなみに、環境省の脱炭素先行地域として、NTTアノードエナジーが支援している7自治体が選定されています。

そして3番目、「需要家エネルギー事業」では、自社開発した発電所で作ったグリーン電力を提供しています。このうち、コー

ポレートPPA（電力購入契約）には関心を寄せておりますが、中でも物理的な制約を受けず使用電力の増減に柔軟に対応できるオフサイト型コーポレートPPAは、今後さらにその価値を発揮すると考えています。

最後に4番目の柱である「構築・保守オペレーション事業」では、太陽光発電や大型データセンターといった電力設備の構築・保守・監視サービスを提供しています。東日本と西日本に設置された2カ所のオペレーションセンターでの高度技術者による監視統制、および全国各地の保守拠点の技術者により、NTTグループの通信用電源設備の設計・監理・保守といったオペレーションを先端の技術力で提供しています。

これら4事業によって脱炭素化やエネルギーの地産地消を現実のものとするのですね。

さまざまな自治体やパートナー企業との連携等によって、すでに具体的な取り組みが始まっています。2023年度は、日本電気株式会社（NEC）との連携により、脱炭素社会実現に向けて取り組んでいます。「新環境エネルギービジョン（NTT Green In-

novation toward 2040)」を掲げるNTTと、「2050年を見据えた気候変動対策指針」を掲げるNECがタッグを組んで環境負荷を低減する新たな取り組みです。NECグループの温室効果ガスScope2排出量削減に加えて、製品をグリーン化電力により製造し、供給することでNTTグループのScope3排出量の削減を実現し、両社の環境経営を推進します。

そして、NTTドコモ、NTTスマイルエナジーとの連携により、脱炭素社会の実現に向けた家庭用太陽光発電・蓄電池の実証実験を5月から実施しています。「ドコモでんき Green」の提供によりカーボンニュートラルの実現をめざすNTTドコモと、太陽光発電・蓄電池の知見があるNTTスマイルエナジーとの連携により、太陽光発

電・蓄電池を利用した家庭向けエネルギーサービスをエリア限定で提供し、月額定額、初期費用無料でご家庭に太陽光発電パネル、蓄電池の設置を提供しています。これにより、NTTドコモは、サービスの販売支援、データ分析による今後の「ドコモでんき」との連携検討、NTTスマイルエナジーは本サービス提供主体としてユーザの利用状況分析、NTTアノードエナジーは、電力小売事業者としてサービス拡大検討、今後、需給調整分野での連携可能性を、検討することになります。

目標に向かい自分を鼓舞し、仲間を鼓舞し、ゴールする喜びを分かち合う

前回のトップインタビュー(2020年)で、「暗黙知」を受け継ぐことの重要性について教えていただきました。NTTアノードエナジーのように多様性に富む組織において、「暗黙知」はどのように引き継いでいращるのですか。

例えば、業界によって制度や使う専門用語が異なります。さまざまなバックグラウンドを持つ社員が結集していますから、専門用語や背景を相互に理解することもその1つです。新型コロナウイルス感染症の5類への移行を経て、出社率も約50%程度になっており、リモートとハイブリッドで組み合わせたコミュニケーションも重要です。

ちなみに、人どうしの直接的な言語によるコミュニケーションは、2、3割で、直接会って共有する空気感等、非言語によるコミュニケーションがその大半を占めるといいます。大半を占める空気感を理解し合えるように努めていきたいと考えています。

さらに、現場には、最前線で長年活躍している60代の社員も、20代、30代の若手社員もいますから、30年、40年の年齢差や経験差があります。

こうした状況において、先輩の持つ暗黙

知を引き継ぐために、息子や娘のような年齢の社員に対して、先輩方が言葉をかみ砕き、分かりやすく教授する仕組みをつくりました。若い社員がこれまで設備の保守点検を担ってきた先輩方を質問攻めにしながら、暗黙知を日常業務において引き継いでいます。実は、今日(インタビュー当日)も昼食を囲みながら先輩方は若手から質問攻めにされていました。こうした取り組みを通して、身につけなければいけない知識や資格に若手が自ら気付き、自発的にスキル向上を図り、それを後輩に伝えていくといった、いい循環をつくり上げていきたいと思っています。この瞬間に暗黙知は形式知になっています。まもなくやってくるIOWN(Innovative Optical and Wireless Network)時代を見据えて、NTTアノードエナジーが進んでいくべき領域や取り組むべき仕事を発信し、こうしたナレッジの循環に加えてICTを駆使して、新しい電力設備のグランドデザインをつくっていききたいと考えています。

トップとして大切にしていることをお聞かせください。そして、皆さんへのメッセージもお願いいたします。

これまでと同様、決断と実行を大切にしています。加えて、実行していくには私自身がその「源」となる、発信や行動です。私は、これを「NTTグループ、地域社会に活力を提供する“エネルギー源”となる」と言語化して、「マイパーパス」として掲げました。これを実現するために私は、「前を見て、顔を上げて歩き続けられる安心な風土づくりの“道しるべ”となり、目標に向かい自分を鼓舞し、仲間を鼓舞し、ゴールする喜びを分かち合います。そして、絆で結ばれた仲間と向き合い、それぞれの目標を尊重し、ともに成長することを具現化、実践していきます」と宣言しています。そして、NTTアノードエナジーでは、これ





感覚を養い、イノベーションを興していただくことに期待しています。スマートエネルギービジネスは私たちだけではできません。私たちは引き続きオペレーションを担いますので、それに資する研究開発もぜひお願いします。

そして、お客さまが私たちNTTの3文字のブランドイメージ力に寄せるご期待にしっかりとこたえていきたいです。蓄電池、水素発電等の技術進歩も激しい時代において、ともに新しいこと創り上げていきましょう。

そのために、お客さまの視点からのご要望もぜひお寄せください。NTTが築いてきた、培った知見をエネルギー領域に反映し、ご提供していきます。

を幹部社員にも拡大して「マイパーパス」を掲げてもらっています。

感化する、まとめ上げることを日々少しずつであっても欠かさないことです。そのためにも東京の田町にある本社と現場最前線の組織の物理的距離を克服して、気持ちのあり方、情報の格差を極力なくしていきたいです。このために、キャラバンを組んで各都道府県を回り、生の声をいただき、

社員のエネルギー源になるように努めています。

この「発信」を社員以外にも、メッセージとしてお届けしたいと思います。

まず、研究者、研究開発者の皆さん、IOWNにより世界をけん引していく存在として、マーケティングの発想を携えて実用化に向けて邁進していただきたいです。また、外の世界と触れ合ってダイバーシティ

(インタビュー：外川智恵 / 撮影：大野真也)

インタビューを終えて

3年ぶりのご登場となった今回も、岸本社長はご趣味には相変わらず「応援」を掲げていらっしゃる。陸上、野球、ラグビーに、新たにサッカーが加わりました。インタビュー前夜も社員の皆さんとともに、Jリーグのチーム「大宮アルディージャ」の応援に行かれたという岸本社長。「昨夜は初めて勝ちゲームを観戦いたしました」と喜んでおられました。

この「応援」という姿勢は、スポーツ観戦だけにとどまらず、今回はインタビュー

である私に一冊の本を手渡してくださいました。テーマはキャリアや働き方の再考でした。

トップインタビューは対談ではありませんから、インタビューイヤーはご自身のことをアピールされるのが一般的であるにもかかわらず、インタビューまで気遣う心配りの細やかさには本当に驚かされます。

岸本社長のさり気ない一言や振る舞いに、かかわるすべての人への思いやりと、その場限りではない深い愛情を感じたひと時でした。



量子コンピュータの実用化を加速する取り組み

計算機が扱う情報が爆発的に増加する中、
将来にわたり、持続可能な計算機アーキテクチャの実現が求められている。
本特集では、計算資源の1つでもある量子コンピュータに対して期待が高まる中、
NTTが取り組む「量子コンピューティングシステムアーキテクチャ」の
実現に向けた挑戦について紹介する。

量子コンピュータのシステムアーキテクチャ実現に向けて — 10

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所で取り組んでいる、量子コンピュータの能力を最大限発揮するアーキテクチャ実現に向けた理論研究と、実用化に向けたシステム・ソフトウェア技術開発について紹介する。

イジングマシン活用アプリケーションの開発を支援する コンピューティングシステム — 13

新しい原理に基づいて演算するイジングマシンの課題を解決するためのSDK (Software Development Kit)、およびコンピューティングシステムの研究開発について紹介する。

量子コンピュータ

イジングマシン

超伝導量子ビット

量子誤り抑制

誤り耐性量子計算

超伝導量子コンピュータのシステムの設計と開発 17

2023年3月にローンチされた量子コンピュータにおける、量子ビットを制御しクラウドサービスとして利用可能にするまでの取り組み、クラウドサービスの仕組み、および今後の展望について紹介する。

量子エラー抑制とその進展 21

NTTから提案された世界で初めての量子エラー抑制を組み込んだ量子センシング、および量子エラー抑制の統合フレームワークである一般化部分空間展開法について紹介する。

誤り耐性量子コンピュータの早期実現に向けた取り組み 26

量子アルゴリズムの新しい回路効率化手法、および誤り耐性量子計算に統計的な誤り抑制手法を併せて用いるなどの早期誤り耐性量子計算（Early-FTQC）に向けた新しい手法を紹介する。

主役登場 鈴木 泰成（NTTコンピュータ&データサイエンス研究所） 30

量子コンピュータの設計と開発



量子コンピュータのシステムアーキテクチャ実現に向けて

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 時代のイノベーションの実現、例えば、デジタルツインコンピューティング (DTC) により未来予測を行うためには、超高速・超大規模な演算処理ニーズを満たすコンピューティング基盤が必要となります。そうしたニーズから、従来とは全く違う方式で演算を行う「量子コンピュータ」に注目が集まっています。NTTコンピュータ&データサイエンス研究所では、量子コンピュータの能力を最大限発揮するアーキテクチャ実現に向けた理論研究と、実用化に向けたシステム・ソフトウェア技術開発を両輪で取り組んでいます。

キーワード：#量子コンピュータ、#イジングマシン、#量子コンピューティングシステムアーキテクチャ

さかうち すみたか

阪内 澄宇

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所 所長

IOWN 構想に向けたコンピューティング基盤刷新の必要性

NTT は「IOWN (Innovative Optical and Wireless Network)」構想を掲げ、現状の ICT の限界を超えた新しいネットワーク・情報処理基盤を生み出すことを推進しています。その世界では、さまざまな ICT リソースを最適に組み合わせ (コグニティブ・ファウンデーション：CF)、あらゆるものを光で高速に結ぶ (オールフォトニクス・ネットワーク：APN) ことで、実世界とデジタル世界の掛け合わせによる未来予測も可能にする新たなサービスの提供 (デジタルツインコンピューティング：DTC) を可能にすることをめざしています。

DTC による未来予測には、膨大なデータを処理し、桁違いの正確さと迅速さを提供できるコンピューティング基盤が求められます。IOWN 構想では、光電融合技術による演算処理高速化の検討を進めていますが、それに加えて、近年注目を集めている「量子コンピュータ」による、全く新しいコンピューティング基盤への刷新も検討しています。量子コンピュータは量子力学的振る舞いを利用することで、素因数分解や最適化問題、化学シミュレーション等、従来のコンピュータが苦手としている問題を高速に解くことが期待されています。こうした量子コンピュータの特性を活かし、これまでに類をみないアプリケーションを実現し、新たなサービスを提供することをめざしています。

量子コンピュータとは

量子コンピュータは、1985年にオックスフォード大学の物理学者デイビット・ドイッチュによる量子チューリング機械という計算モデル提案⁽¹⁾から始まったものと考えられています。特に、1994年に米国の通信会社 AT&T (当時) の数学者ピーター・ショアが、素因数分解問題を従来の CPU のような古典コンピュータよりもかなり高速に解くことができる量子アルゴリズムを発表⁽²⁾したことで一気に注目を集め、さまざまな大学・企業によって量子力学的振る舞いを実際に演算に応用するさまざまなタイプのコンピュータの研究開発競争がスタートしました。このようなコンピュータには現状で大きく 2 つの方式、いわゆる量子コンピュータと、その派生としてイジングマシンが存在します。

量子コンピュータは、素因数分解を高速に解くなど、さまざまな用途が期待されているものです。量子の重ね合わせ状態を表現可能な「量子ビット」を用いて、量子性を用いて演算を行います。量子ビットの実現には、超伝導を用いる方式や、光子を用いる方式、イオントラップ方式等、さまざまな方式が提案されていますが、現在は実装可能な量子ビットの数に限界があります。さらに、ノイズ等の影響により誤り (エラー) が発生するため、実用的な計算を行うには、その誤り訂正のためにさらに量子ビットを必要とします。例えば、2048 bit の素因数分解を行うには、誤り率を 10^{-4} に抑えた量子ビットを、 10^7 個用意することが求めら

れるといわれています⁽³⁾が、現状の量子コンピュータでは規模・精度ともに大きく不足しています。そのため、多くの企業・研究機関により、多ビット化に向けた基礎的な研究開発が進められている段階です。一方で、素因数分解を行うことができるような大規模かつ計算中に誤り訂正が可能な量子コンピュータ (FTQC: Fault Tolerant Quantum Computer) の実現に先駆け、量子ビット数が小さい現状においても、可能な限り回路規模を小さくすることでノイズを抑え有用な計算の応用開拓を進めようという動きもあり、このような小規模な量子コンピュータ (NISQ: Noisy Intermediate Scale Quantum) の研究開発も進められています。

もう 1 つのイジングマシンは、磁性体の性質を表す統計力学上のモデル (イジングモデル) を用いて、古典コンピュータが解くのに時間がかかる問題の 1 つである「組み合わせ最適化問題」を高速に解くことに特化したコンピュータです。量子コンピュータのように量子ビットを用いる方式と違い、用途は限定されますが、すでに一部商用化も進んでおり、実用面で先行しています。

NTT では、イジングマシンに関する技術から、将来の量子コンピュータ (NISQ, FTQC) の実現に向けた技術まで、幅広く研究開発に取り組んでいます。イジングマシンについては、光を用いて演算を行う LASOLV[®]を開発し、その応用開拓も推進しています。量子コンピュータについては、ハードウェア面では実装方式として光量子方式、超伝導方式それぞれについて研究を

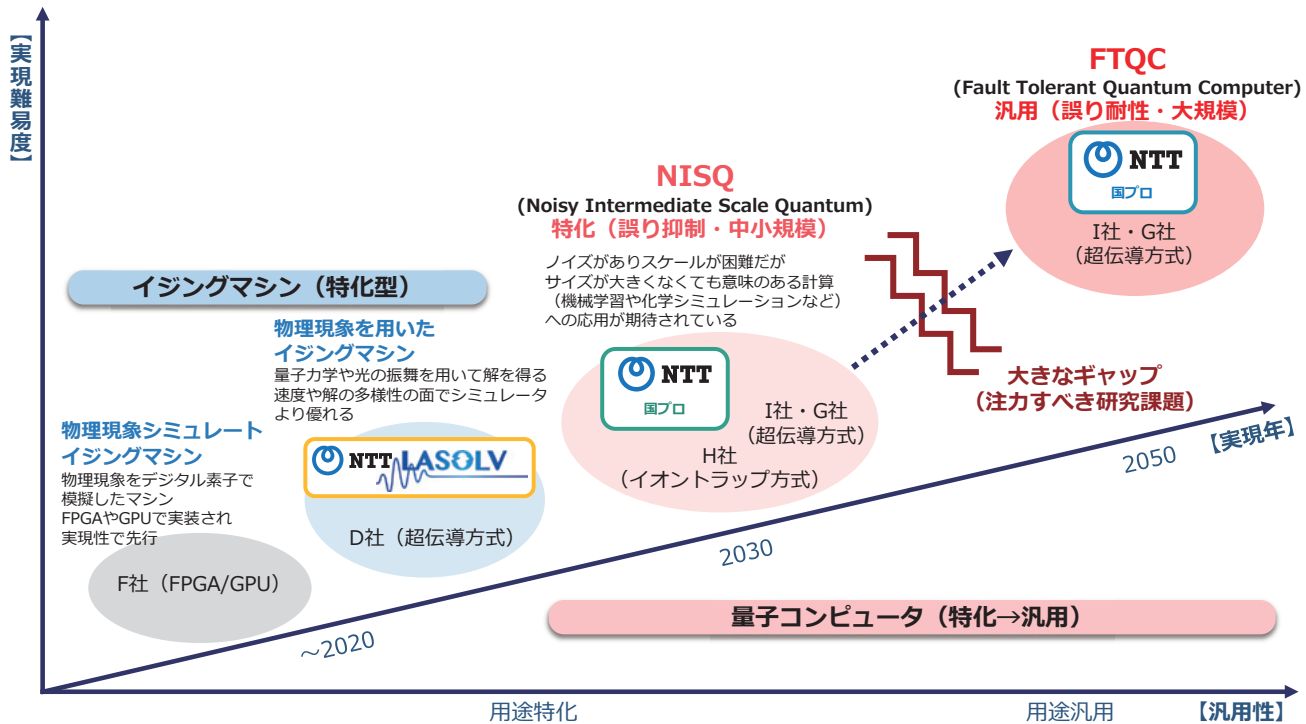


図1 イジングマシン・量子コンピュータのポジションマップ

進めており、ソフトウェア面では誤り訂正や誤り抑制の高性能化、効率化を実現する方式・理論研究に取り組んでいます。また2022年度末、理化学研究所が国家プロジェクト「Q-LEAP」を通じ、国内初の量子計算クラウドサービスの提供を開始しました⁽⁴⁾が、このプロジェクトにはNTTコンピュータ&データサイエンス研究所も参画しており、量子コンピュータの制御ソフトウェアの実装で貢献しています。

図1は、イジングマシン、NISQ、FTQCのポジションマップを示しています。FTQCは解ける問題の幅が広がりますが、相対的に実現難易度は高くなります。そこで、NTT研究所では、FTQCの実現を最終ゴールとして、イジングマシンやNISQの開発に加え、FTQCへのギャップを埋める技術（Early-FTQC）の研究開発を進め、早期に実用可能なコンピューティング基盤を提供することをめざします。

量子コンピュータ実用化に向けたシステムアーキテクチャ技術

このように、イジングマシン、量子コン

ピュータといった実現方式それぞれに対し、さまざまな実装手段のハードウェアが研究・提案されてきています。それに対し、次のフェーズとして、量子計算を実現する各種ハードウェアを制御し、意味のあるアプリケーションを実行するための仕組み、すなわちコンピュータとしてのアーキテクチャ確立に向けた研究開発競争も始まっています。

量子コンピュータを活用するアーキテクチャの実現に向けては、さまざまな課題が挙げられます。これら課題に対し、NTTコンピュータ&データサイエンス研究所では、物理と情報科学を融合し、実用的な量子コンピュータのアーキテクチャ設計と使い方のあるべき姿を探求する、実用化を意識した研究開発に取り組んでいます（図2）。

(1) 量子コンピュータ向けのアプリケーション開発が難しい

量子コンピュータは、専用の量子アルゴリズムを用いて問題を解くコンピュータです。そのため、一般的な形式の問題を、複雑な量子アルゴリズムでどのように表現するかを検討し、量子コンピュータ向けに変換する必要があります。量子力学の知識等

も用いることから、一般のアプリケーション開発者にとっては現状敷居が高いものとなっています。

この課題に対し、量子ハードウェアを使いこなす部分についてライブラリ化やSDK（Software Development Kit）として実装することで抽象化し、アプリケーション開発者を支援することに取り組んでいます。さらに、古典コンピュータ黎明期のアセンブラ同様、現状ではさまざまな量子ハードウェアごとに特化したソフトウェア開発が必要な点について、その特性を活かし最適化した処理を可能にする命令セットの構築や中間表現、高級言語、コンパイラの実現をめざします。

(2) 量子コンピュータは特定の用途で高速性を発揮する

量子コンピュータは重ね合わせ状態をうまく用いることで、多くの入力に対する演算を一度に実行する場合、例えば素因数分解などでは劇的な高速化が期待できますが、古典コンピュータが行う演算をすべて置き換える高速性を有しているわけではないと考えられています。すなわち、一種のアクセラレータと位置付けられます。そのため、

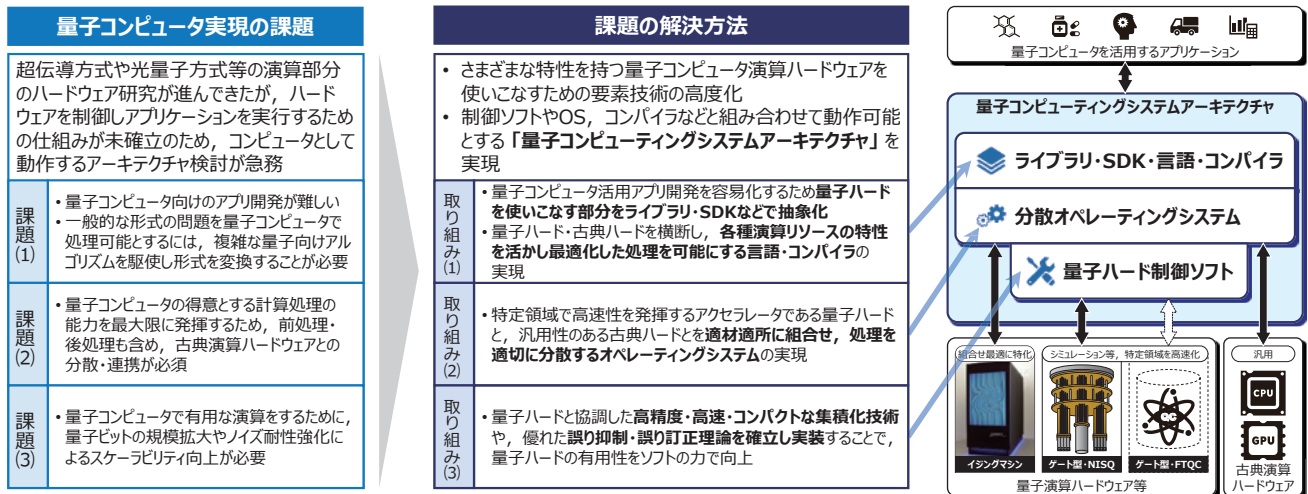


図2 量子コンピュータを活用するアーキテクチャの実現に向けた研究開発

アプリケーションとして価値を生み出すためには、量子コンピュータが得意とする計算処理の能力を最大限に発揮できるよう、古典コンピュータと適材適所で連携するシステムを検討する必要があります。

この課題に対し、各種量子コンピュータと古典コンピュータを密結的に組み合わせ、処理を適切に分散するアーキテクチャを検討し、分散オペレーティングシステムとして具現化する研究開発を進めています。

(3) 有用な量子計算を実現するためにスケーラビリティの向上が必要

前述のとおり、さまざまな実装手段の量子計算ハードウェアの開発が進められていますが、量子超越性（量子コンピュータは古典コンピュータよりも高速に計算できる）を決定的に証明する段階にはまだ至っていません。その理由として、特に量子コンピュータにおいては、意味のある演算を実行するために必要な量子ビット数が足りないことが挙げられます。さらに、ハードウェアで実現した量子ビットもノイズに弱く、そのエラーを訂正して演算するためには、エラー訂正のためにさらなる量子ビットが必要になるという課題があります。そのため、量子ビット数の規模拡大や、演算の精度向上、回路の効率化による必要な量子ビット数の削減などが重要課題です。

この課題に対し、量子計算ハードウェア自体の研究開発による量子ビットの進歩と並走しながら、より高精度・高速・コンパクトな集積化技術や、ハードウェア間の通信技術によるスケーラビリティ向上、優れた誤り抑制・誤り耐性理論確立と実装などを行い、ハードウェアの有用性をソフトウェアの力で向上していきます。

これら3つの課題に対するそれぞれの取り組みによって、量子コンピュータの能力を最大限に発揮するシステムアーキテクチャを実現していきます。

今後の展開

量子コンピュータは、今までの古典コンピュータでは非常に時間のかかる問題を超高速に解くことができると予想されており、その実現が期待されています。NTTコンピュータ&データサイエンス研究所では、本稿で述べた量子コンピュータのシステムアーキテクチャ実現技術について、実用化で先行するイジングマシンから今後さらなる研究開発が必要となるNISQ、FTQCに至るまで、それぞれの技術フェーズに合わせた取り組みを進めつつ、そこから得られたフィードバックを組み合わせることで技術の確立をめざします。

参考文献

(1) D. Deutsch : "Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer," Proc. of R. Soc. Lond., Math. Phys. Sci., Vol. 400, No. 1818, pp. 97-117, July 1985. DOI: 10.1098/rspa.1985.0070

(2) P. W. Shor : "Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring," Proc. of FOCS 1994, pp. 124-134, Nov. 1994. DOI: 10.1109/SFCS.1994.365700

(3) C. Gidney and M. Ekerå : "How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits," p. arXiv:1905.09749. DOI: 10.48550/arXiv.1905.09749

(4) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/03/24/230324a.html>



阪内 澄宇

量子コンピュータを実動させるためには、量子デバイス群を制御するソフトウェアが欠かせません。私たちは、計算能力を最大化するアーキテクチャ実現の理論研究とシステム・ソフトウェア技術の実用化開発を推し進めます。

◆問い合わせ先

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所
企画担当
TEL 046-859-4003
FAX 046-855-1149
E-mail cd-koho-ml@ntt.com



イジングマシン活用アプリケーションの開発を支援するコンピューティングシステム

CPUのような従来のコンピュータが解くことが難しい問題の1つに、膨大なパターンの組み合わせの中から条件を満たすものを見つけ出す「組み合わせ最適化問題」があります。この問題に特化して、新しい原理に基づいて演算するコンピュータが「イジングマシン」です。しかし、その使いこなしには、実社会の問題をイジングマシンが扱える形式に変換するなど多くの課題があります。本稿では、この課題を解決する、SDK (Software Development Kit) やコンピューティングシステムの研究開発について紹介します。

キーワード：#イジングマシン、#LASOLV[®]、#組み合わせ最適化問題

組み合わせ最適化問題とイジングマシン

膨大な選択肢からもっとも良いものを探す組み合わせ最適化問題は、現在のコンピュータでも多くの計算時間を必要とする難問です。例えば、指定された複数の訪問先をもっとも効率的に巡る順番を求める「巡回セールス問題」や、限られた色数という制約の下、与えられた地図の隣り合う領域が違う色で塗分けられるようにする「グラフ彩色問題」などは、規模が拡大するほど難しくなる典型的な組み合わせ最適化問題です。

この課題に対し、磁性体の性質を表すモデルを用いて解くという新しいアプローチで解を導き出す「イジングマシン」の研究が進んでいます。イジングマシンは、組み合わせ最適化問題の1つ、イジングモデル基底状態探索問題を解くことに特化したコンピュータです。イジングモデルとは、磁石（スピン）のネットワークを表現した統計力学のモデルです（図1）。スピン σ_i はアップ（+1）またはダウン（-1）のいずれかの状態をとります。 J_{ij} と h_i がそれぞれスピン間相互作用と磁場の強さを表すとすると、基底状態とは次式で定義される二次多項式のイジングモデル H が最小化された状態を指します。基底状態を満たすスピンの組み合わせが、基底状態探索問題の解となります。

$$H = - \sum_{i < j} J_{ij} \sigma_i \sigma_j - \sum_i h_i \sigma_i$$

組み合わせ最適化問題はさまざまな種類

がありますが、このイジングモデル基底状態探索問題に変換可能であることが理論的に証明されています。そのため、D-Wave Systems⁽¹⁾や富士通⁽²⁾などのさまざまな会社がイジングマシンを開発し、それを用いているいろいろな組み合わせ最適化問題を解く取り組みを進めています。NTT研究所においても、レーザー光を利用したコヒーレントイジングマシン⁽³⁾ [LASOLV[®]] を開発しています。

イジングマシンの利用を容易にするSDK

イジングマシンの活用にあたっては、前述のとおり解こうとする問題をイジングマシンに入力可能なイジングモデルと呼ばれ

る形式で表現する必要があります。そして、問題をイジングモデルで表現する際には、スピンの取る±1の値と問題の解の意味との間に対応付けを行い、イジングモデルの値が最小となるときが得たい解に対応するように多項式をつくる必要があります。最小となるときに得たい解に対応付けるのは、イジングマシンが入力されたイジングモデルを最小化するようなスピンの値を求める計算機であるためです。このイジングモデルの考案作業は問題の複雑さに比例して煩雑になり、イジングマシン利用の難易度を上げてしまいます。NTTコンピュータ&データサイエンス研究所では、このイジングモデルの考案作業を大きく簡略化する機能を持つSDK (Software Development Kit) [cimsdk] の開発をしています。ま

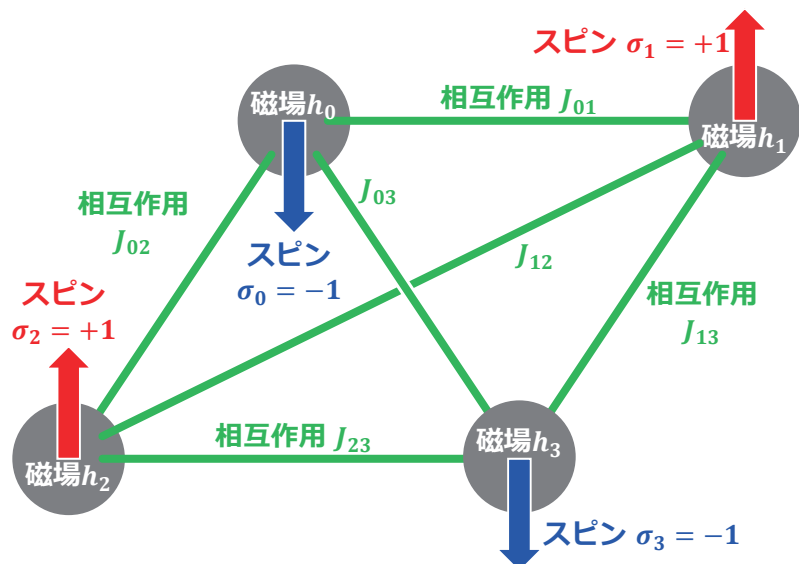


図1 イジングモデル

ずは通常のイジングモデルの考案作業を簡単な問題を例に説明します。

あなたは自部署のスタッフ6人（仮にA, B, C, D, E, Fとします。）に6つのデスク（仮にU, V, W, X, Y, Zとします。）を割り当てることを考えています。6つのデスクは図2(a)のような位置関係です。スタッフ1人につきデスクは1つ割り当てる必要があります（前提1）。また、AさんとBさん、CさんとDさんとEさんとFさんは同一業務でチームを組んでいるので、隣接するデスクであることが望ましいです。ここでは同チームで隣接デスクとなったスタッフの組み合わせ1つごとに1点加算され、この点数を最大化することをめざします（前提2）。

この前提1、前提2を踏まえると、図2(b)のような割当てが最大点数となる解の1つです。この例題について、イジングモデルによる表現を考えていきます。

まず、±1のスピンのと問題の解の意味の間の対応付けを考えます。今回はスタッフ

6人とデスク6つの組み合わせ36通りについて1つずつスピンを用意し、「+1であればそのスタッフがそのデスクに割り当てられた、-1であれば割り当てられなかった。」という意味として対応付けてみます。これらのスピンを今回は $x_{A,U}$ のようにスタッフ名とデスク名を添えたスピンで表現することとしましょう。例えば $x_{B,X}$ であれば「+1であればスタッフBがデスクXに割り当てられた、-1であれば割り当てられなかった。」という意味で解釈することになります。このように用意した36個のスピンのについて前提1と前提2の表現を考えます。

前提1を先ほどのスピンに関する表現としてみましょう。前提1は「スタッフ1人につきデスクは1つ」という内容でした。すなわち「各スタッフについて6つのデスクのうち1つだけが割り当てられる」かつ「各デスクについて6人のスタッフのうち1人だけが割り当てられる」ということです。このうち「スタッフAについて6つのデスクのうち1つだけが割り当てられる」を考

えてみると、 $(\sum_{desk \in \{U,V,W,X,Y,Z\}} x_{A,desk} + 4)^2$ のような二次多項式で表現することが可能です。この式は $x_{A,U} \sim x_{A,Z}$ のうち1つだけが+1、残りの5つが-1となったときに最小となる式であり、まさに1つのデスクだけが割り当てられることが式の値が最小となることに対応します。他のスタッフ、デスクについても同様の二次多項式で割当てを1つとすることで表現が可能です。

前提2についても考えていきましょう。前提2は「同チームのスタッフが隣接するごとに1点加算」というものでした。例としてスタッフAとBのチームを考えましょう。スタッフAとBはデスクUとXに割り当てられれば1点加算です。これを二次多項式で表現すると $(x_{A,U} + 1)(x_{B,X} + 1) / 4$ となります。実際に $x_{A,U}$ と $x_{B,X}$ に±1を代入してみると、両方とも+1のときのみこの二次多項式は+1となり、他のときは0となります。このままでは逆のデスク割り当てや他のスタッフ、隣接デスクの組み合わせで加算されなくなってしまいますので、

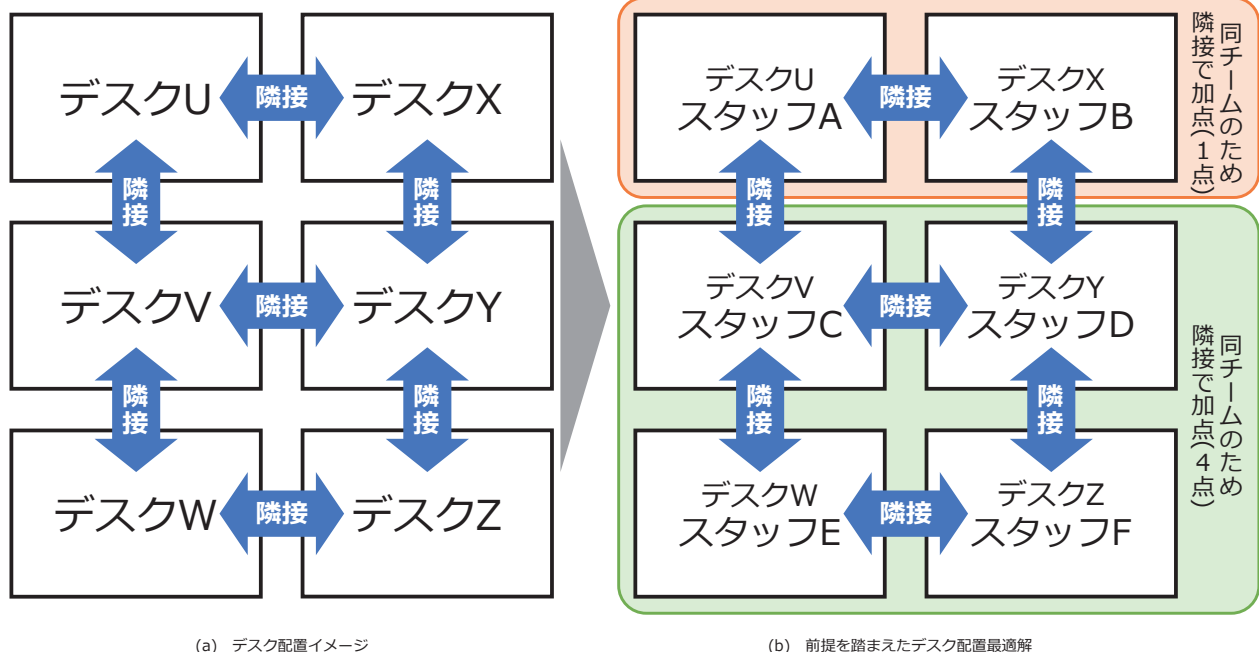


図2 例題のデスク配置イメージと最適解の例

例題の二次多項式表現

前提1

$$\sum_{staff \in \{A,B,C,D,E,F\}} \left(\sum_{desk \in \{U,V,W,X,Y,Z\}} x_{staff,desk} + 4 \right)^2 + \sum_{desk \in \{U,V,W,X,Y,Z\}} \left(\sum_{staff \in \{A,B,C,D,E,F\}} x_{staff,desk} + 4 \right)^2$$

各スタッフについて6つのデスクのうち1つだけが割り当てられる 各デスクについて6人のスタッフのうち1人だけが割り当てられる

前提2

$$- \sum_{(d1,d2) \in \{(U,V),(V,W),(U,X),(V,Y),(W,Z),(X,Y),(Y,Z)\}} \frac{(x_{A,d1} + 1)(x_{B,d2} + 1) + (x_{B,d1} + 1)(x_{A,d2} + 1)}{4} \quad \text{チーム(A,B)のスタッフが隣接することに1点加点}$$

$$- \sum_{(d1,d2) \in \{(U,V),(V,W),(U,X),(V,Y),(W,Z),(X,Y),(Y,Z)\}} \sum_{s1 \in \{C,D,E,F\}} \sum_{s2 \in \{C,D,E,F\}, s2 \neq s1} \frac{(x_{s1,d1} + 1)(x_{s2,d2} + 1) + (x_{s2,d1} + 1)(x_{s1,d2} + 1)}{4} \quad \text{チーム(C,D,E,F)のスタッフが隣接することに1点加点}$$

図3 今回の例題を表現するイジングモデル

すべての組み合わせについてこの式を足し合わせることで、加点される点数を二次多項式で表現することができます。ここで注意すべきは、イジングマシンがイジングモデルを最小とする解を導出するという点です。つまり、隣接による加点が大きいほど、イジングモデルの取る値が小さくなるようにする必要があるので、この二次多項式は正負を反転させて足し合わせることでとなります。

ここまでの内容を踏まえ、考案した多項式を足し合わせると、今回の例題のイジングモデルの全体像は図3のようになります。このようにシンプルな例題であっても、イジングモデルの数式は比較的複雑なものとなります。

対して、cimssdkによる機能を用いた場合のイジングモデルの構築イメージは図4のようになります。図3の数式を考案する際に必要となった、各多項式がどのようなときにどんな値をとるのか、という点を全く考慮せずにイジングモデルを生成できることが分かります。

実用上の問題を考える場合には、より複雑な前提条件をより多くのスピンの対して考えることとなり、イジングモデルの考案作業はとても煩雑なものとなります。実用問題であれば整数を扱うこともあり、複数の±1を取るスピンを組み合わせて1つの

整数として扱う必要も生じます。また、同時に3つ以上のスピンに関するような条件を表現しようとするると三次以上の多項式を扱わなければなりません。イジングモデルでは二次多項式しか扱えないので、うまく次数を削減するような取り組みも必要となります。

cimssdkでは、このような複雑になりやすいイジングモデル考案の作業について、整数をはじめとした各種スピンとそれらに関する条件を自動的にイジングモデル変換する機能を提供しています。本技術によりイジングモデルおよびイジングマシンに関する専門知識を持たない人でも、容易にイジングマシンによる高速な求解という恩恵を得られるようになります。特にcimssdkでは他社類似技術に比べて、複数の条件を無制限に再帰的に組み合わせることが可能であり、数学的に定義可能な論理構造をそのまま表現可能である点、任意の連想配列から対応するイジングモデルを自動生成できる点が独自の強みとなっています。今後は自動変換の対象となるスピンと条件を拡充していくことにより、対応可能な実用問題を広げていきます。

LASOLV® Computing Systemによるアプリケーション開発と実行

イジングマシンを使いこなすうえでのもう1つの課題は、「イジングモデル基底状態探索問題を解くことに特化したコンピュータ」という特性から、それ単体ではアプリケーションを完結させることが難しいという点です。前述したSDKを利用したデータの前処理・後処理や、古典コンピュータが有利な演算などを組み合わせるために、多種演算装置を組み合わせたヘテロジニアスなシステムが必要です。さらに、イジングマシンはPCや一般的なサーバなどと比べるとコストや設置場所の問題があり、多数のマシンを用意することは困難です。そのため、スーパーコンピュータと同様に、複数人で少数のイジングマシンを共用する手段が必要になります。そこでNTTコンピュータ&データサイエンス研究所では、LASOLV®などのイジングマシンを効率良く利用するプラットフォームとしてLCS (LASOLV® Computing System) の開発に取り組んでいます⁽⁴⁾。前述したSDK等、アプリケーション開発を容易にする開発環境に加え、ユーザのジョブを制御し、CPU等で計算を行うノードやイジングマシンで計算を行うノードを効率良く連携利用しつつ、複数ユーザのジョブが重複しない

```

staffs = ["A", "B", "C", "D", "E", "F"]
teams = [{"A", "B"}, {"C", "D", "E", "F"}]
desks = ["U", "V", "W", "X", "Y", "Z"]
neighbor_desks = [
    {"U", "V"}, {"V", "W"}, {"X", "Y"}, {"Y", "Z"},
    {"U", "X"}, {"V", "Y"}, {"W", "Z"},
]
x = {}
for s, d in itertools.product(staffs, desks):
    # ±1を取る変数を宣言
    x[s, d] = cimsdk.boolean((s, d))

# イジングモデルを足し合わせるための変数
input = 0

# 前提1はchoose_one関数を宣言すれば自動的にイジングモデルがつくられる
for s in staffs:
    input += cimsdk.choose_one(x[s, "U"], x[s, "V"], x[s, "W"], x[s, "X"], x[s, "Y"], x[s, "Z"])
for d in desks:
    input += cimsdk.choose_one(x["A", d], x["B", d], x["C", d], x["D", d], x["E", d], x["F", d])

for t in teams:
    for s1, s2 in itertools.combinations(t, 2):
        for d1, d2 in itertools.product(desks, 2):
            # 前提2は値を連想配列で宣言すれば自動的にイジングモデルがつくられる
            input -= cimsdk.translate_dict(
                (x[s1, d1], x[s2, d2]),
                {
                    (-1, -1): 0,
                    (-1, +1): 0,
                    (+1, -1): 0,
                    (+1, +1): +1 if {d1, d2} in neighbor_desks else 0,
                }
            )

```

図4 cimsdkによるイジングモデルの構築イメージ

いようにスケジューリングする機能を有しています。

このLCS上で、cimsdkを用いた開発を行うことで、LASOLV®の実力を活かした応用開拓にも取り組んでいます。例を挙げますと、三菱重工株式会社との共同実証において、人員リソース計画にイジングマシンを用いる取り組みを実施しました⁽⁵⁾。同社には、世界中の発電プラント等の点検・補修工事を行うという業務があります。これに対し、さまざまな点検項目に合わせたスキルを有する作業員を派遣する必要がありますが、その人数、連続勤務日数、残業時間など複雑なパラメータも考慮した人員計画を立案しなければなりません。従来は、点検対象プラント数26カ所、作業員141人、日数64日間の期間で、保有スキルなどのさまざまな制約条件を満たす人員計画の解候補を、熟練者が人手で1カ月程度かけて計画を策定していました。これは組み合わせ総数 3.48×10^{13329} 通りという途方もない規模になりますが、ここに5万スピンを一気に計算できる最新版のLASOLV®を用いることで、非常に短期間で得られることを実証しました。その高速性を用いて、複数パター

ンの人員計画策定や、感染症対策等が必要になる計画の随時見直しなどが可能になると期待されています。

今後の展開

本稿では、イジングマシンの特性を踏まえつつ、アプリケーション開発を容易にするSDKの取り組みや、コンピューティングシステム開発の取り組みについて紹介しました。今後、イジングマシンに加え、量子コンピュータの実用化が進む中、その特性を踏まえたSDK等ライブラリの重要性、よりヘテロジニアス性の増したコンピューティングシステムの必要性が増していきます。NTTコンピュータ&データサイエンス研究所では、量子コンピュータなどの先端的な技術を生かすコンピューティングシステムアーキテクチャのあるべき姿を定義し、研究を発展させていきます。

参考文献

- (1) <https://www.dwavesys.com/solutions-and-products/systems/>
- (2) <https://www.fujitsu.com/jp/digitalanalyzer/>

- (3) 武居・稲垣・稲葉・本庄：“複雑な組合せ最適化問題を解く量子ニューラルネットワーク。”NTT技術ジャーナル, Vol. 29, No. 5, pp. 11-14, 2017.
- (4) 新井・八木・内山・富田・宮原・巴, 堀川：“イジング型計算機による組合せ最適化のためのハイブリッド計算基盤。”NTT技術ジャーナル, Vol. 31, No. 11, pp. 27-31, 2019.
- (5) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/04/25/220425a.html>



(左から) 宮原 和夫 / 寺本 純司

イジングマシンや量子コンピュータのような新原理に基づく計算機は、今後アプリケーション開発や利用の容易さが一層重要視されることになるでしょう。将来に向け、私たちはソフトウェアとコンピューティングシステムアーキテクチャを進化する研究を推進します。

◆問い合わせ先

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所
企画担当
TEL 046-859-4003
FAX 046-855-1149
E-mail cd-koho-ml@ntt.com



超伝導量子コンピュータのシステムの設計と開発

これまでに実現されてきた量子コンピュータをより大規模で実用的なサイズへ拡大しサービスとして提供するには、たくさんの量子ビットを制御可能にする方法と動作を記述する抽象化が必要となります。本稿では、2023年3月にローンチされた量子コンピュータにおける、量子ビットを制御しクラウドサービスとして利用可能にするまでの取り組みや難しさ、また、クラウドサービスの仕組みや今後の展望について解説します。

キーワード：#量子計算、#超伝導量子ビット、#計算機アーキテクチャ

すずき やすなり
鈴木 泰成

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所

はじめに

量子コンピュータは量子的な物質の重ね合わせ状態を計算に活用し、高速な演算や新たな情報処理の実現に寄与すると期待されています。一方、重ね合わせ状態は環境のノイズに弱く簡単に情報が変化してしまうことから、従来の量子計算の研究は重ね合わせ状態を長時間保持できるデバイスの探求、量子的なノイズを削減するための符号理論などの探索、理想的な量子コンピュータで効率的に実行できるアルゴリズムや計算性能の限界の解析などが主でした。近年ではこれらの基礎技術が確立されてきたことから量子計算の実現が現実味を帯びるようになり、その成果を組み合わせた大規模な量子コンピュータを具体的に設計、開発する取り組みが盛んに行われるようになってきました。NTTは、理化学研究所と共同で超伝導量子ビット^{*1}を用いた集積化された量子コンピュータの開発に取り組み、2023年3月に国内初の量子コンピュータクラウドサービスをローンチしました。量子コンピュータの開発にはさまざまな技術が

必要となりますが、NTTはこの中で特に量子ビットのキャリブレーションと、制御を抽象化および自動化しクラウドサービスとして提供できるようにする技術開発に取り組んできました。本稿では、超伝導量子コンピュータの概要と、実用的な量子計算の実現に向けた計算機の開発に向けた取り組みについて解説します。

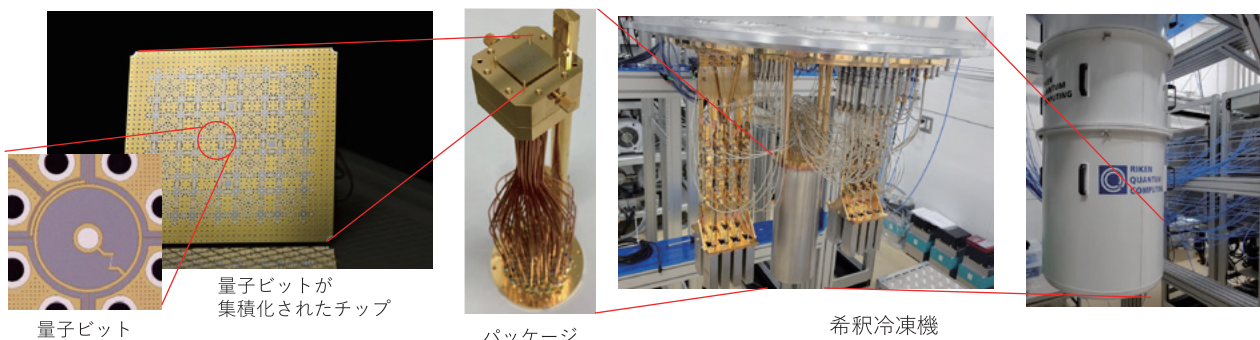
超伝導量子ビット

私たちの身の回りには物質は量子力学に従っているため、識別可能などのような2状態も理論上は重ね合わせ状態にして量子ビットとして扱うことができます。一方、私たちが現実的に重ね合わせ状態を長時間維持できるシステムは限られています。超伝導回路を用いて設計したデバイスのもっともエネルギーが小さい識別可能な2状態を量子ビットとして用いる超伝導量子ビットは、基盤の上に集積化可能で数百マイクロ秒からミリ秒程度の長い寿命を維持できることから、拡張性の高い量子デバイスとして期待されています。図1は量子ビット

が集積化されたチップの写真で、左図にある円形の回路が1つの量子ビットに対応します。この量子ビットは2次元的にチップ上に並べられ、パッケージを介して外部まで配線されています。超伝導量子ビットの重ね合わせ状態は熱に弱いので、チップは希釈冷凍機を用いて数十ミリケルビンまで冷却されます。

図1に表示される超伝導回路そのものは情報を保持する媒体であり、それ自身は計算する能力を持ちません。このため所望の情報処理するには、図2のように量子ビットにマイクロ波を照射して制御する必要があります。典型的な量子計算のプログラムは量子回路と呼ばれる論理回路を模した表現で記述されます。量子回路における量子ビットに対する操作は、ユニタリ操作と呼ばれる量子ビットの情報を得ずに量子状態

*1 超伝導量子ビット：超伝導状態にある回路を用いて量子ビットの0,1を表現するデバイス。集積性を確保しながら高い精度で制御可能なことが知られており、拡張可能な量子コンピュータを実現する主要な候補と考えられています。



写真提供：理化学研究所

図1 超伝導量子コンピュータの外観

を変化させる操作と、読み出し操作と呼ばれる量子ビットの状態が0と1のどちらかを取得する操作の2種類からなります。このどちらの操作も、量子ビットの特性と操作の種類に応じて最適化された形状のマイクロ波を複数照射して行います⁽¹⁾。読み出し操作の場合はこれに加え、量子ビットから返ってくるマイクロ波の形状を調べ、形状から状態が0か1かを判定する必要があります。

量子ビットを制御するマイクロ波の照射と読み出しは実験的には次のように実現されます。まず、通常の計算機を用いて量子回路の要素や量子ビットの特性に合わせ、マイクロ波の形状をデジタルなデータとして設計します。次に、このデータを室温に配置されたエレクトロニクスに転送し、エレクトロニクスはデジタルな信号をアナログな信号に変換してマイクロ波を出力します。マイクロ波は配線を通して希釈冷凍機の中の量子ビットに伝送され、量子ビットに操作が行われます。量子ビットの状態を読み出す場合は量子ビットから返ってくる信号を計測し、エレクトロニクスでアナログな波形をデジタルなデータに変換します。最後に、デジタルな波形データに対する2値識別の判定を行うことで、測定結果が0と1のどちらであったかを判定します。並べられた量子ビットに対してこれらの処理を実施することで、所望の計算を行い、結果を取得することができます。

量子ビットの制御

量子ビットを用いて量子計算を行うには、量子ビットで所望の制御をするのに必要なマイクロ波のパルス形状や、読み出し操作に際する2値識別の関数を設計しなければいけません。最適なパルスの形状は量子

ビットの寿命やエネルギー差といった特性に依存しており、これらの特性は量子ビットごとに異なるため、制御信号は個別に設計する必要があります。また、量子ビットの特性は設計した段階である程度推定が可能ですが、正確な値は実験的に評価しなければ分かりません。このため、量子ビットで計算をできるようにするには、まず希釈冷凍機で冷やした後に複数回の測定を通して量子ビットの特性を明らかにし、次に特性から最適なパルスの形状や読み出し操作の識別関数を量子ビットや量子回路での操作の種類ごとにつくる必要があります。このように、製造した量子ビットが計算に利用できるように行う一連の実験をキャリブレーションと呼びます。

量子ビットのキャリブレーション自体は従来の少数の量子ビットの実験でも行われてきました。しかし、1、2個の少数の量子ビットを制御することができても、単純に大規模化していくと少数の量子ビットを扱っていたときには気にならなかった事項が問題となります。大規模な量子コンピュータを実現するには、実際に大規模な量子計算を構築して拡張性を阻害する課題を実験的に発見し、これを1つずつ取り除かなければなりません。ここでは図3に示される量子計算の拡張性を支える3つの要

素技術について紹介します。

量子コンピュータを拡大するにあたり最初に課題となるのが量子ビットの配線の問題です。典型的には量子ビットはチップの上に2次元に並べられ、個々の量子ビットに制御信号を伝送するため、チップの周辺から個別に配線されます。しかし、この方式を採用すると必要な配線の本数はチップの一辺の2乗で増えていく一方、配線可能な本数はチップの一辺の4倍でしか増えないため、規模がある程度大きくなると配線が難しくなってしまいます。この問題を解決するため、今回の量子コンピュータでは理化学研究所がチップに対して3次元的に制御線を配線する拡張性の高い方式を提案し、富士通株式会社、産業技術総合研究所、情報通信研究機構とともにこの方式での集積化を実現しています⁽²⁾。2番目の課題がエレクトロニクスの効率化です。できるだけ少ない配線で量子ビットを効率的に制御するためには、複数の周波数や波形のマイクロ波信号を多重化して送出する必要があります。これを実現するために量子ビットごとに高価な計測装置を導入すると、量子ビットの数が増えるにつれコストやサイズの観点で拡張が現実的ではなくなります。今回のシステムでは、大阪大学らが主導して開発した量子ビットの制御に最適化され

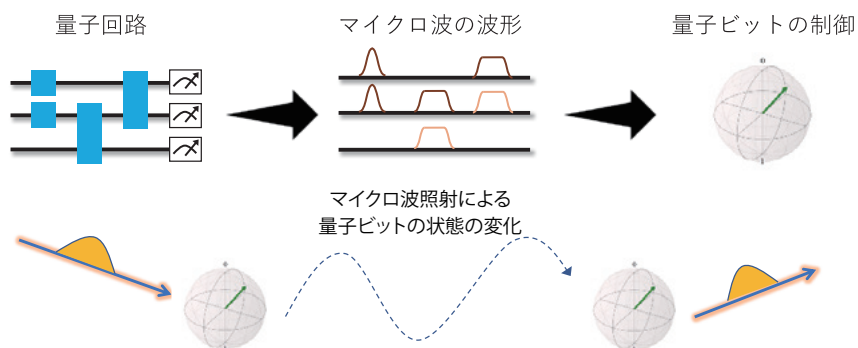


図2 超伝導量子ビットの制御

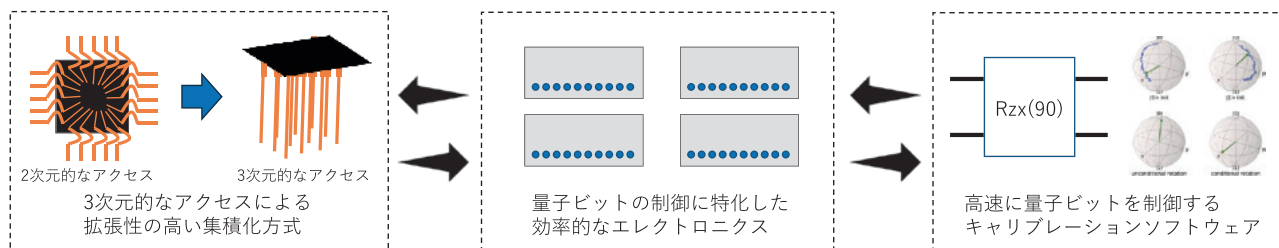


図3 拡張性を支える要素技術

たエレクトロニクスが利用されています。最後に課題となるのが量子ビットを制御し効率的にキャリブレーションを行うソフトウェアの構築です。先述したように量子ビットの特徴付けを手作業で行う方法自体は知られていますが、大量の量子ビットを1つずつ手作業で調整することは現実的ではありません。また、量子ビットや制御装置の特性は時間とともに変化するため、時間をかけてキャリブレーションしては正確な操作ができません。NTTと理化学研究所は、複数のエレクトロニクスを並列に制御し量子ビットを体系的に計測する基盤を構築しました。また、この基盤を用いて複数の量子ビットを並列かつ正確にキャリブレーションするためのソフトウェアや自動化のためのプロトコルを構築しました。

システムの抽象化と運用

前述のシステムで集積化された量子ビットを制御するための基盤技術はそろいましたが、これをクラウドサービスとして持続的に運用するには、安定した稼働を維持するためのノウハウの構築と、ユーザに提供するためのサービスの仕組みづくりが必要となります。前述の構築した計測のためのインフラは、量子ビットが理想的に製造された際には問題なく動作しますが、実際にはさまざまな理由でキャリブレーションが失敗してしまうことがしばしばあります。この失敗の要因は配線ミスといったヒューマンエラーから、量子ビットの特性が設計

値から大きく外れてしまい制御できないという製造の問題まで多岐にわたります。システムが大規模化するとその要因の種類や個所の特定自体が困難となり、現実的な運用が難しくなります。このため、全体を統括するソフトウェアは正常系で正しく動作するだけでなく、異常が生じた際にその原因をできるだけ早い段階で正確に報告できることが期待されます。異常なケースの分類は無数にあるため、これを完全に自動化することは容易ではありませんが、開発の期間でノウハウを蓄積し典型的な要因を効率的に見出す体制を構築しています。

構築したシステムをサービスとして提供するには、ユーザが計算機を利用しやすくするためのWebサービスの構築も必要です。現在の設計では量子ビットを制御するもっとも低レベルなプログラムの表現は、量子ビットを制御するマイクロ波の波形情報です。この表現は量子ビットの特性を調べる実験などでは便利ですが、ユーザが行いたい計算をユーザにパルス形状で記述させることは現実的ではありません。今回の計算機のインフラでは、キャリブレーションが完了していない状態でパルスの形状を直接設計するジョブの記述方式と、キャリブレーションが完了した後に量子回路の描像でプログラムを指定する方式の2つの方式を提供しています。今回提供されるクラウドサービスでは、大阪大学、理化学研究所、NTTが連携し、図4のように、ユーザは量子回路で記述したプログラムをフロントエンドで受け止め、バックエンドのサー

ビスで後者の方式を用いて量子ビットを用いた計算を行い、計測データを識別した測定値をユーザに返却するという仕組みを構築しています。

今後の展望

現在のクラウドサービスは量子ビット集積化の1つの到達点ではありますが、実用的な量子コンピュータを実現するにはまだまだ多くの壁を乗り越えねばなりません。図5に示されるように、NTTではこうした将来の実用化に向けた技術開発を並列して進めています。現在の計算機の最大の問題点はその大きなノイズにあります。現在実現されている量子ビットはもっとも良いものでもゲート操作をするたびに0.1%程度の確率でエラーが生じるため、大規模な量子アルゴリズムを信頼性のあるかたちで実行することができません。そこで、量子誤り訂正技術^{*2}を用いて量子ビットを符号化し、計算中に誤りを逐次的に訂正することで誤り率を実行的に小さくする技術の実現が期待されています⁽³⁾。また、誤り訂正が実現すれば、量子ビットのエラーや特性のばらつきをある程度まで誤り訂正で吸収できるようになるので、アーキテクチャを慎重に設計することで拡張性に優れた計算機

*2 量子誤り訂正技術：誤り率が小さな量子ビットを複数用いて少数の論理的な量子ビットを表現することで、論理量子ビットに生じる誤り率を実効的に削減する技術。

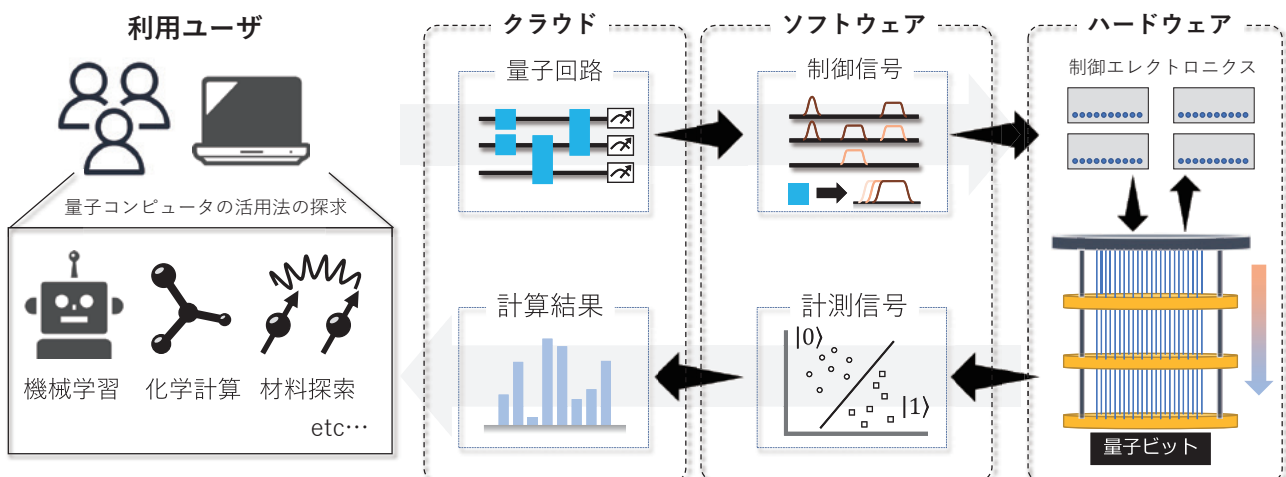


図4 クラウドサービスの概要

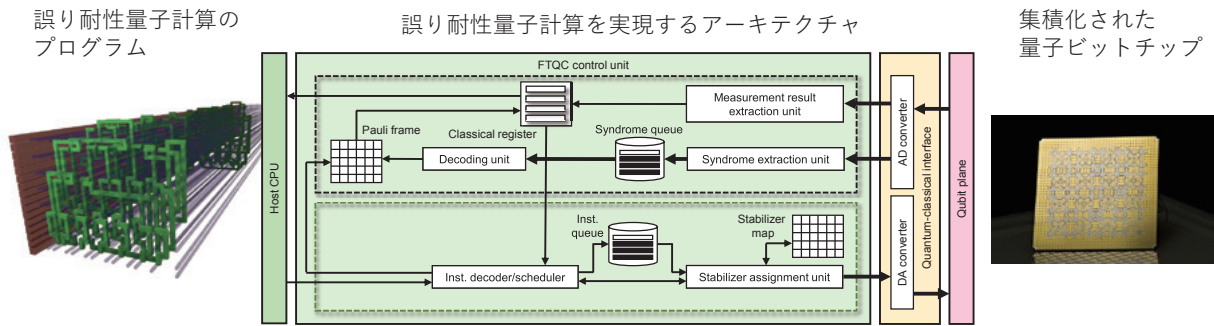


図5 誤り耐性量子計算機を実現するための技術

を構築できます。NTTはさまざまな研究機関と連携し、量子誤り訂正を実現するための計算機アーキテクチャを具体化しています^{(4)~(8)}。誤り訂正を前提としたアーキテクチャを構築すると、私たちが実行できる基本命令セットはデバイスよりもむしろ誤り訂正符号の特性で規定されるようになります。このため、誤り耐性量子コンピュータをターゲットにしたコンパイラやソフトウェアも新たに必要になります。NTTでは、誤り耐性量子計算で実行するような長期的な誤り耐性量子計算を見据えたコンパイラを構築し、これを最適化するための手法や評価するためのソフトウェアを提案してきました^{(9), (10)}。図5の左には、実際に設計したプログラムがコンパイル最適化の途中で3次元的なグラフとして表示されている様子を表しています。

次なる目標は、これまでに構築したこうしたシステムスタックを量子ビットと融合させ、誤り耐性のある量子コンピュータの実証をすることです。誤り訂正を取り入れ、計算機として高速に命令が処理できるようなシステムをつくるには、今まで以上に物理と計算機科学の融合が必須となります。NTTはこうした横断分野でのソフトウェアとハードウェアが一体となった協調設計に基づく計算機のデザインを探求し、実用的な量子コンピュータの未来を世界に先駆けて描き出していきます。

■参考文献

(1) P. Krantz, M. Kjaergaard, F. Yan, T. P. Orlando, S. Gustavsson, and W. D. Oliver : "A quantum engineer's guide to superconducting qubits," Appl. Phys. Rev., Vol. 6, No.2, 021301, 2019.
 (2) S. Tamate, Y. Tabuchi, and Y. Nakamura : "Toward Realization of

Scalable Packaging and Wiring for Large-Scale Superconducting Quantum Computers," IEICE Transactions on Electronics, Vol. E105.C, No. 6, pp. 290-295, 2022.

(3) A. G. Fowler and C. Gidney : "Low overhead quantum computation using lattice surgery," arXiv preprint arXiv:1808.06709, 2018.
 (4) Y. Suzuki, Y. Ueno, W. Liao, M. Tanaka, and T. Tanimoto : "Circuit Designs for Practical-Scale Fault-Tolerant Quantum Computing," 2023 Symposium on VLSI Technology and Circuits, 2023.
 (5) W. Liao, Y. Suzuki, T. Tanimoto, Y. Ueno, and Y. Tokunaga : "WIT-Greedy: Hardware System Design of Weighted Iterative Greedy Decoder for Surface Code," 28th ASP-DAC 2023, pp. 209-215, 2023.
 (6) Y. Suzuki, T. Sugiyama, T. Arai, W. Liao, K. Inoue, and T. Tanimoto : "Q3DE: A fault-tolerant quantum computer architecture for multi-bit burst errors by cosmic rays," the 55th IEEE/ACM MICRO, pp. 1110-1125, 2022.
 (7) Y. Ueno, M. Kondo, M. Tanaka, Y. Suzuki, and Y. Tabuchi : "QULATIS: A Quantum Error Correction Methodology toward Lattice Surgery," 2021 IEEE HPCA, pp. 274-287, 2022.
 (8) Y. Ueno, M. Kondo, M. Tanaka, Y. Suzuki, and Y. Tabuchi : "QECool: On-Line Quantum Error Correction with a Superconducting Decoder for Surface Code," 2021 58th ACM/IEEE DAC, pp. 451-456, 2021.
 (9) N. Yoshioka, T. Okubo, Y. Suzuki, Y. Koizumi, and W. Mizukami : "Hunting for quantum-classical crossover in condensed matter problems," arxiv preprint arXiv:2210.14109, 2022.
 (10) Y. Suzuki, Y. Kawase, Y. Masumura, Y. Hiraga, M. Nakadai, J. Chen, K. M. Nakanishi, K. Mitarai, R. Imai, S. Tamiya, T. Yamamoto, T. Yan, T. Kawakubo, Y. O. Nakagawa, Y. Ibe, Y. Zhang, H. Yamashita, H. Yoshimura, A. Hayashi, and K. Fujii :

"Qulacs: a fast and versatile quantum circuit simulator for research purpose," Quantum, Vol. 5, p. 559, Oct. 2021.



鈴木 泰成

量子計算をどのように抽象化し組み上げていくかはまだ標準的な考え方が確立していないフロンティアです。これまでの計算機を組み上げるうえでつられてきたノウハウを集約し、高機能な量子コンピュータのあるべき姿を探求します。

◆問い合わせ先

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所
 企画担当
 TEL 046-859-4003
 FAX 046-855-1149
 E-mail cd-koho-ml@ntt.com

量子エラー抑制とその進展

現在の量子ハードウェアは計算エラーの影響が非常に大きく、量子コンピュータから有意義な結果を取り出すためにはエラーの削減が必須です。現在、符号化などを行わず、量子ハードウェアへの負担を少なく保ったまま計算エラーの削減を行うことが可能な量子エラー抑制手法が世界中でさかんに研究されています。本稿では、主要な量子エラー抑制法のレビューを行った後、最近、私たちの研究グループから提案された世界で初めての量子エラー抑制を組み込んだ量子センシングおよび量子エラー抑制の統合フレームワークである一般化部分空間展開法について解説します。

キーワード：#量子計算、#量子誤り抑制、#測定結果の事後処理

えんどう すくろ
遠藤 傑

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所

量子エラー抑制

量子コンピュータはさまざまところで説明されるように、量子的重ね合わせが失われることによる計算エラーの影響を抑えることが喫緊の課題となっています。本稿で解説する量子エラー抑制は、比較的最近提案された量子ハードウェアに対する負担をできる限り少なく保ったまま計算エラーを抑制する概念です⁽¹⁾。量子エラー抑制とよく比較される量子エラー訂正では、複数の物理量子ビットを用いて1つの論理量子ビットを表現し、その冗長性を用いて計算

エラーを検出し、その情報を基にしてエラーを能動的に訂正します。しかし、現在の量子ハードウェアの量子ビット数は多くて数百であるため、量子エラー訂正を行うと実効的な量子ビット数が少なくなってしまい、量子ハードウェアの持つ計算能力を活用しきれないという問題があります。そこで、冗長化を避け、実効的な量子ビット数を減らすことなく計算エラーを削減することができる一連の手法である、量子エラー抑制が導入されました。量子エラー抑制実装に関する進展はめざましく、最近IBMによって行われた、127量子ビットデバイスで初

めて量子コンピュータで実用的なタスクを行うことができたと主張する実験論文において、量子エラー抑制が非常に有用な役割を果たすことが分かりました⁽²⁾。また、筆者が提案した指数外挿エラー抑制⁽³⁾が非常に高い性能を示すことが示されました。量子エラー抑制にはさまざまな手法が存在しますが、一般的には複数の量子回路からの出力を古典コンピュータにより事後処理することによって、正しい計算結果を推定することが行われます。その概念図を図1(a)に示します。

ここで、量子エラー抑制は一般的に量子

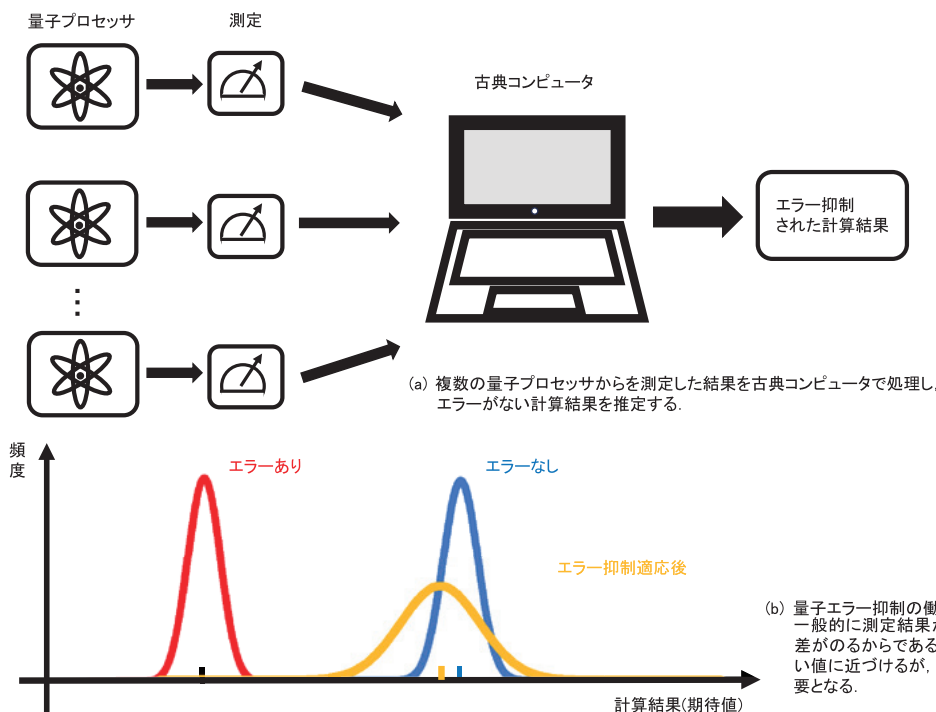
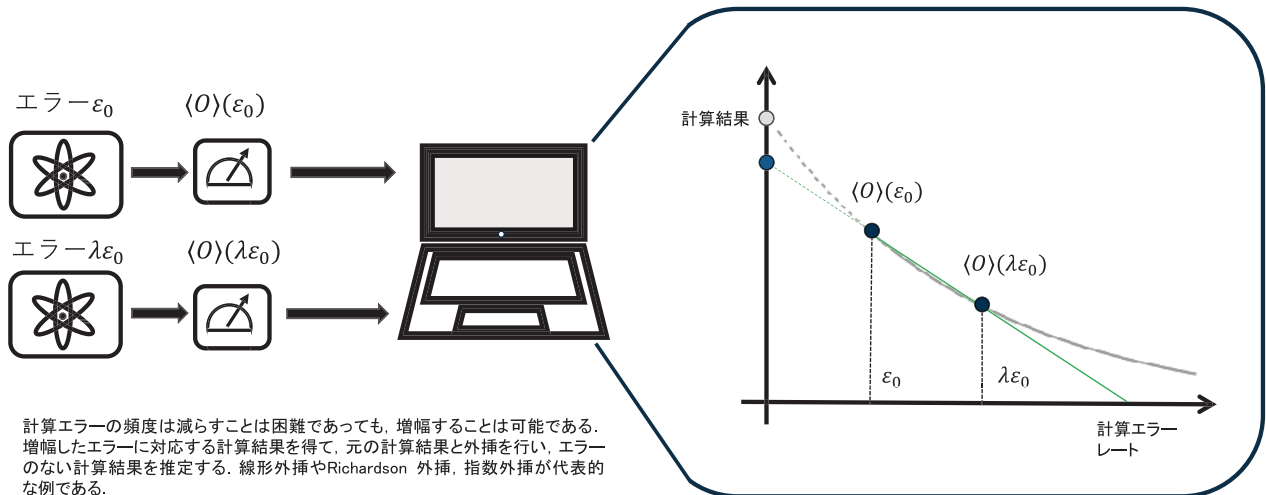


図1 量子エラー抑制の概念図



計算エラーの頻度は減らすことは困難であっても、増幅することは可能である。増幅したエラーに対応する計算結果を得て、元の計算結果と外挿を行い、エラーのない計算結果を推定する。線形外挿やRichardson 外挿、指数外挿が代表的な例である。

図2 外挿法概念図要

状態そのもののエラーを抑制することはできませんが、物理量の期待値のエラーを抑制することができます。量子エラー抑制の働きを図1(b)に示します。しかしながら、現在の量子コンピュータ、および初期の誤り耐性量子計算で実行できることが期待されている多くの量子アルゴリズムが物理量の期待値を活用するアルゴリズムであるため、量子エラー抑制は大いに有用であると考えられています。また、量子エラー抑制のコストはより多くの測定回数であり、量子ハードウェアの計算エラーの発生頻度に対して指数関数的な測定回数が必要になることに注意が必要です。これは、直感的には、量子エラー抑制が、量子ゲート数と量子ゲートのエラー率に関して指数関数的に減衰する物理量の期待値を増幅する効果があるため、計算結果の分散が指数関数的に増加するからです。測定回数の指数増加に関する証明は、量子情報理論的枠組みによって、私たちの研究をはじめとしたいいくつかの研究で示されています⁽⁴⁾。以降では、量子エラー抑制法として主要な手法である外挿法^{(3),(5)}、擬確率法（確率的エラー相殺法とも呼ばれる）^{(3),(5)}、仮想蒸留法⁽⁶⁾、部分空間展開法⁽⁷⁾について説明します。次に私たちの最近の研究成果である、世界初の量子エラー抑制を適用した量子センシングの手法⁽⁸⁾、および極めて一般的な量子エラー抑制の統合フレームワークである一般化部分空間展開法⁽⁹⁾を解説します。量子エラー抑制の概要のみ理解したい方は、外挿法を理解すれば十分ですが、もう少し踏み込ん

で理解したい方は、ぜひその他のセクションも読んでいただきたいと思います。筆者が執筆したレビュー論文⁽¹⁾も必要に応じて参照していただけますと、より深い理解を得られると思います。

■外挿法

外挿法は、その名のとおり、複数の測定結果を外挿することにより、計算エラーのない理想的な結果を推定する手法です^{(3),(5)}。非常にシンプルではありますが、多くの実験で用いられる強力な手法です。その概要を図2に示します。横軸は計算エラーレート、縦軸は計算結果（物理量の期待値）です。当然ではありますが、計算エラーレートは自由に減らすことができないことが問題ですが、計算エラーを増加させることは比較的容易です。例えば、論理ゲート操作をあえてゆっくり行うこと、あるいは余分な論理ゲート操作を行うことで、計算エラー頻度を増加させることはできます。そして、元々の計算結果と、計算エラーレートを増加させた計算結果を外挿することによって、計算エラーのない理想的な計算結果を推定します。外挿法が提案された当初は、線形、および多項式関数により外挿するRichardson 外挿が提案されていましたが⁽⁵⁾、筆者らは計算結果が計算エラーの頻度に対して指数関数で減衰することが一般的であることを指摘し、指数関数による外挿を提案しました⁽³⁾。そして、実際の実験でも非常に高い性能を示すことが示されました⁽²⁾。しかし、外挿法は精度保証がなく、比較的ヒューリスティック（発見的）な手法とい

えます。

量子エラー抑制のコスト要因である測定回数の増加については外挿法でよく理解できるので、例として線形外挿法を考えます。計算エラーレート ϵ_0 に対応する物理量の、実験的に得られた平均値を $\langle O \rangle(\epsilon_0)$ 、エラーレートを2倍した物理量の期待値を $\langle O \rangle(2\epsilon_0)$ とすると、これらを外挿したエラー抑制された結果は $O_{est} = 2 \langle O \rangle(\epsilon_0) - \langle O \rangle(2\epsilon_0)$ と書けます。その際、分散を計算すると、 $\langle O \rangle(\epsilon_0)$ と $\langle O \rangle(2\epsilon_0)$ に相関がないとすると、 $Var[O_{est}] = 4Var[\langle O \rangle(\epsilon_0)] + Var[\langle O \rangle(2\epsilon_0)]$ となり、確かにエラー抑制後に分散が増幅され、正しい計算結果を得るにはより多くの測定回数が必要であることが分かります。

■擬確率法

擬確率法は、量子ゲートの計算エラーの詳細をプロセストモグラフィやゲートセットトモグラフィなどのノイズモデルを得るための手法で特徴付けた後に、そのノイズを実効的に打ち消すような量子エラー抑制を構築する方法です^{(3),(5)}。ノイズに対応する量子プロセスを \mathcal{E} と書き（量子力学版の遷移行列だと思つと分かりやすい）、その逆変換を \mathcal{E}^{-1} と書きます。すると、 \mathcal{E}^{-1} は数学的に強引に構築しているだけなので、一般的に「物理的なプロセス」ではなく、直接実行することができません。そこで、 \mathcal{E}^{-1} を、私たちが計算エラーを少なく実行できる量子エラー抑制のための操作の集合 $\{\mathcal{B}_k\}_k$ と考えることで、 $\mathcal{E}^{-1} = \sum_k q_k \mathcal{B}_k$ と分解できます。普通 $\{\mathcal{B}_k\}_k$ は単一量子ビット

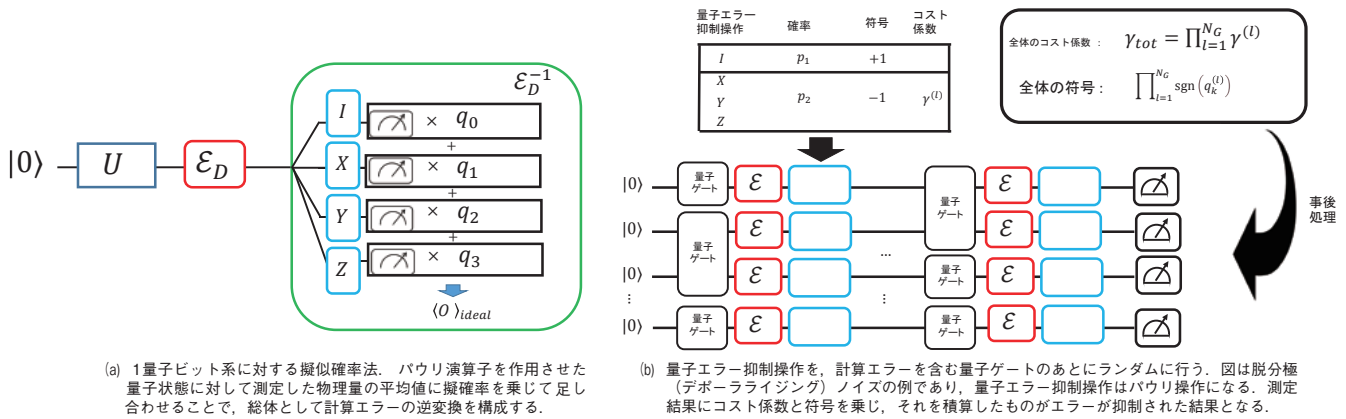


図3 擬確率法概念図

操作を仮定します。例えば、エラー確率 p の脱分極ノイズ(デポーライジングノイズ) $\mathcal{E}_D(\rho) = (1 - \frac{3}{4}p)\rho + \frac{p}{4}(X\rho X + Y\rho Y + Z\rho Z)$ を考えると、その逆変換は $\mathcal{E}_D^{-1}(\rho) = (1 + \frac{3p}{4(1-p)})\rho - \frac{p}{4(1-p)}(X\rho X + Y\rho Y + Z\rho Z)$ となります。すると、 $q_0 = (1 + \frac{3p}{4(1-p)})$, $q_1 = q_2 = q_3 = -\frac{p}{4(1-p)}$, $\mathcal{B}_0(\rho) = \rho$, $\mathcal{B}_1(\rho) = X\rho X$, $\mathcal{B}_2(\rho) = Y\rho Y$, $\mathcal{B}_3(\rho) = Z\rho Z$ です。ここで、 $\sum_k q_k = 1$ であり、 \mathcal{E}^{-1} が一般的に物理的なプロセスでなく、 q_k が負になり得る擬確率なので、この手法を擬確率法と呼びます。当然、負の確率は直接実行することはできませんが、これは測定結果の事後処理を行うことによって実効的に「負の確率でサンプルすることができた場合と同じ」期待値を計算することができます。例として、シンプルな1量子ビットの系を考えます。この場合の概念図を図3(a)に示します。理想の量子状態は $\rho_{ideal} = U|0\rangle\langle 0|U^\dagger$ ですが、脱分局ノイズ \mathcal{E}_D の影響を受け、実際の量子状態は $\rho_{noisy} = \mathcal{E}_D(\rho_{ideal})$ であるとして、測定する物理量を O とすると、ノイズがない物理量の期待値 $\langle O \rangle_{ideal} = q_0 \text{Tr}[\rho_{noisy} O] + q_1 \text{Tr}[X\rho_{noisy} X O] + q_2 \text{Tr}[Y\rho_{noisy} Y O] + q_3 \text{Tr}[Z\rho_{noisy} Z O]$ であるため、量子状態 ρ_{noisy} 、そしてパウリ操作を行った量子状態 $X\rho_{noisy} X, Y\rho_{noisy} Y, Z\rho_{noisy} Z$ に対して物理量の期待値を測定し、擬確率の重みで足し合わせればよいのです。ここで、負の値を持つ擬確率が存在しても、測定結果に負の符号を乗じて事後処理を行うことで物理的ではない逆変換が構築できています。

しかし、実際には複数量子ビットの系で、量子回路中で逆変換を施すことが実用上は重要です。今、複数の量子ゲートのノイズ

$\mathcal{E}_l (l=1, 2, \dots, N_G, N_G \text{ はゲート数})$ に対して擬確率法を行う場合を考えます。この概念図を図3(b)に示します。このとき、それぞれのエラーに対して逆変換を構築し、 $\mathcal{E}_l^{-1} = \sum_k q_k^{(l)} \mathcal{B}_k = \gamma^{(l)} \sum_k p_k^{(l)} \text{sgn}(q_k^{(l)}) \mathcal{B}_k (\sum_k p_k^{(l)} = 1, p_k^{(l)} = \frac{|q_k^{(l)}|}{\gamma^{(l)}} > 0, \gamma^{(l)} = \sum_k |q_k^{(l)}| > 1, \text{sgn}(q_k^{(l)}) = q_k^{(l)} / |q_k^{(l)}|)$ と変形します。ここで、 $\gamma^{(l)}$ をコスト係数と呼びます。そして、それぞれの量子ゲートの後(これは定式化によっては前でもよい)で操作 \mathcal{B}_k を確率 $p_k^{(l)}$ で発生させ、符号の積 $\prod_k \text{sgn}(q_k^{(l)})$ とコスト係数の積 $\gamma_{tot} = \prod_k \gamma^{(l)}$ を測定結果に乘ずればよいのです。そしてこれを繰り返し、積算した結果をエラー抑制された結果として得ます。その際、計算結果の分散はエラー抑制しない場合に比べ、おおよそ γ_{tot}^2 倍されるため、ゲート数に対して指数関数的に多くの測定回数が必要になります。

筆者らは、擬確率法の提案当初では整備されていなかった、適切な計算エラーの特徴付け方法、任意の計算エラーを取り除くために必要な量子エラー抑制のための操作の集合 $\{\mathcal{B}_k\}_k$ を示しました⁽³⁾。また、ゲートモデルだけでなく、リンドブラッドマスター方程式 $\frac{d}{dt}\rho = -i[H, \rho] + \sum_k (2L_k \rho L_k^\dagger - L_k^\dagger L_k \rho - \rho L_k^\dagger L_k)$ で記述されるような時間的に連続的なノイズモデルに対しても擬確率法が適用可能であることを示し、アナログな量子系に対しても量子エラー抑制の幅を広げました⁽¹⁰⁾。

■ 仮想蒸留法

仮想蒸留法はノイズのある量子状態 ρ_{noisy} のコピーを複数準備し、その間に量子もつれ測定を行い、その結果を古典コンピュータで事後処理することによって、ノイズの

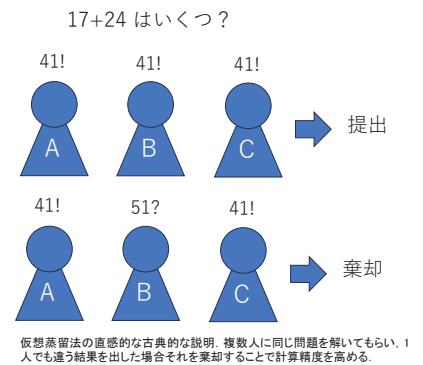


図4 仮想蒸留法概念図

ない量子状態をあたかも「蒸留」することができる手法です⁽⁶⁾。この手法の「古典的な」対応物を見ると、例えば計算ミスをよくする小学生たちの計算の正答率を高めるには、同じ問題を複数人に解いてもらって、皆の計算結果が同じだったときのみ計算結果を提出し、それ以外は棄却する、ということが挙げられます(図4(a))。計算にかかわる人数が増えれば増えるほど、正答率は高まります。ただし、成功確率(計算結果を提出できる確率)は人数に対して指数関数的にします。

仮想蒸留法では量子状態のコピーの数を n とすると、蒸留された量子状態 $\rho_{vd} = \frac{D_{noisy}^n}{\text{Tr}[\rho_{noisy}^n]}$ に対応する物理量の期待値を計算することができます。ここで、 $\rho_{noisy} = \sum_k p_k |\psi_k\rangle\langle\psi_k| (p_0 \geq p_1 \geq \dots)$ と固有値分解した際、ノイズが小さい場合は、最大固有値に対応する固有状態が理想の量子状態の良い近似になっていることが予想されますが、 ρ_{noisy}^n はコピー数 n を増やしていくと、 $|\psi_0\rangle$ に漸近していきます。また、 $|\psi_k\rangle (k=1, 2, \dots)$ の寄与は、 n に対して指

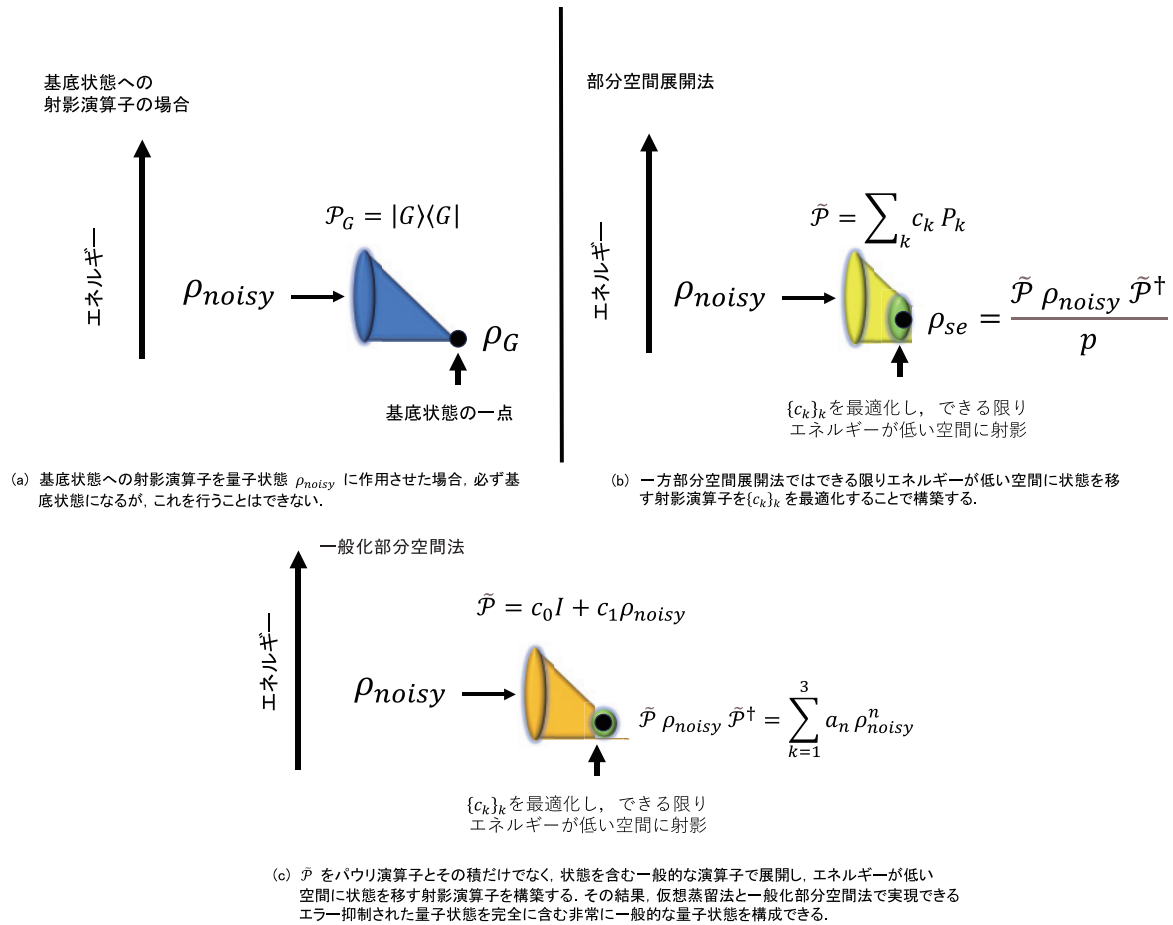


図5 部分空間展開法の概念図

数関数的に抑制されます。ただし、コピー数 n に対して測定回数は指数関数的に増大し、それに伴いコストも指数関数的に増大します。この手法は計算エラーモデルについて情報がなくても、エラーが確率的なものであるなら、計算エラーを高精度に抑制できるという利点があります。ただし、量子ゲートの回転エラーや、変分量子固有値ソルバーのアンザツ量子回路の深さの不足による表現力不足に起因するコヒーレントエラーは、この手法ではいくらコピー数を増やしても抑制できません。

■部分空間展開法

部分空間展開法は、射影演算子（厳密には射影演算子の数学的性質を満たしていませんが便宜的にそう呼びます）を構築し、ノイズのある量子状態をより正解に近い空間に射影する手法です⁽⁷⁾。量子コンピュータで計算を終えた後、測定結果を読み出す前の量子状態がノイズの影響で理想のものとは異なる場合を考えます。例えば、近年さ

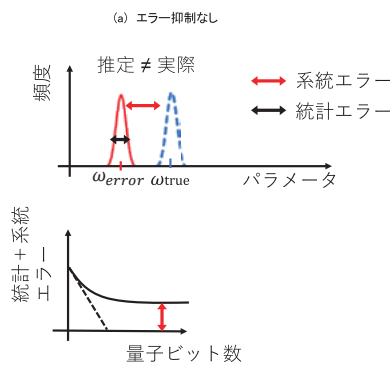
かに研究されている変分量子固有値ソルバーは、分子などのエネルギーがもっとも低い基底量子状態 $\rho_G = |G\rangle\langle G|$ を求める手法ですが、実際にはエラーの影響を受けた別の量子状態 ρ_{noisy} になり得ます。ここで、もしエラーのない量子状態への射影演算子 $\mathcal{P}_G = |G\rangle\langle G|$ が構築できたとしても、射影確率を p_G として、 $\frac{\mathcal{P}_G \rho_{noisy} \mathcal{P}_G}{p_G} = \rho_G$ となり、エラーを取り除くことができます（図5 (a)）。ただし、実際には $|G\rangle$ が非常に大きい量子状態であることから、 \mathcal{P}_G の表式をそもそも得ることができず、射影を正確に行うことはできないので、できる限りエネルギーが低い空間に射影できるような射影演算子（厳密には射影演算子の数学的性質を満たしていないが便宜的にそう呼ぶ）を構築することを試みます。そのような射影演算子をパウリ演算子とその積 P_k を用いて、 $\tilde{\mathcal{P}} = \sum_k c_k P_k$ (c_k は複素数) と表現し、射影後の量子状態 $\rho_{se} = \frac{\tilde{\mathcal{P}} \rho_{noisy} \tilde{\mathcal{P}}^\dagger}{p}$ (p は射影確率) のエネルギーができる限り小さくなるよう

に古典コンピュータで $\{c_k\}_k$ を最適化します（図5）。ここで、どのような P_k を選ぶかは任意性があり、例えば分子の電子軌道の励起演算子などから構築する方法が提案されています⁽⁷⁾。この手法は、コヒーレントエラーはある程度抑制できますが、ビットフリップなどの確率的エラーの抑制には不向きであることが知られています。

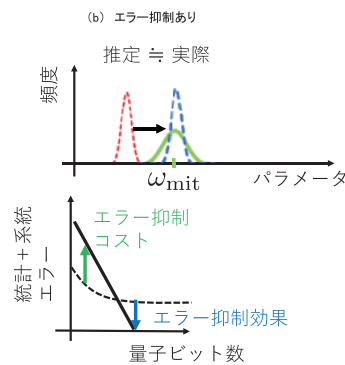
NTTの最近の成果

■量子センシングに対する量子エラー抑制の適用

私たちは、世界で初めて量子エラー抑制を量子センシングに適用するフレームワークを確立しました。量子センシングとは、量子状態をプローブとして用いて、測定したい磁場などと相互作用させ、相互作用した後の量子状態を読み出し、これを繰り返して結果を積算して、その結果から磁場の値を推定する量子情報分野です。量子セン



システムエラーが存在する場合、量子センシングで量子ビット数を増やしても量子優位性のあるエラーのスケールリングを達成することはできない。



量子エラー抑制を行う場合、エラー抑制の影響で統計エラーが増加するが、システムエラーを抑制できるので量子スケールリングが回復できる。

図6 量子エラー抑制(仮想蒸留法)が量子センシングに及ぼす影響

シングで重要となるのは、量子もつれ状態をプローブとして用いる場合、量子ビット数 N に対して、推定された統計誤差が古典では実現できない量子優位なスケールリングが実現できることにあります。しかし、ノイズが測定のたびに揺らいでいる場合は、積算値および推定される磁場の値にシステムエラーが生じてしまい、量子優位性が得られません(図6(a))。私たちは、仮想蒸留法を用いれば、測定のたびにノイズが揺らぐような場合であっても、仮想蒸留法がこのようなノイズを取り除く「フィルター」としての役割を果たし、量子センシングで問題となる系統的错误を高精度に抑制できることを示しました⁽⁶⁾。そして、量子優位性のあるスケールリングが復活できることを示しました(図6(b))。

■一般化部分空間展開法

私たちは、部分空間展開法と仮想蒸留法を特殊な場合としても極めて一般的な量子エラー抑制フレームワークである一般化部分空間法を提案しました⁽⁹⁾。先ほど、部分空間展開法ではパウリ演算子およびその積 P_k を用いて、射影演算子 $\tilde{\mathcal{P}} = \sum_k c_k P_k$ をエネルギーができるだけ下がるように最適化すると述べましたが、一般化部分空間展開法の肝はパウリ演算子(とその積)の P_k を極めて一般的な演算子に拡張したということです。より具体的には、 P_k として量子状態(とそれを含むより複雑な演算子)を採用しました。例えば、 $P_0 = I, P_1 = \rho_{noisy}$ とすると、射影後の状態は $\tilde{\mathcal{P}}\rho_{noisy}\tilde{\mathcal{P}}^\dagger = |c_0|^2\rho_{noisy} + (c_0c_1^* + c_1^*c_0)\rho_{noisy}^2 + |c_1|^2\rho_{noisy}^3$ となり、あたかもノイズのある量子状態により級数展開された量子状態に対応する物理

量の期待値がエラー抑制により計算できます。私たちはこれを累乗部分空間法と呼びます(図5(c))。ほかには、外挿法のエッセンスを射影演算子の構築に活用した誤り部分空間法も提案しました。また、累乗部分空間と誤り部分空間を融合した手法も可能です。一般化部分空間法は部分空間展開法と仮想蒸留法の両方の利点を継承しており、コヒーレントエラー、確率的エラー両方を高精度に抑制することができます。その結果、部分空間展開法、仮想蒸留法よりはるかに高精度な量子エラー抑制が可能になりました。

■参考文献

- (1) S. Endo, Z. Cai, S. C. Benjamin, and X. Yuan: "Hybrid quantum-classical algorithms and quantum error mitigation," J. Phys. Soc. Jpn. 90, No. 3, Article ID: 032001, 2021.
- (2) Y. Kim, A. Eddins, S. Anand, K. X. Wei, E. Van Den Berg, S. Rosenblatt, H. Nayfeh, Y. Wu, M. Zaletel, K. Temme, and A. Kandala: "Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance," Nature, Vol. 618, No. 7965, pp. 500-505, June 2023.
- (3) S. Endo, S. C. Benjamin, and Y. Li: "Practical quantum error mitigation for near-future applications," Phys. Rev. X, Vol. 8, No. 3, 031027, July 2018.
- (4) R. Takagi, S. Endo, S. Minagawa, and M. Gu: "Fundamental limits of quantum error mitigation," npj Quantum Information, Vol. 8, No. 1, Article number: 114, 2022.
- (5) K. Temme, S. Bravyi, and J. M. Gambetta: "Error mitigation for short-depth quantum circuits," Phys. Rev. Lett., Vol. 119, No. 18, 180509, 2017.
- (6) W. J. Huggins, S. McArdle, T. E. O'Brien, J. Lee, N. C. Rubin, S. Boixo, K. B. Whaley, R. Babbush, and J. R.

McClean: "Virtual distillation for quantum error mitigation," Phys. Rev. X, Vol. 11, No. 4, 041036, Nov. 2021.

- (7) J. R. McClean, M. E. Kimchi-Schwartz, J. Carter, and W. A. De Jong: "Hybrid quantum-classical hierarchy for mitigation of decoherence and determination of excited states," Phys. Rev. A, Vol. 95, No. 4, 042308, April 2017.
- (8) K. Yamamoto, S. Endo, H. Hakoshima, Y. Matsuzaki, and Y. Tokunaga: "Error-Mitigated Quantum Metrology via Virtual Purification," Phys. Rev. Lett., Vol. 129, No. 25, 250503, Dec. 2022.
- (9) N. Yoshioka, H. Hakoshima, Y. Matsuzaki, Y. Tokunaga, Y. Suzuki, and S. Endo: "Generalized quantum subspace expansion," Phys. Rev. Lett., Vol. 129, No. 2, 020502, 2022.
- (10) J. Sun, X. Yuan, T. Tsunoda, V. Vedral, S. C. Benjamin, and S. Endo: "Mitigating realistic noise in practical noisy intermediate-scale quantum devices," Phys. Rev. Appl., Vol. 15, No. 3, 034026, March 2021.



遠藤 傑

本稿では、量子エラー抑制の概要について知りたい人から、細かい内容まで知りたい人まで満足いくように書いたつもりです。そのうえで、NTTの量子エラー抑制の最先端の成果を丁寧に解説しましたので、ぜひご一読をお願いします。

◆問い合わせ先

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所
企画担当
TEL 046-859-4003
FAX 046-855-1149
E-mail cd-koho-ml@ntt.com



誤り耐性量子コンピュータの早期実現に向けた取り組み

本稿では、誤り耐性のある量子コンピュータを早期に実現するための新しい取り組みを紹介します。符号化されたまま量子計算を行うときの効率化や量子アルゴリズムの新しい回路効率化手法、また誤り耐性量子計算に統計的な誤り抑制手法を併せて用いるなどの早期誤り耐性量子計算（Early-FTQC）に向けた新しい手法を紹介します。

キーワード：#量子コンピュータ、#誤り耐性量子計算、#早期誤り耐性量子計算

とくなが ゆうき
徳永 裕己

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所

NISQとFTQC

符号を用いたエラー訂正を行わないNISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) コンピュータは、符号化のオーバーヘッドは不要ですが、エラーがどうしても積もっていくため、計算サイズに限界があります。一方で、エラー訂正可能な誤り耐性量子コンピュータ (FTQC: Fault-Tolerant Quantum Computer) には符号化したまま計算するためのオーバーヘッドがあるため、ある程度大きなサイズの量子コンピュータが必要となります。そうすると、図1のようにNISQコンピュータとFTQCの間にそのオーバーヘッド量に対応するギャップが生じることになってしまいます。このギャップはどのようにもないのでしょうか。一昔前はここのギャップは仕方がないという意見が多かったのですが、最近私たちのチームは、このギャップを克服していくためのこれまでにない新しい方法を提示しました。このような動機に基づいた研究の流れは、世界的にも同時期に始まり、現在は早期誤り耐性量子計算 (Early-FTQC) のように呼ばれ世界的な研究のムーブメントになっています。本稿では、誤り耐性量子コンピュータの早期実現に向けた効率化や新しい手法の取り組みを紹介します。

子コンピュータについて紹介しました。この規模の量子コンピュータでどの程度のことか可能でしょうか。チップに載っている量子ビット数は64ビットであり、理想的な状況であれば既存の古典コンピュータによる大規模計算を持ってしてもできない計算ができるといわれています。実際にGoogleは、2019年に53量子ビットを用いて古典的にシミュレーションをすることが困難な量子的な統計効果が現れる計算を発表しました⁽¹⁾ (ただし、この計算は実際に何かの役に立つ計算とは言いづらいものであり、かつ古典計算でも思っていたよりは速く計算ができるという指摘もその後複数出ました)。また、変分量子計算というNISQ時代の効率性を重視したヒューリスティックな量子

計算手法により、古典コンピュータにはない量子的な状態変化が計算にうまく活かされたうえで、高速で役に立つ計算ができる可能性があります。ただし、ここにも注意しないといけない点があり、ヒューリスティックな手法であるがゆえに、計算量的に高速になる根拠を示すことが難しい点、そして理想的でない場合の現実的なノイズやエラーの問題があります。現状の量子コンピュータが1回のゲート操作をするときに起こるエラーは0.1~1%程度であるとされており、大まかにいうとゲート数の分だけエラーが加算されていくといえるので、エラーへの対処が何もなければ1000回のゲートを行うのもなかなか厳しい状況です。この状況でエラーへの対抗手段として現在

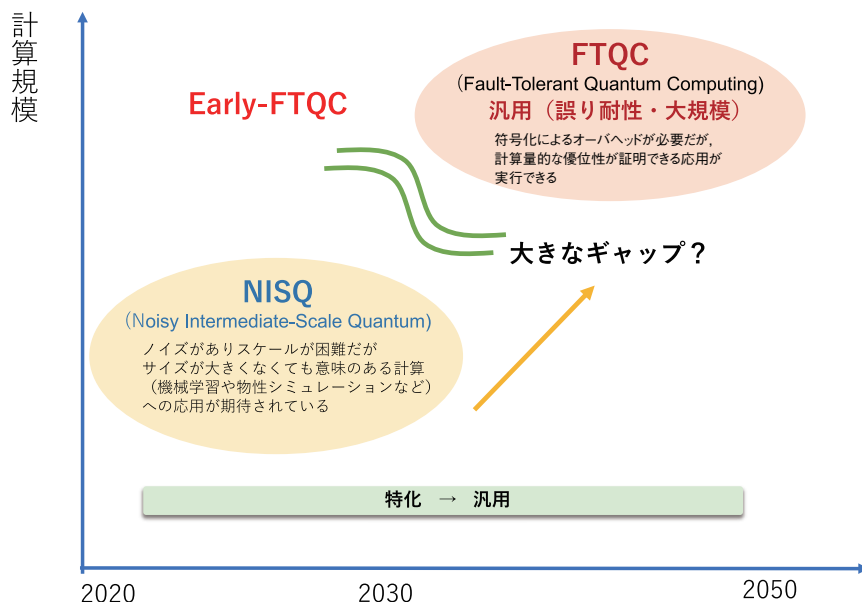


図1 NISQコンピュータとFTQCの間のギャップ

NISQコンピュータの可能性と限界

本特集記事『超伝導量子コンピュータのシステムの設計と開発』において、現在クラウドサービスとして動いている超伝導量

でも用いることが可能な方法が、本特集記事『量子エラー抑制とその進展』で紹介した量子誤り抑制です。量子誤り抑制を用いると、上記のような計算がエラーに埋もれてしまうような状況に対して、量子計算を何度も実行して得られた複数の結果から、エラーを統計的に推定し、計算中に起きたエラーを修正することにより正しい計算結果を得ることができます。ただし、これはエラーが多ければ多いほど推定が困難になるため、量子計算を繰り返し実行し測定を行うコストが大きくなります。実際に、エラー数に対して指数関数的に推定が困難となっていくしますので、現実的には誤り抑制できる計算規模には限界があります。ただし、2023年6月にIBMから、量子誤り抑制も巧妙に活用することで、127量子ビットの超伝導量子コンピュータを用いて古典計算でも解くのが困難な物性物理の問題を解いたという結果も発表されたように⁽²⁾、NISQ領域において古典計算を超える有用な計算が行える可能性も引き続き追求されています（こちらについてもやはり古典的にもっと早く計算できるのではという議論も進んでいます）。

FTQCの効率化

さて、それでは量子コンピュータはこのノイズやエラーを克服できず、これ以上大きくスケールすることはできないのでしょうか。これについては、量子コンピュータにも符号を用いたエラー訂正が可能であることが知られており、符号化したまま量子計算を行い続ける誤り耐性量子計算（FTQC）という手法があることが分かっています。これには符号化したまま量子計算を行うためのオーバーヘッドが必要であり、必要な量子ビット数は符号化しない場合の1000~10000倍程度ともいわれています。ただし誤り耐性量子コンピュータのアーキテクチャを考慮した符号化や復号の効率化、コンパイラの研究開発はまだ始まったばかりともいえ、今後の効率化には非常に期待がかかります。私たちはこのような効率化の研究をこれまでに複数行っており、ここではそのうち2つを紹介します。1番目は符号の処理の効率化についてです。現在、量子計算の標準的な符号は表面符号と呼ば

れるもので、2次元格子状に配置した量子ビット間の近接相互作用において比較的効率的に動作し、エラー耐性しきい値も良い値が出る符号です。この符号を用いて符号化したまま量子計算を行う手法の有望なものが格子手術という手法です。これの効率化は、図2のように計算の時間軸も考慮した3次元における計算パスのスケジューリング問題になることを示し、いくつかの有望な効率化を行いました⁽³⁾。2番目は量子アルゴリズムの回路効率化についてです。量子化学や物性物理のハミルトニアン固有エネルギーを主要な量子アルゴリズムである量子位相推定で求めるタスクは、FTQCで実用的な問題に対し量子優位性を示す代表的なアプローチです。Qubitization^{(4), (5)}は過去の手法と比較して少ないリソースでハミルトニアンを量子位相推定可能なかたちに変換する手法です。初期のFTQCにおいて優位性のある計算の実現を早めるためには、このQubitization中の回路要素数を最適化する必要があります。本研究では、ハミルトニアンの構造を利用してFTQCにおいてコストのかかる操作であるTゲート操作の数を削減することができました。具体的にはSchwingerモデルに対する回路に対して2次多項式的なTゲート数の削減に成功しました⁽⁶⁾。

Early-FTQC

前節で、FTQCとその効率化について紹介しましたが、FTQCそのものの計算の効率化にもどこかでは限界があり、どうして

もオーバーヘッドがかかることは否めません。ではどの程度から有用なFTQCは行えるようになるのでしょうか。図3にFTQCのレジームを表しました。横軸は符号化された量子状態に対して行う論理的な演算回数です。符号化されたまま演算するオーバーヘッド込みで1回と数えます。縦軸はその論理演算のエラー率、つまり符号化をしたにもかかわらず直しきれないエラーが論理演算ごとに起こる確率です。論理演算数が大きく、論理エラー率が小さいほど大きなFTQCを実行できます。この図の緑の線から左の領域は計算サイズが小さすぎて古典シミュレーションが可能な領域です。エラー率が大きいとさらにシミュレーションしやすくなるので上部のほうで線が曲がっています。茶色の線の右側がLong-term FTQC、ここは意味のある応用に対して量子計算の計算量的な優位性が証明できるアルゴリズムが実行できる領域で、長期的にめざすFTQC領域を指します。そして、その間が論理的な量子超越性を満たす境界からLong-term FTQCの境界までの領域であり、私たちは論文⁽⁷⁾において、この領域をEarly-FTQCと呼んでいます。ここにはヒューリスティックに意義のある量子計算が存在していると考えられ、誤り耐性量子計算のもっとも初期に行われるものがこの領域に当たると考えられます。このEarly-FTQCの初めの時期に行われる量子アルゴリズムはNISQアルゴリズムと共通するようなものも多いかもかもしれませんが、NISQとの大きな違いは、すでに誤り耐性を獲得しているので、その後の量子コン

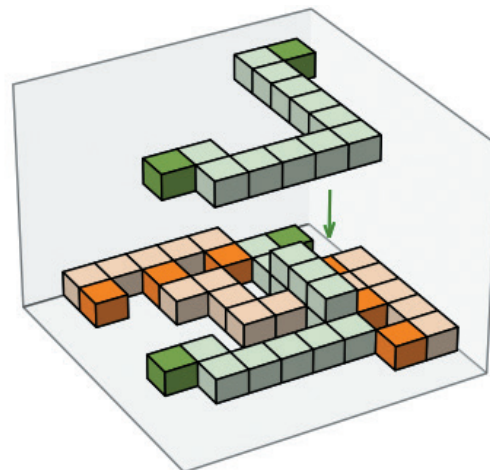


図2 FTQCにおける格子手術のスケジューリング

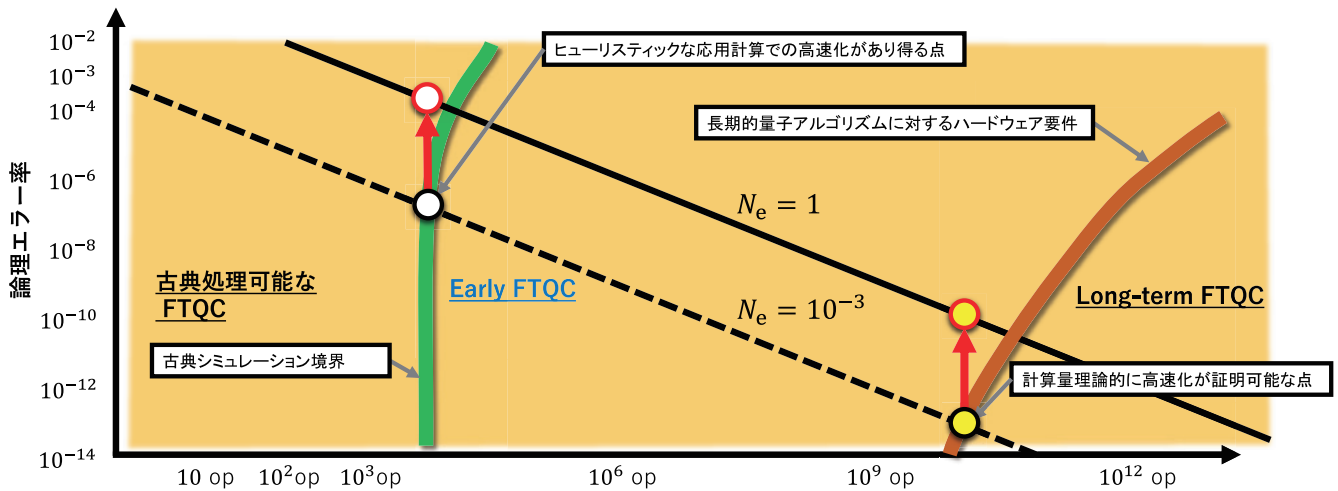


図3 FTQCのレジーム

コンピュータのスケールアップに応じて大きな計算が引き続き行い続けられる、つまり計算サイズが大きくなるにつれてより良い計算ができる可能性が広がっていくという点です。

さて、この初期の誤り耐性量子計算 Early-FTQCの実現をさらに早める方法はないでしょうか。前節で説明したような効率化の手法はもちろん重要であり効果的です。ほかに、古典計算の事後処理を追加することで量子ビット数を減らせるようにアルゴリズムの回路を書き換えるというような提案もされています⁽⁶⁾。さらに私たちは、最近全く新しい手法として、これまでNISQ向けの技術だと思われてきた量子誤り抑制をFTQCに用いることが可能であることを示し、Early-FTQCの実現をさらに早められることを示しましたので、これについてここで紹介します⁽⁷⁾。私たちは前述した量子誤り抑制の1つである擬確率法をFTQCに適用する方法を考案しました。NISQのとくときと異なり、ここでは物理エラーではなく、論理エラーの誤り抑制を行います。図4のように、FTQCにおいてはエラー訂正のためのリカバリー処理をパウリ演算という基本的な量子演算を用いて行いますが、これはシンプルな演算なため、最後の古典事後処理として一括にまとめて効率的に行えることが分かっています。擬確率法による量子誤り抑制の処理も多くの場合は同様にこのパウリ演算で行えるので、この古典事後処理に組み込むことが可能となります(パウリ演算で行えない場合もあるの

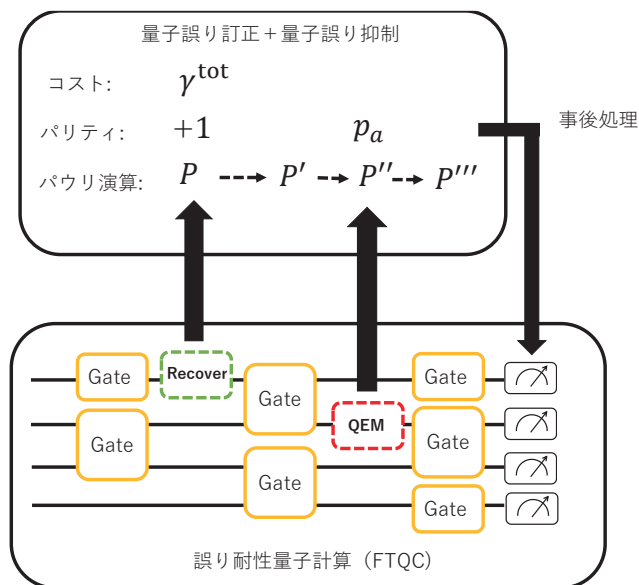


図4 誤り耐性量子計算への量子誤り抑制の適用

ですが、この場合は物理的に処理を行います。詳細は参考文献(7)を参照)。ここで重要となってくるのは量子誤り抑制にかかるコストです。誤りの量に応じて結果の分散が広がるので、統計的に正しい結果を見積もるために計算を繰り返し行うコストがかかります。NISQコンピュータにおいては誤り訂正機能がないため、計算サイズが大きくなるにつれ誤りの量が大きくなります。量子誤り抑制にかかるコストは指数関数的に大きくなっていくので、量子誤り抑制を使えるサイズには現実的に限界が来てしまいます。FTQCにおいては、誤り訂正機能があるので、計算サイズが大きくなっても適度なパラメータにおいて常に量子誤り抑

制が使える領域が存在することになります。通常FTQCにおいては、正しい結果を得るために計算結果に残るエラーの数を1より十分小さくなるように符号距離、オーバーヘッドを設定しますが(図3の $N_e = 10^{-3}$ のライン)、量子誤り抑制が使えるのなら、FTQCの計算結果のエラー数を1程度にまで緩めて(図3の $N_e = 1$ のライン)、符号距離を短く、誤り訂正のために必要なオーバーヘッドを小さくすることが可能となります。図3において赤い矢印がこのことを示しており、これによりEarly-FTQCの領域が拡大していることが分かります(Long-term FTQCの領域も同様に拡大しています)。実際に量子誤り抑制を用いることで

FTQCに必要な量子ビット数を80%程度削減できる場合があることを私たちは示しました。別の見方をすると、同じ量子ビット数を使うならば、誤り抑制の効果により量子演算の回数をさらに1000倍増やした大きな計算ができることを示しました。

Early-FTQCのさらなる進展

Early-FTQCの研究はその後さらにさまざまな意味を伴いながら進展しています。最近さらには大きな意味合いでのEarly-FTQCも検討されています。先ほどは初期のFTQCおよびさらにその実現を早めるという意味でのEarly-FTQCでしたが、最近ではまさにNISQとFTQCの間といえるような「部分的な」FTQCという意味でのEarly-FTQCの概念も登場しています。例えば、量子計算における符号化のオーバーヘッドが大きいことが知られている回転ゲート部分は誤り訂正をせずに、符号化のオーバーヘッドが小さいクリフォードゲートと呼ばれる回路部分を誤り訂正する部分的なFTQCが提案されています⁽⁹⁾。この場合、回転ゲート部分に載るエラーが積み重なるので、これにより計算サイズの限界が決定しますが、NISQコンピュータに比べて大きな量子計算が可能になる可能性があります。私たちからも量子誤り抑制と量子誤り訂正の中間的な処理をめざすような擬似量子誤り検出という提案も行っています⁽¹⁰⁾。これらのようにNISQとFTQCの間をつないでいくような研究開発が近年スタートしています。この間を自由に適度な誤り訂正能力を選択し、つないでいくことが可能となれば量子コンピュータのサイズが大きくなるにつれて、符号化に伴うギャップが起こることなく、常に以前より良い計算が可能となる量子コンピュータの開発を続けていくことが可能となります。そのような時代が後もう少しでやってくるのかもしれない。

■参考文献

- (1) F. Arute, K. Arya, R. Babbush, D. Bacon, J. C. Bardin, R. Barends, R. Biswas, S. Boixo, F. G. S. L. Brandao, D. A. Buell, B. Burkett, Y. Chen, Z. Chen, B. Chiaro, R. Collins, W. Courtney, A. Dunsworth, E. Farhi, B. Foxen, A. Fowler, C. Gidney, M. Giustina, R. Graff, K. Guerin, S. Habegger, M. P. Harrigan, M. J. Hartmann, A. Ho, M. Hoffmann, T. Huang, T. S. Humble, S. V. Isakov, E. Jeffrey, Z. Jiang, D. Kafri, K. Kechedzhi, J. Kelly, P. V. Klimov, S. Knysh, A. Korotkov, F. Kostritsa, D. Landhuis, M. Lindmark, E. Lucero, D. Lyakh, S. Mandrà, J. R. McClean, M. McEwen, A. Megrant, X. Mi, K. Michielsen, M. Mohseni, J. Mutus, O. Naaman, M. Neeley, C. Neill, M. Y. Niu, E. Ostby, A. Petukhov, J. C. Platt, C. Quintana, E. G. Rieffel, P. Roushan, N. C. Rubin, D. Sank, K. J. Satzinger, V. Smelyanskiy, K. J. Sung, M. D. Trevithick, A. Vainsencher, B. Villalonga, T. White, Z. J. Yao, P. Yeh, A. Zalcman, H. Neven, and J. M. Martinis : "Quantum supremacy using a programmable superconducting processor," *Nature*, Vol. 574, pp.505-510, Oct. 2019.
- (2) Y. Kim, A. Eddins, S. Anand, K. X. Wei, E. van den Berg, S. Rosenblatt, H. Nayfeh, Y. Wu, M. Zaletel, K. Temme, and A. Kandala : "Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance," *Nature*, Vol. 618, pp.500-505, June 2023.
- (3) 浜田・鈴木・徳永 : "時間軸方向を活用した効率的な格子手術のスケジューリング," 第8回 量子ソフトウェア研究会, 2023.
- (4) R. Babbush, C. Gidney, D. W. Berry, N. Wiebe, J. McClean, A. Paler, A. Fowler, and H. Neven : "Encoding electronic spectra in quantum circuits with linear t complexity," *Phys. Rev. X*, Vol. 8, No. 4, 041015, 2018.
- (5) G. H. Low and I. L. Chuang : "Hamiltonian simulation by qubitization," *Quantum*, Vol. 3, p. 163, 2019.
- (6) 小泉・鈴木・徳永 : "Pauli積集合による量子位相推定回路の効率化," 第48回 量子情報技術研究会, 2023.
- (7) Y. Suzuki, S. Endo, K. Fujii, and Y. Tokunaga : "Quantum Error Mitigation as a Universal Error Reduction Technique: Applications from the NISQ to the Fault-Tolerant Quantum Computing Eras," *PRX Quantum*, Vol. 3, No. 1, 010345, March 2022.
- (8) L. Lin and Y. Tong : "Heisenberg-Limited Ground-State Energy Estimation for Early Fault-Tolerant Quantum Computers" , *PRX Quantum*, Vol. 3, No. 1, 010318, Feb. 2022.
- (9) Y. Akahoshi, K. Maruyama, H. Oshima, S. Sato, and K. Fujii : "Partially Fault-tolerant Quantum Computing Architecture with Error-corrected Clifford Gates and Space-time Efficient Analog Rotations," arXiv:2303.13181.
- (10) K. Tsubouchi, Y. Suzuki, Y. Tokunaga, N. Yoshioka, and S. Endo : "Virtual quantum error detection," arXiv:2302.02626.



徳永 裕己

誤り耐性量子コンピュータの実現に向けては大きな谷があると思われてきましたが、最近ではEarly-FTQCのような「持続的」な研究開発に向けての新たな提案も生まれており、今後もブレイクスルーが期待されます。

◆問い合わせ先

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所
企画担当
TEL 046-859-4003
FAX 046-859-1149
E-mail cd-koho-ml@ntt.com



主役登場

量子コンピュータの設計と開発

鈴木 泰成 Yasunari Suzuki

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所
准特別研究員

現代の計算機科学は、一見すると手に負えない複雑な情報処理を階層的な抽象化によりシンプルな物理実装に還元し、驚くほど効率的な演算と自在なプログラミングを可能にします。今日の大規模なシステムを支えるロジックは、時に美しく、時に泥臭く、その技術の妙は多くの人を魅了してきました。私もこうした魅力に取りつかれた1人で、計算機の価値に変革を与えるような貢献をしたいと考えるようになりました。

現代の計算機に大きな影響を与えた変革の1つに情報のデジタル化があります。私たちの知覚する音声や画像は、光や物質を通して得られるアナログな情報です。一方、私たちの音声や動画のやり取りや処理は、ほとんどのケースでデジタルな形態を経由して演算し転送されます。このように情報をアナログな表現とデジタルな表現の間で変換するには一定のオーバーヘッドが生じるため、例えば初期の情報通信はアナログ信号でのやり取りが主流でした。しかし、情報処理技術が理論と実装の両面で発展し、デジタルな情報のロバスト性や情報処理の容易さが変換のコストを上回るにつれ、デジタルに処理される応用領域が拡大して今に至っています。このように、データをデジタルな形態で扱うという変革は、計算機の性能と活用の幅を大きく広げました。こうした計算機の基本的な設計の考え方に根幹的な変革を与えようという新たな動きがあります。それがデータを量子力学に従う情報単位である量子ビットとして扱えるようにし、情報処理の幅を広げる量子計算と

いうパラダイムです。

データを量子力学に従う情報単位で表現できるようにするには、計算機のありようを大きく変化させます。量子情報を活用することによる変化はより効率的なアルゴリズムや安全な通信プロトコルを可能にする一方、デバイスの実装コストを引き上げ、拡張を技術的に難しくし、現在の計算機のシステムスタックにおける多くの前提に大きな変更を迫ります。量子的な情報を扱う技術的なコストに対し私たちがこれらを扱う技術や方法論に未熟であるため、現状では基幹となる情報処理システムに量子計算を組み込むには至っていません。今後の技術の発展の中で量子的なデータを階層的に抽象化し、実装し、プログラムし、効率化し、計算機の機能を実用的に拡張できるのでしょうか。これは量子物理から計算機科学への大きな挑戦であるといえます。

量子計算を次世代の情報処理で価値ある技術にするべく、私はこれまで現代の計算機やソフトウェアの考え方をうまく量子計算の開発に活用するための取り組みを行ってきました。量子計算の理論的な限界や、量子的な情報を扱うための小規模な物理実験は、これまでさまざまな側面から行われています。こうした基礎研究で得られた成果は一般性がある一方、技術的な実装可能性を具体的に議論し、大規模な実装になるには、現代の計算機技術を支える考え方を活用し、計算機を定量的に評価しながら最適化することが必須となります。しかし、

こうした取り組みは実現に向けた研究開発が本格化したのが最近であるために、単に未開拓であるだけでなく、システムを定量的に評価するための参照実装や基盤も未成熟な状況です。私はこうした課題を解決するため、誤り訂正メモリのロジックの実装、命令セットの定義、実用的なベンチマークの設計、コンパイラの実装、プロファイラの構築とボトルネック解析に基づくコンパイル最適化、集積化されたデバイスの評価とキャリブレーションの自動化などに取り組んできました。また、こうした取り組みを通し、量子コンピュータを計算機として扱い最適化することが性能の持続的な改善に有効であることを開発と研究の両面から示してきました。

量子計算のための計算機の考え方の再設計は、その前提の違いと変更の大きさから日進月歩で変化する「計算や情報とはどのようなべきか」という考え方の根本を再現する営みになりがちです。私のこれまでの取り組みも、私が思う「かくあるべき」を量子の特性に合わせて再現する営みといえます。精度良く量子計算のあるべき姿を描き出すには、多くの技術レイヤーで基盤的な研究からソフトウェア開発まで、幅広い領域での連携が必須となります。今後も幅広いコミュニティとの議論を通し、量子という場で計算機という機能はどのように分解され再構築されるべきかを明らかにし、具体的な開発を通して量子コンピュータを構築する方法論を開拓していきます。

NTT物性科学基礎研究所
上席特別研究員

山本秀樹 Hideki Yamamoto

独自の薄膜合成法で新高温超伝導体の創製や新物性の発現に挑む

世界の最先端を行くNTTの複合酸化物薄膜作製技術を、新たに開拓した原料の逐次供給技術と組み合わせることで、分子層の厚みを持つ異なる物質を交互に積み重ねた人工物質の作製を行うことができるようになり、新しい超伝導体の発現につながりました。また薄膜作製技術とプロセスインフォマティクス技術との融合により、すでに知られていた酸化物の世界最高品質の薄膜を効率的につくることができるようになり、これまで実証されていなかった新しい物性の観測につながりました。新物質の探索・創製とその物性解明をテーマに研究に取り組むNTT物性科学基礎研究所 山本秀樹上席特別研究員に新物質・新発見と、環境・エネルギー関連で期待のかかる超伝導体への思い、そしてチームワークをベースとした研究者としての姿勢・考え方を伺いました。



複合酸化物超格子作製技術で新物質創製・新発見

現在、手掛けていらっしゃる研究について教えていただけますでしょうか。

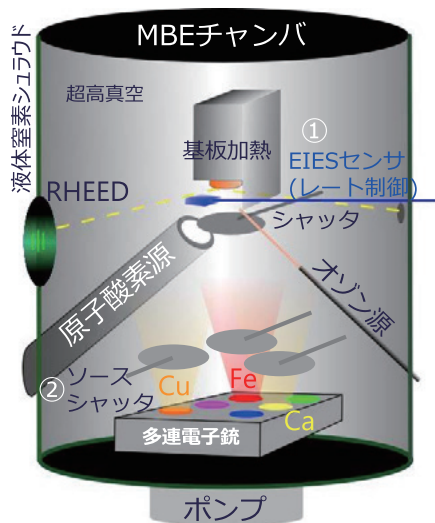
私は新物質の探索・創製とその物性解明をテーマの軸として研究を進めています。前回の本欄登場から約3年の間、私たちの研究チームでは、①人工超格子構造作製による新銅酸化物超伝導体の発見、②先駆的・効率的な高品質薄膜作製手法の開拓、③超高品質SrRuO₃薄膜を用いた磁性ワイル半金属状態の実証等の研究成果を挙げてきました。

まず、①について説明します。「超伝導」は、ある条件の下で物質内の電気抵抗がなくなり、発熱等の損失がなく電流が流れ続ける現象で、そのような性質を示す物質を超伝導体と呼びます。私たちは、新製法でこれまで知られていなかった超伝導体を創製しました（新超伝導体の発見）。超伝導の発現には、物質を極低温まで冷やす必要がありましたが、最近では、水素化物でマイナス25度くらい（超伝導転移温度 $T_c \approx -25^\circ\text{C}$ ）と、超伝導発現温度が室温に近づいた物質も発見されており、室温で超伝導を発現する未発見物質の存在が示唆されます。ただし、 $T_c \approx -25^\circ\text{C}$ の水素化物は、物質そのものが200気圧程度の超高圧下でしか安定的に存在しません（常圧では壊れてしまう）。この水素化物の次に T_c が高い物質群に、銅酸化物超伝導体があります。 T_c の最高値は-130℃程度ですので、より低温にする必要がありますが、常圧下

で超伝導を発現するという利点があります。究極の目標である常圧下・室温で超伝導を発現する物質の発見に向けて、「高圧下で高い T_c を示す水素化物をベースに常圧下で安定化できそうな物質を探索する」「常圧下で比較的高い T_c を示す銅酸化物をベースに T_c が高そうな（ T_c を上げられそうな）物質を探索する」の2つのアプローチがあり得ますが、私たちの人工超格子構造作製は、後者になります。

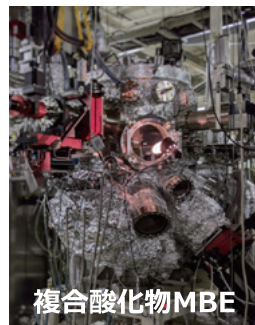
銅酸化物超伝導体の結晶構造は超伝導発現層と電荷貯留層が規則的に積み重なった自然超格子構造になっています。そのため、古くから、薄膜作製手法を用いて超伝導発現層と電荷貯留層とを交互に積み上げ人工超格子構造を作製する、ボトムアップ型の物質創製が有望視されてきました。しかし、結晶構造が複雑で、それぞれの層が大きく異なる結晶構造を持つことから、長らく固相反応（粉混ぜ+焼成）による自然超格子構造作製というトップダウン型の物質創製に頼らざるを得ませんでした。私たちの酸化物薄膜作製技術は、近年のさらなる技術開発（**図1**）とも相まって、その困難な人工超格子作製を可能にするレベルまで成熟しましたので、超伝導発現層として $\text{IL}^*-\text{CaCuO}_2$ という化合物、電荷貯留層として別の酸化物を組み合わせた人工超格子の設計・作製に挑みました。ここで、 $\text{IL}-\text{CaCuO}_2$ は単独では、エピタキシャル薄膜等の限られた環境でのみ結晶構造を安定化できる物質であるため、組み合わせる相手の物質には、 $\text{IL}-\text{CaCuO}_2$ とほぼ同じ反応温

* IL：無限層構造という結晶構造を表す略語。



Copyright 2023 NTT CORPORATION

- ① Ca, Cu, Feの供給レートを同時かつ高精度に制御する技術
- ② NTT独自の供給レート制御と連動させるためにカスタム設計されたソースシャッタ制御技術



MBE: Molecular Beam Epitaxy

図1 高品質複合酸化物超格子作製技術

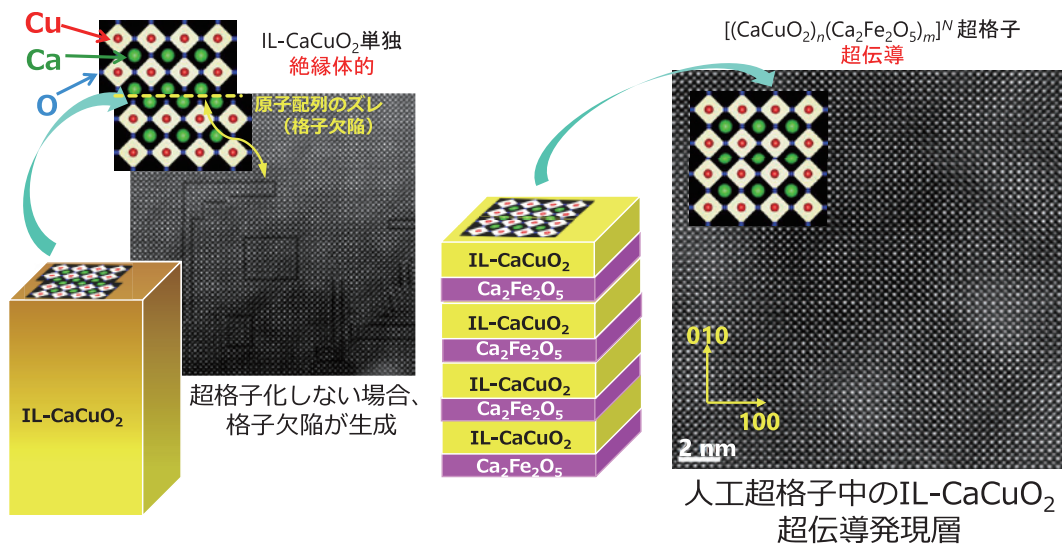


図2 超格子構造で超伝導が発現する理由

度、酸化力などの作製条件で成膜でき、さらに格子定数がほぼ一致するといった制約が課されます。試行錯誤の結果、このような制約をクリアする物質としてCa₂Fe₂O₅という物質に辿り着き、設計した超格子の作製と超伝導の発現を達成できました。

さらに、原子レベルの分解能を持つ超高分解能走査透過電子顕微鏡 (STEM) と、顕微鏡で見えている原子の像が何の元素かを見分ける元素弁別能を持つ電子エネルギー損失分光装置 (EELS) により原子レベルで結晶性の評価が可能となりました。この原子配列の可視化技術は、結晶構造が異なる物質どうして超格子を作製する条件を最適化するうえで大きな力となりました。

今回新たに合成・発見した、人工超格子の銅酸化物高温超伝導

体 [(CaCuO₂)_n/(Ca₂Fe₂O₅)_m]^NのT_cは-223℃以下であり、これ自体は銅酸化物の最高記録に及びませんが、全く結晶構造が異なる2つの層をボトムアップ的に積み重ねていく方法で新超伝導体を作製できることを実証できました。IL-CaCuO₂と組み合わせる相手の物質を変えて人工超格子を作製していくことで、さらにT_cが高い物質を創製できる可能性が示されています。また、超格子構造中で超伝導を担うIL-CaCuO₂層は、それ単独では超伝導を発現しないという謎があったのですが、今回の研究を通じて、超格子中に埋め込むことでIL-CaCuO₂層が超伝導を発現するメカニズムを明らかにすることができました。それは、IL-CaCuO₂層単独では、図2左のように、結晶配列のズレが発生する(伝導面であ

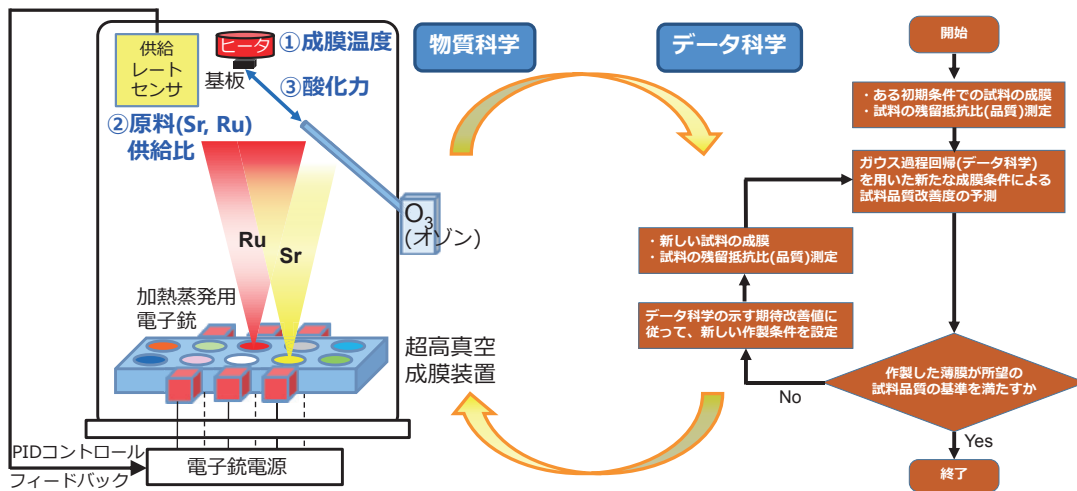
るCuO₂面が分断されてしまう)のに対し、超格子中に埋め込んだ場合には、図2右のようにこの伝導面の分断が生じないことです。

こうした成果は、研究チームの池田主任研究員、Krockenberger主任研究員が中心となって創出されました。4報の論文^{(1)~(4)}として出版されているほか、2021年に開催された国際会議での招待講演、また2023年11月と12月に開催される2つの国際会議での招待講演につながっています。さらに、池田主任研究員が、第50回(2021年春季)応用物理学会講演奨励賞、第14回応用物理学会超伝導分科会研究奨励賞(2023年3月)を受賞しており、研究を外部からも高く評価していただいています。今後は、超伝導転移温度の高温化をめざして、1超格子セルに含まれるIL-CaCuO₂層の層数を変化させたり、高いT_cを示す物質の電荷貯留層の種類に関する経験則を活用したりすることで、物質設計指針を明らかにしていきたいと考えています。

また、そのような営みを通じて、銅酸化物での超伝導発現機構を解明することに取り組んでいくつもりです。IL-CaCuO₂に代表される無限層構造物質の研究をはじめ、私たちは、銅酸化物超伝導体での超伝導発現機構解明のカギを握る「電子相図」が、超伝導発現面であるCuO₂面の完全性の影響を強く受けていることを主張してきました⁽⁵⁾。これまで私たちが対象としてきた物質とは少し異なる銅酸化物ですが、ごく最近、他の研究グループからも類似の主張がなされており⁽⁶⁾、超伝導発現機構の解明という面からも興味が尽きません。

新しい素材の創製や現象の解明には薄膜の作製技術が重要なのですね。

新しい物質や素材は、ビーカーやフラスコの中での反応、酸化物の場合は、原料粉を混ぜて炉で焼成する固相反応で、バルク物質を合成することにより行われるのが一般的です。これに対しNTTでは、真空中で原料を供給して反応させる薄膜作製法により新物質を創製すべく、①高速に加速した電子を原料に衝突させて加熱することで蒸発に2000℃以上への加熱を必要とする高融点元素でも供給できる技術、②電子衝撃発光分光法(EIES)を利用して複数の元素の蒸着レートを高精度・リアルタイムに制御し安定に供給する技術、③オゾンや原子酸素を利用して超高真空中で酸化を行う技術を備え、高制御性・高再現性を有する、世界最先端の「蒸着レート高精度制御マルチソース酸化物MBE成膜技術」を長い年月をかけて開発・改良してきました。この技術を用いて、新物質の合成や既知物質の高品質薄膜の作製などを行うことができますが、最高品質の薄膜を得るには、数100回から時には1000回に及び成膜(trial-and-error)を行って作製条件を最適化する必要がありました。これに対し、プロセスインフォマティクスの手法を用いて、薄膜成長条件の最適化に適した方法論・アルゴリズム・プログラムを構築し、それを活用することで、50回以下の成膜回数で効率的に、世界最高品質の薄膜を作製できるようになりました(図3)。これが、②先駆的・効率的な高品質薄膜作製手法の開拓です。前述の超格子作製技術の確立に加えて、ここ5年くらいで急速な進歩を遂げた技術になります。こちらは、チーム内の若林准特別研究員を中心に、NTT物性科学基礎研究所(物性研)とNTTコミュニケーション科学基礎研究所(CS研)の連携により創出された成果です。



SrRuO₃作製時に最適化すべき成膜パラメータ(①成膜温度、②原料供給比、③酸化力)。①~③自体は独立に制御できるが、薄膜の品質は、3つのパラメータの複雑な関数で決まる。

今回開拓した機械学習援用薄膜作製法のフローチャート。

図3 物質科学とデータ科学の融合

この技術の開発が、③超高品質SrRuO₃薄膜を用いた磁性ワイルド半金属状態の実証に結実しました。SrRuO₃は、金属性と強磁性とを同時に示す酸化物であること、酸化物エレクトロニクスで広く研究されている多数の他の複合酸化物と同様、ペロブスカイト構造を持つ物質であることなどから、物性解明・応用の両面から精力的に研究されてきました。バルクの単結晶をつくるのが容易ではなく、近年まで一定サイズ以上の単結晶が得られなかったことから、物性研究も主に薄膜試料を用いて行われてきた歴史があります。私たちは、上記の先駆的・効率的な高品質薄膜作製手法である ML-MBE (Machine-Learning-Assisted Molecular Beam Epitaxy) 法を用いて、世界最高品質のSrRuO₃薄膜の作製に成功し、この最高品質化により、SrRuO₃が金属状態・強磁性状態・磁性ワイルド半金属状態を同時に内在するという極めて特殊な量子状態にある、世界初の物質であることを実証しました^{(7)~(9)}。これらの成果は、15報に迫る多くの論文出版に至っています。

ある分野の常識は別の分野の非常識、異なるバックグラウンドの研究者チームで非常識を新常識に

研究者として心掛けていることを教えてください

現在、研究はチームとして行っているのですが、チームをマネジメントする立場として、課題やテーマを探るとき、また実験結果を解釈するときに、俯瞰的に眺めるといことを心掛けています。テーマに関しては、まず大きなテーマを設定し、後は現場の人たちの自主性を尊重して任せるようにしています。もちろん、私自身の経験やノウハウを基にアドバイスもしますし、その経験値によって解決できる問題もあるのですが、そこに重きを置きすぎると、発想や研究がどんどん常識的なところに向かっていくというジレンマが起きます。世代の異なるメンバからなる研究チームの強みを最大限発揮するためには、このバランスに留意する必要があると思っています。一方、世代によらず、ある分野の常識は別の分野の非常識といったことはよくあります。幸いなことにチームのメンバの専門やバックグラウンドはそれぞれ異なっているため、こうした人たちがディスカッションしながら研究を進めることで、思いがけない着想や結果が出てくることもあり、昨日までは非常識と思われたことが、新たな常識となることもあります。

それからチームとして研究を進めていくうえで、フェイス・ツー・フェイスで話せる機会を大切にしていきたいと考えています。マネジメント関係のデスクワークや会議も多く、なかなかメンバと直接話す時間を取ることもできませんが、時間が限られている分、逆にその重要性が身にしみる気がします。コロナ禍の自社制限下では、なるべく実験に携わるメンバの出勤を優先し、自身は在宅ワークにシフトしていました。現在では、自社制限もなくなり、実験室等で対面によりディスカッションすることで、テーマや成

果への相互理解が深まることを実感しています。それを次なる発見につなげていけると良いですね。

さて、物性研には、ノーベル賞受賞者を含む外部の著名な研究者に委員をお願いしている「アドバイザーボード」という外部評価委員会があり、2年に1回、委員の先生に御来所いただいて議論を行い、研究体制・内容・進捗への評価や提言等をいただく、「アドバイザーボードミーティング」を、これまでに12回開催しています。コロナ禍の2021年はオンラインで開催せざるを得なかったのですが、私が行ったプレゼンテーションに対して、ある先生から「This research effort is unique in the world, and this presentation is now achieving incredible results.」というコメントをいただきました。思うように実験や研究が進められず、また先生方とも直接議論できずに悶々とした状況下でしたが、このコメントには大いに勇気づけられました。

今後研究者として何をめざしますか。

常圧下室温超伝導体の発見は、超伝導の研究に携わる研究者が抱えている究極の目標です。さまざまな探索・物質合成戦略があり得ると思いますが、私は、そのような物質を薄膜で合成・発見することに挑みたいと思っています。具体的にどんな組成式と結晶構造を持った物質を狙うべきかについては、さらなる検討・検証が必要な段階ですが、幸い、近年の理論・計算科学の進歩によって、まだ合成されていない物質の安定性・電子状態を高い精度で予測することができるようになってきました。また、未発見の仮想物質の格子の状態や物質中の電子・格子相互作用の大きさを見積り、超伝導転移温度を予測することもある程度は可能になってきています。共同研究等で外部の力も借りつつ、このようなアプローチも取り入れていくことを計画しています。

仮に新物質が発見されたとしても、その物質が材料として使われるようになるまでには一定の時間を要するのが常ですが、常圧・常圧で超伝導を発現する材料が実用化されれば、ロスレスで直流電流を流して送電・給電することができ、また回路中の配線に使用すれば発熱の問題も大幅に低減されますので、まさに環境・エネルギー問題に大きく貢献できると期待しています。超高圧下とはいえ室温に近い温度で超伝導を発現する物質が見つかった時代に研究ができる幸運に感謝しつつ、研究者としてこの一朝一夕にはいかない非常に大きな目標に向かって挑戦していきたいと考えています。

研究プロセスを効率化して寄り道もしよう

後進の研究者へのメッセージをお願いします。

まずは、コロナ禍という大きな逆風もありながら次々と新しい成果を創出したチームメンバの皆さん、それから、CS研をはじ

め連携してくださった方々の誠心誠意な取り組みに感謝したいと思います。次に、必ずしも直接私たちの研究に携わっていない方々も含めた後進の皆さんへ。限られた時間で、実績と成果を出していくために、タイムパフォーマンスを上げることは重要です。ここに意識が向く傾向にあるのは当然なのですが、時には寄り道も大切ということも申し上げたいと思います。前述の超伝導を発現する人工超格子の研究でも、いかにも最短距離を走ったようなお話になるのですが、実際はかなりの寄り道がありました。その結果、格子欠陥による格子配列のズレという予想外の現象を発見し、それを防ぐという超格子化の意義を深く理解したうえで、研究を進めることができました。プロセスインフォマティクスによる成膜条件最適化過程の効率化は、この話と矛盾するようにも思われますが、この効率化によってSrRuO₃の研究でも寄り道する余裕が生まれた面もあります。

そして、機会があれば、一度海外滞在を経験できると良いと思います。海外に滞在するということは、少なくとも短期的にはその時点での研究が中断することを意味しますし、仕事、家庭・生活の両観点で、「今なら万事整って何の問題・心配もなく海外に滞在できる」というタイミングは、ほぼ巡ってこないのではないかと思います。また、最近では、Web会議システム等により、学会等で海外の人たちと日常的にコンタクトをとることもできます。それでもなお、海外に滞在する経験には大きな意義があると思います。よく言われる、文化の違いや、考え方の違いを肌で感じることはその一例ですが、その他にも言葉ではうまく表現できない意義こそ大きいと感じます。私自身は2004~2005年にかけて、11カ月ほど米国のスタンフォード大学に共同研究で行かせていただきました。現地の研究者たちと奥深く有意義なディスカッションができたことが第一の意義ですが、収穫はそれにとどまりません。例えば、貴重な人脈を形成することができたと同時に、それを核としてさらに人脈が広がり、2022年10月から2023年5月までの、オランダのトゥエンテ大学からの実習生受け入れにも役立ちました。海外に行くことは、短期的には必ずしも研究の成果に直結しないこともありますが、長期的には、この経験の有無が、研究に対する考え方やアプローチの幅の差になって出てくるように思います。

■参考文献

- (1) Y. Krockenberger, A. Ikeda, K. Kumakura, and H. Yamamoto: "Infinite-layer phase formation in the Ca_{1-x}Sr_xCuO₂ system by reactive molecular beam epitaxy," *J. Appl. Phys.*, Vol. 124, 073905, 2018.
doi: 10.1063/1.4985588
- (2) A. Ikeda, Y. Krockenberger, and H. Yamamoto: "Molecular beam epitaxy of electron-doped infinite-layer Ca_{1-x}R_xCuO₂ thin films," *Phys. Rev. Mat.*, Vol.3, 064803, 2019.
doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.064803
- (3) Y. Krockenberger, A. Ikeda, and H. Yamamoto: "Atomic Stripe Formation in Infinite-Layer Cuprates," *ACS Omega*, Vol.6, 21884, 2021.
doi.org/10.1021/acsomega.1c01720
- (4) A. Ikeda, Y. Krockenberger, Y. Taniyasu, and H. Yamamoto: "Designing Superlattices of Cuprates and Ferrites for Superconductivity," *ACS Appl. Electron. Mater.*, Vol.4, pp.2672-2681, 2022.
doi.org/10.1021/acsaelm.2c00209
- (5) H. Yamamoto, Y. Krockenberger, and M. Naito: "Epitaxial Growth of Superconducting Oxides," in *Epitaxial Growth of Superconducting Oxides*, 2nd edition, Elsevier, 2022.
- (6) K. Kurokawa, S. Isono, Y. Kohama, S. Kunisada, S. Sakai, R. Sekine, M. Okubo, M. D. Watson, T. K. Kim, C. Cacho, S. Shin, T. Tohyama, K. Tokiwa, and T. Kondo: "Unveiling phase diagram of the lightly doped high-T_c cuprate superconductors with disorder removed," *Nat. Commun.*, Vol.14, 4064, 2023.
doi.org/10.1038/s41467-023-39457-7
- (7) K. Takiguchi, Y. K. Wakabayashi, H. Irie, Y. Krockenberger, T. Otsuka, H. Sawada, S. A. Nikolaev, H. Das, M. Tanaka, Y. Taniyasu, and H. Yamamoto: "Quantum transport evidence of Weyl fermions in an epitaxial ferromagnetic oxide," *Nat. Commun.*, Vol.11, 4969, 2020.
doi.org/10.1038/s41467-020-18646-8
- (8) Y. K. Wakabayashi, T. Otsuka, Y. Krockenberger, H. Sawada, Y. Taniyasu, and H. Yamamoto: "Machine-learning-assisted thin-film growth: Bayesian optimization in molecular beam epitaxy of SrRuO₃ thin films," *APL Mater.*, Vol.7, 101114, 2019.
doi.org/10.1063/1.5123019
- (9) Y. K. Wakabayashi, Y. Krockenberger, T. Otsuka, H. Sawada, Y. Taniyasu, and H. Yamamoto: "Intrinsic physics in magnetic Weyl semimetal SrRuO₃ films addressed by machine-learning-assisted molecular beam epitaxy," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.62, SA0801, 2023.
doi.org/10.35848/1347-4065/ac73d8

NTTアノードエナジー

技術戦略部 技術開発部門 企画担当課長

野々垣 翠 Midori Nonogaki

ペロブスカイト太陽電池と水素で カーボンニュートラルをめざす

カーボンニュートラルに向けて、再生可能エネルギー、中でも特に太陽光発電が普及してきています。現在の太陽光発電では主にシリコン系の太陽電池が使われていますが、ここ数年でペロブスカイトと呼ばれる結晶構造を持つ新たな有機化合物による太陽電池の研究が進んでいます。今後の太陽光発電では、ペロブスカイト太陽電池の軽量・柔軟性を活かして、その普及がさらに加速していくものとして注目されています。NTTアノードエナジー 技術戦略部 野々垣翠氏に、同社が取り組むペロブスカイト太陽電池に関する共同研究や水素など脱炭素エネルギーでカーボンニュートラルをめざす思い、そして、開発者としての姿勢を伺いました。



軽量・柔軟性が特長のペロブスカイト太陽電池の実用化に向けて

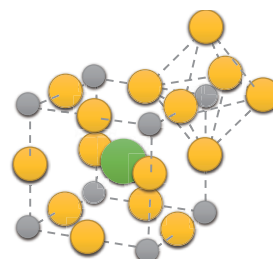
現在、手掛けている開発の概要をお聞かせいただけますか。

私は、2012年にNTTファシリティーズに入社しました。大学では、化合物太陽電池材料の研究を行ってきました。NTTファシリティーズ入社後、通信ビルの電力装置の保守業務、電気自動車向けの充電器の販売展開、スマートエネルギーの実証事業に携わり、開発部門に着任した後は、無停電電源装置（UPS）の開発や海外製UPSの技術評価を中心に業務を行ってきました。そして2022年7月のNTTグループ内のエネルギー関連事業の再編によりNTTアノードエナジー所属となり、現在の技術戦略部において、電力装置開発や再生可能エネルギー技術、脱炭素エネルギー技術関連の総括を行っています。今回、私の所属部署で取り組んでいるペロブスカイト太陽電池についてご紹介させていただきます。

NTTアノードエナジーは、2023年4月に、「ペロブスカイト太陽電池を用いた太陽光発電システム」について有機系太陽電池技術研究組合（RATO）*と共同研究を開始しました。太陽電池はその材料により、シリコン系、化合物系、有機系に分類されますが、有機系に属するペロブスカイトは、**図1**のような結晶構造を持つ有機化合物です。ペロブスカイト太陽電池は、現在実用化に向け

た研究フェーズにあり、種々の元素構造について検討されていますが、ヨウ素、鉛、メチルアンモニウムがメインで研究が進められています。なお、従来のシリコン系太陽電池に対するペロブスカイトの優位性の1つとして、化合物の元素（ヨウ素、鉛、メチルアンモニウム）が、日本国内で一般的に入手可能であることが挙げられています。

また、ペロブスカイト太陽電池は、ペロブスカイトの溶液をフィルム等の基板に塗布することで製造できるため、従来のシリコン系太陽電池よりも製造コストの低減が可能といわれています。さらに、その基板の材質次第では、軽量で湾曲可能なフレキシブルな構造を実現できることも特長といえます。このような特長を持つペロブスカイト太陽電池は、新たな利用シーンを実現する太陽



ペロブスカイト構造




-  Aサイトカチオン（メチルアンモニウムなど）
-  Bサイトカチオン（鉛、スズなど）
-  ハロゲン化物イオン（ヨウ素など）

図1 ペロブスカイトの結晶構造

* 有機系太陽電池技術研究組合：事業化をめざしている企業と研究開発を行っている東京大学が、共通に取り組むべき技術課題に対して対処し、ペロブスカイト太陽電池の開発を加速することを目的に設立された組合。主な参画企業は、東芝エネルギーシステムズ、積水化学工業、パナソニック、アイシン等で、支援機関（大学）として東京大学が参画。

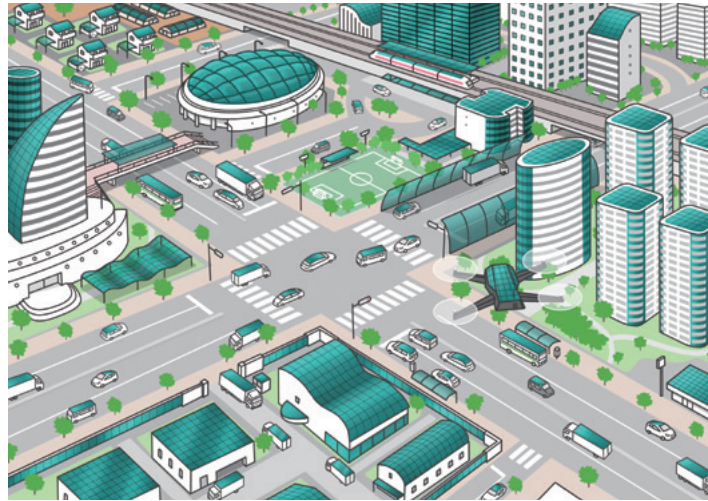


図2 ペロブスカイト太陽電池の適用例

電池として期待が高まっています。

一方、普及に向けてペロブスカイト太陽電池には、①大面積化、②長寿命（高耐久）化、③設置方法、④周辺機器を含めた太陽光発電システムの確立といった課題があります。これらの課題解決に向けて、前述の共同研究では、RATOが主に素材や太陽電池の設計製造にかかわる課題①と②を担当し、NTTアノードエナジーが太陽光発電システムや構築にかかわる課題としての③と④を担当して研究を進めてまいります。当社はこの共同研究を通して、ペロブスカイト太陽電池の特長を活かした社会実装領域（ユースケース）の確立と、発電システムの設計・構築、運用・保守といったエンジニアリング技術の確立をめざしています。

アノードエナジーが取り組む課題は具体的にどのようなものでしょうか。

設置工法の一例として、ペロブスカイト太陽電池のフレキシブル性、透明性を活かすことで、建物の屋上だけでなく、新たに壁面や、窓への設置といった利用シーンが期待できると考えています。さらにその先には、例えば、営農型太陽光発電としてビニールハウス部材への活用や、自動車、航空機、ドローンといった移動体への設置も期待されます（図2）。

建物の屋上、壁面や窓への設置については、太陽電池基板の強度や耐量も考慮しながら今後検討を進めていくことになると考えています。また、ペロブスカイト太陽電池は、軽量かつ薄型であるがゆえに強風により吹き飛ばされる可能性もあり、さらに壁面や窓といった垂直面では、建物の高層に設置されることも意識して、その固定方法やメンテナンスや交換を配慮した工法の検討が必要と考えています。

太陽光発電システムとして、太陽電池から最大限の電力を取り出すためにパワーコンディショナと呼ばれる電力変換器が必要になります。一般的にシリコン系太陽電池は、光の強度の変化に対して、比例関数（直線）的な出力特性を示すのに対して、ペロブ



図3 エネルギー流通

スカイト太陽電池は光の強度が強まるときは指数関数（曲線的）に、弱まるときは対数関数（曲線的）に出力が変化する、いわゆるヒステリシス特性があることが分かっています。したがって、実際のフィールドに導入する場合は、こうしたペロブスカイト太陽電池の特性に対応したパワーコンディショナやシステム構成を検討していく必要があります。

ペロブスカイト太陽電池の普及は、NTTアノードエナジーの事業だけでなく、社会全体のエネルギー流通に多大なインパクトを与え得るものであると考えています。例えば、当社ではエネルギー流通を、「創り、運び、蓄え、調整、効率化、届け使う」といった一連のプロセス（図3）で定義していますが、ペロブスカイト太陽電池による電気の需要地でのオンサイト発電が実現すれば、究極的には「創り、使う」のみのプロセスで電気エネルギーの需要に対応できることとなります。

このような技術革新（イノベーション）が2050年のカーボンニュートラル実現のために必要であることはいうまでもありません。

水素を燃料とした非常用発電装置が通信ビルやデータセンタに設置される日をめざして

カーボンニュートラルの実現に向けて、ペロブスカイト太陽電池以外に新しく取り組んでいきたいことはありますか。



図4 純水素燃料電池盤

カーボンニュートラルの実現に向けて、脱炭素エネルギーの1つとして注目されている水素の利用技術の開発を手掛けたいと思っています。

一般の方にとって水素利用というと、水素は爆発するので危険なといった危険なイメージが先行することは否めない状況だと考えています。しかし、私は技術者の1人として、将来の「燃料」の選択肢を考えたときに、水素は外せない存在だと考えています。問題や課題から目を背けるのではなく、水素利用を提案する立場として、自分たちが課題認識して、その解決の糸口を見つけることが必要だと考えています。NTTアノードエナジーでは、純水素で発電する燃料電池システムの実証設備を構築し、どのようにしたらお客さまに安心して使っていただける提案ができるかという検討を行っています(図4)。実際に設備を構築して、自ら運用することで、机上検討ではみえてこなかった問題や課題がみえてきます。2030年の水素社会の到来を見据え、今まさにノウハウをためているところです。

さて、水素というと燃料電池をイメージする人も多いかと思いますが、私が注目している利用形態の1つとして、水素を燃料とした内燃機関(エンジン)があります。現在、多くの通信ビルやデータセンターでは商用交流電力の停電に備えて、ディーゼルエンジンやガスタービンを利用した発電装置が設置されていますが、これらの燃料には軽油や重油などの化石燃料が用いられています。発電装置が非常時に運転するときはもちろんですが、定期点検などで発電装置を運転するときにも現状ではCO₂が発生しています。カーボンニュートラルを実現した世の中では、こういった発電装置の燃料も、従来の化石燃料から脱炭素エネルギーである水素に代わるようになるかと考えています。

開発者としてスキルの維持、スキルアップはどうしていますか。

電力を扱っている以上、パワーエレクトロニクス等の電力関連は基本スキルとして当然ですが、設計・構築・保守・運用を行っていくため、クオリティ、コスト、デリバリーを最適化させつつ開発する、システム開発スキルが必要となります。そのうえで、これらを事業実装していくにあたって、導入部門との調整能力、コ

ミュニケーション能力も重要なスキルです。NTTアノードエナジーはメーカーではないため、装置メーカーと組んでシステム開発を行います。開発パートナーの技術者と仕様書をベースに議論するときも、立場が違っても同じ内容を話しているようで、実は認識が異なっているといったこともあり、このような場合もコミュニケーションは必須で、それをベースに信頼関係を構築していくことになります。今後はスマートエネルギーのシステム開発を行っていくので、これらのスキルに加えて想像力、洞察力といったスキルも必要になると思います。

基本的な技術スキルは業務や勉強を通し経験を積んで身につけることはできるのですが、その中で個々に専門的な分野として分化してきます。私は、技術開発者として、アンテナを高くして情報収集していくことはもちろんですが、こうした専門家とのコミュニケーションを通して、その技術を自分のものとしていくようなアプローチでスキル向上を図っています。

コミュニケーションで「1+1を100に」

後進の方やパートナーへのメッセージをお願いします。

周囲とのコミュニケーションを大切に、そのときに先入観にとらわれずに、広い視野と高い視座をもって、相手を理解したうえで道筋を探しながら技術開発に取り組んでほしいと思います。技術開発や研究は、1人でこもりがちになることも一部ではあると思いますが、やはりチームで成果を上げていくようなことが基本なのではないでしょうか。こうしたときにチーム内で協力・連携しながら「1+1が2」ではなく、「1+1が100」になるようなかたちにしていくことで成果が活きてくると思います。そのために、先入観にとらわれない、広い視野と高い視座によるコミュニケーションが大きな役割を果たすと思います。その結果、チームとして同じ方向性をめざす人が増えることで、協力や連携が有機的に機能して成果を生み出す、つまり「1+1が100」になるのです。



NTTコミュニケーション科学基礎研究所
特別研究員

宇治土公 雄介 Yusuke Ujitoko

本当に「触りたい」触覚コンテンツの新たな地平へ「触りたさ」の科学的理解とクロスモーダル知覚に基づく触覚提示法の提案

さまざまな触り心地を表現する「触覚提示技術」は日々進歩を続けています。その一方で「どのような触覚体験が人々の心に響くのか」といった部分は解明されておらず、触覚コンテンツの普及はあまり進んでいません。人の心に響く触覚コンテンツの創出のためには、私たちが「何を触りたい」と思うのかといった触覚の心理学的側面を解明していくことが今後必要となります。今回はSNSなどの大規模データから「触りたさ」を解き明かし、簡易な触覚提示法を活用することで将来の触覚コンテンツの普及をめざす「触りたさの科学的理解とクロスモーダル知覚に基づく触覚提示法」について、宇治土公雄介特別研究員にお話を聞きました。

◆PROFILE: 2016年東京大学大学院修士課程修了。同年、株式会社日立製作所入社。2020年電気通信大学大学院博士課程修了。同年、日本電信電話株式会社入社。2022年より特別研究員。人の触覚知覚特性の解明と知覚特性を活用した触覚提示に関する研究に従事。IEEE World Haptics 2021 Best Video Presentation, IEEE Haptics 2020 Best paper 2nd Honorable Mentionなどを受賞。



SNSの大規模データから「触りたさ」の解明に迫る

■「触りたさの科学的理解」とはどのようなご研究なのでしょう。

「触りたさの科学的理解」とは「人がどのようなものを触りたいと思うのか」「なぜ触りたいと思うのか」という謎を心理学的アプローチによって理解する研究です。このような研究を進め、従来の研究であまり調べられてこなかった「触りたさ」に対する理解を深めていくことで、人の心に響く触覚コンテンツの創出に向けて知見を提供できるのではないかと考えています。

触覚とは異なり、視覚や聴覚は情報提示技術が普及しており、また現在世の中には魅力的な音楽や映画コンテンツがあふれ、私たちは各々が「見たい」「聴きたい」と思うコンテンツを体験することができます。その一方で、触覚に関しては触覚提示技術の研究開発が進んできているものの、身の回りに「触りたい」と思う触覚コンテンツはまだそれほど普及していないというのが現状です。その理由の1つとして「どのような触覚体験が人々の心に響くのかがよく分かっていない」という点が大きいと考えています。従来の「触りたさ」に関する調査では主に実験室で実刺激を用いた被験者実験を行っていましたが、この方法では実刺激として日常で私たちが触る対象をカバーできないことや、データのサンプル数が少ないことや、被験者が「実験者が求めている結果」を意識することで結果にバイアスがかかってしまうことなどが原因で、日常における潜在的かつ複雑な触りたさを抽出するのが困難でした。

そこで私の研究では、SNSに蓄積された「日常で発生した触りたさ」に関する大規模なテキストを収集し、触りたさを日常のさまざまなシチュエーションの観点から網羅的に解析することをめざしています。SNSの大規模データに基づき人が「どのようなシチュエーション」で「何を触りたいのか」を基礎研究として明らかにすることで、人の心に響く触覚コンテンツへの洞察を得て、その洞察をベースに「どこに注力して技術開発をするべきか」を定義することが可能になります。例えば「休日に家のリビングで猫に触りたい」という需要が強いことが分かれば、猫の毛並みや肉球の触感を提示する技術の開発に優先的に取り組むという意思決定ができ、将来的に人の心に響くコンテンツ創出につながるのではないかと考えました（図1）。

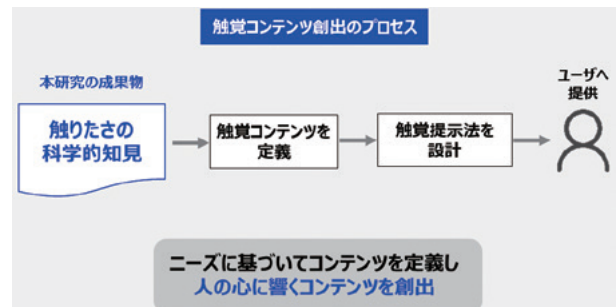


図1 触りたさの知見に基づく触覚コンテンツ創出のプロセス



■これまでの「触りたさ」に関するご研究では、どのようなことが具体的に分かったのでしょうか。

「触りたさ」に関するデータを集める中で、人が日常で触りたいと思う対象は「極めて少数の対象に限定されている」ということが分かりました。私たちの周りには触ることができる対象が無数に存在し、「触りたい」と思う対象も多岐にわたるだろうと予測していたため、この結果は意外でした。触覚提示研究のデモンストレーションでは、その研究の強みとして多様な対象の触感を表現可能であることがアピールポイントの1つになることがよくあるのですが、今回の研究結果によって、多様な触感を表現できないとしても、特定の触感を再現できれば人の心を動かすことができるかもしれないことが示唆されました。また人が触りたいと思う対象は全体的に「モノ」よりも「人」や「動物」など生物に偏っていることが分かりました。そのため、恋人や家族と遠隔で触れ合ったり、メタバース上でバーチャルなアバターと触れ合ったりするコミュニケーションを実現するコンテンツや、猫や犬などの動物に触れて癒されるコンテンツなどを実現することで、このようなコンテンツが人の生活に溶け込む未来がくるのではないかと考えています。さらに、触りたい対象とその触り方には一定の関連性があることも判明しました。例えば「撫でたさ」と「猫」には強い関連性があるため、「猫を触る」というコンテンツをつくるときには、まずは撫でるときの触感を表現することに重きを置くという方針策定ができるかもしれません。

この研究は新型コロナウイルス感染症拡大の中で「自宅で進められる研究はないだろうか」というきっかけで始めた研究でもあるのですが、実は「触りたさ」が感染拡大時に変化していることも分かりました。2020年の新型コロナによる緊急事態宣言発令ごろから、人や動物など生物の肌のぬくもりを求める「スキンハンガー」と呼ばれる現象が人々の間で発生していることを示唆する結果が得られました。おそらくこれは感染拡大時のソーシャルディスタンスの確保や外出制限などによって触りたさに影響が出たのではないかと考えています(図2)。この結果から、コロナ禍ではリモート環境下でも他者との触覚的なつながりを実現する技術が求められていたことが分かりました。そして同様にお金やドア

ノブなど感染を想起させる非生物への「触りたさ」もこの実験で判明したため、実際に触らなくても触感を与えられる技術についても、このようなウイルス感染拡大時には必要とされることが分かりました。さらに一連の研究によって、触りたさは「静的」なものではなく、イベントによって変化する「動的」な性質を持つという点が明らかになり、これは触りたさの複雑さを示す興味深い発見です。

■「クロスモーダル知覚に基づく触覚提示法」ではどのような研究をされているのでしょうか。

これまで得られた「触りたさ」に関する知見に基づき、触感を人に与える具体的な技術として検討しているのが「クロスモーダル知覚に基づく触覚提示法」です。「クロスモーダル知覚」とは、例えばイチゴのおいする赤いかき氷を食べたときに、それが無味であるにもかかわらずイチゴの味がするという現象で、ある感覚に対応する知覚が別の感覚器の入力によって影響を受けるといったのがポイントです。これを指で何かを触るときの触覚提示に用いると、物理的な触刺激を伴わずに視覚情報として指や対象の動きの見え方を変化させるだけで、疑似的な触感を感じさせるというような応用が可能となります。この技術を用いた研究として、ディスプレイのスイープ操作でスクロール量を制限することによって、ディスプレイにないはずの「重さ」を知覚させる触覚提示法などを提案しています(図3)。

従来の触覚提示装置は高価なものが多く持ち運びも困難であったため、実際に「各家庭に1つ」のような普及の仕方は難しいという問題がありました。「クロスモーダル知覚」を触覚技術に応用することで、手軽かつ安価に機能する仕組みに基づく触覚提示技術につながるのではないかと考えています。

「クロスモーダル知覚に基づく触覚提示法」の検討では、個別の提示方法の提案に加えて、提示方法の体系化にも取り組みました。クロスモーダル知覚に基づく触覚提示法として、これまでさまざまな方法が提案されてきました。例えばモノを持ち上げたときの重さ感を表現する方法や、モノの表面を撫でたときの粗さ感を表現する方法など、さまざまな触感表現の方法が提案されてい

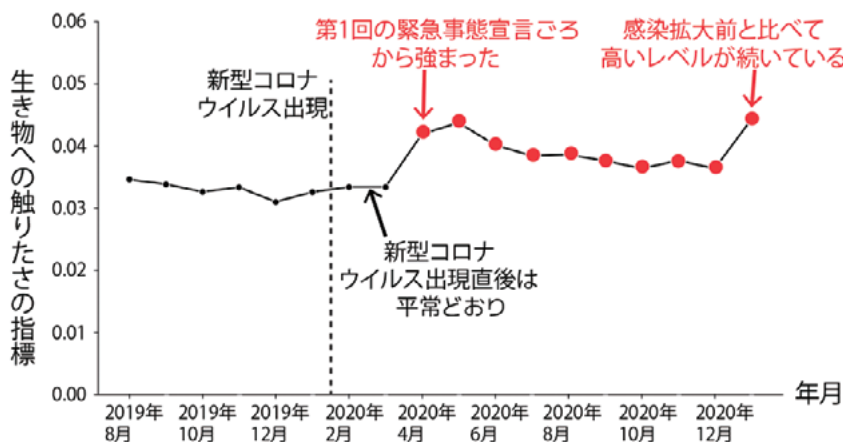


図2 新型コロナウイルス感染症と「触りたさ」の変化

ます。ところが以前は、これらの方法に関する知見（方法や限界など）は個別の論文に断片的に掲載されているのみといった状況でした。そのような状況では、研究者や触覚コンテンツの開発者が知見を効率的に得ることができません。そこで2000年代から今にいたるまでの関連研究を網羅的に調査し、ユーザに対して表現したい触感・ユーザの入力方法・視覚刺激の切り口に基づき、触覚提示法を整理しました。この仕事は網羅的な調査や意義のある切り口に基づき情報の整理が必要であるという点でコンサルワークに近く、研究者としての普段の仕事では使わない脳の使い方を必要としたため大変だったのですが、その分得られる個人的な学びも大きかったです。また分野への貢献としても大きく、「クロスモーダル知覚に基づき触覚提示法」の現在地がクリアになり、これまでの検討の中で漏れている箇所を発見することもできました。

「使われる」触覚コンテンツを創出し、 触覚分野にパラダイムシフトを起こす

■現在のご研究で苦労している点について教えてください。

SNSの大規模データを用いて「触りたさ」に関する分析を進める中で「触りたさについての情報を本当に実験で得られているのか」という点では苦労しています。「触りたい」という欲求は人のプライベートな領域に踏み込む研究テーマである一方で、SNS上のデータはユーザが外部に向けて公開したい情報であるため、公開されたデータが触りたさを反映しているかについては慎重になる必要があります。またSNSによってはユーザの性別や年齢が偏っており、結果にバイアスが生まれます。このような問題に対して、私の研究ではSNSにおけるデータに加えて、オンライン実験で大規模にデータを収集した結果を突き合わせることで、データ収集手段に起因するバイアスをなるべく明らかにすることを心掛けています。現在までの研究で「触りたい対象」については分かかってきた一方で、その対象のどのような触感を提示するべきかや、どのようなシチュエーションがより望まれるかというところまではまだ具体化できていません。そのため今後は「触りたい対象のどのような触感が求められているか」「どのようなシチュエーションでの触る体験が求められているか」を具体化することを目標に研究を進めています。

またクロスモーダル知覚に基づき触覚提示法では、人によって感じ方の度合いに差があるという点が問題です。実際にデモン

トレーションをさまざまな人に対して行う中で、人によって感じ方が変わることや、年齢による感じやすさに違いがあることが分かっています。そのような感じ方の違いを生む要因を解明することによって、触覚を提示する際のキャリブレーションに知見を活かして、触覚提示する際の個人差低減をめざしています。また人の身体を物理的に刺激する従来の触覚提示装置と比べて、現在のクロスモーダル知覚による触覚提示法では感じられる触感が軽微であるという問題もあります。これを解決するためにも、簡易な触覚提示装置による物理刺激と組み合わせることなどを行い、今後はより強力なクロスモーダル知覚による触覚提示法を探索していきます。

■研究の成果によって今後どのようなことが可能になるのでしょうか。

「触りたさの科学的理解とクロスモーダル知覚に基づき触感提示法の提案」で得られた成果を用いることで、NTTが提案するIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想のさまざまな要素に貢献できるのではないかと考えています。例えばIOWN構想の3つの柱のうちの1つであるデジタルツインコンピューティング (Digital Twin Computing) においては、触りたさの理解によって生み出された「人の心に響く触覚コンテンツ」をサイバー世界に実装することで、デジタルツイン自体の訴求力向上に貢献できます。またサイバー世界でデジタルツインの体験した触覚体験をフィジカル世界のユーザに伝えるための仕組みとして「クロスモーダル知覚に基づき触覚提示法」を用いることで、特殊な装置なしで自然な触覚体験を提供することが可能になります。

■最後に、研究者・学生・ビジネスパートナーの方々へメッセージをお願いします。

触覚に関する研究分野に私自身も長くいますが、研究内容があまり一般の方には知られておらず、また触覚コンテンツが普及しそうな見通しがあまりクリアに見えない現状には少し寂しさを覚えます。これを打破していくために、一般の方に広く簡単に使ってもらえるような技術やコンテンツの下支えになるような成果を、基礎研究を進める中で生み出したいというのは研究の1つのモチベーションです。今後も将来的に「使われる」技術につながるように基礎研究を推進することを心掛け、また目先の利益ではなく触覚に関する知見を蓄積して将来誰かが何かの洞察を得るきっかけになればよいと願っています。もしNTTコミュニケーション科学基礎研究所で取り組んでいる私の研究にご興味を持ってくださいましたら、ぜひ一緒に新しい触覚研究の未来を創っていきましょう。

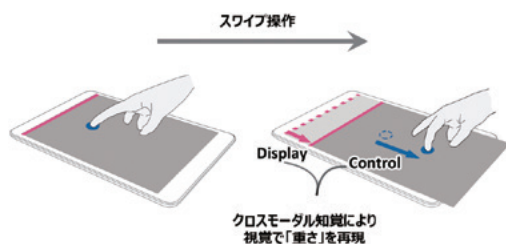


図3 「クロスモーダル知覚に基づき触覚提示法」の例



(今回はリモートにてインタビューを実施しました)



NTT グリーン&フード株式会社

<https://www.ntt-green-and-food.com/>



自然の恵みを技術で活かし、 地球と食の未来をデザインする会社

世界的な人口爆発や地政学リスク等により、食料や資源の争奪戦や価格高騰を招いており、さまざまな不確定要因から、食の安全保障（フードセキュリティ）確保の必要性が高まっています。また、気候変動による海水温上昇や乱獲等により、従来近海で取れていた魚が取れなくなる等、水産業にも大きな影響を与え始めています。水産業においては、養殖を中心に生産量が飛躍的に増加し、「獲る漁業」から「育てる漁業」への転換がみられており、その中でも、環境や天候等に影響を受けない「陸上養殖」に注目が集まっています。そのような中、陸上養殖に品種改良技術（ゲノム編集技術）と情報通信技術を取り入れ、水産フードチェーンのイノベーションをめざす会社として設立されたNTTグリーン&フーズの久住嘉和社長に、事業展開や地域貢献への想いを伺いました。



NTT グリーン & フード
久住嘉和社長

陸上養殖を契機とした地域の 活性化をめざして

■設立の背景と会社の概要について教えてください。

世界の人口増加に伴い、タンパク質の需要も伸びています。このままでは、人類が必要とするタンパク質の需要と供給のバランスが崩れる「タンパク質クライシス」が2030年ごろに起こるといわれています。水産業はタンパク質供給源の1つですが、日本では就業人口の減少や高齢化、環境問題等の影響を受け、約30年で就労者、生産量ともに60%程度減少（水産白書より）するなど社会問題となっています。

また、2050年のカーボンニュートラルに向けた取り組みが注目される中、私たちは大気中に存在するCO₂の約3割を排出・吸収する海洋に着目しました。

こうした食料問題と環境問題の解決をめざして、CO₂をより吸収する藻類の優秀品種選抜・培養・品種改良技術、AI（人工知能）・IoT（Internet of Things）等の情報通信技術を有するNTTと、魚介類の品種改良技術・魚介類の養殖技術を有するリージョナルフィッシュ株式会社は、2023年7月に合併会社を設立しました。

NTTグリーン&フーズは、「自然の恵みを技術で活かし、地球と食の未来をデザインする」をパーパスとして掲げ、「環境をまもりたい」「美味しいものを安心して食べられる世の中をまもりたい」「日本の水産業を再興したい」といった想いをもって、美しい地球で美味しいものを食べられる毎日が当たり前である世界をめざしてチャレンジしていきます。

■具体的にどのような事業展開をしているのでしょうか。

NTTグリーン&フーズの事業は、「藻類の生産・販売」「魚介類の生産・販売」「サステナブル陸上養殖システムの開発・提供」の3分野から構成されています（図1）。

藻類は光合成によってCO₂を固定（二酸化炭素等無機炭素を、糖等の有機炭素化合物に変換して体内に取り込む過程のこと）しながら成長します。「藻類の生産・販売」では、NTTの藻類への品種改良技術、大量培養技術、品種改良技術等を活用し、光合成を活性化させて成長速度を高めるとともに、通常よりも多くのCO₂を体内に固定する藻類を生産します。生産した藻類は魚介類の餌として活用し、また、将来的には農業肥料等、さまざまな分野での活用をめざします。

「魚介類の生産・販売」は、成長が速く、高機能性を有する魚介類を陸上養殖で生産・販売する事業です。魚介類を品種改良することで、食欲を抑制するタンパク質を喪失させ、魚介類の成長速度を高めるとともに、成長に必要な環境負荷を低減させることができます。これにより、飼料利用効率が高まるとともに、成長サイクルが速まるため、養殖に必要な電力等の低減が可能となります。また、従来の天然種の魚介類とは異なる特長を持つ、差別化された地域固有の魚介類を開発・生産することが可能となります。加えて、陸上養殖（人工的に整備した環境と餌）で飼育するため、寄生虫や環境問題となっているマイクロプラスチックを体内に含む可能性がない、安心・安全な魚介類の提供を可能にします。

「サステナブル陸上養殖システムの開発・提供」は、再生可能エネルギーや水質浄化プラント等を含む、循環型の陸上養殖システムを開発・提供する事業です。



図1 NTTグリーン&フードの事業構想

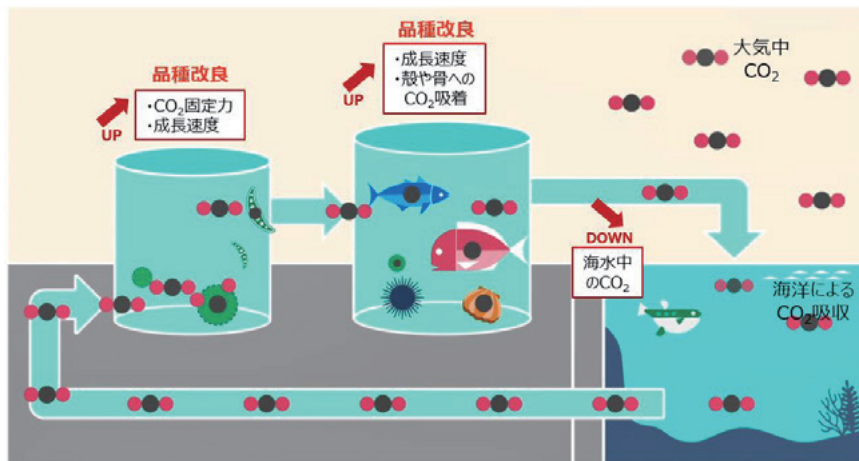


図2 サステナブル陸上養殖システムのイメージ

事業開始から間もないこともあり、まずは「魚介類の生産・販売」の展開に注力する中で、「藻類の生産・販売」を増強し、藻類を販売しつつ「魚介類の生産・販売」の餌としての利用を図っていきます。そして、このサイクルを実現する場として「サステナブル陸上養殖システムの開発・提供」を展開していくといったステップを考えています（図2）。

品種改良で各拠点に適した新しいブランド魚を育てて市場投入

■事業を取り巻く環境はどのような状況でしょうか。

日本の、漁場での漁獲もしくは種苗・生産、加工、販売・食から構成される水産フードチェーンは、特に水産加工技術（血抜き、神経締め、冷凍・冷蔵・鮮度保持・輸送技術）と魚介類の調理技術が優れており、「世界一美味しい」とまでいわれています。一方、漁獲高は減少傾向にあり、それを補うかたちで養殖が増加してい

ます。一般的に行われている海面養殖では、その適地に限りがあり、養殖を要因とした海洋汚染、そして、天候や病気による安定供給の問題もあります。そこで、陸上に人工的に創設した環境下で魚介類の養殖を行う「陸上養殖」が注目され、すでにウナギ、ヒラメ、トラフグ、車エビ、鮭類、チョウザメ等の陸上養殖が行われ、市場出荷もされています。

種苗・生産といった養殖のプロセスでは、イノベーションが起ころうとせず、そのきっかけとなるのが陸上養殖ですが、生産に重点が置かれているのが現状です。NTTグリーン&フードは、リージョナルフィッシュ社の品種改良・養殖技術（種苗領域）と、NTTの藻類生産技術、AI・IoT活用による環境データ（水温・塩分・DO）、成長記録、給餌記録、へい死記録、分養・出荷データ等の管理、そしてエネルギーの地産地消等のエネルギーマネジメントによる環境への配慮等（生産領域）により、種苗から生産・出荷までのバリューチェーン全体をつなげたビジネス展開を図ります。

また、通常品種改良は交配等を繰り返して行われているのですが、種苗生産を担うリージョナルフィッシュではゲノム編集技術により品種改良を行っています。ゲノム編集技術は遺伝子組み換えと混同されやすいのですが、他の生物の遺伝子を組み込むことにより新しい性質を付与する遺伝子組み換えに対して、ゲノム編集は交配等の繰り返しによる品種改良における遺伝子の変化を、酵素を使って効率的に引き起こす技術で、その生物が本来持つ潜在的機能を引き出すことができるのが特長です。これにより、何代もかけて行われる交配を経ることなく品種改良が可能となります。

陸上養殖というビジネス領域も新しい分野で、NTTグリーン&フードも設立間もない会社ですが、まさにイノベーターとしての立ち位置でビジネス展開をしていきます。

■今後の展望についてお聞かせください。

NTTグリーン&フードは2023年7月1日に事業開始しましたが、2023年度は3拠点でプラントを構築し、魚介類の生産を始めます。その後、全国展開をめざし、2035年度には全国20カ所に拠点を拡大する予定です。各拠点では、環境に適した魚種の選定、リージョナルフィッシュ社と連携した品種改良、AI・IoTを活用した生産の効率化等により、地域に根差したブランド魚として育て、地域の小売業や、全国の商社、販売・加工事業者等に販売していきたいと考えています。

こうした拠点の展開により、地域の雇用促進につながり、またブランド魚の販売や、ブランド魚市場開拓等といったかたちで地域活性化に貢献するとともに、NTTグリーン&フードがめざす「食料不足問題の解決」「環境貢献」にも寄与していきます。そして、将来的には海外への拡大もめざしていきたいと思えます。

担当者に聞く

拠点の選定からプラントの構築まで NTTグリーン&フードにお任せ

プラント部 担当課長

永井 菜央美 さん



■担当されている業務について教えてください。

陸上養殖を行う拠点の選定と、陸上養殖のためのプラントの構築を担当しています。

陸上養殖を行うためには、最低1万㎡以上の広さの土地（平地）の確保、陸上養殖に適した地下水の取水および排水といった環境要件のみならず、制度面をはじめとする自治体等からの支援・助成も必要になります。社員数も少ないため、NTTグループの各事業会社のご協力を受けながら、日本全国の候補地視察を進め、こうした要件に合う拠点を探しています。さらに、2023年6月27日に行われた事業開始の記者会見をご覧になられた複数の自治体より、遊休地の活用としてのご相談やオファーをいただくことができ、対応を進めています。

陸上養殖プラントは「水槽」、餌の食べ残しや飼育生物の排泄物などのゴミ（有機物）や、飼育生物からの代謝物、特にアンモニア、亜硝酸イオン等をろ過する「ろ過装置」、水槽内の水を循環し、ろ過槽をはじめとした各処理設備に水を送る「循環ポンプ」、飼育水槽内に入り込んだ病原菌やウイルスに対して種々の方式で殺菌・不活化する「殺菌装置」、水温調節器、そして飼育データ、環境データ、出荷データ等を収集管理する「管理システム」で構成されています。プラントの構築にあたっては、リージョナルフィッシュの陸上養殖に関する経験や知見を活用しながら、魚種に合わせた陸上養殖方式の決定、プラント構築を進めています。なお、魚種の選定は、取水に関するボーリング調査および飼育試験の結果や養殖エリアの環境等から、拠点ごとに最適の魚種を選定しています。

■今後の展望について教えてください。

現在は3カ所の拠点でプラント構築を進めています。将来的

には日本全国に、各地域の特徴を活かした私たちの陸上養殖プラントを構築したいと考えています。そして、そこで育てた魚を地元の皆様喜んで食べてくださっている未来、陸上養殖で地域活性化に貢献している世界を想像しながら日々の業務に尽力しています。

品種改良技術（ゲノム編集技術）で 新たなブランド魚が誕生

戦略・営業部 担当課長

横井 優子 さん

■担当されている業務について 教えてください。

プラント部が選定した場所や魚種により、地元企業と加工・販売・観光・教育・福祉等における連携や、自治体とのブランディングの検討、立案などが主業務です。さらに、持続可能な社会の実現に



向けて積極的な大手企業と販売面における協業なども行っています。

私たちが生産する魚介類は、品種改良技術（ゲノム編集技術）が施された種苗を生育しているのですが、しばしば「品種改良技術は安心なのか」「遺伝子組換え技術と何が違うのか」等のご質問をいただきます。他の生物の遺伝子を組み込むことにより新しい性質を付与する遺伝子組み換えに対して、ゲノム編集は交配等の繰り返しの品種改良における遺伝子の変化を、酵素を使って効率的に引き起こす技術で、その生物が本来持つ潜在的機能を引き出しているため安全であることを説明しています。

こうした特長のある品種改良技術（ゲノム編集技術）を正しく理解いただき、安心して私たちの魚介類を選択いただくためには、継続的な発信が必要と考えており、有識者の方にご協力を仰ぎながらイベントやホームページ、SNS等を活用した情報発信を実施していく予定です。

■今後の展望について教えてください。

私たちは消費者であり、生産者でもあります。5年後、10年後も私たちの思いや取り組みが「日本の美味しい食」を支えていく1つのピースとなれればと思っています。

NTTグリーン&フード ア・ヨ・カ・ル・ト

■3名からのスタート

リージョナルフィッシュとの合併会社に向けた企画会社として、2023年3月にNTTグリーン&フードは設立されました（その後、2023年7月に合併会社化）。企画会社設立当初は、社長を含めNTTグループ（持株会社、NTT研究所、事業会社）出身の3名でのスタートだったそうです。それぞれが、今までの経験で培った知見やノウハウ、人脈を総動員してのスタートだったようですが、とはいえ、たった3人の会社のため、1人何役もこなす日々が続いたとのこと。「大変だったのでは」と尋ねたところ、「そのおかげで、メンバー間の結束が強まりました」と答えてくれました。2023年7月からリージョナルフィッシュ社から、NTTグループにはない技術やノウハウ、視点を持つ社員の方々が着任されました。このような異なる経験や視点を持つ社員が連携することで、より力強く事業を推進していけると期待しています。

■ブランド魚でグルメな世界を夢見て

拠点選定やプラント構築等で日本全国、さまざまな場所へ出張することが多いとのこと。出張が続くと疲れるものなのですが、その場所ならではの美味しいものを食べられることを密かな楽しみとして鋭気を養っているそうです。とはいえ、魚介類を扱う会社のため、美味しいものといっても、つい魚介類に目がいってしまいます。いつの日か自分たちが生産したブランド魚が、こうした飲食店のメニューに載る日を夢見て、今日も出張にいそんでいるそうです。





NTTが創る日本の水素サプライチェーンへの挑戦

NTTが水素事業に参入するにあたって強みとなると着目したのがNTTのアセット(通信管路・とう道等設備・人材)であり、このアセットを活用した水素パイプライン網を整備することで、新たなエネルギー流通基盤を確立します。ここでは、NTTアノードエナジーの水素事業への取り組みについて紹介します。

日本における水素戦略とNTTが水素事業へ参入する意義

日本は世界で初めて水素基本戦略を2012年12月に策定し、2023年には本戦略が改定されました。官民合わせて15年間で15兆円のサプライチェーン投資計画が検討され、水素導入目標は2050年に2000万トン(2030年に300万トン、2040年に1200万トン)と設定されました。水素は「電力分野の脱炭素化」「非電力分野の脱炭素化」に貢献でき、電力分野においては2050年に全電源の10%を水素・アンモニアで賄うことをめざすとされています。

2050年のカーボンニュートラル実現の一役を担う水素に官民合わせて力を入れている中、NTTが水素事業へ参入を検討する意義は次の3点です。

- ① 社会の環境負荷削減：再生可能エネルギー(再エネ)による水の電気分解や、化石燃料と二酸化炭素の貯留・再利用技術を組み合わせることで水素はカーボンフリーエネルギーとして活用できる
- ② 日本の経済発展・競争力強化：日本は国際的に高い水素関連技術を有し、官民一体での水素社会実装の推進により日本の経済発展への寄与が期待できる
- ③ エネルギー安全保障：水素は、国内での製造や海外からの資源調達先の多様化を通じ、日本のエネルギー供給・調達リスクの低減に資するエネルギーとなる

NTTがめざす水素パイプライン事業

NTTが水素事業に参入するにあたって強みとなると着目したのはNTTのアセット(設備・人材)です。水素を需要家が活用していくためには、「国内製造された水素」「海外から輸入してきた水素」を国内中に輸送する手段が必要です。NTTでは「NTT通信ビル(約7000カ所)」を起点に「とう道(約650km)」「管路(約60万km)」を保有しており、通信ケーブル用途で空いている管路を水素パイプラインに有効活用できると考えています(図1)。また、水素を輸送するだけでなく、24時間365日の運用監視や有事の際の駆け付け対応も必須であり、NTTの全国に有する“人材”が強みと考えています。NTTのアセットを活かし、エネルギー供給～保守のワンストップ提供をめざしていきます(図2)。

水素の大量・安定輸送の実現に向けた実証実験

将来の水素大量消費社会の実現に向けて、地域の需要家に水素を安価・安定的に供給する手段の確立が求められています。現状の一般的な水素供給手段は高圧水素カードル・チューブトレーラーなどのトラック輸送であり、臨海部の水素拠点などから幅広いエリアに供給が行われていますが、1台当りの輸送量が限られており大量輸送に適した手段とはなっていません。また、一部の液化水素プラントからはタンクローリーによる輸送が行われており、高圧水素と比べて輸送効率が高い特徴がありますが、プラントの建設・運用コストが極めて高額となる課題があります。他方CNP(カーボンニュートラルポート)など輸入水素サプライチェーンの玄関口となる港湾周辺では、事業用発電所等の大規模需要家向けに大口径・高圧の水素パイプラインが敷設されると見込まれますが、この水素パイプラインは大規模設備であるため高コストで、高圧ガスからの離隔距離確保等の安全対策も大掛かりとなるため、内陸の幅広いエリア・需要に対して水素供給するにはハードルが高いと想定されます。

なお、米国DOE(Department of Energy)等の公開情報にある水素パイプライン・液化水素・圧縮水素の輸送コスト比較によると、短距離・大量輸送の条件において水素パイプラインに優位性があるとの報告もあり、水素大量消費社会に求められる有望な水素供給手段と考えられる一方、我が国での展開に際しては経済性(水素パイプラインの新規埋設における高コスト問題)や安全性(ガス事業法等への対応)など固有の課題を解決することが必要となります。

NTTアノードエナジーでは、2022年度に既設管路内での水素の大量かつ安定的な輸送の実現に向けた二重配管方式の輸送モデルの安全性に関する技術開発・調査研究として、NEDO(国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)の委託事業を通じて既設管路を活用した水素配管の安全対策等に関する調査を実施しました。

本取り組みを行うことで将来的な水素大量消費社会を見据えた内陸地域におけるパイプラインによる水素供給手段の確立、スマートシティの発展に貢献できると考えています。

既設管路を活用した水素配管の安全対策等に関する調査

既設管路を活用した二重配管方式(水素輸送用配管(内管)と、

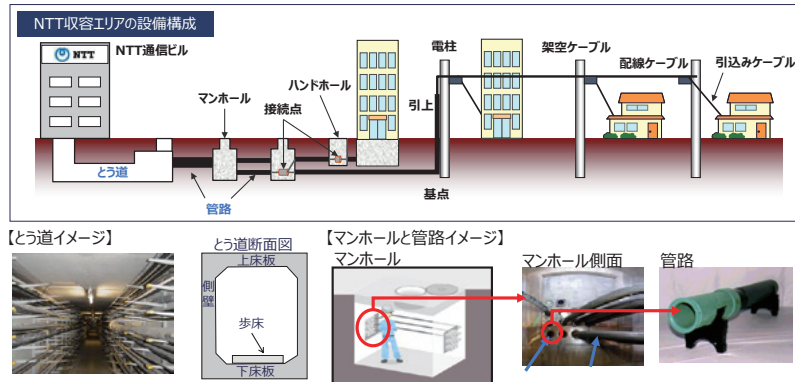


図1 「とう道」「管路」

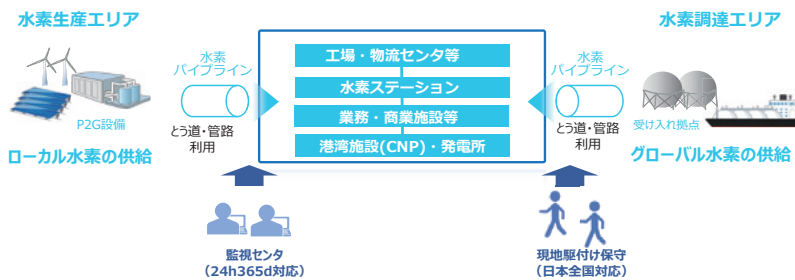


図2 水素パイプライン事業の将来構想

通信用管路（外管：さや管）で構成される二重配管（図3）は、水素輸送用配管のみを直接埋設する一重配管方式と比べ、既設管路を有効活用するため配管敷設に必要となるコストの低減化ならびに水素輸送用配管の損傷リスクも低くなると考えます。また、仮に水素輸送用配管から水素が漏洩した場合、水素輸送用配管と通信用管路の中空層内において直接検知が可能となるため、安全対策上の付臭措置が不要となるなどのメリットが期待されます。しかし一方で、中空層内で漏洩した水素は空気と混合し拡散しながら滞留することが想定されるため、いち早く漏れを検知することが必要となります。

上記課題を解決するため、福島県の某所内に通信用既設管路を再現し、水素パイプライン設備を加えた実証環境の整備を行いました（図4）。二重配管方式と水素供給インフラの安全性にかかわる技術基準の策定に必要な水素漏洩時の基礎データを収集・調査・分析（データアナリティクス）することを目的とし、収集した基礎データから二重配管方式における水素漏洩時の検知状況、ポイントおよび分布型センシング、アンサンブルなどの検知手法の確立につなげることを目標として、以下の実地検証を実施しました。

(1) 水素漏洩検知の実地調査

光ファイバケーブルの防爆性および分布的な検知が可能な点に着目した、光ファイバケーブルによる水素漏洩検知の有効性について、各検証を実施しました。

- ① 直接的な水素漏洩検知：光ファイバケーブルに漏洩した水素を直接吸収させることによる光学特性の変化を用いた漏洩

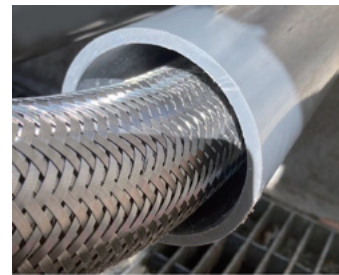


図3 二重配管

点の検出方法（光損失の検証）

- ② 間接的な水素漏洩検知：水素漏洩に伴う光ファイバケーブルへの音響変化分布の検知による漏洩点の検出方法（位相変化の検証）
- ③ 異常予兆に関する検討：二重配管に対して過剰な外力が加わることによる応力歪を、光ファイバケーブルを用いることで破損による経時的な変化に至る前に異常を検知する技術成立性についての検証

(2) 異常検知（圧力、流量）に関する検証

正常時データ（圧力、流量）ならびに水素漏洩時の観測データを基に基礎となる異常検知モデルを作成し、これを基に実環境適用に向けた異常検知モデルの技術成立性に関する初期検証を行いました。

(3) 実環境における各種水素センサの性能評価

実証環境において二重配管内の中空層内に疑似漏洩させた水素

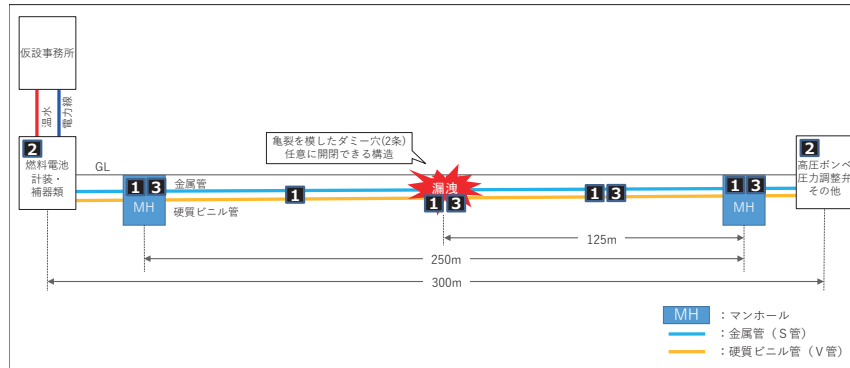


図4 実証環境の概要

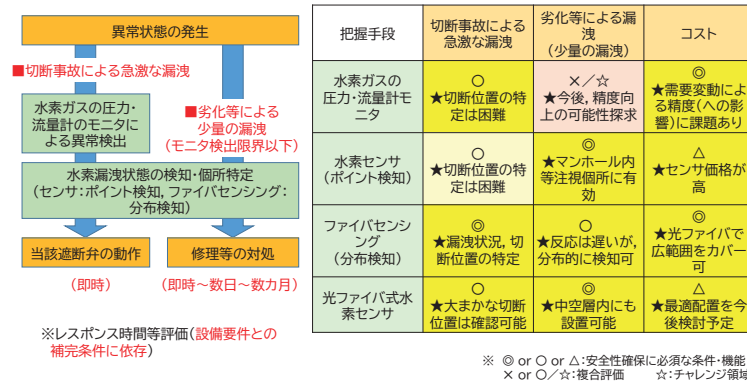


図5 実証結果のまとめ

の直接的な検知における各種水素センサの性能検証を行いました。

検証結果より、光ファイバケーブルを利用した検知方式において100時間程度経過後に微小な光損失が確認できること、水素漏洩地点において、音響振動による漏洩検出が可能であること、ならびに流量低下開始から約30分以内に異常検知が可能（ただし漏洩位置の特定は困難）であること、および光ファイバ式水素センサで水素輸送用配管と通信用管路（さや管）の間の中空層に漏洩した水素をリアルタイムかつ25% LEL以下で検知できること（図5右）。また、異常予兆に関する技術・機能要件の抽出や、事故シナリオに基づき安全性を確実に担保する場合、中空層に漏洩した水素濃度分布ならびに拡散挙動の経時変化の観点より、光ファイバ式水素センサを約10 m間隔で設置することが必要であるなどの成果が得られました。

さらに安全性を担保するためには、さまざまな事故シナリオによる異常状態の発生状況（管切断事故による急激なガス漏洩、劣化等による少量のガス漏洩等）に対して適切な把握手段（モニタ、センサ等）と的確なアクションプランを遂行できる保守要件の明確化を行っていく必要があると考えています（図5左）。

技術に関する今後の見通し

最終需要家への中・小規模の水素供給をターゲットとし、定量的評価に基づくリスクアセスメントの実施、付具措置代替となる安全技術の評価・確立、自然災害等非定常時の安全機能維持、安

全機能（システム）の堅牢化・冗長化構成の検討・実装、最適な配管スペックの研究と調達、既設管路内に適用可能な水素輸送管の選定を実施するなど、二重配管方式を活用した水素パイプライン輸送の実用化・事業化に向けての課題解決に向けた取り組みを実施していきます。

今後の事業展開

水素の需要はコンビナートの大規模水素発電、産業用燃料電池、水素ステーション等、多岐にわたります。その中でも、NTTの強みである「とう道」「管路」がある街区が主要なターゲットになります。NTT通信ビルを水素の地域供給ハブ拠点と位置付け、NTT通信ビルを起点に放射線状にある「とう道」「管路」に敷設する水素パイプラインで街区の需要家（自治体、商業施設、病院、水素ステーション等）へ水素を輸送し、供給を行っていきます（図2）。

また、電力・熱を必要とする需要家に対しては、水素発電を行い電力・熱に変換したうえで供給するモデルも検討しています。2030年には海外からの大量の水素調達が日本では期待されており、自治体やパートナー企業と協議・連携を深めていきます。

◆問い合わせ先

NTTアノードエナジー
経営企画部 広報室
TEL 03-5444-2442