

NTT

ISSN 0915-2318 平成2年3月5日第三種郵便物認可
令和3年3月1日発行 毎月1回1日発行 第33巻第3号(通巻384号)

技術ジャーナル

3

MARCH
2021

Vol.33 No.3

特集

新原理コンピュータへの取り組み NTTグループのICTソリューション

トップインタビュー

谷 直樹 NTTドコモ 常務執行役員(CTO) R&Dイノベーション本部長

グループ企業探訪

NTTデータカスタマサービス

特別連載

ムーンショット・エフェクト
——NTT研究所の技術レガシー

CONTENTS

2021年3月号

4 トップインタビュー

谷 直樹 NTTドコモ 常務執行役員(CTO) R&Dイノベーション本部長
技術の進化とサイバー・フィジカル融合でWellbeing Societyを実現
ポジティブシンキングで変革・挑戦・実行を回そう



10 特集

新原理コンピュータへの取り組み

12 新原理コンピュータへの取り組み

18 コヒーレントイジングマシンと量子アニーリングの性能比較実験

23 ボソニック量子計算に向けた長寿命周波数可変量子ビット

30 量子コンピュータの設計に向けて

37 量子コンピュータの実装技術の課題克服に向けた理論面からの取り組み

43 量子情報処理の誤り耐性技術とその実装方式

49 主役登場 Leonid Abdurakhimov (NTT物性科学基礎研究所)



50 特集

NTTグループのICTソリューション

52 新型コロナ禍における新しい体験型美術展「Digital×北斎」[破章]の開催

56 劇場にいるような臨場感あふれるマルチアングルVR配信
「REALIVE360(リアライブ360)」

62 デジタルトランスフォーメーションを推進し, Smart Worldを
実現するためのキーソリューション「ローカル5G」

69 MLOpsによる機械学習プロセスの高速化と継続的に
サービス価値を提供するための仕組みづくり

76 汎用言語モデル「BERT」のビジネス実用化技術に迫る

NTT 技術ジャーナル

82 特別連載 ムーンショット・エフェクト ——NTT研究所の技術レガシー

第7回 新しい発想の光ファイバ

86 from ★NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル

画像認識技術を用いたゴルフスイング解析サービス
「GOLF AI」

95 挑戦する研究者たち

西田 真也

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
上席特別研究員

同調圧力に鈍感であれ。

自由な時間は成功要因の1つである



100 明日のトップランナー

山端 元音

NTT物性科学基礎研究所 特別研究員

電子をひとつずつ正確に

捕獲し、高速で転送。

超高精度な電流標準への道を

ひらく「単電子転送技術」



104 グループ企業探訪

NTTデータカスタマサービス株式会社

フルターンでサービス提供をする

地域密着のトータルICT工務店



108 グローバルスタンダード最前線

ISO/IEC JTC1 SC27 WG2標準化動向

Focus on the News _____ 112

イベント _____ 131

読者の声 _____ 132

4月号予定

編集後記

本誌掲載内容についての
ご意見、ご要望、お問い合わせ先

一般社団法人電気通信協会内
NTT技術誌事務局
TEL (03) 3288-0608
FAX (03) 3288-0615
E-mail jimukyoku2008@tta.or.jp

本誌ご購入のお申し込み、
お問い合わせ先

一般社団法人電気通信協会
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/>

企画編集

日本電信電話株式会社
〒100-8116 東京都千代田区大手町1-5-1
大手町ファーストスクエア イーストタワー
NTTホームページ URL <http://www.ntt.co.jp/>

発行

一般社団法人電気通信協会
〒101-0003 東京都千代田区一ツ橋2-1-1如水会ビルディング6階
TEL (03) 3288-0608 FAX (03) 3288-0615
URL <http://www.tta.or.jp/>

©日本電信電話株式会社2021

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます●

※本誌に掲載されている社名、製品およびソフトウェアなどの名称は、
各社の商標または登録商標です。

NTT技術ジャーナルはWebで閲覧できます。

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

/ト/ッ/プ/イ/ン/タ/ビ/ユ/ー/

View from the Top

NTTドコモ
常務執行役員 (CTO)
R&Dイノベーション本部長

谷 直樹

PROFILE :

1989年日本電信電話入社。1992年NTTドコモ研究開発部、2011年関西支社ネットワーク部長、2014年M2Mビジネス部長、2015年IoTビジネス部長、2017年執行役員を経て、2020年6月より現職。



技術の進化と

サイバー・フィジカル融合で

Wellbeing Societyを実現

ポジティブシンキングで

変革・挑戦・実行を回そう

NTTの完全子会社となったNTTドコモ。5G（第5世代移動通信システム）のサービス開始とともにビジネス環境は変革期を迎えています。また、新型コロナウイルスの影響により社会課題への関心は高まっています。加速するデジタルトランスフォーメーション（DX）、リモートワークの普及等の社会の変革期にNTTドコモはどのような姿勢で臨むのか、谷直樹NTTドコモ常務執行役員に現在の取り組みとトップの心構えを伺いました。

技術・研究開発は
人々の幸せな未来につながっている

まずはNTTドコモを取り巻く環境等を教えてください。

NTTドコモを取り巻く環境を語るとき、ドコモの事業環境と、NTTグループとしての環境の2つの視点があります。まず、2020年はドコモのみならず通信各社が5G（第5世代移動通信システム）のサービスを開始し、競争環境が変化しました。そして、2020年12月29日、ドコモにはNTTの完全子会社化といった大きな動きがありました。

5Gでは単に新しい技術をサービスとして社会に提供するだけでなく、5Gサービスが社会課題の解決や新しい価値を創造していくことをめざしています。このためドコモではパートナーとなる企業・団体に対し、5Gの技術や仕様に関する情報の提供や、パートナー間の意見交換の場を提供する「ドコモ5Gオープンパートナープログラム」を2018年2月に開始しました。また、5Gを利用した新たなサービスを検討されているパートナー向けに、5Gを体感できる場として「ドコモ5Gオープンラボ」を提供してきました。

そして、5G商用サービスと同じネットワーク装置や同

じ周波数帯を利用し、ビジネス創出を本格的に開始することに加え、5G商用サービスと同環境を体験いただくことなどを目的とした「5Gプレサービス」を2019年9月に開始し、満を持するかたちで2020年3月に「5G商用サービス」を開始しました。

各社とも5Gサービスを開始し、その特性である高速・大容量を訴求しています。ドコモはお客さまにとって魅力的な料金をご提供することに加え、5Gがめざす社会課題の解決や新しい価値を創造していくことにも注力しています。また、世界各国の関係者とともに5Gの国際標準化をリードしてきましたが、5Gの先の「Beyond 5G」や「6G」についても国際標準化を積極的に推進していきたいと思っています。

ドコモはNTTの完全子会社となりましたが、両社のR&Dをこれまで以上に密接に連携していけるよう、万全な体制を整えたいです。ドコモは事業会社であり、事業の側面からニーズを直接R&Dに反映することができ、そのフィードバックを直接事業に反映することができる環

境にあります。R&Dの連携強化においては、こうした事業とのコミュニケーションのパイプを太くすることが期待でき、それにより連携をより有機的なものとしていきたいです。

ドコモの原点は「人と人とのコミュニケーション」だと私は考えています。研究開発を進めるにあたり、将来に向けてめざす姿として“Wellbeing Society”を掲げ、人に寄り添い、人にやさしい社会に貢献できるような研究開発に臨んでいます。つまり、私たちが社会課題の解決に努めることが、楽しく、幸せに暮らせる社会の創造につながっていくのです。アプローチは産業、社会、個人の3つの立場を踏まえたエコシステムの構築です。人のためになる産業を興し、人の住みやすい社会環境を整え、人が能力を発揮し、楽しく幸せに暮らすことをサポートします。このために必要な研究開発は何かを考えることが私たちの使命であると考えており、R&Dの連携において、この思いの共有も図っていきたいです。



研究開発は幸せな社会の実現につながっているのですね。

こうした未来を実現させる技術やサービスについて、現在、研究開発として重点を置いているのは、サイバー・フィジカル融合というフレームワークであり、これによりNTTグループが提唱しているIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想の実現にも貢献していきます。現実世界(フィジカル空間)のヒト・モノ・コトを情報化し、サイバー空間にてデータを獲得・蓄積し、そのデータを分析して未来を予測します。得た知見を価値化して、それを現実世界へフィードバック(アクチュエイト)するというループを循環させることで、前述のとおり、現実世界に生きる人や産業、社会に対して新たな体験や効率化、最適化、生産性の向上や安心・安全の提供などの価値創造に臨みます。

さらにサイバー・フィジカル融合の実現に向けて、ドコモはコアな技術の進化に挑んでいます。コアな技術に



ついて、まず、獲得・蓄積した多様なデータを結びつけて未来を予測して、知見を得るための技術であるAI(人工知能)です。次に、現実世界の情報化とフィードバックの手段を提供するIoT(Internet of Things)やデバイス技術。そして、現実世界とサイバー空間をつなぐネットワークです。そして、これらを業界横断的に活用するプラットフォームに進化させていくことで、“Wellbeing Society”を実現していきたいと考えています。

ほかにも、新型コロナウイルスの感染拡大によって、リアルな行動への制限が出てくるにつれ、バーチャルな世界やオンラインのコミュニケーションにシフトする傾向にあります。この流れの中で、2021年2月4～7日に開催した「docomo Open House 2021」では、完全オンラインとする中で、バーチャルな仕組みを体験いただくVirtual Boothを提供しました。これはバーチャル空間にセットしたブースを訪問してイベントや展示を楽しんでいただくもので、海外旅行をしているような体験ができるブースや自由視点でスポーツや音楽を楽しめるブースも設置しました。

ところで、バーチャルで体験した物事を「もっと見てみたい」「実際にこの目で見てみたい」と思うことがあるのではないのでしょうか。私は、バーチャルな世界をご提供することで、このような気持ちを引き出すことが大切だと思います。バーチャルの先に現実がある、ということは、バーチャルで体験できることの価値が高まれば、現実社会におけるその価値も高まるのです。バーチャルがリアルに取って代わるのではないかという声も時々耳にしますが、私はそうは思いません。バーチャルによってリアルな社会の活動を促進する、そんな展開も増えるのではないかと考えています。

全社員が未来を拓く可能性を持っている

バーチャルとの連携によるリアルの充実を現場と研究開発が一丸となって促進させるという取り組みに期待が高まりますね。

モバイル空間統計というものをご存じでしょうか。新型コロナウイルス関連の報道で、主要ターミナルの入出の増減率が出てきますが、モバイル空間統計により算出

した統計情報も活用されています。モバイル空間統計はドコモの携帯電話ネットワークの仕組みを使用して作成される人口の統計情報で、最短1時間前の性別・年代別・居住地別の人口分布を10分単位で提供することが可能です⁽¹⁾。また、NTTの研究所が開発した高速可視化技術を活用して、日本全国の人口を可視化するサービスを提供しています。このサービスでは、検索・読み出し速度が従来よりも7倍高速化し、利用者は時間推移に伴う日本全国の人口の変化をスムーズに表示・閲覧することが可能です。全国の1辺500 mメッシュごとに、性別、年代、居住地を自由に選択して表示します。

実際の事例として、パートナーのデータと組み合わせで予測モデルをつくることで、店舗経営者は商圈における当日の人口増減を把握できるため、売上を予測して弁当や総菜などの生産量を調整し、フードロスを軽減することができます。また、道路管理運営事業者は観光地などの特定エリアの当日の人口増減を把握して管理下の道路の渋滞発生を予測できます。スマートフォンアプリなどを通してドライバーに精度の高い渋滞予知情報を提供しているので、渋滞解消にもつながります。このような事例もサイバー・フィジカル融合の一環で、集積した情報のどこに価値を見出すかという先見性や企画力、分析力等をサービスとして具現化した一例なのです。

R&D部門発のサービスの話をしてきましたが、ドコモでは社員のさまざまなアイデアを新事業に活かせるようにR&D部門がその仕組みをサポートしています。社員から提起されたアイデアを実用化・事業化の可能性を評価して現実のものとしていきます。このようにR&Dや直接サービスにかかわっている社員以外が持っている可能性も大切にしたいし、光る何かが隠れていると信じています。

谷常務がこれまでトップとして大切にされてきたことを教えてください。

社会は今、新型コロナウイルスの感染拡大によって環境が大きく変化しています。これをチャンスとしてうまくとらえて、新しいアイデアを次々としていくタイミングであると考えています。こうした変化の激しい環境において重要視していることが3つあります。変革、挑戦、実行です。よく聞くワードかもしれませんが、これらに対して次のような思いを持っています。まずは変革です。



あらゆることが変革のチャンスであるとポジティブにとらえることです。2番目の挑戦については、自ら意思を持ってストーリーを描く、構想することです。全体像を描いて行動することが大切です。最後の実行はいうまでもありませんが、とにかく実行すること、できることから始めることです。スモールスタートで構わないのです。少しずつの積み重ねが大きな結果を生むと考えています。

ドコモでは多くの人々が研究開発に取り組んでいるため、それぞれの業務の方向が異なってくることもあります。そういうときには、原点に立ち返ることが重要です。担当者とのディスカッションの中で、「これって何のためにやっているんだっけ？」としばしば問うようにしています。話を聞いていると、より広い視野で議論することが必要だなと感じることがあるからです。そんなときこそ、原点を共有するためにコミュニケーションを充実させようと心掛けています。

話を聞くのはとても重要です。トップから一方的に伝えるのではなく、担当者の考えていることや気持ちを聞きたいと常に思っています。最初は理解するのが難しいと感じることも時々あるのですが、しっかり聞くとその人の本意がみえてきます。こじれそうな話も、「あれ？何のためにやっているんだっけ？」と、フランクに返すと、場も和み、「原点」に立ち返ることができ、それを共有し、共に前進することができるのです。耳を傾けることは多様性の理解や潜在能力を発掘することにもつながりますからね。



ストーリーと本質を把握するために原点に立ち返る

評判どおり、谷常務は話しやすい上司なのですね。

ただ、どうしても社員の皆さんは上司という立場の私に遠慮してしまうこともありますから、そこはなるべく私から話を聞くように心掛けています。個別に時間を取ることが難しいので、極力打合せのときに声をかけるようにしています。それでも時間がないときもあり、仕方がなく部下の話を遮ってしまうこともあります。また、社員によっては、打合せ等のスケジュールが埋まっている合間の私の手が空きそうなタイミングをうまくねらって訪ねてくることもあります。できるだけそういう時間も大切にしています。

昨今はテレワークをしていますから、ちょっとした日常のコミュニケーションを自由に図れず歯がゆいこともあります。それでも可能な限り話す機会を設けています。

先ほどお話したとおり、私はすべての方の話に耳を傾けるのと同時に、変革、挑戦、実行を実現するために何事もポジティブにとらえることを大切にしてきました。

これをうまく展開するにはメリハリも大事なのです。これは重要だと思うことには特に力を注げるように取捨選択し、力の入れどころをしっかりとつかむことです。例えば、資料作成するとき、その資料の意図がしっかりと理解できるように書かれていることは大切です。そして、次に大事なのはどこで誰に、どれくらいの時間を使って伝えるかということです。上司とお客さまでも全く違うし、講演会と経営会議でも違います。30秒で伝える内容と1時間で伝える内容も違います。こうしたシチュエーションをしっかりと把握した伝え方の工夫はとても大切です。作図、表現、文言等、すべて目的に応じて適用する必要があります。ですから私は資料を作成した人に「これは何のために使うんだっけ？」と、ストーリーと本質を把握するために原点に立ち返る質問をよく投げかけます。私はこれを常に意識していますし、社員の皆さん

にもぜひ意識していただきたいと思っています。

CTOとして、技術者の皆さんにも一言お願いいたします。

私は入社して約20年間、ドコモのR&D部門に在籍し、関西支社の設備系の部署、IoTビジネス関連の部署を経て、約9年ぶりにR&Dイノベーション本部へ戻ってきました。この約9年の間に技術は目覚ましく進化しています。2020年6月まで在籍していたIoTビジネスを手掛ける部署では、新技術を活用しながらパートナーとともに新しいビジネスモデルをつくり、収益を上げることを目的に仕事をしてきましたが、その期間は、外からドコモのR&Dを見ていたこととなります。昨年R&Dイノベーション本部長（CTO）に就任して、改めてドコモは素晴らしい技術を数多く保有しており、今まで以上にこれらの技術をビジネスに活かすことができると実感しました。

自らの技術に誇りを持って、かつその技術の意味や意義、位置をしっかりと把握していただきたいです。この

ように心掛けていると、チャンスが見えてくると思います。保有している技術が社会課題の解決に役立つ場面はあらゆるところにあります。チャンスが見えたら実行あるのみです。変革、挑戦、実行の3つは技術者の皆さんにもぜひ心掛けていただきたいと思っています。

（インタビュー：外川智恵/撮影：大野真也）

■参考文献

(1) https://www.nttdocomo.co.jp/biz/service/spatial_statistics/

※インタビューは距離を取りながら、アクリル板越しに行いました。

インタビューを終えて

「常務はとてもお話ししやすい方なのですよ」。インタビューの準備をしているときに、社員の方が微笑んで常務のことを教えてくださいました。ほどなくして現れたスラリとした長身の谷常務。社員の方がおしゃった意味がよく分かりました。白い歯を見せて笑顔でお話を聞いてくださるのです。「これから3つ話します」等と前置きをし、聞く側に心の準備をさせ、丁寧に解説してくださいました。そして、必ず笑いながら謙遜なさる。そんな谷常務の姿勢に社員は安心感を抱くのだと実感しました。

谷常務のご趣味は体を動かすことと食べることで、そして温泉等でリラックスされること。コロナ禍にあつて思うようにはいかないようですが、週に一度はジムで鍛えて、週末は奥様と相談して評判のレストランを訪ねられています。一期一会を座右の銘に楽しく生きているという谷常務。こうした考え方は2011年に関西支社のネットワーク部長として単身赴任した際の経験によるものだといいます。「設備の仕事は今までにない経験でした。多くの方々のご協力や仕事のやり方に大いに学びました」。環境の変化が人にもたらす影響を実感した谷常務が、世界的な変革期に使命感を持って臨まれている気概を感じたひと時でした。



特集

新原理コンピュータへの 取り組み

新原理コンピュータ



イジングマシン



量子コンピュータ

量子デザイン



量子誤り訂正

従来のコンピュータとは異なる原理で動作する新原理コンピュータが世界的に注目を集めている。本特集では、この分野におけるNTTでの取り組みを理論と実験の両面から紹介する。実験では光を使ったコヒーレントイジングマシンや超伝導量子ビット、理論では機能や規模に制約のある量子コンピュータ(NISQ)の能力を限界まで発揮させるための取り組み、およびNISQから始まり大規模量子計算に向けたシステムデザインを紹介する。

New Principle C

新原理コンピュータへの取り組み

イジングマシンや量子コンピュータなど、非ノイマン型の新原理コンピュータに関する研究動向を、NTT研究所における取り組みを交えて紹介する。

12

コヒーレントイジングマシンと量子アニーリングの性能比較実験

超伝導素子群を用いてイジング問題を解く「量子アニーリングマシン」とコヒーレントイジングマシンの計算能力を比較する実験を紹介する。

18

ボソニック量子計算に向けた長寿命周波数可変量子ビット

容量シャント型超伝導磁束量子ビットと3次元キャビティのハイブリッド化により実現された、長寿命かつ周波数可変な3次元量子ビットについて紹介する。

23

量子コンピュータの設計に向けて

莫大な数の量子ビットの相互作用を必要とする誤り耐性量子コンピュータの実現に向け、これらの構成要素をどのように組み上げていくかについて解説する。

30

量子コンピュータの実装技術の課題克服に向けた理論面からの取り組み

理論的知見に基づいて、物理実装上の制約がある量子コンピュータの能力を最大限利用するための研究について紹介する。

37

量子情報処理の誤り耐性技術とその実装方式

誤り耐性技術の研究開発、および量子情報処理の実装に向けた取り組みについて紹介する。

43

主役登場

Leonid Abdurakhimov (NTT物性科学基礎研究所)
量子技術の限界に挑戦する

49

computers

新原理コンピュータへの取り組み

現代のコンピュータとは異なる原理で動作する、量子コンピュータやイジングマシンなど非ノイマン型のコンピュータが注目を集めています。組合せ最適化問題、量子化学計算、素因数分解など特定の問題において威力を発揮しますが、どれも社会にインパクトのある重要な問題であるため、精力的に研究が進められています。本特集では、新原理コンピュータの進展を解説しながら、NTT研究所における理論と実験に関する取り組みを紹介します。

さいとう しろろ
齊藤 志郎^{†1} ことろ ひでき
後藤 秀樹^{†2}

NTT 物性科学基礎研究所^{†1}

NTT 物性科学基礎研究所 所長^{†2}

新原理コンピュータ

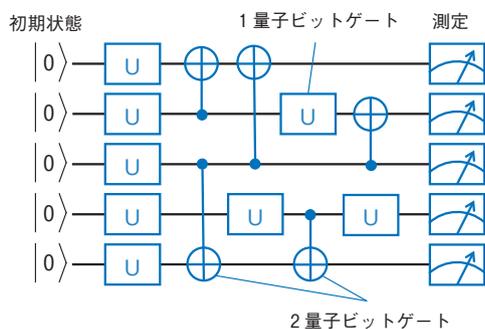
現在の半導体業界には「集積回路上のトランジスタの数が18カ月ごとに倍になる」というムーアの法則と呼ばれる経験則が存在します。実際に半導体素子はこの法則に従い微細化が進み、コンピュータの性能は年々向上しています。この経験則が今までどおり実現されていくと、トランジスタのサイズが微小化し、原子サイズで限界を迎えます。しかし、その前に量子効果が現れ従来の電気回路の法則が成り立たなくなる「量子力学の壁」があるといわれています。量子力学の世界には、重ね合わせ状態、粒子と波動の二重性など古典力学ではみられない不思議な性質があります。これらの性質を積極的に利用し従来とは異なる原理で動作するコンピュータが量子コンピュータです。現在の情報処理では、“0”と“1”の2値を取り得るビットを用いて計算が進みますが、量子コンピュータの基本素子

である量子ビットは“0”と“1”の任意の重ね合わせ状態を実現できます。量子ビットを N 個準備すると、 2^N 個の状態の重ね合わせを表現することができ、量子ビットの数を増やすと重ね合わせの状態数が指数関数的に増えます。この膨大な数の重ね合わせ状態に対して演算を進めることで超並列計算が可能となり、量子コンピュータの速さの要因となっています。また、量子コンピュータでは量子ビットの波としての性質を利用し、量子ビット間の位相の干渉効果により、超並列計算の結果から所望の解を見つけ出します。従来の逐次計算に基づくノイマン型のコンピュータとは異なり、量子コンピュータのように、新しい原理で動作する非ノイマン型のコンピュータが近年注目を集めています。本特集では、NTT研究所における新原理コンピュータに関する取り組みを、理論と実験の両面から紹介します。

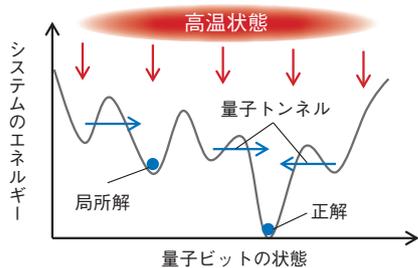
新原理コンピュータは大きく分けて2つの

タイプ、すなわち汎用量子コンピュータと量子アニーリングマシンに分けられます。前者は、多数の量子ビットを基底状態に準備し、**図1 (a)**に示すように1量子ビットゲート操作と2量子ビットゲート操作を繰り返しながら計算を進めます。因数分解や大規模検索に関する量子アルゴリズムが発見されており、古典アルゴリズムよりも高速化されることが理論的に証明されています。しかし、量子ビットは外部ノイズに弱く、エラーが頻繁に

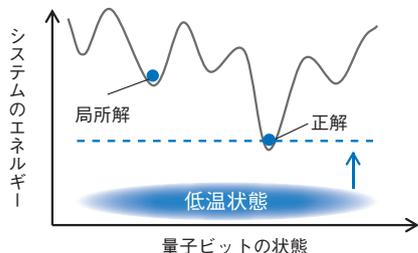
発生するため、量子誤り訂正用の冗長な量子ビット、すなわち膨大な数の量子ビットが必要となります。例えば、2048ビットの数を因数分解するために2千万個の量子ビットが必要という試算があります⁽¹⁾。この規模の量子ビットを現在の技術で作製することは非常に困難です。後者は、**図1 (b)**に示すように、多数の量子ビットをすべての状態の重ね合わせ、すなわち高温状態に準備し、徐々に冷却することでエネルギー最低状態（正解）を見つけ出します。途中、局所的な安定点からは量子的なトンネル効果で抜け出すことができるため、古典的なアニーリングアルゴリズムよりも速く正解に到達するといわれています。量子性による高速化は厳密には証明されていませんが、社会的ニーズの高い組合せ最適化問題の近似解が得られるため、注目を集めています。また、安定な状態をゆっくりと変化させながら計算が進むため外部ノイズに強いという特徴もあります。このタイプのコンピュータでは、最適化問題を物理系に実装する際に、イジングモデルと呼ばれる相互作用するスピン系を表す物理モデルが使われるため、イジングマシンとも呼ばれています。



(a) 汎用量子コンピュータのゲート演算



(b) 量子アニーリングマシンの動作原理



(c) コヒーレントイジングマシンの動作原理

図1 新原理コンピュータ

イジングマシン

超伝導量子ビットを用いた汎用量子コンピュータの研究において、2量子ビットゲート操作を実証、3量子ビットのもつれ状態を観測といった成果が報告されていた2011年に、カナダのベンチャー企業D-Wave Systemsから衝撃的なニュースが発表されました。128量子ビットを実装した量子アニーリングマシン（D-Wave One）が世界初の商用量子コンピュータとして発表されたのです。これは、超伝導量子ビットを用いて計算

するイジングマシンです。超伝導二オブを用いたD-Wave Oneの量子ビットは、汎用量子コンピュータで用いられるアルミニウム製の量子ビットと比較して、圧倒的に量子情報のメモリ時間が短いため、当時、量子性を疑う研究者もいましたが、その後の実証実験で量子性による高速化が確認されています。2013年には512量子ビットのD-Wave Two、2015年には1000量子ビット超のD-Wave 2X、2017年には2048量子ビットのD-Wave 2000Q、2020年には5000量子ビット超のD-wave advantageを発表しており、世界中の企業が同社の提供するクラウドサービスを利用し、量子イジングマシンのビジネス利用に関する研究開発を進めています。しかし、実際のビジネス応用にはさらなる大規模化が必要となります。さらに、超伝導量子ビットはチップ上の固体素子であるために、量子ビット間の結合が近接量子ビット間に限られるという制約があります。そのため、最適化問題を量子アニーリングマシンに実装する際には、問題のサイズよりも多くの量子ビットが必要になります。

一方、NTT研究所では、縮退光パラメトリック発振器(DOPO)を人工スピンとして使い、多数のDOPOパルスをもつ光ファイバ共振器中に閉じ込めることにより、スピン間の全結合を実装可能なコヒーレントイジングマシン(CIM)を開発しました。ファイバ共振器の全長を延ばすことで、人工スピンの数を増やすことが可能なため、固体素子と比べて、大規模化が比較的容易であると考えられます。CIMでは、DOPOの励起光の強度を徐々に強めることにより、図1(c)に示すように低温側から解を探索し、系のエネルギーが最適解に到達した時点で、正解が見つかり

ます。DOPOの量子的性質が計算機としての性能にどう寄与しているかはまだ研究途上ですが、MaxCut問題と呼ばれる典型的な組合せ最適化問題において、古典アニーリングアルゴリズムと比較して、高速化が実証されています⁽²⁾。本特集記事『コヒーレントイジングマシンと量子アニーリングの性能比較実験』⁽³⁾では、コヒーレントイジングマシンとD-Wave Systems社の量子アニーリングマシンの比較実験を紹介しています。

汎用量子コンピュータ

今から20年ほど前は、量子コンピュータの基本素子である量子ビットをいかに実現するかが問題となっていました。量子ビットには“0”と“1”の重ね合わせ状態を実現するための量子2準位系が必要ですが、どのような物理系を用いるべきか議論されていました。量子情報のメモリ時間の長い原子や電子は有望だが集積化が難しい、逆にメモリ時間は短い半導体や超伝導量子ビットは固体素子であるために半導体集積化技術が使える、光量子ビットは光通信との相性が良いなど、さまざまな候補が検討されました。実は、この議論は現在も続いており、それぞれの物理系がそれぞれの特徴を活かして発展してきました。超伝導量子コンピュータは50~70量子ビット、イオントラップ量子コンピュータは32量子ビット、半導体ドット量子コンピュータは2~3量子ビットの集積度を達成しています。特に、2019年にGoogleから発表された、53量子ビットを有する超伝導量子コンピュータが従来のスーパーコンピュータを上回ったとする「量子優位性の実証」は大きな話題となりました⁽⁴⁾。量子コンピュータが得意とする問題を解かせた結果で、すべての問題にお

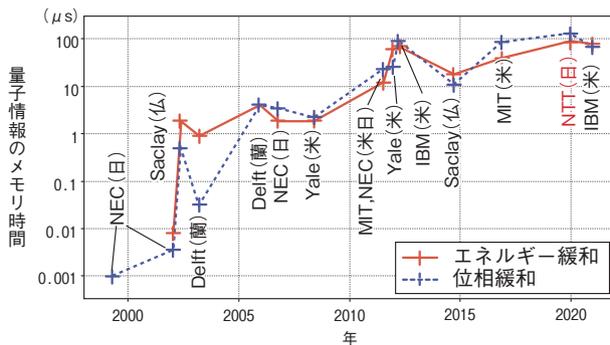
いて量子コンピュータが優れていることを実証したわけではありませんが、非常に重要なマイルストーンを達成したといえます。このマイルストーン達成に向けた超伝導量子ビットの発展を図2に示します。1999年に初めて超伝導量子ビットが動作したときはメモリ時間が1 nsと短く、非常に難しい実験でしたが、2012年ごろには約100 μ sまで延びて5桁も改善しました。その後、メモリ時間はそれほど延びていませんが、チップ上の量子ビット数が急激に増えています。これは、同時期に集積化に向けて最低限必要なメモリ時間が達成されたため、多くの研究機関で研究の方向性がメモリ時間延長から集積化へシフトしたためと考えられます。こうして、現在ではGoogle、IBM、Intelが50量子ビットの超伝導量子コンピュータチップを開発し、量子優位性が示されるまでに発展しました。

NTT研究所では、現在の超伝導量子コンピュータチップに集積化されている量子ビットとは異なるタイプの超伝導量子ビットの研究を続けてきました。その特性を活かして、巨視的量子重ね合わせ状態の検証⁽⁵⁾といった

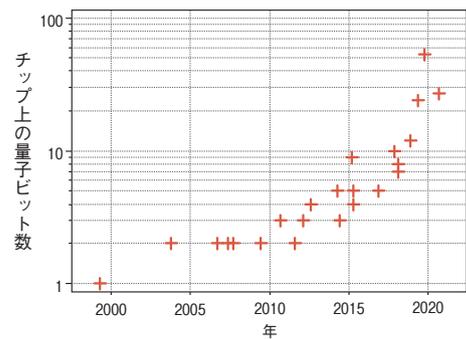
基礎物理の研究から、局所的な高感度磁場センサへの応用⁽⁶⁾まで、さまざまな取り組みを行ってきました。本特集記事『ボソニック量子計算に向けた長寿命周波数可変量子ビット』⁽⁷⁾では、NTTの超伝導量子ビットが世界最高レベルのメモリ時間を記録した成果(図2(a))と、量子コンピュータへの応用の可能性を紹介します。

誤り耐性量子コンピュータに向けて

量子優位性が示されたというニュースを聞くと、実用的な量子コンピュータがもうすぐ実現されるのではと思われるかもしれませんが、実は道のりは長いといわざるを得ません。現状の汎用量子コンピュータは集積度が50量子ビット程度です。さらにノイズの影響で量子情報が時間とともに失われ、ゲート操作が誤りを伴うため、何回もゲート操作を繰り返すような複雑な計算を実行することができません。このように機能や規模において制約のある量子コンピュータはNISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) デバイスと呼ばれています。NISQデバイスでも量子



(a) 超伝導量子ビットにおける量子情報のメモリ時間



(b) 超伝導量子ビットの集積化

図2 超伝導量子ビットの発展

優位性を示すことから、量子のポテンシャルをうかがい知ることができですが、実用に堪え得る大規模で複雑な量子計算を実行するためには誤り耐性量子コンピュータが必要となります。そのためには、複数の量子ビット（物理量子ビット）を準備し冗長性を持たせることで、誤り訂正可能なノイズに強い1つの量子ビット（論理量子ビット）を構成します。さらに、物理量子ビットを制御するレイヤ、論理量子ビットを制御するレイヤ、その上位のアルゴリズムを実行するレイヤなど複雑なレイヤ構造が必要となります。本特集記事『量子コンピュータの設計に向けて』⁽⁸⁾では、誤り耐性量子コンピュータがどのようなレイヤ構造を持つシステムとなるべきかを理論的に検討した結果を紹介し、より具体的には、論理量子ビットを構築するためには、多数の物理量子ビットを集積化するだけでなく、ソフトウェアの開発も必要です。例えば、個々の物理量子ビットの特性を評価したのち、制御系を効率良く校正するプログラムが必要です。さらに、誤り訂正のための演算やフィードバック回路を設計します。この設計を評価するためには量子回路シミュレータが必須です。本特集記事『量子情報処理の誤り耐性技術とその実装方式』⁽⁹⁾では、このような誤り耐性量子計算に向けたソフトウェア基盤の研究開発を紹介し、

冒頭でも述べたように、誤り耐性量子コンピュータには、2千万個の物理量子ビットが必要といわれています。そのための量子ビット集積化技術や制御技術は日進月歩で進化していますが、まだまだブレイクスルーが必要です。近い将来の目標としては、誤り訂正をしないNISQデバイスを高性能化し、従来型コンピュータとハイブリッド化することで、

量子機械学習や量子化学計算への応用が検討されています。NTT研究所では、計算理論や情報理論の知見に基づいて、NISQデバイスの能力を最大限利用するための研究を進めています。本特集記事『量子コンピュータの実装技術の課題克服に向けた理論面からの取り組み』⁽¹⁰⁾では、操作可能な手段を制限することでノイズを除去する、あるいは初期化されていない量子ビットを高速アルゴリズムで有効活用するなど、NISQデバイス*の性能を向上する方法を紹介し、さらに『量子情報処理の誤り耐性技術とその実装方式』⁽⁹⁾では、NISQデバイスのノイズを補償する手法として、計算コストは増えるが量子ビット数を増やす必要のない量子誤り抑制について解説します。

今後の展開

20年前は、1量子ビットを実装するための研究が行われ、量子コンピュータは100年先の技術ともいわれていました。10年前は、2量子ビットゲートが実現し、どのように量子ビットの数を増やしていくかが研究対象となり、量子コンピュータは50年後には実現の可能性があるという声が聞かれるようになりました。現在は、数十ビットの量子コンピュータが動作し、量子優位性が示されています。さらに数千ビットを有するイジングマシンが実現され、一部商用化されています。国のプロジェクトでは、30年後の誤り耐性量子コンピュータの実現が目標に掲げられるようになりました。このように新原理コンピュータに

* ここでの「NISQデバイス」とは、誤り訂正機能を備えたフルスケールの量子コンピュータが完成するまでに得られる、機能に制約のある量子コンピュータ全般を広く意味しており、本記事で紹介する技術は、必ずしも近い将来に使用可能であるわけではありません。

関しては加速度的に研究が進み、研究者も増え、裾野が広がっていると思います。とはいえ、道のりが長いことも確かです。実験研究者にとっては、大規模化に向けたブレイクスルーが必須です。現代のLSI（大規模集積回路）のようにイールドの高いプロセス技術、制御系も含めた集積化技術、あるいは、分散量子コンピューティングに向けたネットワーク技術が必要になるかもしれません。理論研究者にとっては、リソースのかからない量子誤り訂正符号や新しい量子アルゴリズムなどのブレイクスルーが期待されます。あるいは、非凡な科学者が全く新しいアイデアを提案し、問題解決が一気に進むかもしれません。いずれにせよ、何が起るかわからない挑戦的なテーマであることは確かであり、今後も、この分野の発展を注視していきたいと思います。

■参考文献

- (1) C. Gidney and M. Ekerå: "How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits," arXiv:1905.09749, 2019.
- (2) 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.
- (3) 武居・稲垣・稲葉・本庄: "コヒーレントイジングマシンと量子アニーリングの性能比較実験," NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 3, pp. 18-22, 2021.
- (4) 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. Yuezhen 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.
- (5) 角柳・松崎・樋田・山口・齊藤・Munro: "巨視的スケールでの実在性の破れを実証," NTT技術ジャーナル, Vol. 29, No. 5, pp. 20-23, 2017.
- (6) Focus on the News: "超伝導量子ビットによる高感度・高空間分解能電子スピン共鳴に成功," NTT技術ジャーナル, Vol. 31, No. 8, pp. 71-72, 2019.
- (7) Abdurakhimov・Mahboob・樋田・角柳・齊藤: "ボソニック量子計算に向けた長寿命周波数可変量子ビット," NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 3, pp. 23-29, 2021.
- (8) Munro・Bastidas・東・根本: "量子コンピュータの設計に向けて," NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 3, pp. 30-36, 2021.
- (9) 徳永・鈴木・遠藤・浅岡: "量子情報処理の誤り耐性技術とその実装方式," NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 3, pp. 43-48, 2021.
- (10) 秋笛・竹内・高橋・加藤・谷: "量子コンピュータの実装技術の課題克服に向けた理論面からの取り組み," NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 3, pp. 37-42, 2021.



(左から) 齊藤 志郎 / 後藤 秀樹

研究の初期段階では、理論と実験が理想と現実の両極から攻めますが、新原理コンピュータの研究は両者の距離が近づいてきていると思われます。NTT研究所の所を横断したコラボレーションが進むことを期待しています。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
量子科学イノベーション研究部
TEL 046-240-3327
FAX 046-240-4722
E-mail shiro.saito.bx@hco.ntt.co.jp

コヒーレントイジングマシンと 量子アニーリングの性能比較実験

NTTでは、光パラメトリック発振器群を用いてイジングモデルと呼ばれる相互作用するスピン群の基底状態探索問題を効率良く解く新しいコンピュータ「コヒーレントイジングマシン (CIM)」の研究開発を行っています。本稿では、超伝導素子群を用いてイジング問題を解く「量子アニーリングマシン」とCIMの計算能力を比較する実験を紹介します。

たけすえ 武居	ひろき 弘樹	いながき 稲垣	たかひろ 卓弘
いなば 稲葉	けんすけ 謙介	ほんじょう 本庄	としもり 利守

NTT 物性科学基礎研究所

はじめに

組合せ最適化問題は、たくさんの選択肢の組の中から最適なものを見つけ出す問題で、従来のコンピュータが多くの場合効率良く解くことができない問題として知られています。近年、組合せ最適化問題を相互作用するスピンの理論モデル（イジングモデル）のエネルギー最小状態探索問題に変換し、スピンを模擬する物理システムを用いて実験で解くコンピュータ（イジング型コンピュータ）がさかんに研究されています。近年のイジング型コンピュータの先駆けとなったのが、超伝導量子ビットを人工スピンとして用いる量子アニーリングマシン（QA）で、すでにカナダのD-Wave社により数千の量子ビットを実装した計算システムがリリースされています⁽¹⁾。コヒーレントイジングマシン（CIM）は、縮退光パラメトリック発振器（DOPO）を人工スピンとして用いるイジング型コンピュータであり^{(2),(3)}、NTTではCIMに基づく計算システム「LASOLV®」の研究開発を

行っています⁽⁴⁾。本稿では、NTTが米国NASA、スタンフォード大学と共同で実施したCIMとD-Wave QAの性能比較実験について説明します⁽⁵⁾。

コヒーレントイジングマシン

DOPOは光共振器中に位相感応増幅器（PSA）を配置して実現する光発振器です。PSAは非線形光学媒質にポンプ光を入力することで、光パラメトリック増幅過程によりポンプ光位相に対して0または π 位相の成分の光がもっとも効率良く増幅される光増幅器です⁽⁶⁾。そのため、発振しきい値より上ではDOPOの位相は0または π のいずれかのみとなります。よって、例えば位相0状態を上向きスピン、 π 状態を下向きスピンと見立てることで、イジングスピンを表現することができます。NTTでは、約1 kmの光ファイバを含む光共振器を用い、PSAを1 GHzの周波数でオンオフすることで、時間多重された数千のDOPOパルスを一括生成しています（図1）。DOPOパルス間の相互作用（＝ス

ピン間相互作用)は測定・フィードバックにより実装します。測定・フィードバック法では、数千(N個とします)のDOPOパルス群が1 km光ファイバ共振器中を一周するごとに、ビームスプリッタでそのエネルギーの一部を分岐し、すべてのDOPOパルスの振幅を測定、その結果を行列演算回路に入力します。行列演算回路には、あらかじめ解きたいイジング問題に対応するスピン間結合情報(N×N行列)を格納しておきます。そして、測定結果(要素数Nのベクトル)と結合行列の行列演算をすることで、次の周回における各パルスへのフィードバック情報を算出します。その情報を光パルスに乗せて、ビームスプリッタを介して光共振器中のDOPOパルスに注入することで、DOPOパルス間の結合を実現します。この測定・フィードバックの過程を、ポンプ光強度を0の状態か

ら増大させながら、DOPOパルス群が共振器を100~1000周する間繰り返すうち、当初はランダムであったDOPOパルスの位相はより安定な組合せに時間発展し、最終的に入力したイジングモデルの基底状態に高い確率で到達します。NTTでは、2016年に測定・フィードバックに基づく2000スピンのCIMを実現し、最新のデジタルコンピュータ上で実装した焼きなまし法に比べ、2000要素の組合せ最適化問題の解を約50倍高速に得ることを報告しました⁽²⁾。

量子アニーリングマシンとの比較実験

量子アニーリングは、横磁場を印加して上向きスピンと下向きスピンの量子重ね合わせ状態にしたスピン群を最初の状態として、徐々に横磁場を弱めつつ求めたいイジングモデルに相当するスピン間相互作用を入力する

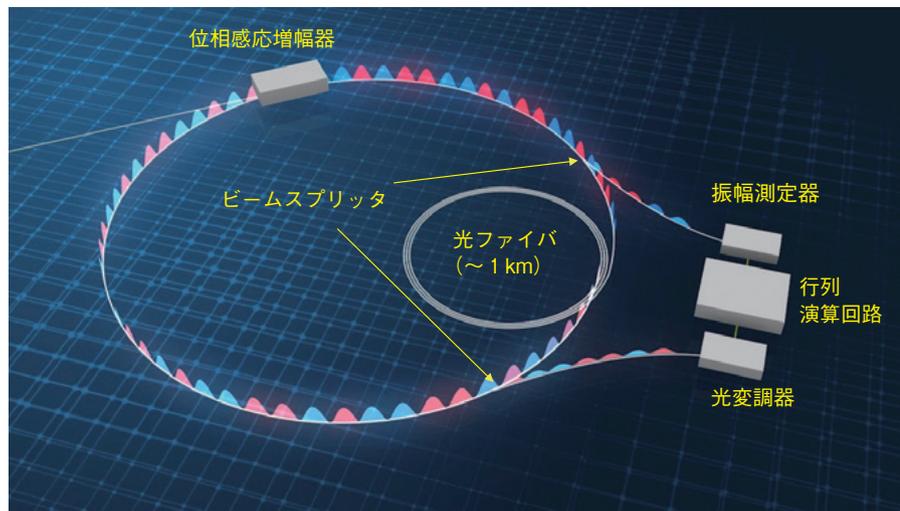


図1 測定・フィードバックを用いたコヒーレントイジングマシン

ことで、量子揺らぎを利用して高い確率で基底状態を得るアルゴリズムです⁽⁷⁾。これを、超伝導量子ビットを人工スピンとして用いて実装したD-Wave社のQA装置は、交通流の最適化に適用されるなど⁽⁸⁾、すでに実社会への応用をめざした取り組みに用いられています。今回、CIMを開発しているNTTとスタンフォード大学のそれぞれのCIM装置と、米国NASA Ames研究所が所有する2000量子ビットのD-Wave QA装置を用いて、共通のイジング問題を解いた場合の正答率の比較実験を行いました⁽⁵⁾。問題のスピン数を N_p 、各スピンと結合しているスピンの平均個数を d 、結合密度を $D=d/N_p$ とします。結合密度50%のさまざまなサイズの問題に対する正答率の評価結果を図2(a)に示します。このように、CIMでは正答率は問題サイズ

を大きくしても顕著には低下せず、 $N_p=80$ でも数10%を保ちました。一方、D-Wave QAでは N_p が大きくなると正答率は急激に悪化し、 $N_p=50$ ですでに0.001%にまで低下しました。さらに、異なる d の問題に対する正答率とスピン数の関係を図2(b)に示します。 $d=3$ の疎な結合の問題の場合、D-Wave QAがわずかにCIMを上回りますが、 d の値が増大するにつれ急激に正答率は低下します。一方、CIMでは $d=3$ の場合も、 $D=50\%$ の場合も正答率はほぼ変わらず、正答率が結合密度にほとんど依存しないことが分かります。

結合密度増大時のCIMとD-Wave QAの性能の違いは、スピン間結合方法の違いに起因していると考えられます。本研究で使用した2000スピンのD-Wave QAは、超伝導量

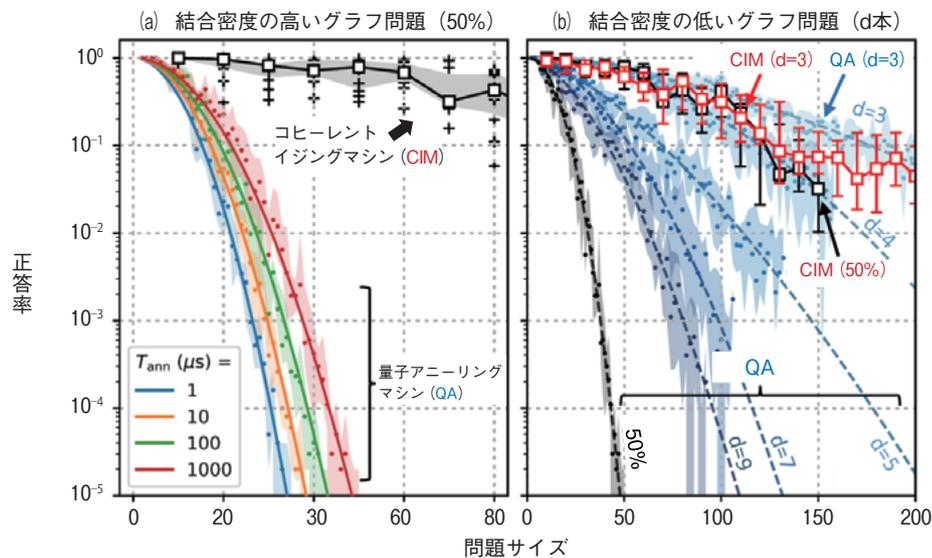


図2 CIMとD-Wave QAのイジング問題の厳密解正答率 (実験結果)

子ビット群はキメラグラフと呼ばれるグラフ構造となるよう物理的配線により結合されており、各量子ビットは6本の結合しか有していません。そのため、解きたいイジング問題をキメラグラフ構造に変換して入力する必要がありますが、結合密度の高い問題をより結合密度の低い問題に変換すると使用するスピン数が増大します。一方、CIMではDOPO間には物理的配線はなく測定・フィードバックにより全結合が可能であるため、結合密度にかかわらずイジング問題をそのまま入力可能であるという違いがあります。

今回の実験では、イジング問題のキメラグラフへの変換手法として、D-Wave QAで標準的に用いられている、問題を規則的に埋め込み全結合を可能とするNative clique embedding法と、事前に問題に応じて最適な埋め込み方法を計算することで必要な量子

ビット数を最小化するヒューリスティック法を用いました。この2手法を用いたD-Wave QAの50スピンのイジング問題に対する正答率と、CIMのそれとを比較した結果を図3に示します。ヒューリスティック法を用いることにより、D-Wave QAで解く実質的な問題のサイズを小さくすることができるため、正答率の向上がみられますが、 $d=5$ 以上ですでに正答率はCIMに及ばず、密度が増大するに従い差が顕著になることがここでも分かりました。この結果は、CIMやQAのような物理システムに基づくイジング型コンピュータにおいて、複雑なイジング問題をスピン間に実装する方法が、計算性能に大きく影響することを示しています。

今後の展開

本稿では、現時点（正確には、2019年時点）

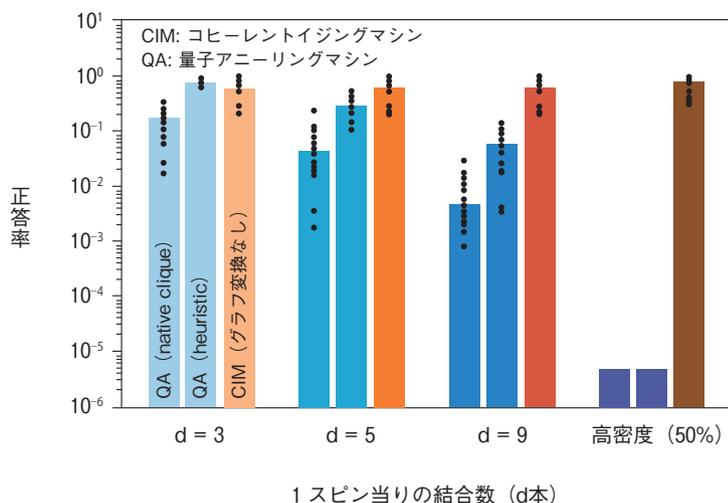


図3 50スピンのイジング問題における正答率の結合密度依存性

でのCIMとD-Wave QAの性能比較について述べましたが、CIMもQAも、今後さらに研究開発が進み一層性能が向上することが期待されます。これら相転移現象や量子性を示す物理システムに基づく新しい計算機が、現代のデジタル計算機にどれだけ優位性を持ち得るか、またその優位性を社会に寄与する「応用」に結びつけることができるかを明らかにすることが今後の重要な課題です。

■参考文献

- (1) www.dwavesys.com/
- (2) T. Inagaki, Y. Haribara, K. Igarashi, T. Sonobe, S. Tamate, T. Honjo, A. Marandi, P. L. McMahon, T. Umeki, K. Enbutsu, O. Tadanaga, H. Takenouchi, K. Aihara, K. Kawarabayashi, K. Inoue, S. Utsunomiya, and H. Takesue: "A coherent Ising machine for 2000-node optimization problems," *Science*, Vol. 354, No. 6312, pp. 603-606, Nov. 2016.
- (3) P. L. McMahon, A. Marandi, Y. Haribara, R. Hamerly, C. Langrock, S. Tamate, T. Inagaki, H. Takesue, S. Utsunomiya, K. Aihara, R. L. Byer, M. M. Fejer, H. Mabuchi, and Y. Yamamoto: "A fully programmable 100-spin coherent Ising machine with all-to-all connections," *Science*, Vol. 354, No. 6312, pp. 614-617, Nov. 2016.
- (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) R. Hamerly, T. Inagaki, P. L. McMahon, D. Venturelli, A. Marandi, T. Onodera, E. Ng, C. Langrock, K. Inaba, T. Honjo, K. Enbutsu, T. Umeki, R. Kasahara, S. Utsunomiya, S. Kako, K. Kawarabayashi, R. L. Byer, M. M. Fejer, H. Mabuchi, D. Englund, E. Rieffel, H. Takesue, and Y. Yamamoto: "Experimental investigation of performance differences between coherent Ising machines and a quantum annealer," *Sci. Adv.*, Vol. 5, No. 5, eaau0823, May 2019.
- (6) 梅木・風間・小林・圓佛・笠原・宮本: "低雑音高出力パラメトリック増幅中継技術," *NTT技術ジャーナル*, Vol. 31, No. 3, pp. 22-26, 2019.
- (7) T. Kadowaki and H. Nishimori: "Quantum annealing in the transverse Ising model," *Phys. Rev. E*, Vol. 58, No.5, pp. 5355-5363, 1998.
- (8) F. Neukart, G. Compostella, C. Seidel, D. V. Dollen, S. Yarkoni, and B. Parney: "Traffic flow optimization using a quantum annealer," *Frontiers in ICT*, Vol. 4, No. 29, Dec. 2017.



(左から) 武居 弘樹 / 稲葉 謙介 /
本庄 利守 / 稲垣 卓弘

最近のCIM研究は「基礎」と「応用」の両方をめざした研究開発となってきました。多くの方の協力を得て、ダイナミックな変化を楽しみつつ日々研究開発に勤めています。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
量子科学イノベーション研究部
TEL 046-240-3489
FAX 046-240-4726
E-mail hiroki.takesue.km@hco.ntt.co.jp

ボソニック量子計算に向けた 長寿命周波数可変量子ビット

Leonid V. Abdurakhimov

Imran Mahboob

といだ ひらく かくやなぎ こうすけ
樋田 啓 角柳 孝輔

さいとう しろう
齊藤 志郎

NTT 物性科学基礎研究所

容量シャント型超伝導磁束量子ビットと3次元キャビティのハイブリッド化により、長寿命かつ周波数可変な3次元量子ビットを実現しました。これまで、2次元磁束量子ビットで実現されているエネルギー緩和時間は50 μs 程度でしたが、今回90 μs まで延ばすことに成功しました。この新しいデザインは、3次元キャビティ中のマイクロ波の状態を量子ビットとして利用するボソニック量子ビットへの応用が期待できます。

超伝導量子計算機

量子計算は、重ね合わせやエンタングルメント^{*1}のように、よく研究されてはいるものの、十分に活用されてこなかった量子現象を利用した新しい計算方法です。基本素子は量子ビットと呼ばれる2準位系で、基底状態 $|0\rangle$ と励起状態 $|1\rangle$ の任意の重ね合わせ状態 $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ (α と β は $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ を満たす複素振幅)を準備することができます。N個の量子ビットを用意すると、 2^N 個の状態の重ね合わせをつくることができます。すなわち、 2^N 個の入力を1つの量子状態として、N個の量子ビットにエンコードし、同時に演算することができるのです。この性質は量子並列性と呼ばれています。ピーター・ショアやロブ・グローバーが発見した量子アルゴリズムでは、この性質と量子位相^{*2}の干渉効果を合わせることで、多数の入力に対する出力を効率良く得ることができます。その結果、量子計算機は、大きな数の因数分解

(ショアのアルゴリズム)や大規模データ検索(グローバーのアルゴリズム)などの問題を、従来の計算機よりも格段に速く解くことができます。

現在は量子計算機実現に向けて、超伝導量子ビット、イオントラップ、光量子ビット、スピン量子ビットなどさまざまな物理系が精力的に研究されています。それぞれの系が異なる長所と短所を持ち合わせていますが、中でも超伝導量子ビットはもっとも進んだハードウェアプラットフォームであるといえます。このことは、Google、IBM、Microsoftに代表される大企業やRigetti computingなどのスタートアップが超伝導量子計算機に注力していることから推察されます。さまざまな種類の超伝導量子ビットが研究されていますが、大規模量子計算に向けた開発では、

*1 エンタングルメント：量子ビット間には、古典力学では説明できないような相関を持たせることができます。このような相関あるいは状態をエンタングルメントと呼びます。

*2 量子位相：量子状態には古典的な波と同様に位相因子が存在し、量子ビット間の干渉効果を引き起こします。

表 最新の超伝導量子計算機の比較. []内の値は2次元トランズモン（補助量子ビット）の緩和時間^{(1)~(4)}

企業/大学	量子情報のエンコード	量子ビット	周波数制御	T_1 (μs)	T_2 (μs)	量子ビット数	誤り訂正
Google	量子2準位系	2次元トランズモン	可変	16	N/A	53	なし
IBM	量子2準位系	2次元トランズモン	固定	79	69	65	なし
デルフト大学	量子2準位系	2次元トランズモン	可変	32	34	5	なし
イエール大学	キャビティのボソニック状態	3次元キャビティ + 2次元トランズモン	固定	N/A [35]	320 [13]	1	あり

その制御性の良さと量子情報の保持時間の長さからトランズモン^{*3}が主流となっています。トランズモンの中でも、量子ビットを形成する2準位間の遷移周波数が固定されたタイプと遷移周波数可変なタイプとに分かれます。一般的に前者は量子情報の保持時間が長く、後者は量子演算用のゲート操作の自由度が高いという特徴があります。表に両者の代表的な例を示します。

近年、小規模超伝導量子計算機は著しく進歩してはいるものの、汎用量子計算機の実現はいまだに挑戦的な目標となっています。最大の問題はノイズ環境との相互作用により量子情報が失われてしまうことです。量子情報の保持時間を示す性能指数は、エネルギー緩和時間^{*4} T_1 と位相緩和時間^{*5} T_2 です。Google, IBM, デルフト大学が採用しているトランズモンの T_1 と T_2 は最大でも100 μs

程度であり(表)、量子ビットの典型的なゲート操作時間は100 ns程度です。これらの結果から、最先端の量子計算機におけるゲート操作の誤り率は 10^{-3} と見積もられます。この誤り率で信頼できる量子計算を実行するためには、量子誤り訂正のためのオーバーヘッドが要求され、実用的な量子計算機には最低でも2千万個の量子ビット実装が必要であるといわれています⁽⁵⁾。現在の量子ビット実装技術を拡張していくには限界があり、分散量子計算などの次世代実装技術が期待されています。

一方、誤り耐性量子計算に対する異なるアプローチとして、hardware-efficientな量子計算方式が近年注目を集めています。この方式では、量子ビット自体が量子誤り訂正を実行する機能を有し、従来方式のようなオーバーヘッドを必要としないという利点があります。有望なアプローチの1つとして、3次元キャビティ中のマイクロ波光子状態に量子情報をエンコードするボソニック量子ビットが精力的に研究されています⁽⁶⁾。3次元キャビティを冷却し量子現象が顕著に現れる領域に入ると、マイクロ波光子の状態はその光子数に応じて離散化された量子状態となります。

*3 トランズモン：超伝導量子ビットの一種。電荷状態に量子情報をエンコードする電荷量子ビットの改良版であり、電荷量子ビットを並列キャパシタでシャントすることによりノイズ耐性を向上させ、長い緩和時間を達成しています。

*4 エネルギー緩和時間：量子ビットの励起状態が基底状態に緩和する時間。

*5 位相緩和時間：量子ビットでは、基底状態と励起状態間の量子位相の差を観測することができます。この位相差の情報失われていく時間を位相緩和時間と呼びます。

すなわち、量子状態は、 $|0\rangle_c, |1\rangle_c, \dots |n\rangle_c$ 、と離散化されており、キャビティ中に0, 1, 2, ..., n個のマイクロ波光子が存在する状態を表します。しかし、キャビティ中の光子数状態はエネルギーが等間隔に離散化されているため、 $|1\rangle_c$ を励起すると $|2\rangle_c, |3\rangle_c, \dots$ などの高エネルギー状態も同時に励起されてしまい、超伝導量子ビットのように任意の2準位間のみを操作することはできません。そこで、キャビティを超伝導量子ビットと相互作用させ、光子数状態のエネルギーをわずかにシフトさせることで、それぞれの光子数状態に個別にアクセスできるようにします。この量子ビットはその役割から、補助量子ビットと呼ばれていますが、ボソニック量子ビットでは非常に重要な要素となります。次に、ボソニック量子ビットのエンコーディングの例を示します。ここでは、平均光子数が等しく、偶数である $|0\rangle_L = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_c + |4\rangle_c)$ 、 $|1\rangle_L = |2\rangle_c$ を量子ビットの2状態として用います。キャビティで生じるエラーの主要因は光子数の減少です。ボソニック量子ビットに対しては、量子状態を壊すことなく光子数の偶奇性を測定することが可能です。そこで奇数が観測された場合は光子ロスが起きたと判断し、光子を追加することでエラーを訂正できます。

本稿では、ボソニック量子ビットに適用可能な新しい周波数可変量子ビットを紹介いたします。この量子ビットはボソニック量子ビットの補助量子ビットとして利用できるだけでなく、ボソニック量子ビット間の可変結合素

子としての応用も期待できます。可変結合素子は、大規模ボソニック量子計算機実現に向けた重要な要素技術です。

3次元ハイブリッド磁束量子ビット

容量シャント型磁束量子ビット^{*6}は2007年に理論提案され⁽⁷⁾、2016年に2次元チップ上に実現されました⁽⁸⁾。私たちは、2次元容量シャント型磁束量子ビット(図1)を銅製の3次元キャビティ(図2(a))中に設置することで、3次元ハイブリッド磁束量子ビットを実現しました⁽⁹⁾。磁束量子ビットは3つのジョセフソン接合を有する超伝導ループから構成されており、接合の1つは他の2つよりも小さく設計されています(図1(a), (d))。この小さな接合は、2つの矩形アルミニウムパッドから成る平面キャパシタによりシャントされています(図1(a)-(c))。まず、このキャパシタをサファイア基板上に作製し、次に斜め蒸着法を用いて微小なジョセフソン接合を作製します。ジョセフソン接合は2層の超伝導アルミニウム薄膜の間に、薄い(2 nm程度)絶縁膜を挟んだ構造であり(図1(e))、酸化アルミニウムから成る絶縁膜は酸素雰囲気中でアルミニウムの表面を酸化することで形成します。

2次元容量シャント型磁束量子ビットを作

*6 容量シャント型磁束量子ビット：超伝導量子ビットの一種である磁束量子ビットの改良版。磁束量子ビットは、超伝導ループを流れる電流の向き、すなわち電流が作り出す磁束の向きに量子情報をエンコードします。容量シャント型磁束量子ビットでは、磁束量子ビットを並列キャパシタでシャントすることにより、長い緩和時間を達成しています。

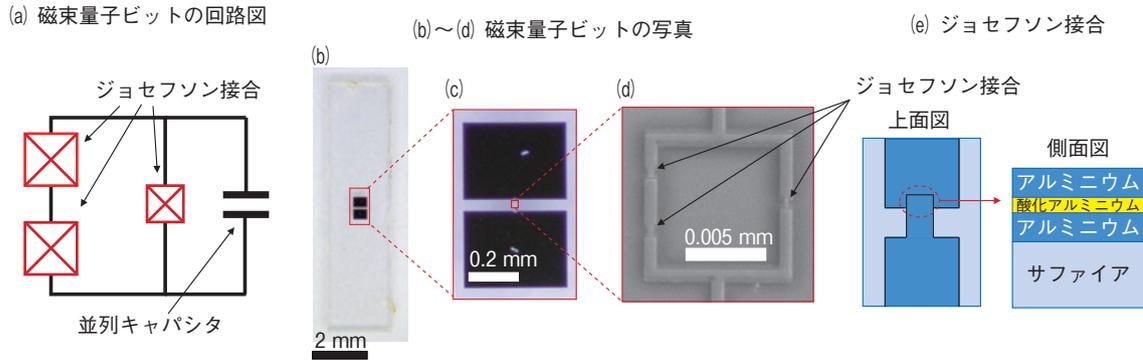


図1 2次元容量シャント型磁束量子ビット

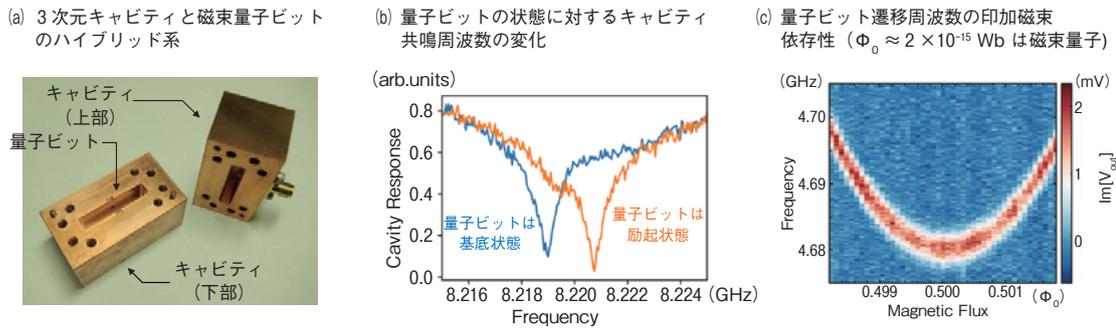


図2 3次元ハイブリッド磁束量子ビット

製したサファイア基板を3次元共振器中に設置し(図2(a)),希釈冷凍機を用いて10 mKまで冷却します。量子ビットが基底状態から励起状態に励起されると、キャビティと量子ビットの静電結合によりキャビティの共鳴周波数が高周波側に2 MHz程度シフトします(図2(b))。つまり、キャビティの共鳴周波数を測定すると、量子ビットの状態を読み出すことができます。量子ビットの2準位間の遷移周波数は、外部磁束 $\Phi_e = B \cdot S$ によって制御可能です(図2(c))。ここで、 B は印加磁場、 S は量子ビットのループ面積を表します。 $\Phi_e = 0.5\Phi_0$ では、外部磁束の揺らぎに対して

量子ビットの遷移周波数が安定しており(図2(c))、もっとも長い位相緩和時間が得られるため、最適動作点と呼ばれています。私たちの3次元ハイブリッド磁束量子ビットは、この最適動作点において、エネルギー緩和時間 $T_1 = 60 - 90 \mu s$ 、位相緩和時間 $T_2 = 100 \mu s$ を記録しました⁽¹⁰⁾。これらの緩和時間は、超伝導磁束量子ビットに対する先行研究の結果を超えるものであり(図3)、周波数固定トランズモンと同程度の性能を達成しています。

ボソニック量子ビット

3次元ハイブリッド磁束量子ビットは、現

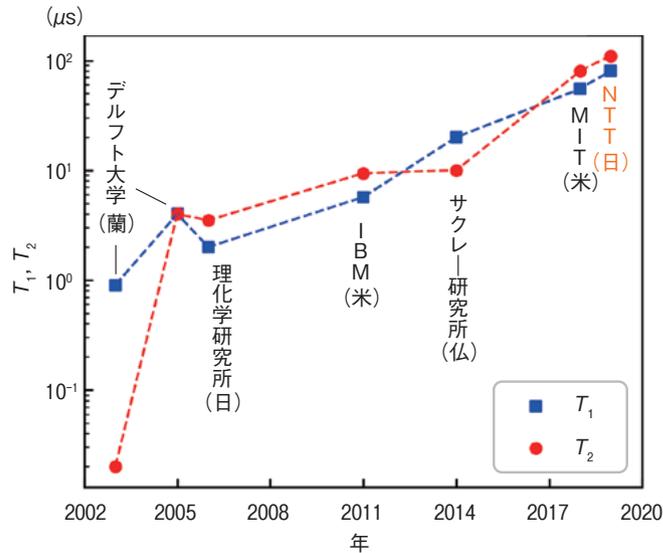


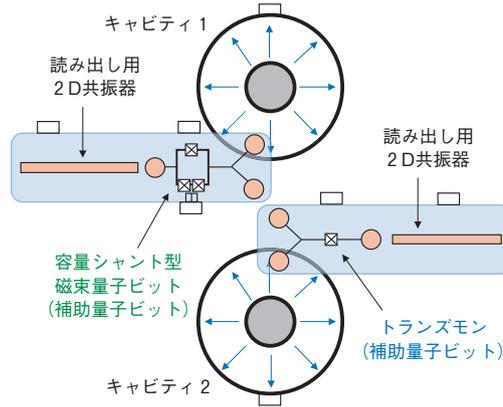
図3 超伝導磁束量子ビットのエネルギー緩和時間 T_1 と位相緩和時間 T_2 の推移

在，超伝導量子計算機に広く用いられているトランズモンと同程度のエネルギー緩和時間を示すことが明らかとなりました。これは量子計算機実現に向け，トランズモンに加えて3次元磁束量子ビットも利用できることを示唆しています。3次元キャビティとの整合性の良さから，特に，ボソニック量子ビットを用いた量子計算への応用が期待できます。

3次元キャビティ中のボソニック量子ビットを用いた量子計算は，hardware-efficientな量子情報処理に向けた有望なアプローチです。最近，キャビティ中の光子数状態に量子情報をエンコードし，1量子ビットに対する量子誤り訂正の可能性が実証されました⁽⁴⁾。次の重要な目標は，1量子ビットに対する量子誤り訂正の精度向上に向けたプロトコル改良と，量子誤り訂正を実装した複数量子ビット間におけるゲート操作の実証で

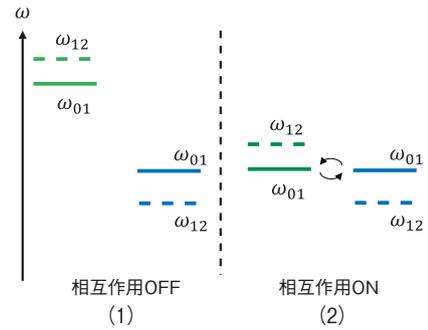
す。2量子ビットゲート操作は，2つのボソニック量子ビット間を補助量子ビットで結合することにより実現可能です。例えば，2つのボソニック量子ビットを周波数固定トランズモンで結合し，制御NOTゲート操作を実証した実験が報告されています⁽¹¹⁾。しかし，周波数固定トランズモンによるボソニック量子ビット間の結合は固定されており，量子ビット間の相互作用が必要ないアイドル状態においても常に相互作用が存在するため，エラーが蓄積する可能性があります。この問題は，可変結合素子の導入で解決することができます。3次元ハイブリッド磁束量子ビットは，外部磁場による遷移周波数の制御が可能のため，可変結合素子に適用することができます。3次元ハイブリッド磁束量子ビットを用いて，ボソニック量子ビット間の可変結合を実現するための概要を図4に示します。2

(a) 2つの量子ビット間の結合をON/OFFできるボソニック量子ビット



3次元同軸型キャビティにボソニック量子ビットをエンコードする。可変結合は補助量子ビット間のiSWAPゲート操作により実現

(b) 補助量子ビット間のiSWAPゲート操作



- (1) 周波数の離調により補助量子ビット間の相互作用OFF
- (2) 補助量子ビットが共鳴し相互作用することでiSWAP操作が実現。 ω_{01} は量子ビットの基底状態と励起状態間の遷移周波数、 ω_{12} は励起状態と第2励起状態間の遷移周波数

図4 ボソニック量子ビット間の可変結合

つのボソニック量子ビット、すなわち2つのキャビティ間の結合は、2つの補助量子ビットを介して行われます(図4(a))。ここで、一方の補助量子ビットは容量シャント型磁束量子ビット、もう一方がトランズモンです。キャビティ間の結合のオン・オフは、図4(b)に示す補助量子ビット間のiSWAPゲートにより実現します⁽¹²⁾。

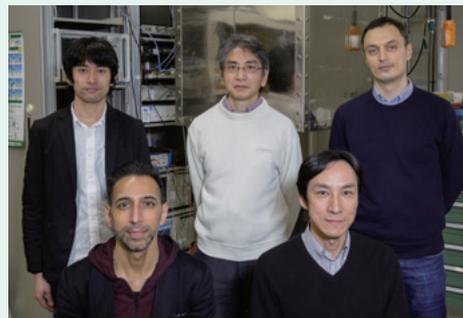
今後の展開

本稿では、長寿命と周波数制御性を兼ね備えた新しいタイプの3次元超伝導量子ビットを紹介しました。今後は、最近注目を集めているhardware-efficientな量子計算、すなわちボソニック量子ビットへの応用可能性を検討する予定です。

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. Yuezhen 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) E. J. Zhang, S. Srinivasan, N. Sundaresan, D. F. Bogorin, Y. Martin, J. B. Hertzberg, J. Timmerwille, E. J. Pritchett, J. B. Yau, C. Wang, W. Landers, E. P. Lewandowski, A. Narasgond, S. Rosenblatt, G. A. Keefe, I. Lauer, M. B. Rothwell, D. T. McClure, O. E. Dial, J. S. Orcutt, M. Brink, and J. M. Chow: "High-fidelity superconducting quantum processors via laser-annealing of transmon qubits," arXiv:2012.08475.
- (3) M. A. Rol, F. Battistel, F.K. Malinowski, C.C. Bultink, B.M. Tarasinski, R. Vollmer, N. Haider, N. Muthusubramanian, A. Bruno, B.M. Terhal, and L. DiCarlo: "Fast, High-Fidelity Conditional-Phase Gate Exploiting Leakage Interference in

- Weakly Anharmonic Superconducting Qubits,” Phys. Rev. Lett., Vol. 123, No. 12, 120502, Sept. 2019.
- (4) N. Ofek, A. Petrenko, R. Heeres, P. Reinhold, Z. Leghtas, B. Vlastakis, Y. Liu, L. Frunzio, S. M. Girvin, L. Jiang, M. Mirrahimi, M. H. Devoret, and R. J. Schoelkopf: “Extending the lifetime of a quantum bit with error correction in superconducting circuits,” Nature, Vol. 536, pp. 441-445, August 2016.
 - (5) C. Gidney and M. Eker: “How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits,” arXiv:1605.09749.
 - (6) W. Cai, Y. Ma, W. Wang, C. L. Zou, and L. Sun: “Bosonic quantum error correction codes in superconducting quantum circuits,” arXiv:2010.08699.
 - (7) J. Q. You, X. Hu, S. Ashhab, and F. Nori: “Low-decoherence flux qubit,” Phys. Rev. B, Vol.75, 140515, April 2007.
 - (8) F. Yan, S. Gustavsson, A. Kamal, J. Birenbaum, A. P. Sears, D. Hover, T. J. Gudmundsen, D. Rosenberg, G. Samach, S. Weber, J. L. Yoder, T. P. Orlando, J. Clarke, A. J. Kerman, and W. D. Oliver: “The flux qubit revisited to enhance coherence and reproducibility,” Nat. Commun., Vol. 7, 12964, Nov. 2016.
 - (9) L. V. Abdurakhimova, I. Mahboob, H. Toida, K. Kakuyanagi, and S. Saito: “A long-lived capacitively shunted flux qubit embedded in a 3D cavity,” Appl. Phys. Lett., Vol. 115, No. 26, 262601, Dec. 2019.
 - (10) L. V. Abdurakhimov, I. Mahboob, H. Toida, K. Kakuyanagi, Y. Matsuzaki, and S. Saito: “Driven-state relaxation of a coupled qubit-defect system in spin-locking measurements,” Phys. Rev. B, Vol. 102, No. 10, 100502 (R), Sept. 2020.
 - (11) S. Rosenblum, Y. Y. Gao, P. Reinhold, C. Wang, C. J. Axline, L. Frunzio, S. M. Girvin, L. Jiang, M. Mirrahimi, M. H. Devoret, and R. J. Schoelkopf: “A CNOT gate between multiphoton qubits encoded in two cavities,” Nat. Commun., Vol.9, 652, Nov. 2018.
 - (12) R. Barends, C.M. Quintana, A.G. Petukhov, Y. Chen, D. Kafri, K. Kechedzhi, R. Collins, O. Naaman, S. Boixo, F. Arute, K. Arya, D. Buell, B. Burkett, Z. Chen, B. Chiaro, A. Dunsworth, B. Foxen, A. Fowler, C. Gidney, M. Giustina, R. Graff, T. Huang, E. Jeffrey, J. Kelly, P. V. Klimov, F. Kostritsa, D. Landhuis, E. Lucero, M. McEwen, A. Megrant, X. Mi, J. Mutus, M. Neeley, C. Neill, E. Ostby, P. Roushan, D. Sank, K.J. Satzinger, A. Vainsencher, T. White, J. Yao, P. Yeh, A. Zalcman, H. Neven, V. N. Smelyanskiy, and J. M. Martinis: “Diabatic Gates for Frequency-Tunable Superconducting Qubits,” Phys. Rev. Lett., Vol. 123, No.21, 210501, Nov. 2019.



(後列左から) 樋田 啓 / 角柳 孝輔 /

Leonid V. Abdurakhimov

(前列左から) Imran Mahboob / 齊藤 志郎

1999年に超伝導量子ビットが誕生してから約20年が経ちました。この20年で超伝導量子ビットの緩和時間は飛躍的に伸びました。これからは世界トップレベルの量子ビットをさまざまな応用に活かしたいと思います。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所

量子科学イノベーション研究部

超伝導量子回路研究グループ

TEL 046-240-3327

FAX 046-240-4722

E-mail shiro.saito.bx@hco.ntt.co.jp

量子コンピュータの設計に向けて

William John Munro^{†1,2}

Victor. M. Bastidas^{†1,2}

あすま こうじ ねもと かえ
東 浩司^{†1,2} 根本 香絵^{†3}

NTT 物性科学基礎研究所^{†1}

NTT 理論量子物理研究センタ^{†2}

国立情報学研究所^{†3}

私たちは現在、小規模な量子コンピュータや量子ネットワークの構成要素を作成できるレベルの量子技術を手にしています。ここでの課題は、莫大な数の量子ビットの相互作用を必要とする誤り耐性量子コンピュータの実現に向け、これらの構成要素をどのように組み上げていくかにあります。本稿では、現在分野で想定されている量子コンピュータのレイヤ構造について解説します。

はじめに

量子力学の原理が、従来技術では実現できない、あるいは従来技術の性能を大きく凌駕する、全く新しい技術を生み出すことが分かっているから約半世紀になります。これら技術のすべては、「量子」の技術的優位性を獲得するために、「量子コヒーレンス^{*1}」や「量子もつれ^{*2}」を利用し、その応用範囲は量子計測・イメージングから、量子通信、量子計算に至るまでと、広範なものになっています。これらの分野自体は依然として揺籃期にあります。私たちはすでに、量子センサアレイを含む多数の入力を取り入れ、量子コンピュータをつなぐ「量子インターネット」の姿さえも想像しています⁽¹⁾。必要とあれば量子時計^{*3}を用いて、ここで使用されるすべてのデバイスを同期することもできます⁽²⁾。ここでの疑問は、図1にあるように、現在手に入る数量子ビットデバイスから、NISQ

(Noisy Intermediate-Scale Quantum) プロセッサ⁽³⁾や、究極的な誤り耐性量子コンピュータ⁽⁴⁾にどのように移行していくか、あるいはこれらを実現するためにどのような道のりを歩むべきかということです。

ここ10年間で、量子技術の開発やその将来に関するパラダイムシフトが起きてきました。一研究室レベルで、数量子ビットを用いて原理検証実験を行ってきたこれまでとは異なり、商用利用可能で、ある程度の規模を持つ量子プロセッサを構築するレベルへと移行してきました。超伝導回路、イオントラップ、光学系では、コヒーレンスを保ちながら同時

*1 量子コヒーレンス：量子力学に従う系の状態は、波のような性質を持つ波動関数を使ってしか表現できないことがあります。この状態は「量子コヒーレンスを持つ」とみなされます。

*2 量子もつれ：複数粒子の状態が、部分系の記述をどんなに巧みに持ち寄っても決して表現できない、量子力学特有の現象。量子通信、量子計算のリソース、光子や原子などを用いて、その存在はすでに実験で確認されています。

*3 量子時計：不確定さが量子力学的限界に到達している原子時計。

に動作する約50量子ビットを持つデバイスが実現され、それらの上で非自明な量子アルゴリズムが実行されています。これらのNISQプロセッサは、従来型の計算機では計算することが困難な複雑性、いわゆる「量子優位性」を持つことが示されています^{(5), (6)}。しかし、NISQプロセッサで用いられる量子ビットやゲート操作、測定、制御が持つノイズの影響で、それが扱えるタスクのサイズは非常に制限されます(図1)。ノイズ補償技術は、システムサイズの拡大にある程度は貢献しますが、(10^6 から 10^8 個の量子ビットと数兆回にも及ぶゲート操作から成る) 万能量子計算までも達成しようと思うと、誤り訂正や誤り耐性が必要になります。基本的な問いは、現状の技術動向をかんがみて、どのようにして量子コンピュータの未来像を獲得していくかということです。

図1は、リソース(物理量子ビットの数)とエラー率に対する量子計算の概観⁽⁷⁾です。橙色は実行するタスクが古典計算機でもシミュレート可能な領域、青色は量子優位性を

示すタスクが存在する領域、薄緑色は量子誤り訂正符号を利用した量子コンピュータで遂行できるタスクの領域、深緑色は誤り耐性万能量子コンピュータ(FTQC: Fault Tolerant Quantum Computer)で遂行できるタスクの領域をそれぞれ表しています。

NISQプロセッサとシミュレータ

量子コンピュータのデザインについて、NISQプロセッサとシミュレータに関する考察から始めます。それらは、特定の範囲のタスクに着手するようにデザインされた完全にプログラマブルなマシンであり、理想的には万能性を有しますが、ノイズの影響により用途が専用マシンへと制限されます。しかし、NISQプロセッサやシミュレータは量子物理が提供する潜在能力を明らかにするには極めて有用です。もっとも開発が進んでいる超伝導回路やイオントラップを用いて、NISQプロセッサを構成する取り組みは数多く存在します⁽³⁾。しかし、プロセッサやシミュレータは、ある特定の状態で一緒に動作する20から

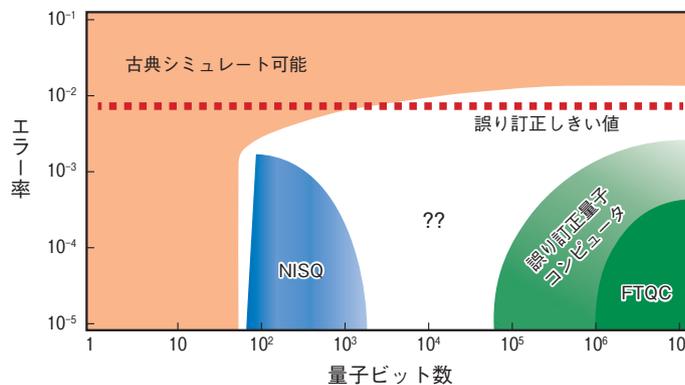


図1 リソース(物理量子ビットの数)とエラー率に対する量子計算の概観

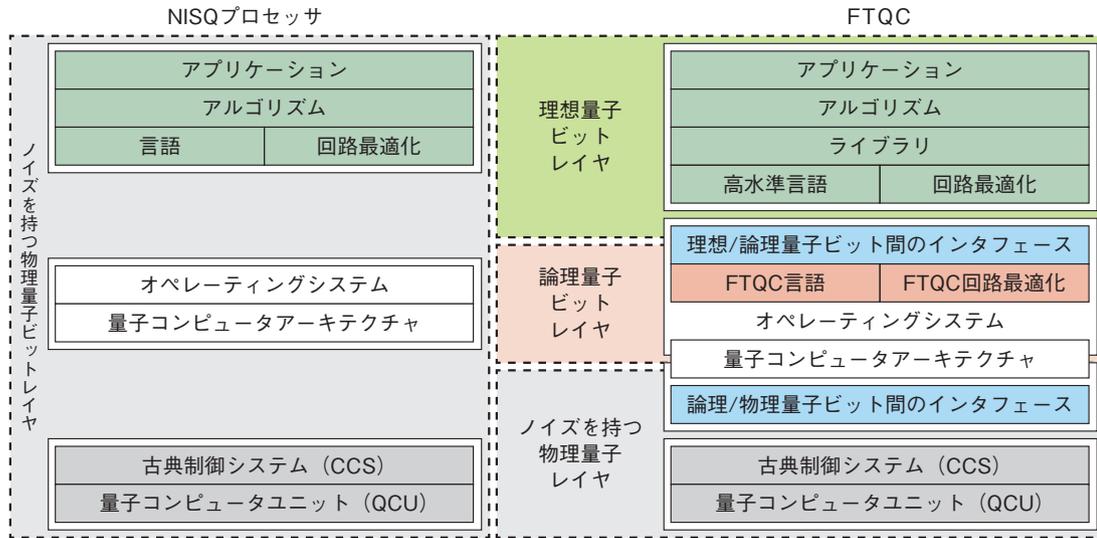


図2 NISQプロセッサとFTQCに対するシステムレイヤ

100個の量子ビットの集合体に過ぎません。それらは、図2の各層として描かれている異なるレベルのシステムを、シームレスかつ一緒に動作するように統合したデバイスです。最上位層には、NISQプロセッサ上で実行させたいアプリケーション（シミュレーションやサンプリングなど）があります。アプリケーションは非常に抽象的なオブジェクトで、タスクを遂行するのに必要なインストラクションやルールを与えるアルゴリズムに翻訳されます。これらのインストラクションは、プロセッサが実行する基本演算（ゲート操作や測定など）のセットに分解されます。そのような基本演算は抽象化されていて、ハードウェアに依存するものではありません。オペレーティングシステムは、そのような基本演算の列を受けて、それらを与えられたプロセッサアーキテクチャ上でどのように実行するかを

決めます。ここで、NISQプロセッサの設計や接続性が、実行可能なアルゴリズムを決定します。オペレーティングシステムは、そのアルゴリズムを受け、古典制御システム（CCS）が量子コンピュータユニット（QCU）上でそのアルゴリズムを実行させるための「物理的な指示パルス・シグナル」へと翻訳します。サイズの小さいプロセッサの多くに対しては、オペレーティングシステムや、アーキテクチャ以上の上位層はシステムに統合されず、その役割はオフラインで、（時には手作業で）行われることもあります。

しかし、プロセッサの量子ビットの数が増えるにつれて、これらはプロセッサの処理能力への制限となるため、上位層の統合も重要となっていきます。ゲート操作や測定などの基本演算の列の最適化は、プログラムを実行させる物理系のノイズの影響を最小化するた

めに、アルゴリズムとオペレーティングシステムを合わせて行われる必要があります。最終的には、量子ビットのコヒーレンス時間、ゲート操作や測定の質が、可能な計算のサイズを制限します。つまり、解きたい問題に対するNISQプロセッサの有用性は、プロセッサ中のエラーそのものによって制限されるのです。例えば100量子ビットのプロセッサ上で、各々の量子ビットに100回のゲート操作を行う場合、1ゲート操作当りのエラーとして 10^{-4} という低い誤り率を考慮するだけでも、ほぼ確実にエラーを含む計算結果しか得られないということになってしまいます。

NISQプロセッサやシミュレータの開発は、大規模万能量子コンピュータの実現をめざす上でも重要なステップです。NISQプロセッサはすでに量子優位性（ある程度の数の量子ビットしか持たない量子プロセッサであっても、数兆個のトランジスタを用いた今日のスーパーコンピュータよりも高速に、何かしらのタスクを遂行し得ること）を示しています。このことは、量子的なアプローチが持つ潜在能力を示した点で重要です。そして、これらNISQプロセッサでの成果が、量子コンピュータにおけるシステム全体の構成やレイヤデザイン、またそれらが現実にもどのように動作するのかを解明するというより大きな課題へと、研究のフォーカスに大きな転機をもたらしたことは特筆すべき重要な点でしょう。

誤り訂正量子コンピュータ

ノイズ補償技術はある程度（おそらく数桁

の）エラーの影響を低減しますが、より大規模なプロセッサに対してはスケールしません。そこで、プロセッサのノイズに対処する方法を確立する必要があります。量子誤り訂正符号*4は、これを行うための不可欠な手法です。しかし、量子情報を、多数の物理量子ビットから構成される論理量子ビットに埋め込む必要があるため、そのリソースコストは大きくなります。図2において、誤り訂正量子コンピュータにはあって、NISQプロセッサにはないレイヤは、この量子誤り訂正機能の実装のために付加されています。これを付加することによって生じる技術的ギャップは、雑音を持つ（例えば、0.1%の誤り率を持つ）物理量子ビットを扱う場合でも、非常に大きく、必要な量子ビット数も桁違いに大きくなります。また、量子誤り訂正が機能するためのエラーしきい値を超えないようにシステムを動作させる必要があります。このような量子誤り訂正を利用するだけで、誤り耐性量子計算の実現以前に、意義ある応用が見つかるかもしれません。この可能性は十分に探索されていませんが、興味深い取り組みです。誤り訂正量子コンピュータは、後述する完全な誤り耐性量子コンピュータへの自然な橋渡しの役を演じます。

誤り耐性量子コンピュータ

ここでは誤り耐性量子コンピュータを定義することから始めます。誤り耐性量子コン

*4 量子誤り訂正符号：複数の量子ビットを組み合わせ、エラー耐性を持つ（少数個の）量子ビットを構成する符号。

ピュータとは、そのデザインを変更することなしに任意のサイズの計算が実行可能な誤り訂正量子コンピュータの具体形です。それは、NISQプロセッサのレイヤ構造のデザインに大きな変更を要求し、少なくともレイヤ構造を3つの部分に分ける必要があります。

1つは雑音を持つ物理量子ビットレイヤ、もう1つは論理量子ビットレイヤ、そして最後の1つは理想量子ビットレイヤで、これらのレイヤは協調して動作する必要があります。

最上位レイヤ（図2中の緑色の層）は、NISQアプローチで示されたものと同様ですが、ライブラリを有し、高水準言語が割り当てられ、理想量子ビットに作用することが想定されます。ライブラリの目的は、アルゴリズムが使用する可能性のある有用なサブルーチンを提供することです。アルゴリズムは、理想的なゲート操作と理想的な測定の列、すなわち、理想的な量子回路に変換されます。回路圧縮技術は、必要とされる理想量子ビットや、暫定的に必要なリソースを減らすために利用されます。このレイヤは仮想量子マシンのようなもので、ハードウェアに依存しません。理想量子ビット上では、どんなゲート操作も施せます。

中間レイヤは、論理量子ビットとそれに対する操作に関与します。論理量子ビットは、実行できるゲート操作に制限があるという点で、前述の理想量子ビットとは異なります。中間レイヤは、理想量子ビットとのインタフェースの役を担い、理想量子ビットレイヤの量子回路（コード）を（制限されたゲート

操作しか持たない）論理量子ビットに対するものに変換します。これらの論理量子ビットは、エラーしきい値以下で動作する物理量子ビットを用いた量子誤り訂正符号を基に定義されます。したがって、このレイヤでどの量子誤り訂正符号を用いるのかが示されます。これに付随し、量子計算の誤り訂正モデル（ブレーディングや格子サージェリーなど）や、それを記述する言語が決定されます⁽⁸⁾。これらの論理量子ビットに対する演算は、ノイズを持つ物理量子ビットレイヤに対する物理操作のセットへと分解されます。

最下位のレイヤ（ノイズを持つ物理量子ビットレイヤ）も、NISQプロセッサのそれと同様ですが、誤り耐性量子計算では、計算中に実行される演算は、より規則正しく、より均一なものが要求されます。最下位レイヤは、中間レイヤから与えられた物理量子ビットへの物理操作を受け取り、ハードウェアデバイスのレイアウトや接続性を考慮し、どのようにそれを実装するかを決定します。オペレーティングシステムは、そのアルゴリズムを受け、CCSがQCU上でそのアルゴリズムを実行させるための物理的な指示パルス・シグナルへと翻訳します。

これらのレイヤは別々に与えられますが、誤り耐性量子計算では、シームレスかつ一緒に動作する必要があります⁽⁴⁾。あるレイヤの小さな変更が他のレイヤの大きな変更につながる可能性もあります。例えば、中間レイヤにおける量子誤り訂正符号の選択は、コンピュータアーキテクチャに大きな影響を持ち、

QCUに要求されるゲート操作などへも直接的に関係してきます。異なる符号への移行は、全く異なるコンピュータアーキテクチャを必要とするでしょう。

分散型量子コンピュータ

雑音を持つ物理量子ビットレイヤの特徴の中でも鍵となるのは、量子コンピュータアーキテクチャと、量子ビットやコントロールラインのレイアウトや接続性です。従来のコンピュータ設計でもあるように、モノリシックプロセッサのサイズが性能のボトルネックになることがあります。これに対する解決策はマルチコアアプローチを採用することでした。同様のボトルネックは量子ハードウェアでも生じる可能性があり、そのため、小さい量子プロセッサを接続し、大規模化を行う分散型アプローチを採用することもあり得ます。このモジュールアプローチは、離れた物理量子ビットに接続性を与えるなどの数多くの利点を持ちます^{(9), (10)}。そのようなモジュールは、数量子ビットを組み合わせ、全体として数千量子ビットの機能を得る、というようなことも可能にするでしょう。これは量子コンピュータデザインの選択肢の一つですが、現状ではその最適なサイズは分かっていません。

おわりに

誤り耐性量子コンピュータのデザインにおいて、各々のレイヤを独立に扱うのは得策ではありません。上位レイヤの最適化は、中間の論理量子ビットレイヤで必要なリソースに

ついて大きな影響を与え、ひいては必要とされる量子誤り訂正符号の符号長の低減につながります⁽⁸⁾。結果的に、これは物理量子ビットレイヤで必要とされる量子ビットやゲート操作数の減少につながります。特に、最下層における計算システムを抽象化すべきではなく、量子ビットとして使用する物理系の特性を理解することは極めて重要です。ここでの物理系の選択や制御法は、他のレイヤに多大な影響をもたらします。誤り耐性量子計算を実行するためのしきい値は、現実に量子ビットが受けるノイズの構造に強く依存します。

私たちは引き続き、量子コンピュータ構築に向け、全体像の設計のみならず、最下位から最上位レイヤまでの各々のレイヤ設計や、それらの協調設計についての研究を進めていきます。

参考文献

- (1) H. J. Kimble : "The quantum internet," *Nature*, Vol. 453, pp. 1023-1030, June 2008.
- (2) S. M. Brewer, J.S. Chen, A.M. Hankin, E.R. Clements, C.W. Chou, D.J. Wineland, D.B. Hume, and D.R. Leibbrand : "A²⁷Al⁺ Quantum-Logic Clock with a Systematic Uncertainty below 10⁻¹⁸," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 123, No. 3, 033201, July 2019.
- (3) J. Preskill : "Quantum Computing in the NISQ era and beyond," *Quantum*, Vol. 2, p. 79, August 2018.
- (4) K. Nemoto, S. Devitt, and W. J. Munro : "Noise management to achieve superiority in quantum information systems," *Phil. Trans. R. Soc. A*, Vol. 375, No. 2099, August 2017.
- (5) 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. Yuezhen 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
- (6) H. S. Zhong, H. Wang, Y. H. Deng, M. C. Chen, L. C. Peng, Y. H. Luo, J. Qin, D. Wu, X. Ding, Y. Hu, P. Hu, X. Y. Yang, W. J. Zhang, H. Li, Y. Li, X. Jiang, L. Gan, G. Yang, L. You, Z. Wang, L. Li, N. L. Liu, C. Y. Lu, and J. W. Pan : "Quantum computational advantage using photons," *Science*, Vol. 370, No. 6523, pp. 1460-1463, Dec. 2020.
- (7) <https://ai.googleblog.com/2018/03/a-preview-of-bristlecreeper-google-new.html>
- (8) M. Hanks, M. P. Estarellas, W. J. Munro, and K. Nemoto : "Effective compression of quantum braided circuits aided by ZX-Calculus," *Phys. Rev. X*, Vol. 10, No. 4, 041030, Dec. 2020.
- (9) K. Azuma, H. Takeda, M. Koashi, and N. Imoto : "Quantum repeaters and computation by a single module: Remote nondestructive parity measurement," *Phys. Rev. A*, Vol. 85, No. 6, 062309, June 2012.
- (10) K. Nemoto, M. Trupke, S. J. Devitt, A. M. Stephens, B. Scharfenberger, K. Buczak, T. Nöbauer, M. S. Everitt, J. Schmiedmayer, and W. J. Munro : "Photonic Architecture for Scalable Quantum Information Processing in Diamond," *Phys. Rev. X*, Vol. 4, No. 3, 031022, August 2014.



(左から) William John Munro/
Victor. M. Bastidas/ 東 浩司/
根本 香絵

量子コンピュータの構築では、その全体像を意識しながら、必要となる構成要素やそれらをつなげるインターフェースの研究開発、そしてそれらすべてを協調して動作させる「からくり」をつくるのが極めて大事です。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
理論量子物理研究センター
TEL 046-240-3440
FAX 046-240-4722
E-mail koji.azuma.ez@hco.ntt.co.jp

量子コンピュータの実装技術の 課題克服に向けた理論面からの取り組み

誤り耐性のある大規模量子コンピュータの実現には、非常に厳しい条件を満たす実装技術が要求されます。そのような実装技術を可能にするための基礎研究が、まさに今、世界中で進められています。実は、この点において、理論研究も貢献することができます。本稿では、理論的知見に基づいて、物理実装上の制約がある量子コンピュータの能力を最大限利用するための研究を紹介します。

あきぶえ	せいせき	たけうち	ゆうき
秋笛	清石	竹内	勇貴
たかはし	やすひろ	かとう	ごう
高橋	康博	加藤	豪
たに	せいいちろう		
谷	誠一郎		

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

機能や規模において制約のある 量子コンピュータ

近年、量子コンピュータの卓越した潜在能力への期待が高まり、世界中で、国家プロジェクトや大小さまざまな企業が熾烈な量子コンピュータ開発競争を演じています。しかし、近い将来実現が期待されるのは、フルスペックの量子コンピュータに比べて機能や規模において制約のある量子コンピュータであると考えられています。その理由は、誤り耐性のある大規模量子コンピュータの実現には、非常に厳しい条件を満たす実装技術が要求されるからです。そのような実装技術を1日でも早く実現するための基礎研究が、まさに今、世界中で進められています。

一方で、理論的知見により、物理実装上の制約からくる量子コンピュータの能力の限界を明らかにする研究も進んでいます。本稿では、計算理論や情報理論の知見に基づいて、

機能や規模において制約のある量子コンピュータの能力を最大限利用するための研究を紹介します。

ノイズ除去の困難性を超える

現在想定されている量子コンピュータでは、量子ビットの集まりを用意し、1量子ビットまたは2量子ビットへの操作をあらかじめ決められた順に行い、得られた状態を観測することで出力ビット列を得ます(図1)。量子アルゴリズムとは、出力が問題を解決する情報となるように、量子ビットへの操作を解決したい問題に依存して、うまく設計することです。このとき、扱う量子ビットがノイズの影響を受けないことが重要であることはよく知られています。ノイズの影響を排除するために、大規模な量子コンピュータにおいては量子誤り訂正符号を使うことが検討されています。これは、複数の量子ビット(物理量子ビット)を用いて冗長性を持たせることによ

り、ノイズの影響を受けない1つの量子ビット（論理量子ビット）を実効的に構成するという手段です。このような手段を実現するために物理量子ビットへのノイズレベルを一定水準以下にすることが求められていますが、現在でもその要求を完全には満たせていません。

そもそも、量子コンピュータにおいてある部分が直接操作できるということは、その部分は外部の状態に応じて影響を受ける（ノイズが侵入する）ことを意味しています。つまり、多様な操作手段を持っていることは、ノイズの侵入経路も多様であることをも意味します。そのため、操作可能な自由度が限られ

ている（量子情報を取り扱うことができる）ものには、ノイズの影響も小さくなります。ところが、現在想定されている量子コンピュータは、通常のコンピュータのアナロジーをその起源としているため、多様な操作を実行できることを前提としており、制限された状況での実用的な情報処理は考察されてきませんでした。

そこで私たちは、量子誤り訂正符号以外でノイズ除去をする方法として、操作可能な手段を制限するという方法を理論的に検討しました⁽¹⁾。具体的には、内部自由度は大きいものの、外部から直接操作できる自由度は小さなもので、両者の間を何らかの固定された相互作用によって量子情報が行き来するという状況（間接的量子制御）を考え、そのようなものを量子情報の処理を実行する手段として利用できるか検討しました（図2）。その結果、内部自由度は、量子コンピュータとしての観測結果に影響を与えるものと与えないものに綺麗に二分することができることがわかりました。さらに、直接操作できる部分が2量子ビット以上の自由度を持ってさえいれば、結果に影響を与える内部自由度を担う部分に対して、間接的にはあるものの、任意

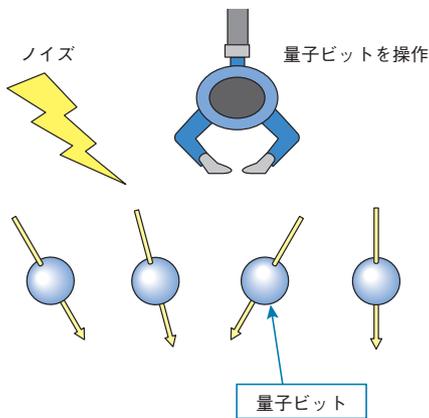


図1 従来の量子コンピュータのモデル

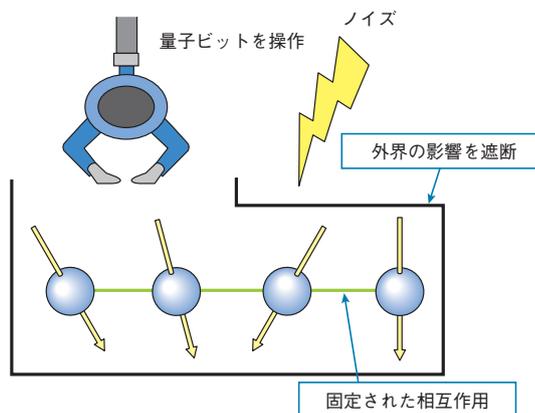


図2 間接的量子制御による量子コンピュータのモデル

の量子的制御が実行可能であることが分かりました。つまり、多くの部分を直接には操作できなかったとしても、少なくとも2量子ビットの操作が自由にできるのであれば、間接的量子制御は量子情報を処理する物理系として十分な能力を持っていることになります。ただ、この結果は、間接的な量子制御の実現に関する可・不可の議論にとどまっており、所望の量子制御をどの程度の時間で実行できるかなどのより踏み込んだ問いに対する回答を与えることはできていません。この成果は間接的量子制御を考えるうえでの理論的な土台をつくったことに相当するものであり、より実用的な問いに対する回答にはさらなる研究が必要です。

量子メモリの実現困難性を越える

量子コンピュータは、高度に制御された量子系^{*1}に対して適切な順序で測定を行い、情報を読み出し、そこで得た情報を基に再び量子系の制御や測定を行うという流れに沿って行われます。この中でも、量子系に対する測定は、仮に理想的に行えたとしても量子系に変化を与えてしまうため、測定順序は実装したい量子アルゴリズムから強い制約を受けます。このため、測定順序の自由度を高くできれば、さまざまな量子アルゴリズムが実現できるようになり、量子コンピュータの可能性を広げることに結びつきますし、さらには、安全性の高い秘匿通信（量子鍵配送）の高効率化にもつながります。

一方で、測定までの時間が長くなると、量子系に対する外部雑音を長時間抑える機構（量子メモリ）が必要になります。量子メモ

リはさまざまなデバイスで研究が進められています。依然メモリが有効に働く時間内に行える測定の回数は限られていて、大規模な量子コンピュータを実現するうえでの障壁となっています。これに対し、一見順序どおりに行う必要があるように思える測定（遅延測定）の中にも、量子系へ与える変化をうまく抑えた測定をあらかじめ行うことで測定順序を前倒しできる、すなわち量子メモリなしで実装できるものがあることが知られており、近年その理論的解析が進められてきました。しかし、そのような遅延測定がどのような量子情報処理に応用できるかは分かっていませんでした。

今回私たちは、そのような遅延測定が、量子符号化と呼ばれる、多くの量子情報処理に登場するサブルーチンに応用できることを発見しました⁽²⁾。2種類の方法で量子系に符号化されたビット列を、測定により復号することを考えます。このとき、直感的には、符号化方法を知ったうえでそれに応じた遅延測定を行わなければ復号に失敗してしまうように思えます。しかし、私たちは、符号化方法を知る前に測定を行ったとしても、簡単な事後処理を施すことでビット列を誤りなく復号できることを発見しました（図3）。また、そのような符号化方法の完全な特徴付けにも成功しました。さらに、本方法は量子鍵配送に直接応用可能で、通信雑音が無視できる場合には、既存のものよりも高効率な鍵配送が可能であることが分かりました。ただし、実際の長距離鍵配送では通信雑音が無視できないため、通信雑音が存在する下での詳細な効率解析が今後求められます。

*1 量子系：光子や電子など、量子力学的性質が顕著になる物理系。

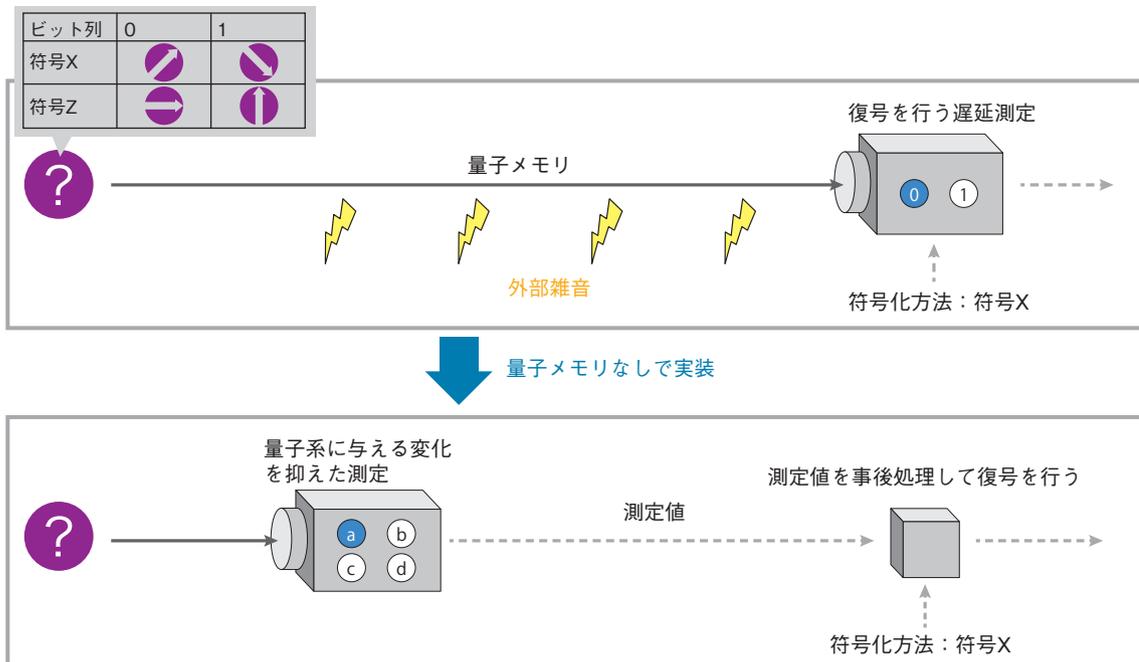


図3 量子メモリを必要としない復号

量子ビットの初期化困難性を超える

量子コンピュータによる高速計算の実現には、高速なアルゴリズムが不可欠です。このようなアルゴリズムは一般に、状態が0に初期化された多数の量子ビットが利用できるという仮定の下で設計されます。多数の初期化済み量子ビットは、アルゴリズムの実行中に生じるさまざまな途中結果の記憶を可能とし、記憶された途中結果は計算の並列化に利用される等、アルゴリズムの高速性能の向上に大きく貢献します。

多数の初期化済み量子ビットは高速なアルゴリズムの設計において大きな役割を果たす一方で、その実現は現在の実装技術では困難であることが知られています。実際、量子ビットの初期化精度には限界があり、多数の量子ビットを初期化しても、一部の量子ビットが意図しない状態となることがあります。したがって、利用できる初期化量子ビットの個数

を厳しく制限すると実現性は向上しますが、このような状況の下では高速なアルゴリズムの設計が困難です。

利用できる初期化済み量子ビットの個数をできるだけ制限しつつ、高速なアルゴリズムの設計を可能とするため、私たちは未初期化量子ビットに着目しました。未初期化量子ビットの量子状態は不明ですが、通常の量子ビットと同様に、量子演算を適用して状態を遷移させることができます。初期化を必要としないため、多数の未初期化量子ビットが利用できるという仮定は、実現性を損なうものではありません。

私たちは、多数の未初期化量子ビットと少数の初期化済み量子ビットが利用できるという仮定の下で(図4)、論理和関数等、複雑なアルゴリズムの基礎となる関数を計算する高速なアルゴリズムを設計しました⁽³⁾。少数の初期化済み量子ビットだけで同等の高速性能を持つアルゴリズムを設計することは困難

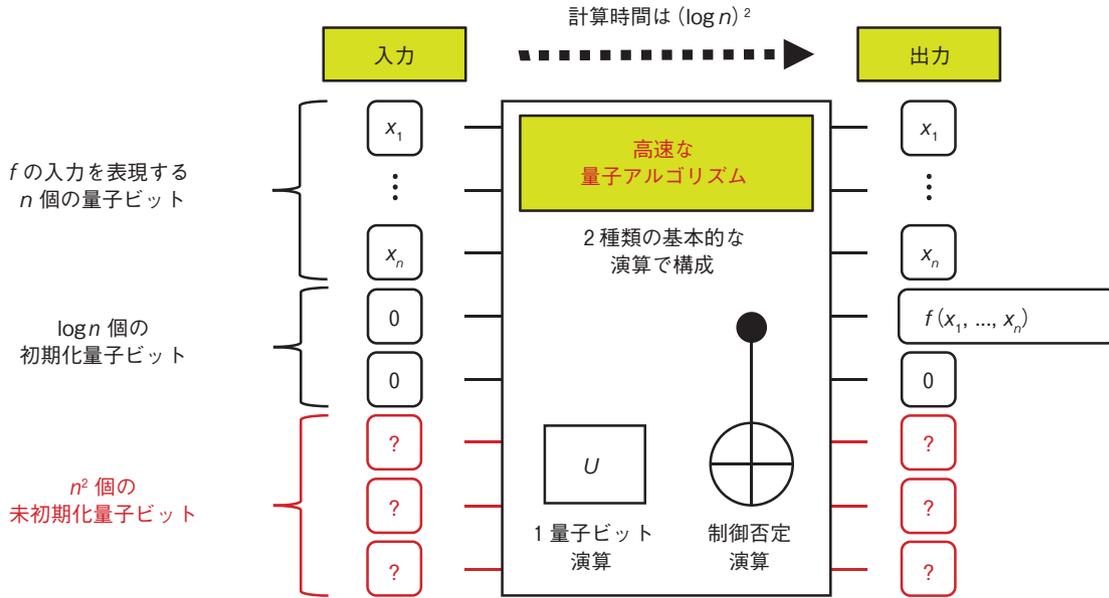


図4 多数の未初期化量子ビットと少数の初期化量子ビットを利用した関数 $f: \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}$ の計算

であるため、私たちの成果は、未初期化量子ビットが高速なアルゴリズムの設計に大きく貢献することを明らかにしたものとなります。

アーキテクチャの制約を超える

近年、実現性を高めるために機能を制限した量子コンピュータのさまざまなモデルが提案されています。今回、私たちはフーリエ階層という量子回路の階層構造に着目し、図5(a)に示すようなHC1Q (Hadamard-classical circuit with one-qubit) という新しいモデルを提案しました⁽⁴⁾。HC1Qは、重ね合わせで実行する古典計算Cの前後でアダマールゲート H^{*2} によって基底変換を行うというモデルです。ただし、一番下の量子ビットに関しては基底変換を一度も行いません。フーリエ階層は高次になればなるほど計算能力が高くなっており、一番下の第1階層は古典コンピュータで効率良くシミュレートできてしまうことが分かっています。そのため、古典計算に対する量子計算の優位性(量子超越性)

を得るためには少なくとも第2階層以上に着目する必要があります。私たちが提案したHC1Qは第2階層という低次の層に属しているながら量子超越性も有しているため、もっとも機能が制限された量子コンピュータのモデルの1つだと考えることができます。私たちは、もしHC1Qを古典コンピュータで効率良くシミュレートできるならば、計算量理論^{*3}における多項式階層が第2階層まで崩壊するというを示しました。多項式階層とは決定問題(はい、いいえで答えられる問題)の階層構造で、無限個の階層が存在すると強く信じられています。フーリエ階層と多項式階層という全く異なる2つの階層構造を関連付けることで、機能が制限された量子コンピュータのモデルの量子超越性を示したというのが私たちの結果です。図5(a)からも分かる通り、HC1Qでは入力したすべての

*2 アダマールゲート: 1量子ビットに作用する基本的な量子ゲートの1つ。

*3 計算量理論: 問題の難しさを系統的に研究する学問分野。P ≠ NP 予想は計算量理論の最大の未解決問題。

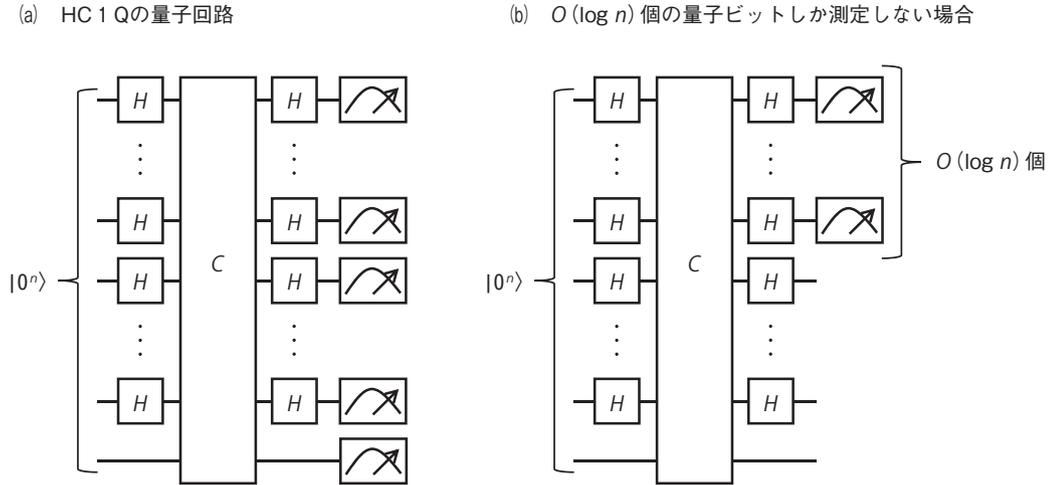


図5 フーリエ階層の第2階層に属する量子コンピュータのモデル

量子ビットを測定しています。では、測定する量子ビットの数を減らすとどうなるでしょうか。興味深いことに、測定する量子ビットの数が少ない場合（図5(b)）は、古典コンピュータと同等あるいはそれ未満の計算能力になってしまうということが分かりました。

今後の展開

量子コンピュータ上での高速計算は、ハードウェアとソフトウェアの両輪があって初めて実現することができます。今回紹介したように、理論によってハードウェアの限界を引き出したうえで、ソフトウェアとして何ができるのかを追求していきます。

参考文献

- (1) G. Kato, M. Owari, and K. Maruyama: “Algebra and Hilbert space structures induced by quantum probes,” *Annals of Physics*, Vol. 412, p. 168046, 2020.
- (2) S. Akibue and G. Kato: “Perfect discrimination of nonorthogonal quantum states with posterior classical partial information,” *Physical Review A*, Vol. 99, p. 020102, 2019.
- (3) Y. Takahashi and S. Tani: “Power of uninitialized qubits in shallow quantum circuits,” *Theoretical Computer Science*, Vol. 851, pp. 129-153, 2021.
- (4) T. Morimae, Y. Takeuchi, and H. Nishimura: “Merlin-Arthur with efficient quantum Merlin and quantum supremacy for the second level of the Fourier hierarchy,” *Quantum*, Vol. 2, p. 106, 2018.



(上段左から) 秋笛 清石 / 竹内 勇貴 / 高橋 康博
(下段左から) 加藤 豪 / 谷 誠一郎

NTT研究所は、爆発的に増大するデータをネットワーク上で超高速に分析・処理するため、量子コンピュータのハードウェアから超高速計算能力を引き出すことを可能にする基礎理論の確立に貢献します。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
メディア情報研究部 情報基礎理論研究グループ
TEL 0774-93-5020
FAX 0774-93-5026
E-mail cs-liaison-ml@hco.ntt.co.jp

量子情報処理の誤り耐性技術とその実装方式

量子情報処理を幅広く活用するためには、ノイズに対処するための誤り耐性処理が必須となります。量子誤り訂正符号を用いた誤り耐性量子計算は、スケーラブルとなりますが量子ビット数や処理の増加が大きいため効率化が今後の重要な研究課題となっています。量子誤り抑制は計算コストがかかりますが、量子ビット数のオーバーヘッドがかからないため近い将来の活用が期待されています。本稿では、これらの研究開発および量子情報処理の実装に向けた取り組みも合わせて紹介します。

とくなが 徳永	ゆうき 裕己	すずき 鈴木	やすなり 泰成
えんどう 遠藤	すぐる 傑	あさおか 浅岡	るい 類

NTTセキュアプラットフォーム研究所

はじめに

量子コンピュータや量子ネットワークの可能性が近年注目されつつありますが、その実現のためにもっとも必須となる技術が誤り耐性技術です。量子情報処理と既存の情報処理（古典情報処理）で起き得るノイズ量には莫大な差があります。古典情報処理ではエラーが起きる頻度が小さいため、多くの情報処理はそれほどエラーを気にせず処理可能でした。しかし、量子情報処理ではエラーが起きる頻度が非常に大きいいため、エラー対策なしで行える計算は小さな規模のものでしかありません。量子情報処理をスケーラブルにし、有用なさまざまな計算を行い、大きなネットワークとしていくためには、量子情報の誤り耐性処理を行い、量子情報をノイズから強固に保護する必要があります。このため、量子情報処理においては、誤り耐性処理がコンピューティング技術およびネットワーク技術アーキテクチャの根幹部分となると予想されます。NTTセキュアプラッ

トフォーム研究所では、この量子情報をエラーやノイズから守る誤り耐性技術を重要な基盤技術として研究を進めています。量子情報処理のための誤り対処法としては大きく分けて2つの手法があります。それは量子誤り訂正符号と量子誤り抑制（ノイズ補償）手法です。量子誤り訂正符号は、量子ビットを冗長に符号化することによって、一部にエラーが起きても復号をすることで訂正が可能な手法です。これはスケーラブルに誤り耐性処理が可能であることがこれまでに分かっている唯一の手法であり、将来的な規模の大きな量子情報処理の実用化のために必須な技術であると予想されます。しかし、符号化のために必要な量子ビット数や処理数の増加が避けられず、これによる誤り耐性処理の実現は少し先になると考えられています。では、それまで何も打つ手がないのかというそうではなく、もう1つの技術として注目されているのが量子誤り抑制（ノイズ補償）手法です。これは量子ビット数のオーバーヘッドなしに正しい計算結果を予測することで、計算結果から

誤りを取り除こうという技術です。誤りのない計算結果の予測のために計算処理のコストは増加し、スケーラブルとはなりません。量子ビット数のオーバーヘッドがいらぬため、まだ量子情報処理の規模が小さいうちに重要な技術とされています。一方で、実装する要素技術そのものができる限り精度が高いこと、ネットワーク処理や分散処理に向けての機能が低いことも重要です。本稿では、量子誤り訂正符号を用いた誤り耐性量子計算に向けたソフトウェア基盤の研究開発、量子誤り抑制（ノイズ補償）手法の技術、および実装するための要素技術について紹介します。

誤り耐性量子計算の実現に向けた研究開発

量子コンピュータは物質の重ね合わせ状態を利用しさまざまな情報処理を可能にしますが、その代償としてノイズに対して脆弱で、単位命令のスループットが遅いという欠点を持ちます。既存の計算機のメモリ、例えばDRAM（Dynamic Random Access Memory）ではキャパシタの充電・放電で0,1を表し、十分なマージンを設けたしきい値動作のもと、自然放電で情報が失われるより早くリフレッシュを行うことで、小さなオーバーヘッドで情報の長期保存を実現しています。これに比べ、同じく電子を操る超伝導回路を用いた量子ビットは、ビット反転といった単位操作が低速だけでなく、量子力学の性質の1つであるクローン禁止定理などから直接的なリフレッシュが行えません。この問題は量子

誤り訂正符号を用いて量子ビットを符号化し、エラーを間接的に検出し訂正し続けることで回避できますが、量子誤り訂正を行った状態で計算を行うには誤り訂正をしない場合に比べ、時間、サイズともに数百倍や数千倍といった莫大なリソースが必要となります⁽¹⁾。このように、量子コンピュータは「揮発性メモリから揮発する情報をリフレッシュの代わりに誤り訂正符号と高速なフィードバックで抑え込む」ような複雑な計算機アーキテクチャになることを宿命付けられています。したがって、実用的な誤り耐性量子コンピュータを実現するには、優れた量子デバイスの開発に加え、容易な拡張性、広帯域なインターフェース、安価でロバストな制御などを満たすシステムの構築が必須となります。私たちのグループは、実用的な誤り耐性量子コンピュータを実現するべく、理化学研究所や大学と共同で高い性能と信頼性を両立する超伝導量子コンピュータの研究開発を行っています。ここでは、私たちが重点的に取り組んでいる量子コンピュータのソフトウェア基盤について3つのトピックを紹介します（図1）。

1番目は、チップ上の多数の超伝導量子ビットを効率的に特徴付けし、校正を行うシステムです。現状の超伝導量子ビットは性能のばらつきから個別制御が必須であり、計算機は大量のFPGA（Field Programmable Gate Array）やマイクロ波源などからなる巨大な分散システムとなっています。私たちはこうした機器を非同期に制御し、大量の量子ビットを自動かつ高速に校正するためのラ

イブラリを構築し、機械学習や量子的なランダム性を活用した効率的な特徴付けや校正の手法を提案しています^{(2), (3)}。

2番目は、量子誤り訂正での復号に必要な演算やフィードバックを行う周辺回路の設計です。量子誤り訂正で用いられるトポロジカル誤り訂正符号でのエラーの最尤推定は、最小重み完全マッチングと呼ばれるグラフの問題に帰着できますが、この問題の素朴な解法はレイテンシが大きく実用的でないため、データ構造や計算機アーキテクチャを工夫し速度を改善する必要があります。私たちのグループは、小規模な符号の復号回路を機械学習で最適化する手法⁽⁴⁾や、単一磁束量子を用いた高速な復号手法の提案⁽⁵⁾に取り組んでいます。

3番目は、前述のような提案を評価するためのプログラムを、技術レイヤをまたいで翻訳する処理系とこれをシミュレートするソフトウェア群の構築です。特に、量子回路のシミュレータは緻密な高速化によっていくつかのベンチマークで世界最高速を実現しています⁽⁶⁾。前述のように、誤り耐性量子コン

ピュータの大規模化は、大規模な分散システムを駆使し、最適化された制御デバイスとアルゴリズムで高い実効性能と信頼性を確保しつつ、いかに集積化された量子デバイスを制御するかという戦いであり、こうした技術を研鑽してきたNTT研究所に適した挑戦的課題といえます。

量子誤り抑制（ノイズ補償）手法

2019年10月、量子コンピュータが古典コンピュータで解くのに1万年かかるといわれた問題を53量子ビットの小規模な量子デバイスを用いて200秒で解くことができたとしてGoogleが発表しました⁽⁷⁾。この実証実験で使われたような小規模でノイズな量子コンピュータは、NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) コンピュータと呼ばれています。Googleが解いた問題は、1万年ではなくスーパーコンピュータを用いて数日で解くことができるという反論もありますが、量子コンピュータのサイズが大きくなるにしたがって、この差はさらに広まっていくと考

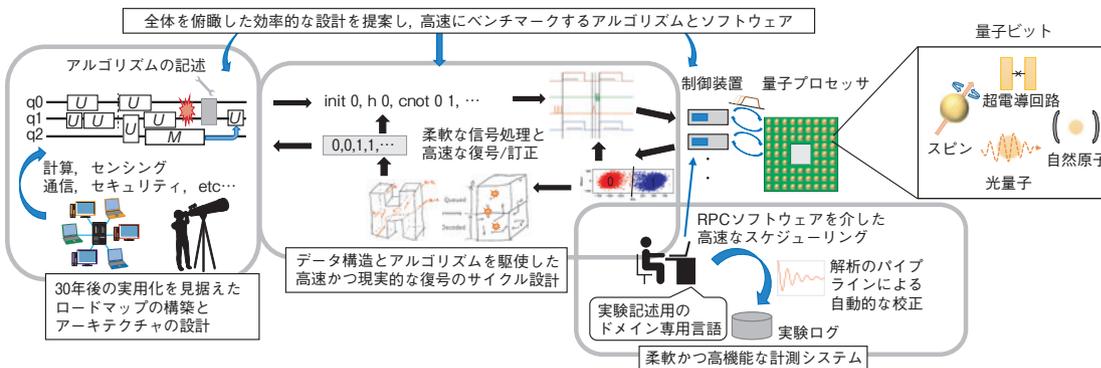


図1 誤り耐性量子計算とそのソフトウェア基盤の概念図

えられています。このような小規模量子デバイスをどのように実用上役立てれば良いかと世界中の研究者が研究しており、主に化学計算や機械学習への応用が期待されています。

一方、このような小規模量子コンピュータの計算エラーは無視ができません。歴史的にエラーを抑える手法として量子エラー“訂正”が研究されてきました。量子エラー訂正では、1論理量子ビットを表すのに複数の量子ビットで符号化しエラー訂正を行うことで、符号化に用いた量子ビット数に対して指数関数的にエラーを抑えることができますが、量子ビット数が限られているNISQ コンピュータには不向きです。そこで、ハードウェア側の負担を大きくすることなくエラーを抑える量子エラー“抑制”の研究がさかんに行われています⁽⁸⁾。量子エラー抑制は量子ビット数を増やす必要はありませんが、より多くの測定回数が必要となります。

近年さまざまなエラー抑制法が提案されています。ここでは、まず、もっともシンプルで分かりやすい外挿法を説明します。量子コ

ンピュータの計算エラーはノイジーな操作を加えることなどにより、あえて増やすことはできます。そこで、もともとの結果と、計算エラーを増やした後の結果を外挿することによって、計算エラーのない計算結果を推定できるのが外挿法です。外挿法の概念図を図2に示します。また、計算エラーのエラーモデルを同定し、そのエラーの逆変換をほどこして実効的にエラーをキャンセルする擬似確率法と呼ばれる手法も存在します⁽⁹⁾。ほかには、対称性検証法、部分空間展開法などといった手法があります。詳細は筆者が執筆したレビュー論文⁽⁶⁾を参照してください。

さらに、私たちのグループはこれから量子ビット数が増えていくと見越して、量子誤り訂正を用いた誤り耐性量子計算がある程度可能になった後も、さらに計算精度を向上するために量子エラー抑制が有用であるということの世界で初めて示し⁽¹⁰⁾、量子エラー訂正と量子エラー抑制は別々に考えるべきものではなく、統合したスキームとして考えるべきであることを示しました。

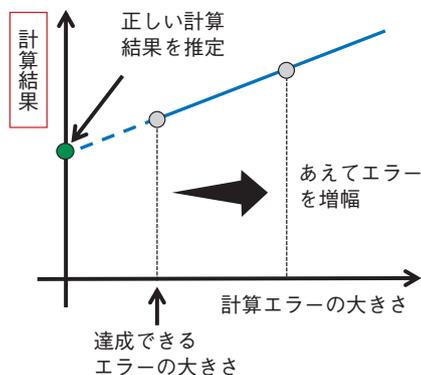


図2 量子エラー抑制（外挿法）の概念図

要素技術の実装方式

これまでは与えられた実装方式のうえで、誤り耐性処理をソフトウェア的にいかに効果的に行うかという取り組みを紹介してきました。一方で、要素技術の実装方式そのものが精度高く動作すること、実装の規模が大きくなること、ネットワーク化、分散処理などその機能が高度になっていくことも、誤り耐性を強くするうえで重要な技術です。特にネッ

トワークを含めた機能を拡大するために重要な技術が、共振器量子電磁力学（共振器 QED）を用いた原子と光子の相互作用（図 3）によるさまざまな要素技術であり、NTT セキュアプラットフォーム研究所では、量子中継などを含めた将来的な量子セキュアネットワーク基盤のためにこの実装方式について研究を行っています。

まず、通信のためには通信用の量子ビットとなる光子を高効率で生成する必要があります。レーザの微弱光による代用や非線形結晶を用いた生成では単一光子としての精度や効率に問題点がありますが、共振器 QED を用いた場合は、精度の高い単一光子生成が高効率に可能となります⁽¹¹⁾。さらにパルス長を短くしていくことで繰り返しレートの上昇も図り、情報処理としての総合的な性能が向上するよう検討を進めています⁽¹²⁾。また、原子を量子ビットメモリとし、光子を通信用の量子ビットとした場合に、共振器 QED を用いると原子と光子の間で精度の高い量子ゲートが可能となります。これについては光子の

損失とゲートの忠実度の面で誤り耐性にトレードオフが起こることを考慮し、誤り耐性が最適となる実装方式を検討しています⁽¹³⁾。また、超伝導量子コンピュータを分散処理するためには超伝導量子ビットと同じ周波数領域であるマイクロ波の光子との量子ゲートやルーチングなどを行う必要があります、これらを効率的に行う回路量子電磁力学（回路 QED）を用いた技術についても研究を行っています^{(14)、(15)}。

おわりに

私たちは量子情報処理の誤り耐性処理に向けて、ソフトウェア的にいかに効率的に優れた誤り耐性処理を行うかという観点から、誤り耐性量子計算のソフトウェア基盤の研究開発および量子誤り抑制手法の研究を行っています。また、物理実装の要素技術自体の精度や効率を良くし、いかに機能を拡大するかという逆の面からの研究開発にも取り組んでいます。最終的に、十分規模の大きな誤り耐性量子コンピュータの実現はまだ遠い将来だと

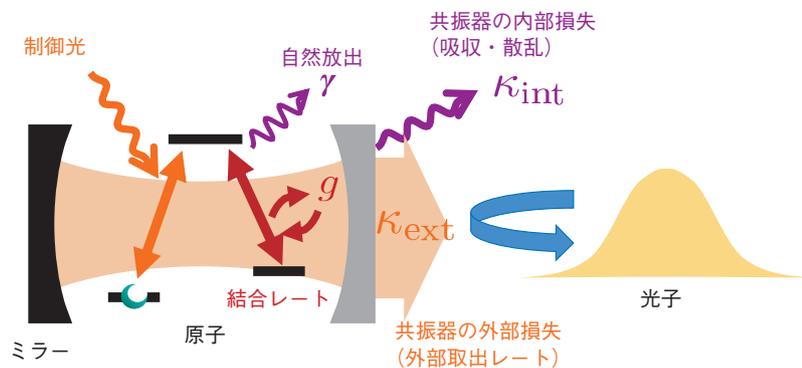
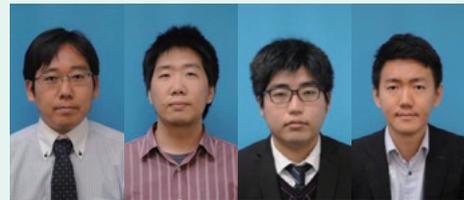


図 3 共振器量子電磁力学による原子と光子の相互作用の概念図

予想されていますが、それに向けて効率的な新たなアーキテクチャを生み出すことをめざしています。また、それまでの過程においても量子誤り抑制などを活用し、なるべく近い将来から可能な限り有意義な量子情報処理を行えるよう新たな研究に取り組んでいます。

■参考文献

- (1) A. G. Fowler and C. Gidney: "Low overhead quantum computation using lattice surgery," arXiv: 1808.06709, 2018.
- (2) K. Heya, Y. Suzuki, Y. Nakamura, and K. Fujii: "Variational Quantum Gate Optimization," arXiv: 1810.12745, 2018.
- (3) Y. Nakata, D. Zhao, T. Okuda, E. Bannai, Y. Suzuki, S. Tamiya, K. Heya, Z. Yan, S. Tamate, and Y. Tabuchi: "Constructing Exact Unitary t-designs by Quantum Circuit and Applications to Higher-Order Randomized Benchmarking," 2021.
- (4) A. Davaasuren, Y. Suzuki, K. Fujii, and M. Koashi: "General framework for constructing fast and near-optimal machine-learning-based decoder of the topological stabilizer codes," Phys. Rev. Research, Vol. 2, No. 3, 033399, 2020.
- (5) Y. Ueno, M. Kondo, M. Tanaka, Y. Suzuki, and Y. Tabuchi: "Quantum Error Correction with a Superconducting Decoder," QCCC 2020, Dec. 2020.
- (6) 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," arXiv: 2011.13524, 2020.
- (7) 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. Yuezhen 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. Zaleman, H. Neven, and J. M. Martinis: "Quantum supremacy using a programmable superconducting processor," Nature, Vol. 574, pp. 505-510, Oct. 2019.
- (8) S. Endo, Z. Cai, S. C. Benjamin, and X. Yuan, "Hybrid quantum-classical algorithms and quantum error mitigation," J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 90, 032001, 2021.
- (9) S. Endo, S. C. Benjamin, and Y. Li: "Practical Quantum Error Mitigation for Near-Future Applications," Phys. Rev. X, Vol. 8, No. 3, 031027, 2018.
- (10) Y. Suzuki, S. Endo, K. Fujii, and Y. Tokunaga: "Quantum error mitigation for fault-tolerant quantum computing," arXiv: 2010.03887, 2020.
- (11) H. Goto, S. Mizukami, Y. Tokunaga, and T. Aoki: "Figure of merit for single-photon generation based on cavity quantum electrodynamics," Phys. Rev. A, Vol. 99, No. 5, 053843, May 2019.
- (12) Y. Tokunaga, H. Goto, T. Utsugi, and T. Aoki: "Figure of merit for the efficiency of single photon generation using cavity-QED systems," International symposium on single photon based quantum technologies, 2019.
- (13) R. Asaoka, Y. Tokunaga, R. Kanamoto, H. Goto, K. Koshino, and T. Aoki: "Suitable fault-tolerant schemes for cavity-QED-based quantum computation," CLEO Pacific Rim conference, 2020.
- (14) K. Koshino, K. Inomata, Z. R. Lin, Y. Tokunaga, T. Yamamoto, and Y. Nakamura: "Theory of Deterministic Entanglement Generation between Remote Superconducting Atoms," Phys. Rev. Applied., Vol. 7, No. 6, 064006, June 2017.
- (15) S. Masuda, S. Kono, K. Suzuki, Y. Tokunaga, Y. Nakamura, and K. Koshino: "Nonreciprocal microwave transmission based on Gebhard-Ruckenstein hopping," Phys. Rev. A, Vol. 99, No. 1, 013816, Jan. 2019.



(左から) 徳永 裕己 / 鈴木 泰成 /
遠藤 傑 / 浅岡 類

誤り耐性量子計算を実現するためにはどのようなアーキテクチャにするべきか真剣に考えて研究をするフェーズに入ってきたと考えます。新たな計算機の実現に向けて貢献したい意欲のある方の参入を期待します。

◆問い合わせ先

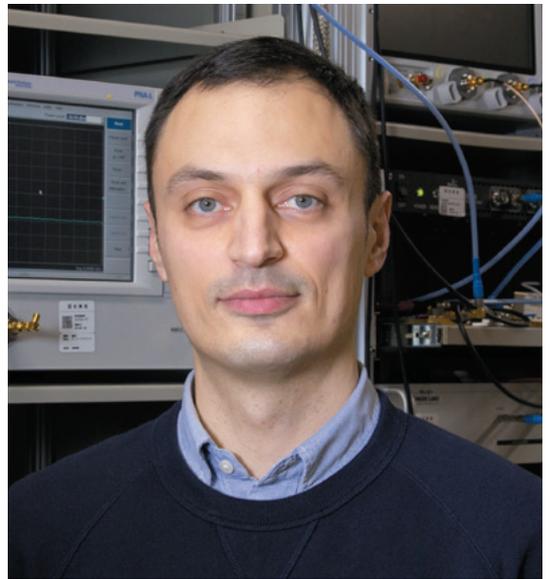
NTTセキュアプラットフォーム研究所
企画担当
E-mail scpflab@hco.ntt.co.jp

主役登場

量子技術の限界に挑戦する

Leonid Abdurakhimov

NTT 物性科学基礎研究所
リサーチスペシャリスト



1991年にIBMの著名な科学者ロルフ・ランダウアが「情報は物理的な実在である」と主張しました。実際、あらゆる情報処理には物理的なハードウェアが必要です。これまでのところ情報技術は、主に半導体トランジスタに依存してきました。コンピュータの計算能力は、チップ中のトランジスタの数が2年ごとに倍になるというムーアの法則に支えられ、ここ数十年で劇的に向上しました。しかし、トランジスタのサイズが原子と同程度まで小さくなるという原理的な限界が近づいています。経済や社会に利する情報技術を持続的に発展させるためには何をすべきでしょうか。多くの科学者が新しい原理に基づく革新的な計算機が必要であると考えています。量子計算機はこのような発想の中から生まれた新しい計算機であり、情報処理に量子デバイスを利用します。量子デバイスは量子力学で記述される特異な原理に基づいて動作するため、私たちは全く新しい設計思想に基づき計算機を構築します。私は、超伝導回路を用いた量子デバイスの物理的実装に興味があり、NTTで研究を始めました。

NTTにおける研究を通して、革新的な技術の開発は常にチャレンジングであることを経験しました。パワーポイントの発表資料に量子デバイスの図面を描くことは簡単ですが、実際のデバイスを作製するのは非常に困難です。例えば、私が現在研究している容量シャント型磁束量子ビットは2007年に理研のグループから理論提案されましたが、実験室で実現されたのはごく最近になってからです。私た

ちにとって難しかった課題は、デバイス作製だけではなく、量子ビットをいかにノイズ源から切り離して長寿命を達成するかという点です。例えば、超伝導量子ビットを冷却するための希釈冷凍機の中に、高周波部品を最適配置するために多くの時間がかかりました。最初は量子ビットの寿命が数 μs 程度でしたが、すべての最適化を終えた後は約100 μs まで延長することに成功しました。当時私は「自分の量子ビットがついにまともに動作した」と感動したのを覚えています。彫刻家が石から最適な形状の彫刻を削り出したときのような達成感を感じました。実際に、これまでに報告されているどの磁束量子ビットよりも長寿命を記録したのです。

長寿命磁束量子ビットを基に、私たちはより複雑な量子デバイスを研究することが可能です。しかし、今まで以上に量子計算機の実現は究極の挑戦であると感じるようになりました。将来の量子計算機実現に向け、何が最適なアプローチなのかを自問しています。Hardware-efficientな量子計算に関していくつかの有望な提案がありますが、実用的に動作するものが判明するまでに数年、あるいはさらに時間を要するかもしれません。このような状況の中で、超伝導量子ビットの短期的な応用先として、量子センシング、量子シミュレーション、量子暗号などの可能性を検討することは重要であると考えています。多くの課題を乗り越えて量子技術が急速に発展してきたように、私たちはこれからも可能な限り量子技術の限界に挑戦していきます。

特集

NTTグループの ICTソリューション

低遅延ネットワーク



VR映像配信



ローカル5G

機械学習



自然言語処理

NTT東日本・西日本, NTTコミュニケーションズ, NTTデータの各社が取り組んでいる, ICTソリューション・サービスについて紹介する。

Information and Technology

新型コロナ禍における新しい体験型美術展「Digital×北斎」【破章】の開催

NTT東日本が保有するICTやアセットを活用し、時間と場所を超え、地域の文化芸術を楽しむことができる分散型デジタルミュージアムについて紹介する。

52

劇場にいるような臨場感あふれるマルチアングルVR配信 【REALIVE360 (リアライブ360)】

NTT西日本で開発した、4K/8Kの高画質360度VR映像をストリーミング配信することができるマルチアングルVR (Virtual Reality) 映像配信サービス「REALIVE360」について紹介する。

56

デジタルトランスフォーメーションを推進し、Smart Worldを実現するための キーソリューション「ローカル5G」

NTTコミュニケーションズのローカル5G (第5世代移動通信システム) ネットワークを活用したお客さまとの共同実証実験の事例、およびMEC (Multi-access Edge Computing) ・ネットワークスライスのテクノロジーについて紹介する。

62

MLOpsによる機械学習プロセスの高速化と継続的にサービス価値を 提供するための仕組みづくり

NTTデータで注視している、MLOpsの背景や基本的な考え方に加えて、現時点で最新と考えられる検討観点や具体的な実現手段を中心に解説する。

69

汎用言語モデル「BERT」のビジネス実用化技術に迫る

NTTデータで応用開発を行っている、BERTの一例である「金融版BERT」と「ドメイン特化BERTフレームワーク」について紹介する。

76

Communication Solutions

新型コロナウイルス禍における新しい体験型美術展 「Digital×北斎」【破章】の開催

NTT東日本では、同社が保有するICTやアセットを活用し、新型コロナウイルス禍においても時間と場所を超え、地域の文化芸術を楽しむことができる分散型デジタルミュージアムのショーケースとして、2020年12月1日から体験型美術展「Digital×北斎」【破章】を開催しています。本稿では、その取り組み内容について紹介します。

すずき たけひろ
鈴木 健広

NTT東日本

背景

NTT東日本では、地域の価値ある文化芸術を発信し地方創生に寄与する取り組みとして、2019年11月1日～2020年2月28日まで、体験型美術展「Digital×北斎」【序章】⁽¹⁾を開催し、鑑賞された方々より、時間と場所を選ばず地域の価値ある文化芸術を体感することができるデジタルミュージアムの魅力や可能性について多くの期待の声をいただきました。

一方で、昨今の新型コロナウイルス感染症蔓延により、地域の美術館・博物館が新型コロナウイルス感染防止に配慮した運営にシフトするなど、文化芸術鑑賞の楽しみ方も新しい行動様式に合わせていくことが求められています。

こうした状況の中でも地域の価値ある文化芸術を伝えたい、楽しみたいという多くの声や、デジタルデータを活用したニューノーマルな文化鑑賞のあり方についてのニーズの高まりを受け、体験型美術展「Digital×北斎」【破章】の企画を進めることになりました。

体験型美術展「Digital×北斎【破章】」の概要

NTTインターコミュニケーション・センター [ICC] ギャラリーEにて、代表的な日本文化芸術の1つである葛飾北斎や歌川廣重の作品等を題材とした体験型美術展を開催しています。

なお本美術展は、山梨県立博物館やフランス国立オルセー美術館から、絵画のマスターレプリカの公式認定を受けている株式会社アールステクネと協力し開催しています。

■高精細技術により再現された所蔵元認定のデジタルデータやマスターレプリカの展示

- ・山梨県立博物館 葛飾北斎 「富嶽三十六景」 47作品
- ・大阪浮世絵美術館 歌川廣重 「東海道五十三次」 55作品
- ・フランス国立オルセー美術館 ゴッホ 「ローヌ川星降る夜」等 17作品
- ・神奈川県立歴史博物館 五雲亭貞秀 「神名川横浜新開港図」等 4作品

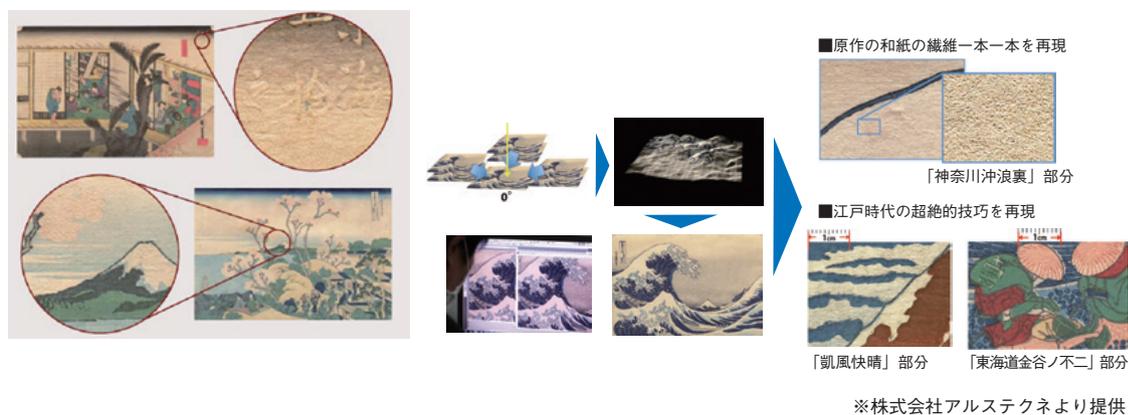


図1 独自の三次元質感画像処理技術DTIP

美術館・博物館での原画の展示は、これまで傷みやすい等の理由により公開が制限され、照明下や至近距離の鑑賞ができませんでした。また、高解像度デジタル化においても、素材や絵筆などの微細な凹凸などの質感を再現することは難しいとされていました。今回の協業パートナーである株式会社アルステクネでは、高精細多角度光記録といった特長を持つ独自の三次元質感画像処理技術DTIP (Dynamic Texture Image Processing)*¹により、疑似立体画像合成変換処理、原画との3次元色域分解校正を行い、浮世絵版画であれば、原画の和紙の繊維1本1本まで忠実に再現し、作家の超絶技巧を伝えることができました(図1)。

*1 DTIP：株式会社アルステクネ社独自の特許取得技術。

■地域との連携

本美術展を開催するICC内ギャラリーEと、展示作品とゆかりのある地域の施設や拠点を高速ネットワークで連携させ、より多くの方が地域の日本文化芸術作品に触れることで、時と場所を超えて楽しめる世界を皆様とともに創出していきます(図2)。

■最新のデジタルアプリケーションを活用した新しい体験機会の提供

GoogleなしでVR (Virtual Reality) を体感できる裸眼VRや、絵画の中に没入するように作品の世界観を全身で体感できる3Dダイブシアター、リアルな絵画が動くムービングアートピクチャー等の最新のデジタルアプリケーションを駆使し、新しい文化芸術鑑賞の体験機会を提供しています(図3)。



図2 地域との連携



(a) 裸眼VR



(b) 3Dダイブシアター

図3 先端技術を活用した新しい体験機会の提供

■デジタルデータの高品質な配信・セキュアな集積

NTT東日本通信ビルや高速ネットワークの「閉域網でセキュアな環境」「低遅延」「耐災害性」という特性を活かし、文化芸術のデジタルアーカイブの活用において求められる「文化財の権利保護」「滑らかなコンテンツ配信」「ディザスタリカバリ*²」等のニーズにおこたえしていきます。

■安心・安全な非接触型ミュージアムソリューションの提供

裸眼VR、3Dダイブシアター、ムービンググレートピクチャー等による、全コンテンツ非接触で楽しめる仕掛けや、AI（人工知能）カメラによる混雑検知、AIロボットによるご案内により、新型コロナ禍においても来場者が安心して鑑賞できるミュージアムソリューションの提供に取り組んでいきます。また、本美術展のホームページ⁽²⁾上では、会場まで足をお運びいただかなくても展示の一部を鑑賞できるよう、360度ビューによるバーチャル鑑賞を提供しています。

本美術展については、NTTが提供するリモートワールドを体現する3D空間型オウンドメディア「DOOR」⁽³⁾との連携も準備していきます。

*2 ディザスタリカバリ：災害などによる被害からの回復措置、あるいは被害を最小限に抑えるための予防措置。

■参考文献

- (1) <https://www.ntt-east.co.jp/pr/hokusai.html>
- (2) <https://www.ntt-east.co.jp/pr/hokusai-hasyo/>
- (3) <https://www.ntt.co.jp/news2020/2011/201106b.html/>



鈴木 健広

長い歴史を持つ日本は世界的な文化国です。そして日本の地域には数多くの魅力的な文化芸術が存在します。これらをデジタル技術やICTにより「守り」、「活用する」ことは、今、我々日本人が取り組むべき使命ではないでしょうか。

◆問い合わせ先

NTT東日本
経営企画部 営業戦略推進室
TEL 03-5359-3460
E-mail eisen-bunka-ml@east.ntt.co.jp

劇場にいるような臨場感あふれる マルチアングルVR配信 「REALIVE360（リアライブ360）」

コロナ禍によって各種イベントが中止・延期される中、「イベントの無観客オンライン配信」という新しいスタイルが立ち上がりつつあります。NTT西日本グループでは、マルチアングルVR (Virtual Reality) 映像配信サービス「REALIVE360」の開発に着手し、都市部で開催されているコンサート等のイベントを、地方等遠隔地でも高臨場感に体験できるサービスとして「REALIVE360」をサービス化しました。本稿では「REALIVE360」の特徴と今後の展開について紹介します。

ささはら たかひこ えむら まさのり
笹原 貴彦 江村 正規
 ふかたに たかふみ
深谷 崇文

NTT西日本

コロナ禍における 音楽ライブなどの現状

コロナ禍によってイベント業界は大きく様変わりしました。政府による緊急事態宣言下においては、ほぼすべてのイベントや興行が中止・延期または規模を縮小しての開催となり、東京オリンピックの延期をはじめ、プロ野球やJリーグまでもが開幕を延期するという状況に追い込まれました。緊急事態宣言の解除後においても、音楽フェスティバルや地域のお祭りなど2020年内に開催予定だったイベントは、軒並み延期や中止、規模の縮小となっています。イベントを実施後にクラスターが発生したケースなどもあり、自粛ムードが続いており、イベント自粛のあおりを受けてライブハウスの閉店が相次いでいます。新型コロナウイルス感染予防のためにフィジカルディスタンスを保とうとすると、収容人数の15%で「満席」となるといったシミュレ-

ション結果も注目を集めました⁽¹⁾。このようにイベントのオフラインでの開催はまだまだコロナ禍前のような状況に戻る見通しすら立っていない状況です。

イベントの無観客オンライン配信

オフラインでのイベント開催が前述のように厳しい一方、「イベントの無観客オンライン配信」という新しいスタイルが立ち上がりつつあります。

「サザンオールスターズ」が無観客配信ライブを実施し、そのチケット購入者数が約18万人となり、結果として推定6億5000万円もの売上を記録しました⁽²⁾。これは配信ライブの開催会場の収容人数（1.7万人）の10倍以上とオンライン配信のポテンシャルを広く知らしめることとなりました。

オンライン配信のメリットは、チケット単価が2000～3000円と通常の音楽ライブより安く設定されているため、この金額なら観ても



図1 REALIVE360イメージ画像

良いと思える人にもチケットを購入してもらえます。また、平日の夜のイベントであれば、都合が悪くなかなか現地に行くことができない遠方のファンにとっても、オンライン配信であればと視聴してみようと思いやすくなるということが挙げられます。ライブ配信チケットの価格を抑えるというのは売上の減少につながるかと思いましたが、これまでチケットの購入を見送っていた層にチケットを販売することができたのと同時に、一度はライブ観劇から離れたファンである出戻り組も踏まえ、新たなファンを獲得することに成功したのです。

REALIVE360

そうした中、NTT西日本グループのスマートライフチームでは、新型コロナウイルス感染症流行前の2018年からマルチアングルVR (Virtual Reality) 映像配信サービス

「REALIVE360」の開発に着手していました(図1)。当初は「都市部と地方の“体験の格差・機会格差”をICTの力で解消する」をサービス開発のスローガンとしていました。音楽ライブをはじめ、エンタテインメント系のイベントの公演数や動員数などは都市部に集中しています。地方在住の音楽ファンにとって遠方から交通費・時間をかけて参加するのはハードルが高い点があります。さらにハンディキャップを持つ方や、シニア、小さな子どもを持つファミリーなど、音楽や演劇・スポーツが好きでも会場まで行くことが困難な方は多く存在します。そのような方たちに、都市部で開催されているコンサート等のイベントを、地方等遠隔地でも高臨場感に体験できるサービスとして「REALIVE360」をサービス化しました(図2)。サービス化に際してはNTT西日本グループの配信技術に加え、VR撮影・編集などを手掛けるアルファコード社

参加者は「REALIVE360」のアプリをダウンロードして配信映像を視聴

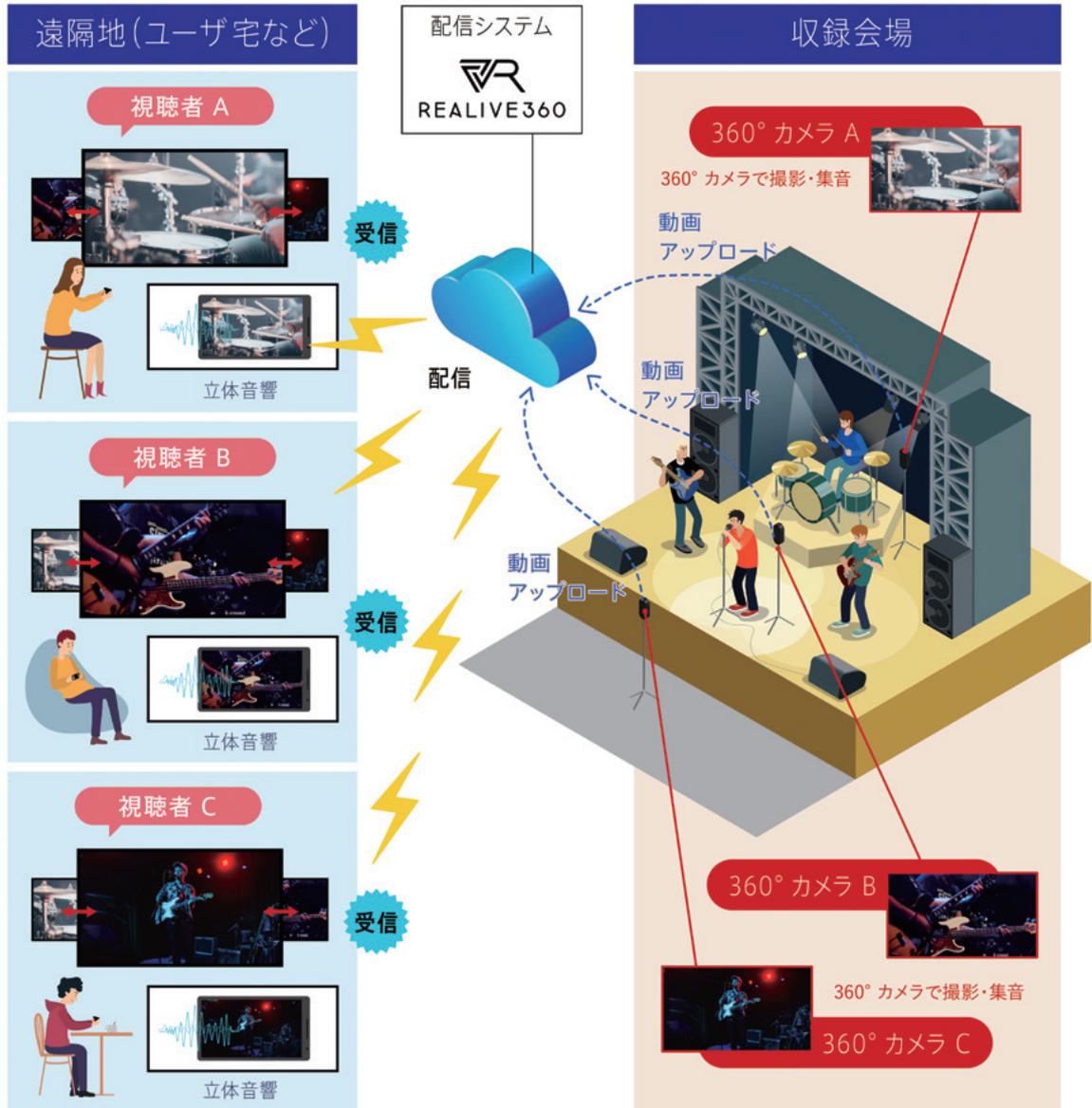


図2 REALIVE360のサービスイメージ

などと協業体制を構築しました。2019年末には第1弾アーティストとして「ももいろクローバーZ」のライブを配信し、大きな話題を呼びました。その後、前述のとおり新型コロナウイルス感染拡大の影響でイベントのオンライン配信が主流となり、「REALIVE360」と

してもFM802とのコラボレーションで、コロナ禍によって観客減やイベント中止に悩む音楽業界を支援する企画「REALIVE360 VR ZONE」の実施(図3)や、J-WAVEイノベーションワールドフェスタの配信、「誰ガ為のアルケミスト」の舞台を配信するなど実績を



図3 「REALIVE360 VR ZONE」でのキューソフネコカミによる演奏模様

重ねてきました。

■4K/8Kの高画質360度VR映像をストリーミング配信

「REALIVE360」の特徴の1番目は今までにない「4K/8Kの高画質360度VR映像をストリーミング配信」していることです。独自の技術で従来、360度VRストリーミング配信が抱えていた画質の粗さを解消しました。「REALIVE360」ではNTT研究所にて研究開発され、NTTテクノクロスにて製品化された「パノラマ超エンジン」を活用し、4K/8Kの高画質VR配信を実現しています。まず、360度VR映像の場合、その瞬間には見えていない部分も含めた360度分の映像データが必要になるため、普通の平面ディスプレイで表示される16:9動画とは異なる考え方をする必要があります。平面ディスプレイで表示されている4Kの映像データは、その平面ディ

スプレイで4K解像度を表示しているのに対し、「4Kの360度VR映像」の場合、その瞬間には見えていない部分も含めた映像データが4K解像度ということになるので、実際に視聴できている視聴領域は4K未満になってしまいます。360度VR映像を視聴中、4K解像度なのにもかかわらず想定よりも画面がぼやけるといふこととなります。一方で、視聴範囲の画質を上げるために解像度を8Kに上げると、配信ネットワークの必要帯域が大きくなるため、ユーザに求める視聴環境の条件が厳しくなってしまいます。すなわち、顧客のネットワーク環境が十分に整っている必要があります。サービス利用者の拡大に大きな影響を及ぼしてしまう可能性があります。そこで、視聴領域だけ高解像度、その他の見えていない部分は低解像度で配信することが可能な「パノラマ超エンジン」を採用することとし

ました。パノラマ超エンジンでは、4K解像度であれば約4分の1、8K解像度であれば約7分の1までネットワークの必要帯域を削減することができ、4G回線でも8K解像度の360度VR映像を楽しむことができます(図4)。

■マルチアングル

2番目は「マルチアングル」です。複数のアングルからユーザが見たいアングルを自由に選択できるため、主体的・能動的に好みのアングルでライブを楽しむことができます。マルチアングルであるがゆえに、実際のライブ会場では体験できない「さまざまな座席の瞬間移動」を実現できるとともに、お気に入りのメンバの追っかけ視聴や出演者が見ているであろうステージ上からファンを見渡すアングルや天井からのアングルなど、通常では設定できないようなアングルを設定できます。マルチアングルだからこそ出演者をバストショットでしっかりおさえるメインアングルを設定しつつ、チャレンジングなサブアングルを設定することができます。

■立体音響

3番目が「立体音響」です。ボーカルの声

は映像の右側から、ドラムの音は後方から聞こえるといった演出が可能です。実際の各アングルから聞こえる音をVR映像内でリアルに再現できます。アングルごとに音の聞こえ方が変わるのももちろん、VR映像内の視聴している場所を変えるだけでも聞こえ方が変化します。臨場感を上げる工夫を映像だけでなく、音声でも実施しています(図5)。

その他、アプリケーションでサービスを実現していることから専用のゴーグルやヘッドセットなどは不要で、スマートフォンやタブレットだけでVRの世界を楽しめることも特徴です。

また、各社プレイガイドと連携していますのでユーザはプレイガイドでチケットを購入し、払い出されたシリアルコードで認証するとREALIVE360のアプリでイベントが視聴可能になります。

今後の展開

このように現在はエンタメでの利用をメインとしているREALIVE360ですが、サービス利用者であるイベント主催者の皆様にたく

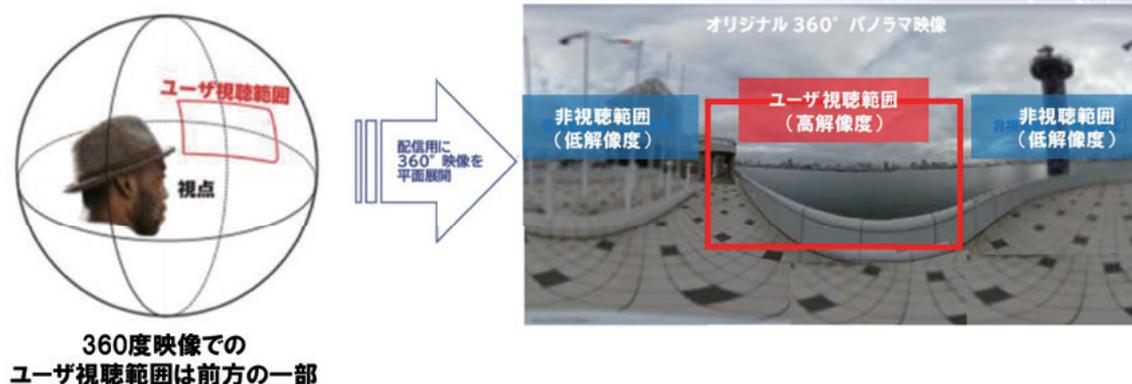


図4 パノラマ超エンジンの仕組み



図5 REALIVE360の特徴

さんの機能拡張のリクエストをいただいております。現在、さまざまな機能を開発中です。

それは、「出演者と視聴者がインタラクティブにコミュニケーションを取れる機能」や、「スポンサーなどの広告を表示する機能」といったオフラインでイベントを実施する際に行っていたことをオンラインでも実現する機能や、「視聴者が配信者へのお礼や応援の気持ちを込めてお金を送ることができる投げ銭機能」や「視聴データ分析」機能といったオンライン配信だからこそ実現できる機能に加えて、現行のアプリケーションだけでなく「Webブラウザでの視聴やTVへのキャスト機能」といった視聴拡張性を向上させる機能です。

加えて今後は、エンタメ分野だけでなくB2B市場への展開として教育や観光などといった分野へのサービス拡大を予定しています。さらに、業界の垣根を越えたパートナーシップも視野に入れ、広く意見をいただきながらさまざまなビジネスシーンの課題解決や

新規バリュー創出につなげていきたいと考えています。

■参考文献

- (1) 沖縄タイムス:「ガラガラだけど「これで満席」ある劇場の“問いかけ”に反響,” 2020.
- (2) <https://www.data-max.co.jp/article/36502>



(左から) 江村 正規 / 笹原 貴彦 / 深谷 崇文

NTT西日本グループは、ソーシャルICTパイオニアとしてVRをエンタテインメント分野での活用を契機に、将来的には医療や教育等の産業や日常で活用することで新たな利用シーンへ事業拡大し、地域や企業の抱える課題解決をめざしていきます。

◆問い合わせ先

NTT西日本
 ビジネスデザイン部
 E-mail bd-xrbiz@west.ntt.co.jp

デジタルトランスフォーメーションを推進し、 Smart Worldを実現するための キーソリューション「ローカル5G」

現在、製造業をはじめとするさまざまなお客さまから注目されている無線技術のローカル5G（第5世代移動通信システム）、これまで自営の無線通信手段として広く普及してきたWi-Fiとは異なり、ライセンスバンドを使用するローカル5Gは、設計・構築・運用に特別なノウハウを必要とします。本稿では、ローカル5Gが制度化される前から実証実験を重ね、知見を溜めているNTTコミュニケーションズより、ローカル5Gネットワークを活用したお客さまとの共同実証実験の事例や、MEC（Multi-access Edge Computing）・ネットワークスライスといった技術開発中のテクノロジーについて紹介します。

まえだ 前田	りょう 亮	かきもと 柿元	ひろあき 宏晃
ただたけ 武田	よしあき 好明	まつやま 松山	ゆきなか 幸中
なかむら 中村	だいすけ 大輔	もりふじ 森藤	ふくまさ 福真

NTTコミュニケーションズ

お客さまビジネスのDXを支えるデータ 収集機能「ローカル5G」

NTTコミュニケーションズ（NTT Com）は、「DX Enabler[®]」として、事業創造や競争力の強化につながるデジタルトランスフォーメーション（DX）をお客さまと共創していくことをめざしています。DXを実現するうえで重要となるのがデータ利活用で、そのためのプラットフォームとして、2019年に「Smart Data Platform」を発表しました。

Smart Data Platformは、データの収集や蓄積、管理、分析などに必要となるさまざまな機能を取りそろえています。高度なデータ収集を実現する無線通信手段であるローカル5G（第5世代移動通信システム）も、DXの実現に不可欠な機能としてSmart Data Platformにラインアップしています。

NTT Comは、ローカル5Gをはじめとする技術を用いて、安全なデータ収集と蓄積の

ための環境を整え、さらにデータ統合や分析、利活用のための仕組みをワンストップで提供することで、お客さまのビジネス価値の創出に貢献することをめざしています。

セキュアで高品質な無線環境で、移動体 との通信や柔軟な生産体制を実現

ローカル5Gは、高速大容量かつ低遅延で通信できること、多数の端末を同時接続可能であることなど、5Gとしてのさまざまな特長があります。その中でも特にお客さまから期待をいただいているのが、移動する物体との高速通信が可能なことです。

電車や自動車、ドローン、ロボットといった移動体から大容量データを安定的にリアルタイムに収集することは、Wi-Fiなど従来の無線通信技術では難しい面がありました。しかし、ローカル5Gを用いれば、映像などの大容量データを迅速に収集することが可能となり、データ利活用の幅が広がります。

セキュリティも期待されている部分です。モバイルキャリアが提供するパブリック5Gと同様、ローカル5GでもSIMを利用した認証や暗号化を行うことになるため、セキュアな無線通信環境を構築することが可能です。

例えば各種製造装置の入出力データは極めて機密性が高く、セキュリティにも十分に配慮しなければなりません。ローカル5G環境でSIMを使った認証や暗号化を行うことで、なりすましや盗聴などのリスクを大幅に低減することができ、従来の無線通信技術ではやり取りすることが難しかったデータも送受信できるようになります。

代表例として、ロボットが人間と協調して作業するといった場面における、ローカル5Gの活用が考えられています。ロボットの稼働データをリアルタイムに収集する、あるいは遠隔からロボットの制御を支援するといった用途です。

ロボットとの接続に関しては、DMG森精機株式会社様と実証実験を行っています。

また、製造業以外の分野にも利用用途が広がる可能性を秘めています。例えば、ロボットを用いて施設内の警備を行う、あるいはドローンを使った設備点検への応用も期待されています。こちらに関しては、総合警備保障株式会社、京浜急行電鉄株式会社とコンソーシアムを結成し、総務省 令和2年度「地域課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証」においてフィールド実証を進めています⁽¹⁾。

■ 事例：DMG森精機様との共同実験

DMG森精機様との共同実験では、ローカル5Gを活用し、無人搬送車に人協働ロボットを搭載した自律走行車「AGV」の遠隔操作などの実現可能性を検証しています。AGVに搭載されているセンサを使って、周辺環境の状態をデータとして収集するスピードをWi-Fiとローカル5Gで比較したところ、ローカル5GはWi-Fiよりも安定して高速にデータ収集できることが確認できました(図1)。このような検証を重ねて、工作機器な

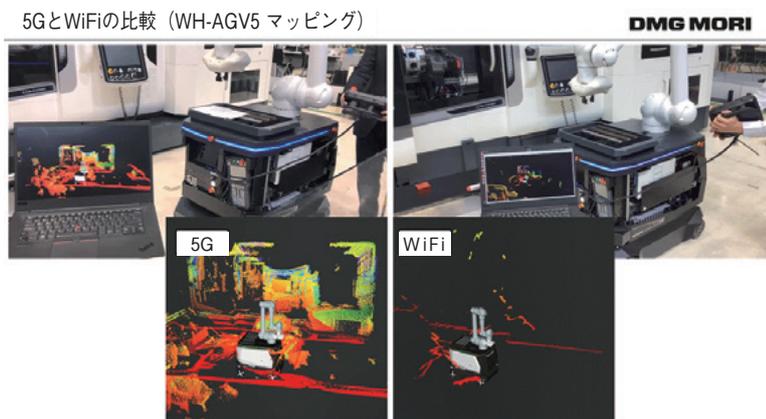


図1 Wi-Fiとローカル5Gとの立体図作成スピードの比較

どにおけるローカル5Gの適用についても、知見やノウハウを蓄積しています。

今回の実証実験によって、自動走行の精度や安全性の向上、エッジコンピューティングを利用することによる車体の軽量化など、AGVのさらなる高性能化が期待されています。

ローカル5Gだけでなく長年培ったネットワーク構築技術によるトータルコディネート

NTT Comの強みは、ローカル5G環境を構築するだけでなく、エッジやクラウドに接続するネットワーク、さらにはアプリケーションまで含めたシステム全体を通して最適な通信品質やソリューションをトータルコディネートのうえ、提供できることです。

NTT Comが提供しているSmart Data Platformには、データ利活用に必要なあらゆる機能がそろっています。お客さまは、ローカル5Gと連携させるネットワークサービス（通信回線、エッジ、クラウドなど）や各種アプリケーションなど、必要な機能を選択し組み合わせることで、ローカル5Gによるデータ収集と利活用が実現できます。

また、柔軟にソリューションを提案できることも、NTT Comならではのメリットです。無線通信においてローカル5Gだけにこだわっているわけではなく、お客さまの課題を伺い、解決策としてプライベートLTEやWi-Fi、LPWA（Low Power Wide Area）を提案するケースもあります。お客さまの課題解決にとって最適な機器・サービス・技術を選定し、ベストなコディネートで柔軟に提案さ

せていただきます。

アークス浦安パークでのローカル5G実証実験

ここからは、NTT Comにおけるローカル5Gの技術開発の取り組みについて説明します。NTT Comは、28 GHz帯に加え、2020年末に制度化された4.7 GHz帯でのローカル5Gの実験試験局免許を2020年6月に取得、電波伝搬特性等の検証を自社施設である「アークス浦安パーク」でスタートしました（図2、3）。同じローカル5Gでも、4.7 GHz帯と28 GHz帯とでは、電波特性は異なります。28 GHz帯は、通信速度を重視するときメリットを出しやすい反面、遮蔽物に対する透過や回折が期待できず、到達距離も短いといった特性があります。基地局のアンテナと受信端末との間にさえぎるものがないような理想的な無線環境に近いLOS（Line Of Sight）内での5G通信に、より強みを発揮できるでしょう。

一方の4.7 GHz帯は、28 GHz帯と比べると遠くまで電波を飛ばすことが可能で、遮蔽物に対してもある程度、透過や回折をします。そのため、28 GHz帯での置局設計よりは工場の敷地内など一定のエリアをできるだけ少ない基地局でカバーすることができます。この2つの周波数帯の特性を踏まえたうえで、お客さまの利用用途や通信のニーズに応じて適切な周波数帯を選択することが重要です。

また、NTT Comでは、ローカル5Gとネッ



図2 アークス浦安パークでのローカル5G



図3 アークス浦安パークでの電波伝搬検証

トワークサービスとの連携について、さまざまな角度から検討を行っています。その中で、ローカル5G通信で収集したデータをクラウドよりも手前にあるネットワーク上で処理を行うエッジコンピューティング「MEC (Multi-Access Edge Computing)」という技術に注目しています。低遅延を求めるお客さま向けに、このMECをオンプレミス（自社内の情報システム）に配置することで、リアルタイムなデータ収集と利活用を実現しました。また、NTT Comのネットワークサー

ビスをご利用いただく場合は、用途に応じてMECをネットワークエッジに構築し、多段利用していただくことも可能になります（図4）。さらに次世代インターコネクトサービス「Flexible InterConnect」を活用すれば、エッジだけではなく、各種クラウドサービスとセキュアに接続することも可能です。

このようにMECを上手く活用することで、低遅延を実現しながら、クラウドへ送信するデータ量を削減できるほか、災害などによってクラウドやインターネットにトラブルが発

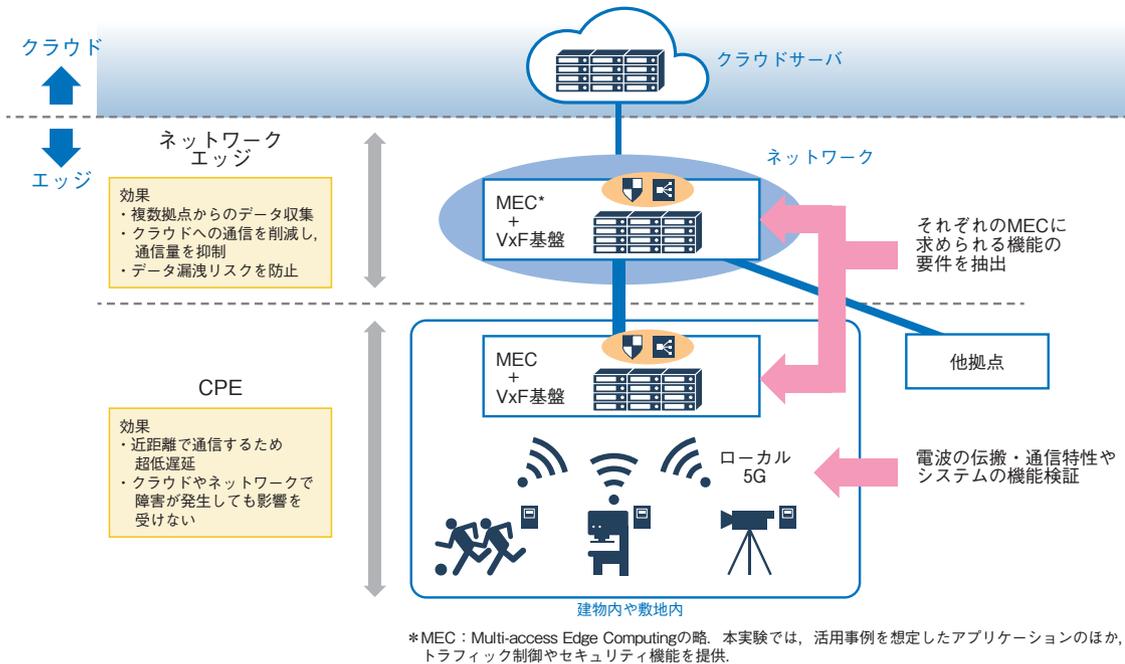


図4 多段MECを組み合わせたローカル5G検証

生しても処理を継続できる可能性を高めることができます。こうした対応は、さまざまなサービスを持つNTT Comの強みです。

SA方式でのエンド・ツー・エンドでのネットワークスライス検証

5Gにはソフトウェアを用いて仮想ネットワークを構築する「スライシング」という技術があります。3GPP (Third Generation Partnership Project) が策定する5Gの仕様では、高速大容量通信と低遅延、そして多数端末同時接続の3種類のスライスが規定されていますが、ローカル5Gでは、さらに細かく、アプリケーションごと、あるいは端末ごとといった要件に合わせてスライスを作成できます(図5)。

NTT Comでは、ローカル5G通信だけでなく、その裏側にあるネットワークも含めて、細かく多彩なネットワークスライスを作成し、エンド・ツー・エンドで制御することをめざしています。それによって例えば、工場の稼働データなど機密性が高いケースでは閉域網やオンプレミスのネットワークに閉じたスライスに載せ、インターネットなど情報系ネットワーク用のスライスと分けるなど、自由なカスタマイズが可能になります。その1つとして、エリクソン社のローカル5G向けソリューション「Edge Gateway*」を活用し、

* Edge Gateway : 小規模からの運用開始を想定した「Edge Gateway」の導入にあたっては、エリクソン社が世界で先行2社のみと結ぶアーリーアダプター契約を締結。NTT Comのローカル5Gソリューションで活用することを想定したチューニングを施し、世界に先駆け実証を進めています。

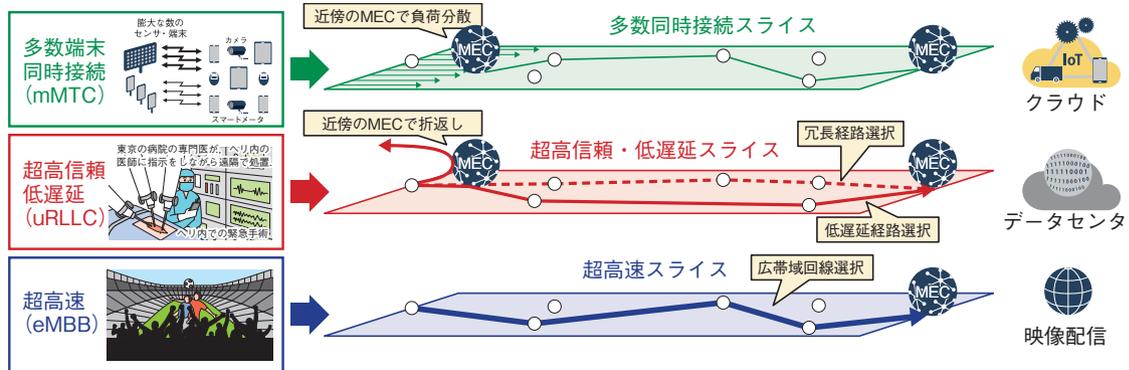


図5 エンド・ツー・エンドでのネットワークスライス検証

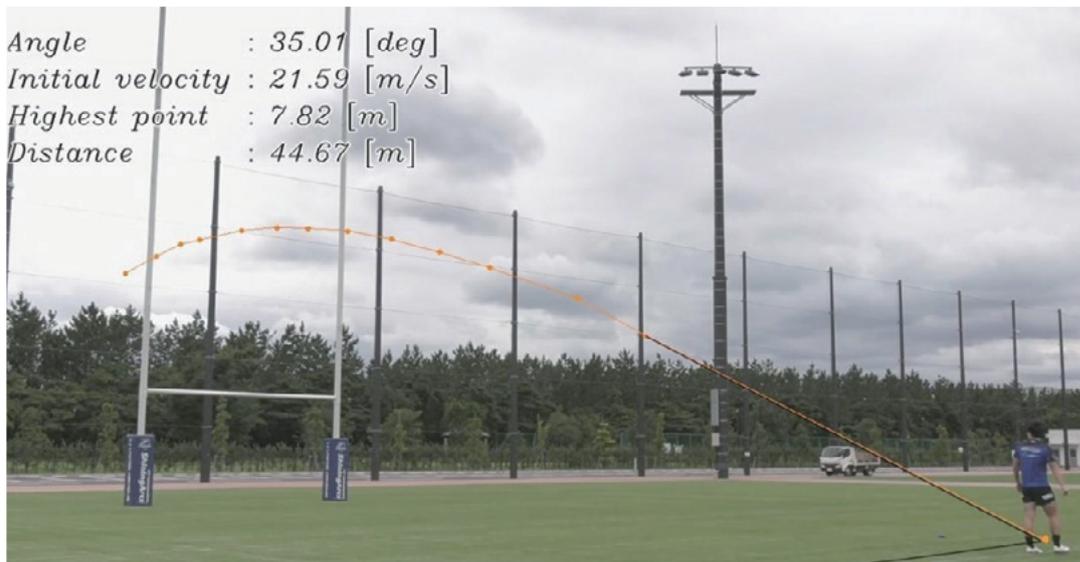


図6 ネットワーク連携実証例：ラグビーボールの軌跡描画・映像解析

Sub-6帯およびSA方式の検証や、バックヤードにあたるネットワークと接続してエンド・ツー・エンドでの遅延測定やスライシング機能の検証を実施するなど、検証により各社の製品・技術を見極めながら、柔軟なネットワーク構築が可能となるように技術開発や検証を拡充しています。また今後は、各種エッジコンピューティング機能の搭載やNTT Com

のデータ活用プラットフォームであるSmart Data Platformと連携させるなど、実フィールドに配備する実証を展開していきます。

実証の1例として、NTT Comラグビー部の練習場である「アークス浦安パーク」に設置した検証環境を利用し、ローカル5Gでのリアルタイム映像解析を実現しています。図6の写真では、選手がラグビーボールを蹴る

映像を低遅延スライスで送信し、即座にMEC上のアプリでボールの角度と初速度を算出し、そこから高さや飛距離をAI（人工知能）に予想させ、ボールの軌跡とともに元の映像に描画して出力する、といったことを行っています。

このようにNTT Comでは、ユースケースを想定してトータルネットワークソリューションとしてのローカル5Gの活用方法も提案していきます。

おわりに

ローカル5Gは新しいワイヤレステクノロジーではありますが、その土台にあるのは、私たちが長年培ってきたネットワーク技術にほかなりません。NTT Comは、これまでの蓄積を活かしつつ、リーズナブルにローカル5Gを利用できるサービスの検討や、今後開設予定であるSmart City Lab（共創環境）を活用しながら、お客さまの事業創造や競争力強化のDXを推進するローカル5Gサービスやソリューションを創出し、お客さまとの共創を加速させていきます。

■参考文献

- (1) <https://www.ntt.com/about-us/press-releases/news/article/2020/1120.html>



(上段左から) 武田 好明 / 前田 亮 / 柿元 宏晃

(下段左から) 森藤 福真 / 中村 大輔 / 松山 幸中

ローカル5G以外にも紹介したSmart Data Platformをはじめ、多くのソリューションのラインアップがあり、また並行して新たな技術開発を進めています。これからもお客さまのDX実現に貢献し、Smart Worldを実現したいと考えています。

◆問い合わせ先

NTT コミュニケーションズ

URL <https://www.ntt.com/about-us/5g.html>

MLOpsによる機械学習プロセスの高速化と 継続的にサービス価値を提供するための仕組みづくり

MLOps (Machine Learning Operations) とはDevOpsの機械学習版で、機械学習の開発担当者とシステムの運用担当者がお互いに協調し合い、実装から商用システム運用までを円滑に進めるための概念全体を表します。昨今、技術トレンドとしてMLOpsが流行っておりますが、ベンダごとに定義はばらばらで統一的な見解がないと考えています。そのような背景を踏まえ、本稿ではMLOpsの背景や基本的な考え方に加えて、現時点で最新と考えられる検討観点や具体的な実現手段を中心に解説をします。

やまぐち えい
山口 永

NTTデータ

背景

AI (人工知能) を使った新規サービスの立上げや既存業務の改善を試行するプロジェクトは年々増えていますが、実ビジネスへ本格導入に至らないケースが散見されます。主な理由は2つあり、1つは限られたPoC (Proof of Concept) 期間内に実業務に耐えられる

レベルまでAIの精度を向上しきれないケースと、もう1つは機械学習の開発担当者が作成したAIモデルをシステム開発担当者が引き継いで商用システムへ導入しますが、コミュニケーションや作業の分割コストにより導入に時間がかかるケースが挙げられます (図1)。加えてサービス展開後の課題としては、コンセプトドリフト、またはデータドリフト

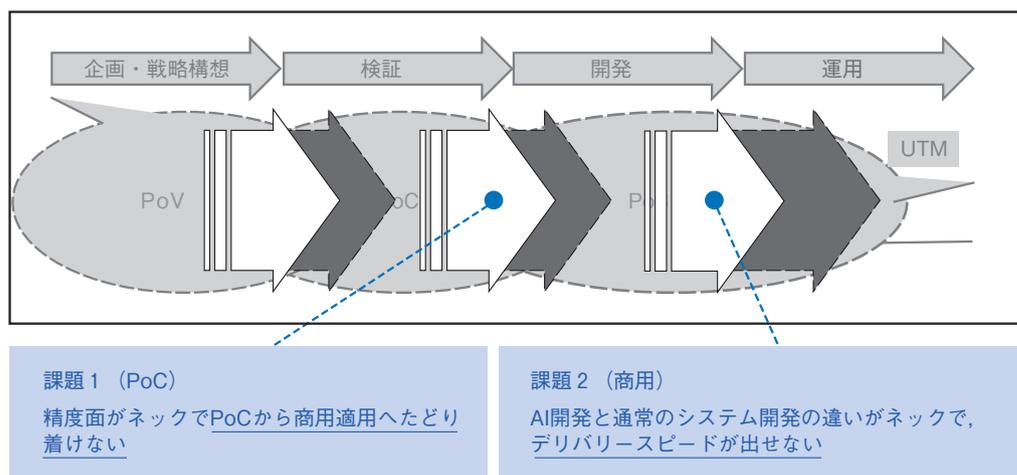


図1 機械学習の開発プロセスの課題

と呼ばれる事象への対応が挙げられます。こちらは耳慣れない言葉ですが、一例を挙げると人の行動様式の変化を表しており、例えば昨今新型コロナウイルスの感染拡大が広まっておりますが、その影響で人の行動様式が日から週単位で変化しています。そのため、変化前にデータサイエンティストがチューニングしたAIモデルの精度が陳腐化し、役に立たなくなるケースが挙げられますが、そのような事象を指しています。

図1の課題に対するアプローチ方法として、昨今MLOpsという技術トレンドに注目が集まっています。本稿では、それぞれの課題に対するMLOps流のアプローチ方法に関して説明します。

■課題1：PoC期間内にモデル精度を実業務に耐えられるレベルまで向上しきれない

1番目の課題に関しては、チューニングプロセスを効率化することで、限られたPoC (Proof of Concept) 期間内でのチューニ

ング回数を増やすアプローチが有効だと考えられています。チューニング回数を増やすことは精度向上に寄与しそうな施策がたくさん取り込まれるため、モデルの精度が向上することは直観的には正しように思えます。

チューニングプロセスを効率化するために、まずは俗人的なチューニングプロセスを標準化し、共通言語化したうえで、チューニングプロセスの各工程を効率化できるようなツールの導入が有効であると考えられます。

1点目のプロセスに関しては、データ分析の領域で使われている分析フレームワークが有効であると考えられています。例えば、CRISP-DM (CRoss-Industry Standard Process for Data Mining) という分析フレームがあります。こちらのプロセスはウォーターフォールの開発プロセスとは異なり、プロセス間の行き来を許容したプロセスになります(図2)。

当該プロセスは機械学習の開発プロセスと

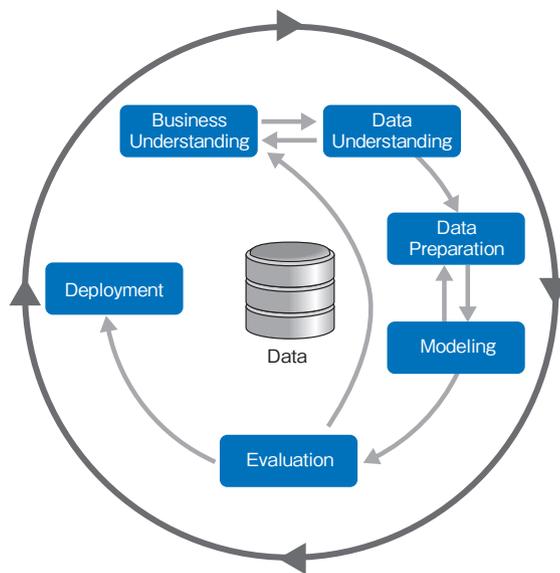


図2 CRISP-DM

も相性が良く、設計凍結を前提としたウォーターフォールの開発プロセスと異なり、こんな特徴量を使ったらどうなるか、アルゴリズムを変更したらどうなるかなど、試行錯誤しながら精度向上を図るのが一般的ですが、そのようなプロセスを前提としています。

2点目のツールに関しては、機械学習の開発効率の向上を目的としたツールが、OSS (Open Source Software)、クラウドサービスプロバイダおよびサードパーティベンダから発表されているため、当該ツールの導入を図ります。NTTデータでは、以下のようなMLOps導入サービスを展開しており、機械学習のモデル開発効率に課題を持っているお客さま向けに各プロセスの効率化が可能なツール導入支援を行っています(図3)。

精度向上に直接寄与するツールの代表例として、AutoMLと呼ばれているツールが非常に有効です。こちらのツールは機械学習の開発プロセスで必要な特徴量設計やモデル設

計、モデルチューニングを複数のアルゴリズムを同時に実行して、一番精度が高い機械学習を選定します。

ただし、これらのツールを駆使してAIの精度を向上させても、それがお客さまの実ビジネスへどのような効果を与えられるかを示さなければ意味がありません。そのためには、正解率 (Accuracy) や再現率 (Recall) といったAIのモデル精度指標をお客さまの実ビジネスの言葉に翻訳して、ビジネスインパクトを示す必要があります。

■課題2：機械学習の商用システム開発はさまざまなロールの専門家の協力が必要

機械学習の開発プロセスと、参画される専門家の所収範囲の概要を図4に示します。概要レベルでもさまざまな専門家の参画が必要になることが見て取れます。

例えばAIモデル開発者和其他の専門家間で次のような課題があるプロジェクトが多々あります。

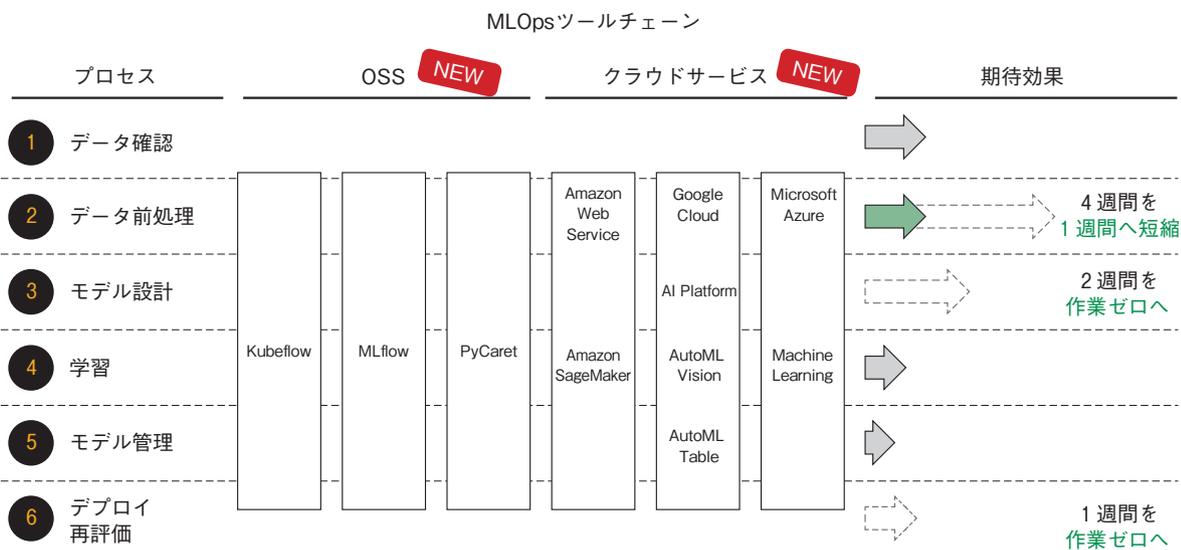
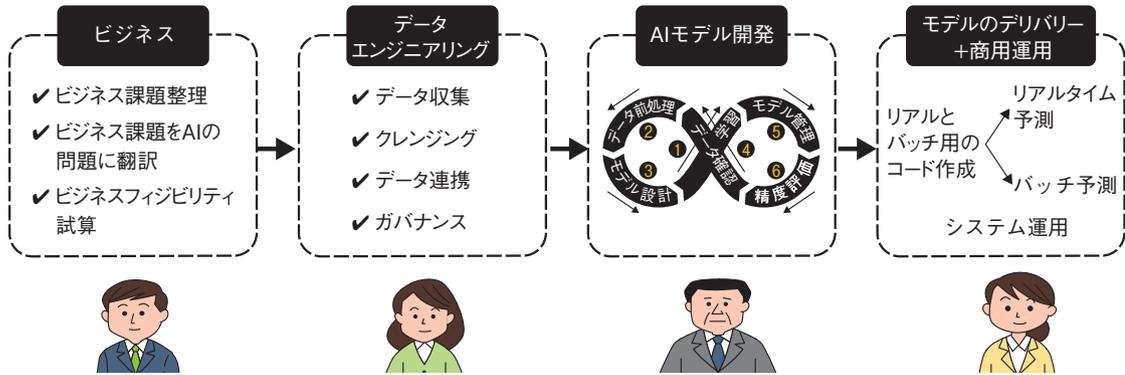
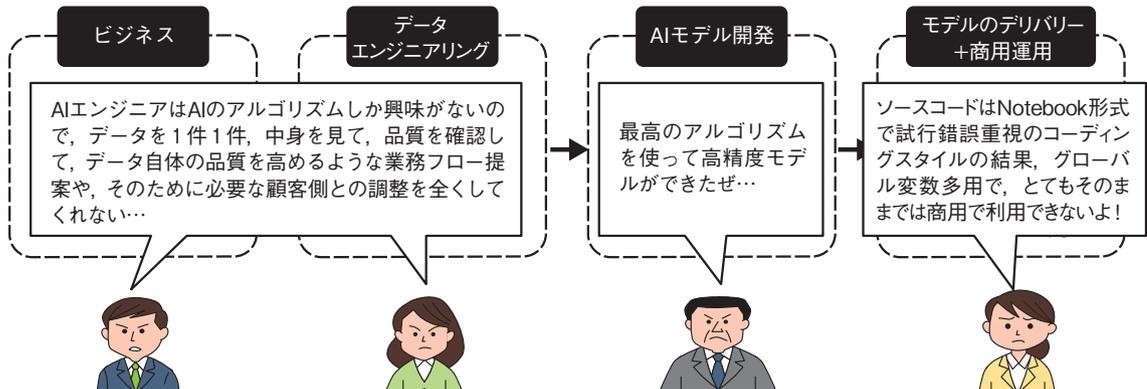


図3 NTTデータ、MLOps ツールチェーン

■機械学習プロジェクトは分業体制が多く、多種多様な専門家が参画される



■AIモデル作成フェーズと商用システム組み込み部分でデリバリースピードが出ない
 ■主な理由は専門家間のケイパビリティギャップと各タスクの理解不足



■前述した課題を解決するため、下記のAIモデル開発者を対象に、ビジネス+データエンジニアリング+デリバリーに関する一定程度の素養が必要かつ必要性の動機付けが重要

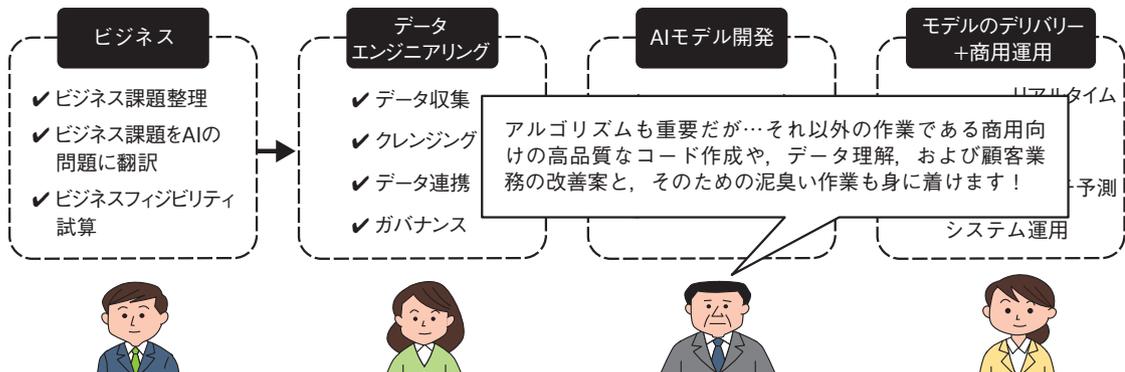


図4 MLOps

- ・ AIモデル開発者はモデル精度向上に注力しがちだが、ビジネス&データエンジニアリング側としては、データ品質のレポートと品質を高めるために必要なデータ生成および業務プロセスに関する提案をしてほしい。
- ・ AIモデル開発者は優れたソフトウェア開発者ではないため、作成したコードの品質が悪く、デリバリー側の開発者側で商用向けの高品質なコードに書き換えるコストがとてかかる。

この点を踏まえると、AIモデル開発者のロール定義を商用開発フェーズは広げる必要があることが分かります。PoCフェーズでは必須であったモデル精度を向上させるためのテクニカルなナレッジだけではなく、商用開発向けに必要な高品質なコード作成技術やデータ理解ならびに顧客業務を理解したうえでのデータ品質改善案なども考えられる人材が必要であることが分かります。

■課題3：パンデミックなどの人の行動様式が変化する事象が発生した場合、変化前にチューニングした機械学習モデルが役に立たなくなる

昨今、新型コロナウイルスが猛威を振るっていますが、その影響で人の購買傾向の変化であったり、マスクを必須とする社会情勢からスマートフォンの顔認証ではなく、指紋認証へニーズが変化する現象があるかと思えます。これはコンセプトドリフト、データドリフトの事象で、人の行動様式の変化から、発生するデータの統計的な性質が変化するため、今まで作成したモデルが役に立たなくなるという問題を表します。この事象が発生し

た場合の対応策としては、新たにデータを収集して、収集したデータでモデルを再構築する必要があります。ただし、毎回人手+手動で実施するのは非効率なため、機械学習システムの機能要件と仕組みとして実現し、プロセスを自動化させる必要があります。特に、一般的なアプリケーションと同様に機械学習モデルも運用フェーズが重要になりますが、前述のとおりシステム的なエラー監視の仕組みだけでは駄目で、機械学習モデルの精度監視を合わせて行う必要があります。

図5はMLOps全体の流れを表しており、①モデル開発と②デプロイだけでなく、③モデル精度監視と④学習データ作成+再学習の仕組みが必要になることが読み取れるかと思えます。これらの仕組みを自動化の仕組みと合わせて導入することで、コンセプトドリフト、データドリフトの事象が発生したとしても、システムの仕組みとして対応することが可能になります。

今後の展開

MLOpsは昨今の技術トレンドですが、それらを下支えする技術スタックはいまだ定義を含めて未成熟です。ただし、OSS、クラウドサービスプロバイダないしサードパーティベンダがしのぎを削って開発を進めているため、それらの動向を継続的にウォッチする必要がありますと考えています。

業界全体でコンセンサスが取れたMLOpsの定義はいまだ確立されていませんが、海外を含めてMLOpsに関する情報発信を行っているベンダからの情報を要約すると、システム構成(図6)とそれらを下支えする11個の

■ MLOpsとは、複数チームから構成される機械学習の開発サイクルを、Opsツールを使って円滑に回す取り組み全体を指します

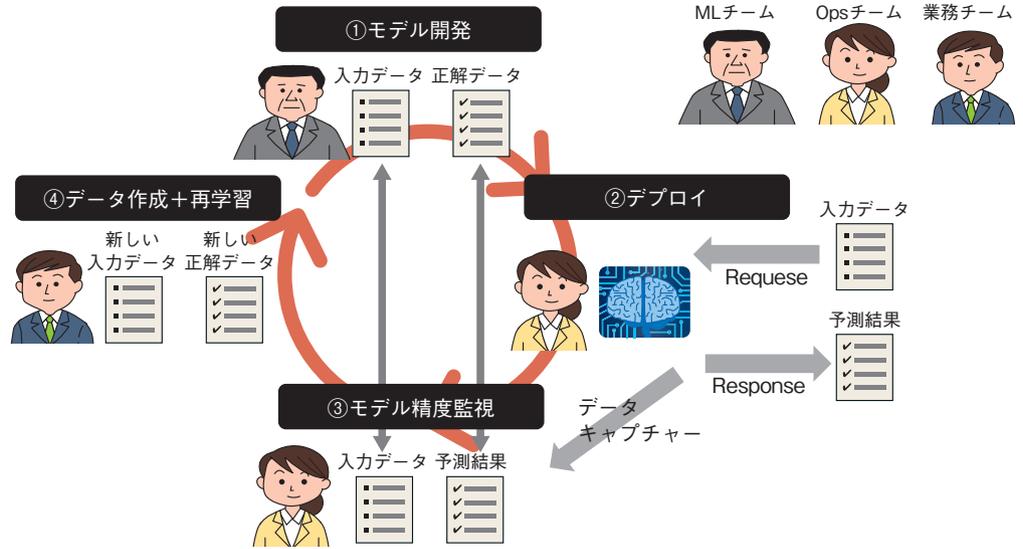


図5 MLOpsの流れ

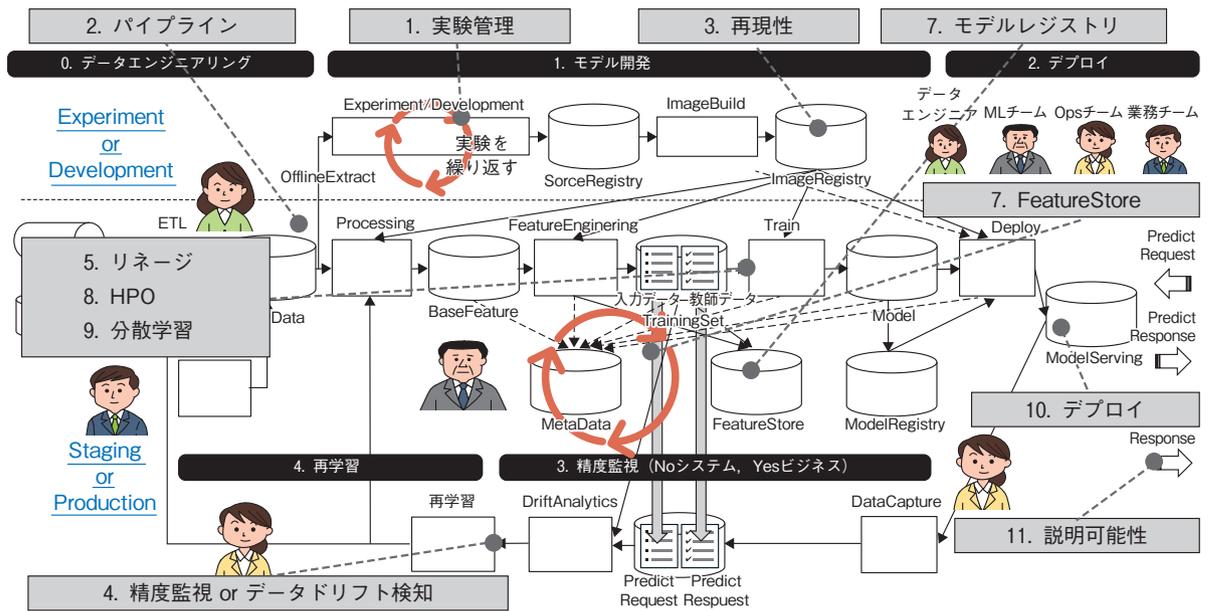


図6 機械学習システムパターンとMLOpsツールとの関係

機能群（表）に整理できるのではないかと考えられます。

紙面の都合上、1つひとつの機能を説明することはできませんが、今後もMLOpsツ

ルの成熟度が高まることが予想され、それと比例してAIの社会実装が加速していくと考えられます。

そうした流れの中で、今後もMLOpsやAI

表 MLOpsの11個の機能群

機能名	説明	期待効果	
		高速化	使い勝手
1. 実験管理	・ML実験実施後、その実験を後でトレースできる ・複数の実験を比較するが可能でかつ可視化による比較が可能	○	
2. パイプライン自動化	・機械学習の複数のプロセスをつなぎ合わせてジョブ化することが可能	○	
3. 再現性	・機械学習のアルゴリズムが依存するライブラリーに依存して、他の環境で処理が動かないよう、コンテナ等の技術でパッケージング+ポータビリティを担保することが可能		○
4. 精度管理 or DataDrift	・精度の劣化をモデルの元データの分布のずれで検知できるようにするため、ベースラインデータとRequestで飛んでくるデータをぶつけて、データのずれの比較が可能		○
5. リネージ (追跡)	・機械学習の複数プロセス間 (例: 前処理, 学習, etc) のつながりや各プロセスの入力と出力を後でAPI等でトレース取得が可能		○
6. FeatureStore	・データサイエンティストが前処理で作成した特徴量データを他のデータサイエンティストと共有可能かつ特別なストア領域で管理+ポータル共有が可能		○
7. ModelRegistry	・データサイエンティストが作成した機械学習モデルをモデル専用のレジストリーサービスに登録し、後で承認者が承認+1クリックで環境へデプロイが可能		○
8. HyperParameterTuning	・ハイパーパラメーターチューニング専用のジョブを実行させることが可能かつもっとも精度が高いモデルを生成したジョブの選定が可能	○	
9. 分散学習	・データ分割 or モデル分割手法の利用が可能かつ機械学習のモデル学習のスケールアウトが可能	○	
10. MultiFrameworkDeploy	・複数の機械学習アルゴリズムのサービングコードの生成を半自動化し、加えて高度なデプロイ方式、例えばカナリアリリース等の実現が可能	○	
11. Explainable	・機械学習の予測結果から、どのような説明変数が予測結果に寄与したのかの判定が可能かつ予測結果の説明が可能		○

の社会実装に関するさまざまなノウハウが蓄積されていきますが、それらのノウハウを活用することで、機械学習業界およびAIの社会実装の発展に寄与していきたいと考えています。



山口 永

機械学習を使った新規サービスや既存業務改善を志向するお客さまは増えている状況ですが、なかなか社会実装まで至らないケースが多いです。上記課題感で困りごとの場合は、是非当方へご相談いただけますと助かります。

◆問い合わせ先

NTTデータ
技術革新統括本部 デジタル技術部
アジャイルプロフェッショナル担当
TEL 080-1004-0671
E-mail Ei.Yamaguchi@nttdata.com

汎用言語モデル「BERT」の ビジネス実用化技術に迫る

ことばを処理するAI（人工知能）技術の1つとしてBERTという技術が脚光を浴びています。NTTデータではBERTをビジネスで実用化するため、さまざまな業界の特有な単語や言い回しをとらえることのできるBERTの応用開発を行っています。これにより、個々のお客さまニーズに合わせた最適なAIモデルを構築することができます。本稿では、その一例である「金融版BERT」と「ドメイン特化BERTフレームワーク」について紹介します。

わち とくま
和知 徳磨

NTTデータ

はじめに

近年、深層学習をはじめとしたAI（人工知能）関連技術がめざましい進歩を遂げており、これまで実用足り得なかった分野に対して適用が進んでいます。画像処理では、犬と猫の区別も難しかった状態であったのに対し、深層学習を活用することで犬種の区別やピクセルレベルでの位置まで特定できるようになりました。言語処理では、機械翻訳が10年前と比べて劇的に改善されています。個々のタスクでは「この文の著者は否定的な見解を述べている」や「この単語は人名を表している」というようなことが機械的に判別できるようになっています。

自然言語*¹処理を支える技術としてBERT（Bidirectional Encoder Representations from Transformers）という

*1 自然言語：「日本語」、「英語」などの人間が日常的に用いている言語。

技術が大きなブレイクスルーを引き起こし、注目を浴びています。しかし、BERTをビジネス適用する際の課題として、金融や医療などの業界特有の専門用語や専門知識が多く含まれた文書に対して、期待する精度が実現できないことがあります。本稿ではそれを解決する技術である金融版BERTおよびドメイン特化BERT技術について紹介します。

自然言語処理技術

深層学習の技術は、分類や検出、数値予測、生成などの幅広いタスクで高い精度を実現し、一部のタスクでは人間を上回る精度を達成しています。2015年には、画像分類のベンチマークタスクで人間を上回る精度を達成して話題になりました。

自然言語処理の分野も発展してきており、従来のパターン認識や出現頻度をベースとした手法から、深層学習をベースとした手法へシフトしています。これにより以下のようなこ

とが機械的に実現できるようになっています。

- ・「この文の著者は否定的な見解を述べている」(ネガポジ判定)
- ・「文章を入力として、記載内容から潜在リスク等を数値化」(スコアリング)
- ・「文中から人名・地名のような特定の種類の単語を抜き出す」(固有表現抽出)
- ・「文章を読み込み、文章に対する質問に回答する」(質問応答)

自然言語処理の分野では、単語や文の単位で入力を処理することが一般的です。最近では、一般的な文章に対して単語や文を処理する汎用的なモデルを用意して、このモデルを各タスクに合わせてチューニングする方法がよく用いられています。この汎用モデルは「言語モデル」と呼ばれています。後述するBERTも言語モデルの1種です。

BERTとは

BERTはGoogleが開発した汎用自然言語処理モデルです。2018年に発表された際に、さまざまな自然言語処理のベンチマークタスクの従来記録を塗り替えたことで話題になりました。例えば、「Wikipediaから抜き出した140単語程度の文を読み内容に関する質問に答える」というようなタスクがベンチマークとして採用されており、人間より高い精度を実現しました。

BERTの強みはさまざまなドメインやタスクの課題を単一のモデルで解くことができる点です。BERT以前のタスク特化型モデルでは、解きたい課題に対して言語自体の特徴を

含めゼロから学習を始めるため、課題ごとに多数の教師*²データが必要でした。BERTは大規模な文章群による教師なし事前学習を行うことで、教師データを必要とせずに汎用的なモデルをつくり上げています。このように、大量の自然文をそのまま使うだけで汎用言語モデルを構築できる仕組みをつくり上げたことが、BERTの功績といえます。しかし、このような汎用事前学習モデルをつくることのできるのは、技術力や計算資源が豊富な一部の団体に限られているのが現状です。

そしてBERT利用時は事前学習済BERTモデルを少量の教師データでチューニングすることで、対象の課題に対して高精度を実現できるといわれています。例えば、「著者の見解を肯定と否定に分類するタスク」の場合、言語モデルの後段に小規模な重み付けモデルを追加し、肯定度合いと否定度合いをそれぞれ数字で出力するようにして、その大きさを比べて最終結果を出力する、といったチューニングを行うことが一般的です。

BERTの日本語化とNTT版BERT

Googleが発表したBERTは英語版でしたが、日本では京都大学や情報通信研究機構(NICT)などが日本語版の事前学習済モデルを公開しています。BERTの汎用事前学習モ

*2 教師(データ): 解きたいタスクに合わせて、データにAIモデルが解釈できるようなラベル付けを行うこと(またはラベル付けされたデータ)。例えば、ある商品のレビュー文を「好意的」・「非好意的」で分類することや、文章中に出てくる「人名」・「地名」部分に目印をつけることを行います。また、データに教師情報を付与することをアノテーションともいいます。

デル構築の肝は、事前学習で用いる文書群の質（多様性）と量をいかに担保するか、にあります。当初、日本語版の事前学習モデル構築では、一定の質と量が担保され、かつ入手が容易である日本語Wikipedia全文（約3GB）を用いる方法が主流でした。しかしこの方法では、Wikipediaで出現頻度が少ない文体（話し言葉など）に対して、性能が発揮しづらいという問題点も分かっています。

NTT研究所では、独自に収集した大規模文章群（約13GB）から日本語の事前学習モデルを構築しており、多くのタスクで公開されている事前学習済モデルより高い性能を発揮しています。後述するBERTも特に断りがない限り、NTT研究所のBERTを基にしています。

ドメイン特化のための追加学習

BERTやその日本語版は従来技術に比して高い性能を実現しています。例えば、金融分野では「FAQの回答自動引き当て」や「財務情報からのリスク抽出」、医療分野では「電子カルテの記載内容チェック」や「医薬品添付文書の情報活用」のようなユースケースでの活用が期待されています。しかし、前述の大規模な一般文章群で事前学習を行った汎用

モデルをチューニングするやり方では、実際のビジネス適用において期待するほどの精度が実現できないこともあり、課題となっています。

この傾向はビジネス課題の対象となるデータが特定のドメインに偏っている場合（ドメインデータ）で特によくみられます。例えば、「金融や医療などの専門語を多く含んだデータ」や「道路交通法や慣習などの特有の知識が必要な運転関連データ」などがドメインデータの例といえます。

ドメインデータごとに大規模文書群を用意することは現実的ではなく、特定のドメインタスクで汎用BERTより精度向上を図りたい場合、何らかの工夫をする必要があります。

最近の研究では、小～中規模の文章群を事前学習済BERTモデルに追加学習を行うことにより、ドメインに適応した事前学習モデルを構築する手法が提唱されています（表）。つまりタスクに特化した言語モデルをつくるということです。NTTデータが開発中である、金融版BERTやドメイン特化BERTでも同様の追加事前学習アプローチを採用しています。

表 データ規模の違い

※データ規模の考え方は、対象としている問題や文脈によってさまざまですが、本稿では以下に基づくものとします。

大規模	中規模	小規模
人手では全体の傾向をとらえることも難しい規模の文章群	人手では流し読みでも全件確認は難しい規模の文章群	人手で全件確認や教師データ付与が可能な規模
数GB以上	数MB～数百MB	数KB～数百KB

金融版BERTの仕組み

NTTデータではインターネット上から収集した金融関連文章を用いて追加事前学習を行い、金融ドメインに特化した事前学習済モデルである金融版BERTを構築しました。金融版BERTの検証として一種外務員資格試験⁽¹⁾の解答に取り組み、検証したモデルの中で唯一合格点相当のスコア（440点満点中308点）を実現しました。

外務員資格試験とは日本証券業協会が主催している試験で、証券取引・デリバティブ取引の勧誘を行う外務員が受験する試験です。その中でも一種試験は上位資格であり、2019

年に4633名の受験者が受験していて、合格率は67.6%です。試験の内容は、主に問題文の正誤を判定する○×問題と、正しい文を選ぶ5択の選択問題で構成されます。問題文中には金融商品の専門用語や法令に関する知識が登場し、一般的な知識のみでは正解が難しい問題も多くあります（図1）。

ここでは金融版BERTの仕組みについて説明します（図2）。

- ① 金融関連文書をインターネット上から収集（NTTデータが実施した金融分野へのAI適用案件において蓄積した知見を基に、効率良くBERTモデルの性能向上を行えるようなWebページを選択）

正解：×

金融版：協会員は、日本証券業協会の審査により「二級不都合行為者」とされた者については、その決定を受けた日から3年間はいかなる名称を用いているかを問わず採用してはならないこととされている。

NTT版：協会員は、日本証券業協会の審査により「二級不都合行為者」とされた者については、その決定を受けた日から3年間はいかなる名称を用いているかを問わず採用してはならないこととされている。

正解：×

金融版：日経225先物には、制限値幅は定められていない。

NTT版：日経225先物には、制限値幅は定められていない。

● モデルが着目している箇所
(濃いほど重要と判断)

赤字 金融版BERTのみが着目している箇所

図1 金融版BERTで正答できるようになった問題例

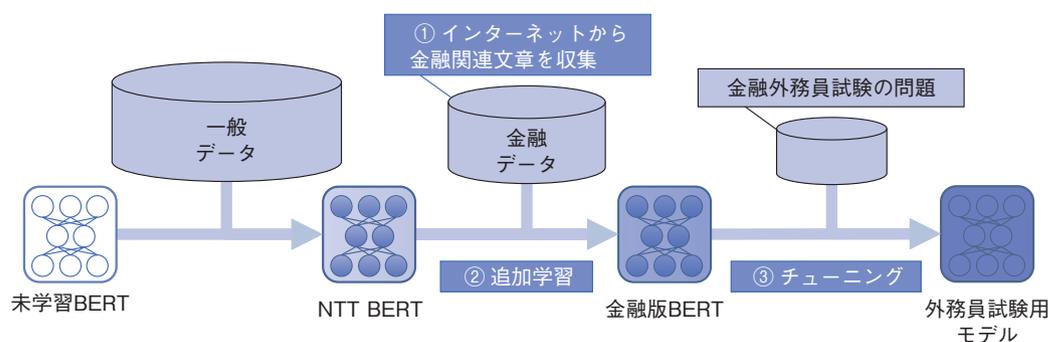


図2 金融版BERTの処理概要

② NTTが開発した日本語BERTを基に、上記の文章群を追加事前学習

③ ビジネス課題を反映したタスクデータを用いたチューニング

①～②について、NTTデータが事前学習済モデルを保有しているため、実際のPoC (Proof of Concept) やシステム開発への適用には、ビジネス課題に応じた教師付タスクデータの作成とそのデータに応じたチューニングのみが必要となります。

ドメイン特化BERTフレームワークの仕組み (開発中)

金融版BERTでは、汎用BERTモデルをドメイン特化させることで高精度を実現することができました。一方で、金融関連文書を収集するには有識者が対象とするWebページを選定してデータを収集していました。このため、モデル構築の際のコストが高く、また有識者の参画が必須である、という課題があります。これらの課題を解決するため、

NTTデータでは追加学習用のドメインデータ収集の自動化をめざしたドメイン特化BERTフレームワークを開発しています。

ここではドメイン特化BERTフレームワークの仕組みについて説明します (図3)。

- ① ビジネス課題を反映したタスクデータを準備 (この時点では教師なしでも良い)
- ② タスクデータに応じた追加事前学習用の文章をインターネット上から自動収集 (タスクデータ中から汎用BERTが苦手としている表現を抽出し、その情報からクエリを生成してインターネット検索を実施)
- ③ 収集したデータから追加事前学習で精度向上が期待できる文章をアルゴリズムで選別 (インターネットから収集した文章群から、タスク精度向上が期待できる文を抽出してドメインデータのデータセットを作成)
- ④ NTTが開発した日本語BERTに、上記の文章群を追加事前学習

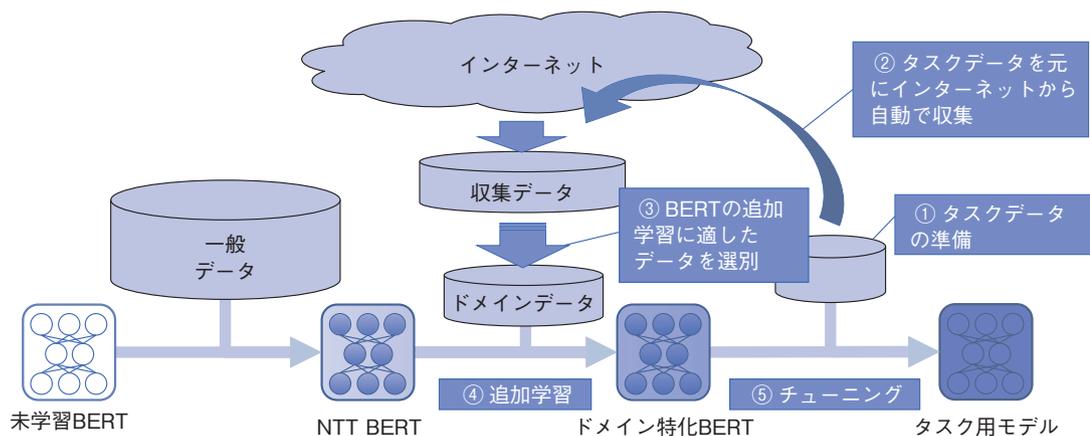


図3 ドメイン特化BERTの処理概要

⑤ タスクデータを用いたチューニング（この時点で教師データが必要）実施

実際のPoCやシステム開発への適用には、金融版BERTと同様に、ビジネス課題に応じた教師付タスクデータの作成とそのデータに応じたチューニングが必要となります。加えてタスクに合わせた追加事前学習を自動化された基盤上で行うことで、さらなる高精度をめざします。

ドメイン特化BERTフレームワークの強みは自動化されたデータ収集とデータ選別によりお客様のデータに合わせた最適モデル構築が行えることと、ドメイン特化BERTを手で構築する場合と比べてPoCや開発期間を短縮できることです。BERT以前の技術では、専門用語を多く含むドメインに特化したタスクを扱う際には、タスクごとに人手で辞書をつくるなどの個別対応が必要でした。BERTを用いることで辞書構築の代わりに大量の文書群を用いることで汎用的な言語モデルを構築し、それを活用することでさまざまなタスクに対する改善を実現しました。さらにドメイン特化BERTフレームワークを用いることで、特定のドメインタスクに対するさらなる精度向上を期待できます。

おわりに

本稿では、BERTおよびその日本語化、それを応用した金融版BERT・ドメイン特化BERTフレームワークについて紹介しました。現在開発中であるドメイン特化BERTについては、さらなる精度向上と効率化へ向

けて改良を重ねています。

2021年度以降、金融・医療・製造などのお客様に提供し、新規ビジネスの創出や既存ビジネスの効率化にお力添えさせていただきます。例えば、「FAQの回答自動引き当て」「電子カルテの記載内容チェック」「日報からのプロジェクトリスクチェック」等の活用ユースケースが例に挙げられます。

また、前述の業界・事例に限らず、BERTの先進的な技術をいち早くビジネス適用できるようお客様を支援していくとともに、ドメイン特化BERTフレームワークを活用したPoCパートナーを募集中です。

■参考文献

(1) <https://www.jsda.or.jp/gaimuin/shiken.html>



和知 徳磨

NTTデータでは、金融版BERT・ドメイン特化BERTをはじめとしたAI関連技術の開発を行い、ビジネスにおける効率化や新しい価値の提供を行っています。AIや言語処理に関する困りごとがありましたら、ご相談いただけると幸いです。

◆問い合わせ先

NTTデータ
技術革新統括本部 技術開発本部
TEL 050-5546-9741
FAX 03-3532-0488
E-mail ai-coe-jp@kits.nttdata.co.jp

特別連載

ムーンショット・エフェクト ——NTT 研究所の技術レガシー——

第7回 新しい発想の光ファイバ

ノンフィクション作家の野地秩嘉（のじつねよし）氏より「ムーンショット・エフェクト——NTT研究所の技術レガシー」と題するNTT研究所の技術をテーマとした原稿をいただきました。連載第7回目は「新しい発想の光ファイバ」です。本連載に掲載された記事は、中学生向けに新書として出版予定です（NTT技術ジャーナル事務局）。

■線路屋と光ファイバ

「線路屋」の中島和秀は茨城県の筑波にあるNTTアクセスサービスシステム研究所で光ファイバの研究をしている。線路屋と言っても鉄道の線路を研究しているわけではない。通信線もまた「線路」だ。NTTでは屋外の通信線にかかわる技術分野を「線路」と呼び、研究開発から設計、建設、保守まで線路に関係する仕事をする人を「線路屋」と呼んでいた。

中島は1994年の入社以来、光ファイバに関わってきた。上席特別研究員であり、世界初の「曲げフリー光ファイバ」を開発した権威である。しかし、中島はあくまで謙虚で、「私はただの線路屋です」としか言わない。

彼はトレードマークのサスペンダー姿で、私に光ファイバと光ネットワークについて講義をしてくれた。彼がサスペンダーを愛用しているのは実験中にシャツが裾からはみ出して、機器に触れるのを防ぐためだという。

そこまで細部に心配りをしながら日々、研究しているのであり、おしゃれのためのサスペンダーではない。

彼は言った。

「光ファイバは物理基盤であり、社会インフラを発展させる可能性を持った基盤でもあります」。

さて、中島が光ファイバでやった業績は多々あるのだが、私たち素人が瞬時に、「なるほど」と理解できるのは、おそらく、そのうちのふたつだろう。

ひとつは新しい種類の光ファイバを研究開発していること。

もうひとつは曲げたり、折ったり、結んだりできる「曲げフリー光ファイバ」を開発し、特許を持っているこ

とだ。

■光ファイバ、その歴史

中島は自らのふたつの業績を説明する前に、光ファイバについて簡単に歴史を教えてくれた。

「光ファイバについて、最初に理論を発表したのはノーベル物理学賞を受賞された香港人のカオさん（チャールズ・クエン・カオ）です。1965年、カオさんは石英ガラスの中の不純物をとりのぞけば非常にエネルギーロスが少なく、遠くまで高速に光を伝達できるという理論を発表しました。

その後、アメリカのガラスメーカー、コーニング社が測定できるレベルの範囲内で低損失な光ファイバの実現性を初めて実証したのです（1970年）。そこからは米国の通信会社AT&T（当時）、当時の電電公社（現NTT）、日本のメーカー各社を交えたグローバルな研究開発競争が始まったのです」。

NTTは競争のなかの先頭集団にいた。民営化した1985年には北海道の旭川と鹿児島間をつなぐ日本を縦貫する光ファイバケーブル網を完成させている。国内の主要な幹線を完成させたうえで、光ファイバについてシステム、構造、材質の3つの要素を同時に進化させていった。

中島は研究の進み方について語る。

「80年代から90年代の間は、いかに通信の速度を速くするかが研究者たちの課題でした。1秒間に何ビットの情報を送れるかをどんどん上げていく研究だったんですね。

そして、私がNTTに入社した1994年からは、その次のフェーズです。それまでひとつの波長の光でしか通信

していなかったのですが光ファイバ1本のなかで10個の波長の光を使って、10倍送るといって研究を始めました。

光ファイバで送る情報量を増やすとは光を明るくするのではなく、点滅を速くすることです。1秒間に10回パチパチするのを100回パチパチするようにしたら10倍のデータが送れる。今の光通信は基本的にデジタル通信ですから、光のオン、オフを1か0に対応させることで信号を送ります」。

この時、使っていたのが従来型の光ファイバである。その断面構造を見ると、2つの層になっている。

コアと呼ばれる中心層。そして、その周りがあるのがクラッドと呼ばれる外側部分だ。クラッドは光に対して透過率が高い石英ガラスでできており、コアは石英ガラスにゲルマニウムという物質を混ぜてある。

光には屈折率の異なる物質の境界で屈折して透過したり、条件によっては反射する性質がある。光ファイバはコアとクラッドという2種類の異なるガラス部材でできていて、コアの屈折率はクラッドのそれよりも高い（大きい）。そのため、全反射（コアとクラッドの境界においてすべての光が反射される）や屈折作用により光は中心部のコアに閉じ込められる。

■次世代型への取り組み

中島は入社後、光ファイバの研究を始めたのだが、「（敷設が進んでいた）従来型を改良しろ」と指示されたわけではなかった。送る波長の数を10倍にするには次世代型のそれを開発してみろと示唆されたのである。

いわば、携帯電話（ガラケー）がやっと普及し始めた時代に、5Gスマホの研究をしると命令されたようなもので、当時の中島にとってみれば「途方もない」テーマだった。

中島がやってきた研究開発の目的は光ファイバの低損失化と大容量化である。

光が遠くまで進む際、距離が遠くなればなるほど減衰してしまう（光が弱くなる）。それをいかに抑えるかが低損失化であり、少しでも多くの信号を送ることが大容量化だ。そのために次世代型の光ファイバを模索する。

日々、研究に時間を費やしていた中島はひとつの論文を見つけた。

研究とは天啓がひらめくのをじっと待つことではな

い。そういうこともあるだろうが、ほとんどは世界や国内で発表された研究論文を読んだり、また、その内容が正しいかどうかを実験してみるのだ。

彼が目にしたのは新しい構造に関する論文だった。1997年、『Optics Letters』という学術誌に掲載されたもので、イギリスのバース大学で研究しているT. A. Birks, J. C. Knight, St. J. Russellの3人の名前が記してあった。

内容は次のようなものである。

「純石英ガラス（混ざりものがないガラス）の断面内に、多数の空孔を六方最密構造状（ハチの巣状）に配列し、空孔で囲まれた中心に光を伝搬させる光ファイバを作製した。本光ファイバは任意の波長で単一モード（高速）光通信が実現できることを確認した」

素人には「ガラス棒に小さな孔をいくつも空けると高速の光通信ができるはず」としか読めない。

中島は「まあ、それはそうなんですけれど、こういうことですよ」と私にわかるように内容を翻訳してくれた。

「それが空孔構造光ファイバと言われるものです。

前述しましたが、従来型の光ファイバはコアとクラッドという2つの層からなるものでした。ところが、空孔構造光ファイバはコアもクラッドもない1本のガラスの棒です。そして断面を見ると、光ファイバの中心を取り巻くように微細な空孔（空気を通す孔）が空いていて、その中心部分に孔は空いていません。

バース大学の3人がそうした構造の光ファイバを作ってみたところ、光をちょうど孔のない中心部分にうまく閉じ込めることができたということです。

学会発表を知り、では、我々も新しいタイプの光ファイバにチャレンジしようとなりました」。

つまり、2つの層に分けなくとも、ガラス棒に小さな孔を多数、空けることができれば同じかそれ以上の能力を持つ光ファイバができるということだった。

■新構造

論文に出ていた空孔構造光ファイバにはそれまでのものとは違う働きが3つあった。

ひとつは屈折率の変化をつけられること。従来型の光ファイバの場合はコアもクラッドも基本的には同じガラ

素材だから、屈折率を変化させようと思ってもしせいぜい1%くらいだった。

ところが、ガラスと空気の屈折率はかなり異なる。ガラスは1.5だが、空気は1だ。ガラスと空気の屈折率の違いは大きいので、空孔構造光ファイバはその違いを利用したのである。

屈折率を大きく変化させることができると、何がいいかと言えば、設計できる自由度が広がることにつながる。それがメリットだ。

ふたつめはガラスという単一の材料と空気の孔だけのシンプルな構造なので、ゲルマニウムなどの混ぜものをしてコアを形づくる必要はない。不純物がないので従来型を上回る低損失性が期待できる。

3つめは従来型よりもまっすぐ進む光を数多く使えること。

空孔構造光ファイバは、空気孔の直径と孔の間隔の設定を変えることで、従来、もっとも効率の良い特定の波長の光（特定の色の光）だけで行った信号伝送を数多くの波長帯域を使って伝送できるようにした。つまり光の通り道が増えたのである。

「どんな色（どんな波長）の光も送ることができることにつながるのです。太陽光はあらゆる波長の光が混ざって白色光となっている。空孔構造光ファイバは、従来型の光ファイバに比べて10倍以上も広い範囲の波長の光を伝送できるポテンシャルを持っています」（中島）。

中島たちは石英ガラスと空孔だけの光ファイバの研究を始めた。だが、それと並行して、空孔は使うけれど、従来型のコア部分を残した「空孔アシスト型光ファイバ」も開発している。

これはコアとクラッドの構造はそのままにして、クラッドに空孔を開けた光ファイバだ（図1）。つまり、従来型と空孔構造光ファイバを足して2で割った中間型であり、従来型の足りない部分を空孔がアシストして、能力を引き上げたものと言える。

中島は「はい、その通りです」とうなずいた。

「空孔構造光ファイバは1997年の論文の段階では光が1キロ行ったら100分の1に減衰してしまうというもので、とても使い物になりませんでした。しかし、我々が開発した空孔アシスト型にしたら、従来の光ファイバと

同じぐらいの損失（減衰）で済むようになったのです。

みなさんのためにわかりやすく整理しますね。

空孔アシスト型光ファイバは従来の光ファイバと同じだけれど、クラッドに空孔が空いている。

一方、空孔構造光ファイバはガラスと空気の孔だけ。ただし、空孔の直径はアシスト型よりもうんと小さく、しかも無数に空いていなくてはなりません」。

ガラスに孔を開けるだけならば空孔構造光ファイバの方が製造は簡単だろうし、安価になるのではないかな。

そう私は思った。

しかし、それはまったく間違っていた。

中島はさらにわかりやすく丁寧に教えてくれた。

「空孔構造光ファイバは製造が非常に難しいのです。ガラスに微細な空気の孔をたくさん空ける作業はひどく困難なのです。

超音波ドリルで孔を開けていく手法なのですが、ガラスにまっすぐに孔を通すことが難しい。ほんのちょっとの狂いが生じてもいけないし、微細な孔同士がくっついていけない。

製造方法ですが、まず母材（光ファイバへの加工前の材料）のガラス棒を用意します。直径10センチメートル、長さ2メートル程度としておきましょう。その大きさの母材を髪の毛よりも細い太さまで溶かして引き伸ばすことで、光ファイバができるのです。

おわかりになると思いますが、直径が太い母材に多くの空孔を開けることはできますね。ただ、長さを稼ぐのは簡単ではない。途中で曲がってしまう。曲がると、ガ

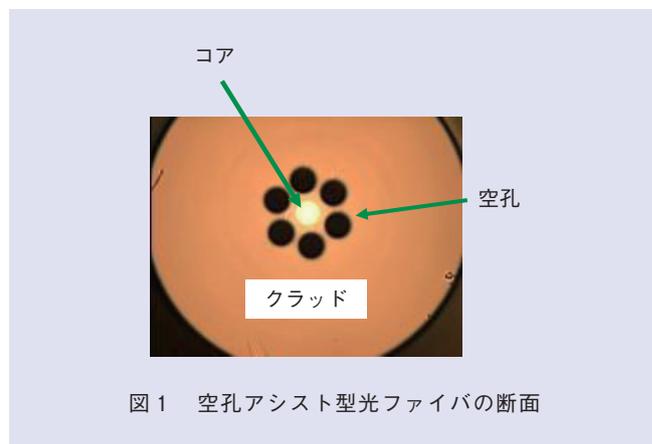


図1 空孔アシスト型光ファイバの断面

ラス内の無数の孔がくっついてしまうかもしれない。製造技術の難度が高いから工作料が高くなる。

単純な工作ですけれど、しかし、まだ製造技術が追いついていないのです。ですから、ある程度以上の長さのケーブルを作る技術はまだ確立していません。仮に、できたとしても大変なコストがかかるでしょう」。

空孔アシスト型光ファイバならば孔の直径はやや大きくてもいいので、こちらは実用化されている。中島たちが開発し、特許も持っている。すでに量産もされて、市販されている。

■曲げフリー光ファイバ

そして、空孔アシスト型光ファイバを開発している際、生まれたのが「曲げフリー光ファイバ」だ。

中島は言う。

「2000年頃から、いかに家庭まで光を届けるかという、いわゆるFTTH（ファイバー・トゥ・ザ・ホーム）が課題になってきました。そして、家庭にも光ファイバを引くことが増えていったのですが、その際、現場から取り扱いが悪いとクレームが入ってきたのです。従来型光ファイバは曲げの直径が60ミリ以上は必要でした。それよりも、小さく曲げようとすると、光がコアの外に漏れて減衰していったのです。

その頃の光ファイバは扱い方を知っている人でないと曲げることのできないものでした」。

家庭で使っている銅線のコードは床を這わせたり、直角に曲げたり、あるいは束ねたりすることができる。

しかし、従来型の光ファイバは直径6センチの円を作るのが限界だった。それよりも小さな円を作ろうとすると、たちまち信号が通わなくなった。

そこで、中島たちは設計の自由度がある空孔アシスト型光ファイバを改良して、どこまで曲げられるかを試してみた。改良した空孔アシスト型で実験を繰り返しているうちに、60ミリ直径だった曲げる限度を30ミリ、15ミリ、10ミリと小さくしていくことに成功したのである。空孔の大きさ、数、位置などを少しずつ変えていって、地道な努力で曲げる半径を小さくしていくことができた。

こうして、2005年には実用化され、今では直角、折り返し、結び、束ねもできる光ファイバになっている

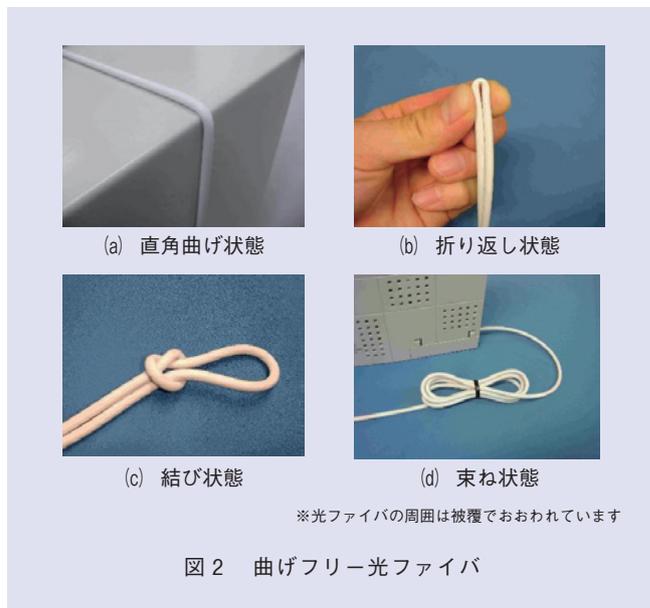


図2 曲げフリー光ファイバ

(図2)。

曲げフリー光ファイバの本格的な導入が始まったのが2007年。その後、FTTHの契約は増えた。それはそうだろう、曲げられる光ファイバがあれば家庭内の通信機器に使うことができるのだから。曲げフリー光ファイバは光ネットワークの一部となったのである。

野地秩嘉 (のじつねよし)

1957年東京都生まれ。早稲田大学商学部卒業後、出版社勤務を経てノンフィクション作家に。日本文藝家協会会員、人物ルポルタージュをはじめ、食や美術、海外文化などの分野で活躍中。著書は



『高倉健インタビューズ』『キャンティ物語』『サービスの達人たち』『ニューヨーク美術案内』など多数。『トヨタ物語』『トヨタに学ぶカイゼンのヒント』がベストセラーに。『TOKYOオリンピック物語』でミズノスポーツライター賞優秀賞受賞。近著は『日本人とインド人』(翻訳 プレジデント社)。

挑戦する 研究者たち CHALLENGERS



西田真也

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
上席特別研究員

同調圧力に鈍感であれ。 自由な時間は成功 要因の1つである

実世界の多様な質感を人間の脳が認識するメカニズムの多くは謎として残されています。そのメカニズムの解明は、人間の感覚情報処理の科学的理解だけでなく、情報工学技術の発展にとっても不可欠な課題です。NTTコミュニケーション科学基礎研究所は所内外の研究者とともに情報科学、神経科学、心理物理学等の学際的な観点から「質感」の研究を牽引しています。「質感学」という新分野は、国内外から注目を集めており、その研究成果と研究者としての姿勢について西田真也NTTコミュニケーション科学基礎研究所 上席特別研究員に伺いました。



世界を牽引する質感知覚研究

現在、手掛けている研究について教えてください。

私は「質感認識」を研究しています。人間は視覚をはじめ五感を通じてさまざまな質感を認識し、物性や材質、状態、感性的な価値まで瞬時に判断します。こうした質感を認識する能力は人間の活動において重要な役割を果たしています。なぜなら人間は対象を認識し、評価して行動を選択して、身体活動を通じて環境世界とかがわっており、そのすべてのフェーズに質感認識が深く関係しているからです（図1）。

私が研究対象としている質感は、ものの物性（光沢感・

透明感など）、材質（陶器・金属など）、状態（乾燥・凍結など）といった「物理的質感」、そして美醜や好悪などの「感性的質感」の2つに大別できます。

質感認識とは人間が質感を認知する能力、脳による物体の本性の解読のことだと私は考えています。実世界の多様な質感を人間の脳が認識しているメカニズムの多くは謎として残されています。そのメカニズムの解明は、人間の感覚情報処理の科学的理解だけでなく、実物体の質感認識や質感生成等の分野を通して、情報工学技術の発展にとっても不可欠な課題です。

私は、いろいろな仲間とともに、世界に先駆け1990年代の半ばから質感知覚研究を開始して、2010年までの間に、



図1 表面を濡れているように見せる画像質感変換⁽³⁾

光沢質感の画像特徴を発見するなどしました。そして、文部科学省の「新学術領域研究」という共同研究グラントを利用して、世界に先駆けた学際的な質感研究を進めてきました。まず、2010～2014年度新学術領域「質感脳情報学（質感認知の脳神経メカニズムと高度質感情報処理技術の融合研究）」⁽¹⁾において、「質感認知にかかわる視聴触覚情報の心理物理的分析」という1つの研究チーム（計画班）を率いました。そこでは、光沢感の認識メカニズムと光沢に関する色・輝度相互作用の仮説の提案、動きの情報に基づいて液体の質感を認識するメカニズムの解明を行いました。さらにこのような人間の特性を利用して、静止画が動いているように見える光投影技術「変幻灯」の開発等を行いました。

それに引き続き2015～2019年度新学術領域「多元質感知（多様な質感認識の科学的解明と革新的質感技術の創出）」⁽²⁾においては、領域代表として情報科学、神経科学、心理物理学の観点から追究を進め、視覚、触覚、聴覚、言語分野において基礎研究から応用研究までをカバーする「質感学」を確立しました。また、「信号変調に基づく視聴触覚の質感認識機構」という計画班の代表として、輝度や色の統計量に基づく物体表面の濡れの知覚⁽³⁾（図1）や画像コントラスト低下に基づく極細構造の知覚を解明すると

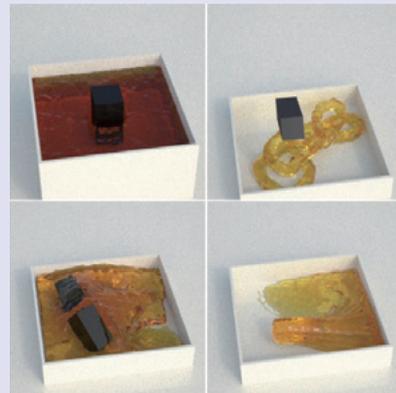


図2 液体質感（粘性）の認識を分析するために用いた刺激⁽⁴⁾

もに、人工神経回路による液体質感知覚メカニズムの分析を行いました⁽⁴⁾（図2）。さらに、変幻灯の原理を発展させ、ステレオ眼鏡なしで見たときに画像ボケを生じない新しい両眼立体視法「Hidden Stereo」を開発しました。

これら2つの新学術領域研究で発展させてきた「質感学」は学際性と視野の広さにおいて国際的にも傑出していると高く評価されました。

新学術領域を確立されたのですね。これまで謎とされていた部分の解明に期待が高まりますね。

私は、自分の「見えている」という状況、人間の情報処理に関することに非常に興味があります。政治や社会においても人間が行動する理由に大に関心を持っています。心理学等の既存の学問だけではなく、自分が納得できる方法で人間を理解することはできないかと常にアプローチを模索しています。

新学術領域の研究活動は新たなフェーズに突入し、2020年、学術変革領域研究（A）「深奥質感（実世界の奥深い質感情報の分析と生成）」⁽⁵⁾において領域代表として研究をスタートさせました。質感の本質的理解には、感覚器がとらえた入力情報を質感属性変数や質感カテゴリーの言語ラベルに結びつけるような表層的な質感情報処理だけでなく、

その背景にある深奥質感と呼ぶべき処理階層を理解する必要があります。

私たちが想定する深奥質感処理は次の4つです。1番目は、質感情報から事物の多面的な生態学的意味や価値を計算する過程です。身体内部に情動的な反応を誘発する過程も含まれます。2番目は質感と他の感覚属性の統合により外界モデルを脳内に構築することによって、行動の結果を事前に予測し、適切な行動選択をするような過程です。3番目は質感情報処理が、処理の主体である人間の個性（例えば年齢、脳機能障害、文化背景、経験）によって影響される過程。最後に、実際の事物を出発点として、五感でとられた感覚情報の処理を介してリアルとフェイクを見極める過程です。

この研究では、人間の深奥質感処理を脳認知科学的に解明し、革新的な質感技術を開発することをめざしています。人間にリアルな深奥質感を体験させる感覚情報の本質を理解し、深奥質感を認識する機械認識技術や深奥質感を思いのままに制御するメディア技術を開発し、質感科学をアートに接続します。図3のような研究体制で、計画研究は3つの研究項目、10のチームで深奥質感の謎に迫る予定で、私はそのうち心理物理・感覚工学分野を担当し、視覚・聴覚・触覚・言語情報からの深奥質感認識の統合的理解について多角的に検討します。

機械が人間に追いついた結果生まれたパラダイムシフト

以前にこのコーナーでお話を伺ったのは2012年でしたが、この間に研究環境はどのように変化しましたか。

以前にお話した2012年は、さまざまな知能において、まだ人間の能力が機械に勝っていました。ところが、約8年の歳月を経て、AI（人工知能）、機械学習の発展などにより、限定的ではありますが機械が人間を凌駕する知的能力も現れています。このパラダイムシフトは人間をテーマとした研究者である私にとって相当のインパクトがあります。今

までは人間の複雑な認知・行動等のメカニズムを理解することによって、人間に匹敵する能力を持つ機械を開発するヒントを得ようとしていました。しかし、現在は全く逆のアプローチが一般的になりつつあります。つまり、人間の能力を持つ機械の中身を分析して、人間の情報処理を理解しようという試みです。ニューロサイエンス分野をはじめとするいくつかの分野において、既存のアプローチや発想の転換が進んでいます。深奥質感の研究もその流れの中にあります。質感という重要なテーマに対して、今までとは違う方向で研究を進めていきたいと思っています。

こうした技術や研究が目覚ましく発展したこともあり、若い人と一緒になって新しいことを日々勉強しています。インターネットで論文が発表され、その数は想像を超えるほどのものとなり、取捨選択も大変です。現在は、立場上研究以外の仕事も多いので、これらをキャッチアップする時間を設けるのも一苦労です。次々に押し寄せてくる新しい波に心躍らせながら、常に自分が最先端にいることは困難であると感じています。そういう中で、新しく得た知識とこれまで培った経験や知見を融合するところにオリジナリティを出せないかと考えて、研究を進めています。人間



図3 学術変革領域（A）「深奥質感」の研究体制



の感覚に関する研究の基軸が、心理学だったところから、機能的MRIなどを使った脳の機能の可視化へと移り、さらに現在はAI研究との融合へと時代は流れています。こうした変遷を、身をもって体験し、理解していることは、最新の状態しか知らない研究者と比べて強みになると期待しています。

このような速さで時代が移り変わるのには自分にとって初めてのことでないでしょうか。聞いた話ですが、機械学習、AI系を研究テーマとしている博士課程後期の学生にとって、初年度に手掛けていた研究は3年次には古くなっていて発表価値がなくなっているのだそうです。現代は世界中にライバルがいて、自分が研究成果を発表したら、1年もたたないうちに別の研究者がその先の成果を発表してしまう時代です。このスピード感に心が休まらないと聞きます。AI分野の研究者は、エキサイティングだけれど、熾烈な戦いを強いられ、精神的にも厳しい時代を生きているといえるでしょう。

さまざまな展開を見せる研究領域において、一貫して研究活動を続けてこられた原動力は何でしょうか。

難しい質問ですね。私はどちらかというと新しいものに飛びつく傾向にあります。1つのことを貫いているように見えたとしても、自分自身の中で興味の対象は常に変化し、進化しています。私にとってはそれが重要です。研究者について1つのテーマを貫いているストーリーを描きがちですが、私は少し違って「面白いことをしたい」という意識を貫いているのだと思います。

研究対象の「質感」はとても難しい問題でもあるので、自らを律する意味も含めてプロジェクトを立ち上げていますから、1つのテーマを貫いているようにも見えてでしょう。しかし、プロジェクトに参画している多くの研究者から新しい話を聞くことができ、それがとても刺激的で面白いと思っている自分がいます。

一方で、「正しい」と自分が思うことに関しては頑固ではあります。たとえ興味の対象であっても何にでも迎合す

るわけではなく、逆に自分自身がこれとは思ったら、よく知らない新しいものであっても、取り入れていきたいと考えています。興味の対象はさまざまに変化しますが、研究者としての歩みを貫いているのにはいくつか理由があります。1つは人に命令されないからです。私は若いころからあまり人の指示に従うことはしませんでした。それを許容していただいた上司には感謝しています。NTT基礎研究所は、研究者を尊重し、やりたいことをやらせてくれます。こうした環境がなくなると研究者から見た魅力が減っていくのだと思います。



若い研究者の皆さん、あなた方の時代が到来したのです

研究者はその自由を獲得するために、研究環境を選ぶことも必要なのですね。

研究の成功は「偶然の連続」であるとも思います。その偶然を最大限得るためにも、自然な展開の中で自由に動くことが大切です。研究費をいただいている以上、企画や計画を立てて研究を進めていくことは大切ですが、多くのノーベル賞受賞者も話しているとおり、ある程度研究者に任せて采配の自由度を高め、99%が失敗しても1%成功することを奨励していくことが重要ではないかと考えます。そうしないと未来は拓けないし、未来を拓くためにも無駄が必要なのです。良い成果を求めるために、この無駄を許容できるかどうかが大切ですね。

NTTにはその自由を担保する体力があります。私は大学の教員でもあります。大学教員は研究費の獲得に非常に苦労していますが、NTTの研究者はそこまでの苦労はありません。また、研究者は変人で、変わった存在かもしれません。だからこそ、変わった何かを生み出すことができると考えれば、自由に追究できるように環境を整えることで未来は拓けるようにも思います。

一般的には、こうした自由な研究環境が日本には少なくなってきており、研究者のなり手も減ってきています。若

い研究者は数少ない研究ポストを獲得しようと非常に苦労しています。日本における研究活動の歴史において、企業の研究所は応用研究ばかりではなく、基礎研究も支えてきました。中でもNTTはかつて公社であったころの使命・文化もあって、じっくりと基礎研究に向き合える環境が残っていると思います。日本の研究にとってNTT研究所の果たす役割はまだまだ大きいと思います。

私は日本学術会議第一部（人文・社会科学）の会員でもあります。その立場からこうした現状をかんがみて、日本はこれから価値を生み出す若い世代の育成についてかなり戦略的に挑まなければならないのではないかと思います。その点において、多くの優秀な若手研究者を採用し、研究モチベーションを維持できるような自由な裁量を与えて育成していく力がNTTにはあります。NTTには今後もその力を発揮して、日本の未来に貢献してもらいたいと思います。

後進の研究者、そして、研究者の卵たちへ一言お願いいたします。

私は、文系出身で半分理系に足を突っ込み、企業の研究者で大学教員でもあるという背景がありますから、複眼的に物事を見つめ、考える経験を積んできました。この利点を活かして若手研究者の育成にあたりたいと考え、さまざまな機会に人材育成についても積極的に発言していきたいと思っています。

また、若手の研究者をみたときに、NTT研究所の後進研究者と学生とは立ち位置が異なることから、指導も違うと考えています。NTTの研究者は博士号を取得している人も多く、すでに研究者としての能力も覚悟も備わっていますから、研究を通じた切磋琢磨を促します。一方で、学生は将来研究者として歩むかどうか定まっていないので、研究者としての道を強く奨めることはせず、どこかで何かの役に立ったらいいなと思いながら研究指導を行います。

こうした思いの中で、若い研究者へのメッセージとして、同調圧力に鈍感になってください。米国のように研究者が

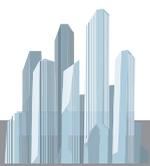
起業するような風潮を同調圧力の1つととらえれば、同調圧力がうまく機能することで底上げにもつながるのかもしれない。しかし、日本では、大学まではいわゆる「いい子でいる」「皆と同じようにふるまう」ように育てられてきたところもあり、自己規制が強いのではないのでしょうか。自己規制を取り払い、同調圧力に鈍感になって研究活動に臨んでほしいと思います。1人の研究者として、あえて出る杭になってみるのも良いかもしれません。

最先端の研究に関して、国際学会における論文発表がインターネット上にすぐに公開され、新しいことが次々と出てくるエキサイティングな時代です。このような時代においては、とくに情報系の研究者は大きな研究所に所属しているメリットを感じにくくなっているかもしれません。他の分野のように自分の研究に必要な大型の実験装置や技術が研究所にしかないというアドバンテージがあるわけではなく、アイデアとそれなりの計算機環境があれば在野の研究者も勝負のリングに上がることができる状況になってきています。つまり、アイデア勝負の熾烈な戦いを日夜繰り広げなければならない時代に皆さんは生きているのです。新しいアイデアや方向性は最先端の研究に常に触れている研究現場からしか生まれてきません。共通業務に忙しい皆さんの上司が指導してくれることは期待できません。とすれば、若い研究者の皆さん、まさにあなた方の時代が到来しているのです。

■参考文献

- (1) <http://shitsukan.jp/BISS/>
- (2) <http://shitsukan.jp/ISST/>
- (3) M. Sawayama, E. H. Adelson, and S. Nishida: "Visual wetness perception based on image color statistics," *Journal of Vision*, Vol. 17, No. 5, pp. 7-24, 2017.
- (4) J. J. R. van Assen, S. Nishida, and R. W. Fleming: "Visual perception of liquids: Insights from deep neural networks," *PLoS Computational Biology*, Vol. 16, No. 8, e1008018-29, 2020.
- (5) <http://shitsukan.jp/deep/>

明日のトッパー



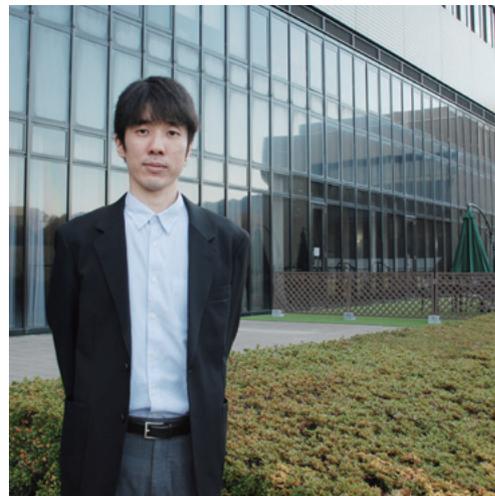
NTT物性科学基礎研究所

山端元音 特別研究員

電子をひとつずつ正確に捕獲し、高速で転送。 超高精度な電流標準への道をひらく「単電子転送技術」

電子を正確に制御し、ひとつずつ正確に運ぶ単電子転送技術。将来的には電気標準分野や計測産業分野への貢献が期待されています。ここでは、シリコン単電子素子の研究に取り組む山端元音特別研究員にお話を伺いました。

◆PROFILE：東京工業大学電子物理工学専攻 研究員（PD）（2009年10月～2010年3月、うち2009年11月～2010年1月はハーバード大学 客員研究員）、NTT物性科学基礎研究所（2010年4月～2020年9月、うち2015年5月～2015年7月はNational Physical Laboratory, UK 客員研究員）、NTT物性科学基礎研究所 特別研究員（2020年10月～）。



NTTの基礎研究—単電子転送技術とは

◆研究されている内容を教えてください。

電子を正確に制御し、ひとつずつ正確に運ぶ「単電子転送技術」の研究をしています。

研究にはシリコン単電子素子を使用します。単電子転送に使用するシリコン単電子素子は、2つの微細ゲート電極をシリコン細線上に並べ、その上部を上層ゲート電極で覆うという2層構造になっていますが、シリコン細線は約10ナノメートルと非常に小さいサイズになっています。

ゲート電極に負の電圧をかけることで、シリコン細線中に電子に対する障壁を形成することができます。そこで高い周波数を持った入力信号を使い、障壁を上げ下げすることで電子の流れを高速でオン/オフし、電子をひとつずつ捕獲し、転送します。

この素子の中で少数の電子がどのようにふるまうか、またそれをどのように正確に制御するかを探求しています（図）。

◆現在はどこまで研究が進んでいるのでしょうか。

単電子転送により正確で高精度な電流源を得ることができれば、将来的に電流の単位であるアンペアを最も直接的に定義する高精度な「電流標準」への応用につながります。

2014年には最高動作周波数3.5 GHzの高速単電子転送に世界で初めて成功しました。単位時間当たりの転送電子数が増えれば観測される電流値も大きくなるため、動作周波数は電流標準への応用に向けた重要な指標です。

そしてもうひとつの重要な指標がエラー率です。2014年の時

点で転送エラー率はかなり低いものと予想されていましたが、実証はされていませんでした。そこで高精度電流測定系を持つ英国国立物理学研究所（National Physical Laboratory, NPL）と共同研究を行い、実際に1 GHzでの転送において 9.2×10^{-7} 以下という世界最高精度であることを実証し、2016年に発表しました。

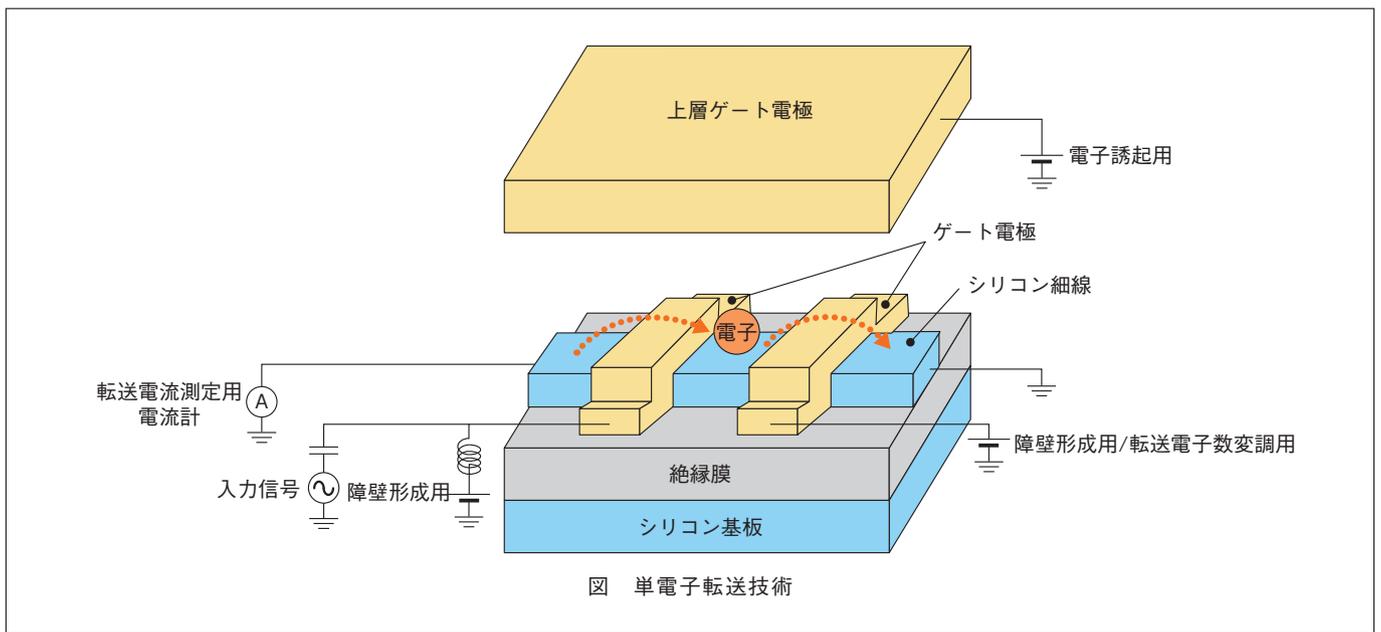
◆さらなる高速化、低エラー率に向けた今後の課題は何でしょうか。

以前より電流標準の目標値として「エラー率 10^{-8} 以下」が知られています。近年、ようやく 10^{-7} 程度までたどり着きましたが、そこからさらに1桁下げるとは非常に難しいと感じています。実際に 10^{-8} のオーダーで計測を行うには、それを測定する側にさらに高い精度が要求されます。デバイスによっては既に 10^{-9} 、 10^{-10} まで行けそうだが、という手ごたえはありますが、現状の測定系ではそれを実証できません。

電子の動きを計測するには、まったく違う手法を用いるなど、なんらかのブレイクスルーが必要です。現在は産業技術総合研究所などとも共同研究を行い、まずは7乗のオーダーを切り、8乗のオーダーに入るようなものがないかとさまざまな取り組みをしています。私はどちらかというと(1)電流値を上げるため素子を並列に並べる、(2)安定的に高精度なシリコン単電子素子を製作できる手法を確立する、など、複数の項目に渡る検討を通じ、主に素子側の工夫に取り組んでいます。

◆シリコン単電子素子を活用して、他にも研究を進めていましたか。

電流標準への応用に向けた研究と並行して、単電子の量子コヒーレント振動に関する研究を行っています。単電子転送は主に



電子の粒子性を扱うものですが、電子は量子力学的な波動性もまた備えています。

そこで新たな測定手法を用い、実際に単電子を転送している、測定している時に、内部でどのような量子的振動が発生しているかを検出しました。具体的には「共鳴準位」というものを使い、電子の高速振動のある一瞬をストロボ撮影のように捉えることに成功し、2019年に論文として発表しました。これまで誰も見る

ことができなかったサブテラヘルツという高周波数の振動を観測できたことで、今後、超高速量子ビットなどに応用されればうれしいな、と思っています。

また、初期状態での電子の位置を固定する、素子内で1回だけ振動させる、など電子の高精度操作にも取り組み



たいと思っています。



将来的には電気標準分野や計測産業分野への貢献へ

◆将来どのような分野での応用が期待されているのでしょうか。

まずは先ほども申し上げた電流標準への応用です。単電子転送による高精度な電流に基づき、アンペアを正確に実現することが可能となります。実は抵抗の標準、電圧の標準は既に実用化されており、関連の研究はそれぞれノーベル賞を受賞しています。超高精度な電流標準が実現すれば、それらに匹敵するインパクトがあると思います。

また、それにより高精度かつ小型な「ポータブル標準素子」が実現すれば、測定機器の校正にかかるコストも削減可能です。

そして将来的にはIOWNの3要素のうち、オールフォトニクス・ネットワークの実現に必要なとされる「超低消費電力」という側面でも貢献があると嬉しいな、と思っています。

◆NTTの強みはどのような点にあるとお考えでしょうか。

基礎研究では論文化が重要ですが、そこにたどり着くまでの



試行錯誤は非常に大変です。まず自然界で起きている現象はいったい何なのかを考え、アイデアを出し、素子の作製・測定を行います。さらに、第三者にも理解してもらえるようにデータの解析を行い、第三者にも理解してもらえるよう論文を書く。それぞれのプロ

セスには長い時間がかかり、大きな成果を出すにはじっくりと腰を据えて取り組む必要があります。NTT物性科学基礎研究所にはそうした環境が整っています。

例えば先ほどの量子コヒーレント振動検出では、データ自体は2015年には揃っていて、アイデアもありました。ただ、まったく新しい発想であったため、外部の理論家との議論を1年以上かけて行うなど「第三者にも理解してもらえるように解析を行う」というところで非常に時間がかかりました。しかし、その段階でじっくりと考えたことによりインパクトの高い論文に仕上がったと思います。

また、NTTの強みとして、人材、ノウハウ、研究費のすべてが揃っていることがあげられます。例えばシリコン単電子素子の作製には、旧LSI研究所時代のノウハウが多く活用されています。また、大きなクリーンルームもあり、優秀な人材も揃っています。これだけの環境を新規に立ち上げるのは難しいのではないのでしょうか。

◆これから単電子転送技術の研究に取り組みたいと思っている方へメッセージがあればお願いします。

私は、まだ世界では誰も見たことがなかった高精度な単電子転送を世界で初めて目にし、非常に興奮しました。自然界で現れる物理現象は複雑で、基本的に自分の思った通りにはいきません。その中からいかに意味のある有用な成果を抽出するか、ということには日々苦労しますが、「実際に起こっていること」を理解できたときには本当に面白いな、と感じます。じっくり腰を据えてひとつのことに取り組むことで、大きな成果が出る。これが基礎研究の醍醐味ではないのでしょうか。

シリコンデバイスの研究に取り組んでいる10名程度のグループで、私はシリコンデバイスの作製、測定、理論構築、解析などすべてに関わって研究を進めています。私は大学時代からシリコンデバイスに関する研究をしていましたが、電子スピンや光、化合物半導体について研究していた方などいろいろな専門性を持った人が集まっています。そのためある程度広い範囲で研究を俯瞰できる、お互いの相乗効果が生まれるなどの利点があります。

そういったある程度広いつながりの中で、じっくり腰を据えて研究に取り組みたい、という方にはぜひNTTに来て欲しいですね。NTT物性科学基礎研究所ではポストドクなど様々なパスがありますので、これをお読みになって興味を持った方はぜひ一度調べてみて欲しいと思います。

NTT DATA

NTTデータカスタマサービス株式会社

フルターンでサービス提供をする 地域密着のトータルICT工務店

NTTデータカスタマサービスは全国に195の拠点を擁し、お客さまに設計・構築から運用・監視・保守までのすべてのバリューチェーンにおいてサービスを提供している。デジタルトランスフォーメーションが進展していく中、環境の変化に対応していく取り組みと今後の展望について渡辺守孝社長に話を伺った。



NTTデータカスタマサービス 渡辺守孝社長

全国195の拠点でお客さまに 寄り添う「トータルICT工務店」

◆設立の背景と目的、事業概要について教えてください。

NTTデータカスタマサービス（NTTデータCS）は、NTTデータが金融機関や官公庁等に対して提供していた、データ通信設備サービス（端末を含むシステムの設備をNTTデータが保有・運用してお客さまに利用していただくサービス）の端末系の工事・ハードウェア保守を担当する会社として、1998年にNTTデータから分社するかたちで設立されました。当時のシステムは、メインフレームベースのセンタを中心としたもので、その中で端末系は業務ごとに異なる端末が利用されているため、必要とされるスキルセットが少し異なっており、端末系の保守・運用を新たなビジネスモデルとして事業化し、この分野を伸ばしていこうという経緯で分社されました。

その後、システムがサーバ・クライアント型になり、端末もPCベースの汎用的なものに代わり、それに伴い必要とされるスキルセットも変わってくる中で、当初の端末系の工事・ハードウェア保守から、お客さまのシステム全体の開発、構築から運用・監視・保守まですべてをフルターンで提供するところまで事業展開するようになりました。

NTTデータCSは会社設立当初から全国に拠点を構えており、2020年6月現在で全国195カ所の拠点、1100人超の社員により、「ネットワーク/基盤インフラ設計・構築サービス」、「導入・工事サービス」、24時間365日の

カスタマサポートセンタ（コールセンタ）やお客さま拠点における「統制・運用・監視サービス」、そして「保守サービス」を、お客さまに寄り添う地域密着の“トータルICT工務店”として提供しています。

◆事業を取り巻く環境はどうか。

ICTの進化・発展に伴い、さまざまな業務をリモートで行うことができるようになってきました。しかし、工事やハードウェア保守のような業務は現場に行かなければ成立しないため、当社が実施しているような拠点ベースのビジネスは縮退していく会社が多い中、その必要性は依然高い状態にあります。

こうした環境において、多くのお客さまの会社は地域ごとに点在している中、システム・コンピュータベンダやSIerのグループ会社が全国に拠点を構え、または地域ごとに分散した保守会社を束ねることで、その親会社の提供するシステム設計・構築から運用・監視・保守までのバリューチェーンの一部を担うかたちで事業を行っています。

当社の場合はNTTデータのバリューチェーンの一部としてサービスを提供することはもちろんですが、設計・構築から運用・監視・保守までのすべてのバリューチェーンにおいてサービスを提供しているのが特長です。また、特定のベンダのグループ会社ではないため、ベンダフリーで、マルチベンダ対応が可能です。さらに、全国1社体制で事業展開しているため、全国一律のQCD（品質（Quality）、コスト（Cost）、デリバリ（Delivery））でマネジメントできます。お客さまによっては工事等

の作業をどうしても夜間や休日に行わなければならないことも多々ありますが、それも全国一律のQCDで対応しています。

こうした特長を活かして、これまでの金融機関・官公庁のほか、全国に多く店舗を持つアパレルメーカー等の店舗系のシステム工事・保守、10万サイト以上の公衆無線LANの監視・運用・保守、減災コミュニケーションシステムのネットワーク構築、東京国際空港（羽田空港）の駐車場における満空車管理システム、IoT活用型の車両誘導システム、駐車場予約システム（Web・アプリ）の開発・構築といった事例も増えてきています。

環境の変化への 対応を支える人材育成

◆デジタルトランスフォーメーション（DX）が進展していく中で、事業にはどのようなインパクトがあるのでしょうか。

DXの進展により、例えばインターネットバンキングの普及が進み、金融機関の窓口業務や印鑑照合のような業務の変化、縮小、場合によっては消滅といったことが発生します。さらに、リモートワークの推進により、支店やオフィスの統廃合、縮小、移転といった動きもある一方で、IoT（Internet of Things）やAI（人工知能）が普及することで、各所へのセンサの設置、AIを活用した新しい業務・サービスの登場等の新たな動きもあります。

こうした動きの中で、銀行の支店は統廃合されてもATMはなくなりません。さらにはIoTによりセンサが各所に設置されるようになると、端末の種類や設置場所も増えてきます。拠点ベースのビジネスという観点からは、この先も形を変えながら続いていきます。

当社はDXの登場以前から、端末やシステムそしてお客様の業務の変化に対応していくことを目的として、端末系からサーバ系やネットワーク系といった領域まで対象を拡げてきており、業務についても保守・運用中心から設計、構築、工事、運用、保守という一連のバリューチェーンにわたって展開するようになってきました。最近ではオフィス移転に伴う引越しまで対応するようになりました。環境の変化に対応していけるような仕組みづくり、さらには全国の拠点というリソースを活かした“トータルICT工務店”として、世の中や技術の新しい流れに対してお客さまに寄り添ってサポートしていきます。

◆今後の展望についてお聞かせください。

“トータルICT工務店”として事業展開していくために



は、資格の取得や社員のスキルアップといった人材育成が重要です。事業所として業務に必要な資格という点では、建設業法関連の監理技術者・主任技術者をすべての分野にわたり取得しており、そのほか電気工事士等の取得、そして2020年4月には一級建築士事務所も開設しました。社員のスキルという点では情報処理技術者関連の資格、ネットワーク系ではCCNP/CCDPやCCNA/CCDA等、プロジェクト管理としてはPMP、システム運用としてはITIL Expert等があります。これらの資格取得をはじめ、こうした資格の技術を実務で活かしていくためにも、NTTデータのP-CDP（Professional Carrier Development Program）という仕組みにより、設計、構築、工事、運用、保守という一連のバリューチェーンに対応できる人材育成に注力していきます。

これまで、全国にある拠点を活用して、NTTデータとの連携により全国展開型のお客さまとのお付き合いが多かったのですが、地域のお客さまとのお付き合いを増やしていきたいと考えています。そのためにも、地域における「顔」でもある、NTT東日本・西日本の各支店様との連携強化に注力していく必要があります。当社は端末だけではなく、サーバやネットワークに関するスキルもあり、企画・設計・構築段階から運用・保守までのすべてのバリューチェーンに関するサービスを提供していることから、それぞれの持ち味を活かした補完関係を築き、win-winのビジネス展開をしていきたいと思っております。

NTT東日本・西日本との連携で 高まる支社への期待

取締役執行役員 東日本支社長
浪瀬 時彦 さん

◆支社として担当されている業務について教えてください。

NTTデータCSには、エリアごとに8支社（北海道、東北、東日本、東海、北陸、西日本、中国、九州）があり、その中で東日本支社は関東エリアと信越エリアを担当しています。東京都内にはNTTデータCSの本社があり、NTTデータとの連携や大規模で全国的なお客さまについては本社営業本部の担当で、東日本支社はそれ以外の金融機関や自治体、法人等地域のお客さまを担当しています。

各支社には、設計、構築、工事、運用、保守という一連のバリューチェーンに対応する機能が備わっており、本社が獲得した全国的なお客さまに関するエリア内の業務を実行面で担当しているほか、支社独自の営業部隊も配置して支社ごとにそのエリアのお客さまへの営業活動も行っています。もちろん、支社で獲得したお客さまのプロジェクトに対しては、支社に通りの機能があるので、それを活用して本社で提供しているサービスのダウンサイジングバージョンのようなかたちによりフルレンジでサービス提供しています。

こうした環境において、支社の収益向上が期待されており、支社独自の営業活動を強化しているのですが、エリアにおけるNTTデータCSの知名度や支社内のヒューマンリソースにおいて厳しい面もあり、それを補強するためにNTTデータの地域会社と連携してサービスを提案しています。今後は、NTT東日本・西日本の各支店様との連携や他社との連携を増やしていくつもりです。

◆ご苦労されている点を伺えますか。

NTT東日本・西日本の各支店様との連携における糸口をつくることに苦労しています。

NTTデータの地域会社との連携においては、当社はNTTデータから分社した会社であり、同じNTTデータグループということで、ある程度は業務内容や業務の進め方も相互理解できて、スムーズに連携することができます。

一方、NTT東日本・西日本との連携においては、同じNTTグループではあるのですが、NTTデータCSが、何ができる会社なのかも知られていないのが実情です。1988年のNTTデータ分社の経緯にさかのぼってみれば、その段階ですでに事業の形態をはじめ会社の雰囲気等、すべてにわたってNTTとNTTデータでは異なっていたため、無理もない話です。

当社の支社は本社と同じように、設計・構築といった上流工程から工事・保守などの現場に根差した工程まで



浪瀬時彦さん

幅広い領域を手掛けられる強みを活かし、各地域で独立して活動できる、いわば1つの会社のような存在です。だからこそ、より地域に寄り添い、それぞれの地域のニーズを踏まえたご提案ができると考えています。これまで当社が着実に積み上げてきた品質と実績を、お客さまとNTT東日本・西日本に付加価値として提供できる地域密着の会社であることをしっかりと説明しながら、一步一步誠実にお付き合いすることで信頼関係を構築していくことが大切だと思っています。

◆今後の展望について教えてください。

自治体をはじめとする地域のお客さまとのお付き合いを増やしていくことが当面の目標です。

NTT東日本・西日本の各支店様は、まさに地域の“顔”であり、自治体とのお付き合いにおいても豊富な知見があります。当面の目標を現実のものとしていくために、NTT東日本・西日本の各支店様との連携構築はそのキーファクターです。

まずは、当社を知ってもらうことが入口にはなりますが、そのときにNTT東日本・西日本および関連するグループ会社と当社が補完関係にあること、それによりお客さまとNTT東日本・西日本等に付加価値をつけることができることを説明し、ご理解をいただく中で、1つでも多くの成功事例をつくっていきたいと思います。

NTTデータカスタマサービス **ア・ラ・カルト**

■驚きの受賞

日本ヒューレット・パッカード（日本HP）から、官公庁のお客さまの大規模全国ネットワークへのネットワークスイッチ導入実績が評価され、“FY20 Experience Edge Solution Partner of the Year”というパートナー表彰を受賞しました（写真1、2）。

この賞は、アジア・オセアニア地区においてNTTデータCSの受賞が日本における初受賞であり、日本HPでさえも驚きを隠せなかったそうです。ネットワーク機器の導入という、社員が頑張ってきたスキルをつけてきたところが認められたうえ、このようにグローバルな賞をいただけたことは大変嬉しく思います。

■GIGAスクール構想

「多様な子供たちを誰一人取り残すことなく、子供たち一人ひとりに個別最適化され、資質・能力を一層確実に育成できる教育ICT環境の実現」を目的とした、文部科学省のプロジェクト“GIGAスクール構想”において、ネットワーク構築と端末導入を行いました。担当社員自身が経験したことのない環境で学習できる子供たちをうらやましく思うとともに、そこに貢献できることを誇りに思うという意見があちらこちらで聞こえたそうです。

その一方で、工事はコロナ禍で休校になった2020年4～5月にかけて行われたのですが、もう少し早く導入されていればという悔しい思いと、授業のある日には工事はできないという現実のジレンマを感じつつ整備に励んだそうです。

■CSファミリー活動

新入社員の配属先を超えた人脈形成を図ることを目的に、「CSファミリー活動」を行っています。職場をまたいで入社10年目前後の社員が父母役、5年目前後の社員が兄弟役、新入社員が弟妹役の7～8名のファミリーを構成し、各種勉強会、職場の悩み相談のほか、最高裁判所、豊洲市場見学、犬カフェ体験、釣り堀居酒屋体験等も行っているとのこと。また、合同ファミリー大会もあり、花見やボーリング大会を行ったとのことですが、2020年はコロナ禍の影響で全ファミリー参加のオンライン懇親会になったそうです。

入社後の研修終了後からの1年間の取り組みで、新入社員にはなかなか評判がいいようです。就活生の中にもCSファミリー活動が魅力の1つという学生もいるそうで、今後も継続・発展できることを願っています。



写真1 受賞トロフィー

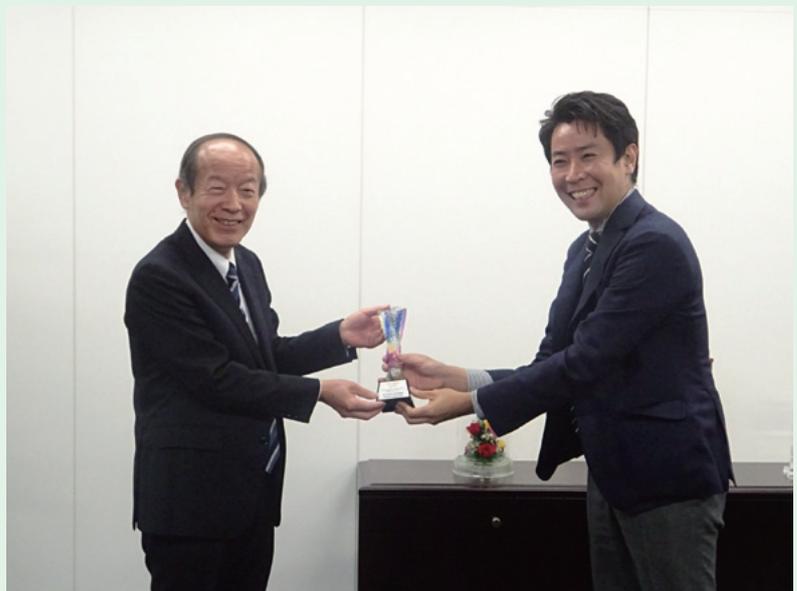


写真2 日本HP社責任者からのトロフィー贈呈の様子



ISO/IEC JTC1 SC27 WG2標準化動向

くさがわ けいた きくち りょう いちかわ あつり みうら たかゆき
 草川 恵太 / 菊池 亮 / 市川 敦謙 / 三浦 堯之
 NTTセキュアプラットフォーム研究所

ISO (International Organization for Standardization) / IEC (International Electrotechnical Commission) JTC (Joint Technical Committee) 1 SC (Subcommittee) 27では、セキュリティやプライバシーに関する方法・技術・ガイドライン等の開発・標準化が行われています。その中でもWG (Working Group) 2は暗号およびその他のセキュリティメカニズムの開発・標準化を担っています。ここではWG2での暗号アルゴリズム・プロトコルに関する最新の標準化動向を紹介します。



ISO (International Organization for Standardization) / IEC (International Electrotechnical Commission) JTC (Joint Technical Committee) 1 SC (Subcommittee) 27はセキュリティやプライバシーに関する方法・技術・ガイドライン等を取り扱う標準化団体です。その中でもWG (Working Group) 2は暗号およびその他のセキュリティメカニズムを扱うワーキンググループです。基本的な暗号方式(ブロック暗号やハッシュ関数)から匿名認証や秘密計算といった高度なプロトコルまでさまざまな方式を議論しています。

■軽量暗号 (ISO/IEC 29192)

暗号方式の性能は、演算にかかる時

間や遅延、消費する電力、ハードウェア実装した際の面積、演算に用いるメモリサイズといったさまざまな指標で測ることができます。デバイスがバッテリーや電源で動くのであれば消費電力が低い暗号が必要ですし、伝送量が多い環境では演算にかかる時間が小さいことが求められます。また車載機器や工場でのセンサといったリアルタイム性が重要な環境では低遅延な暗号が必要でしょう。このような環境で用いられるような、なんらかの指標で既存の標準化された暗号よりも「軽い」暗号方式を、軽量暗号と呼んでいます。2000年代に研究が始まり、近年の機器に対する安全性要件やIoT (Internet of Things) の流れもあり現在も活発に研究・開発が行われています。

ISO/IECでも軽量暗号を分野ごとにまとめたISO/IEC 29192やRFID向けの暗号技術を定めたISO/IEC 29167が策定されています。米国NIST (National Institute of Standards and Technology) は2014年から軽量暗号の標準化を検討し、2018年に公募を行い、2021年1月現在、候補を絞りつつ選定プロセス (Round2) が進んでいます。日本のCRYPTREC (Cryptography Research and Evaluation Committees) でも検討が行われており、2017年には「CRYPTREC 暗号技術ガイドライン (軽量暗号)」⁽¹⁾として検討内容がまとめられています。

WG2ではさまざまな軽量暗号に関

する標準であるISO/IEC 29192を担当しています。この標準は、軽量ブロック暗号 (Part2)、軽量ストリーム暗号 (Part3)、軽量ハッシュ関数 (Part5)、軽量メッセージ認証符号 (Part6) などに分かれています。その中でもメッセージ認証符号 (ISO/IEC 29192-6) に、Chasky-12やNTTがかかわっているLightMACが日本から提案され、2019年に標準化されました。

ほかにも調整可能ブロック暗号 (Tweakable BlockCipher, TBC) を扱う規格としてISO/IEC 18033-7が2020年に立ち上げられました。こちらには軽量暗号コンペティションCAESARで選定された軽量暗号の1つDeoxysの基本要素であるDeoxys-BCやNTTがかかわっている軽量暗号SKINNYが掲載される予定です⁽²⁾。

■匿名署名 (ISO/IEC 20008)

デジタル署名はさまざまな分野で用いられる基本技術です。署名者は署名鍵と検証鍵を生成し、検証鍵を公開します。署名者は署名鍵を用いて文書に署名を行い、検証者は検証鍵・文書・署名をそろえて検証を行います。

この場合、ある文書と署名を見たときに、どの検証鍵の持ち主が署名を行ったかということが分かります。デジタル署名を認証として用いる場合には、どの検証鍵の持ち主がその認証を行ったかが分かることとなります。

アプリケーションによっては署名者の匿名性を守りたいという要求があり

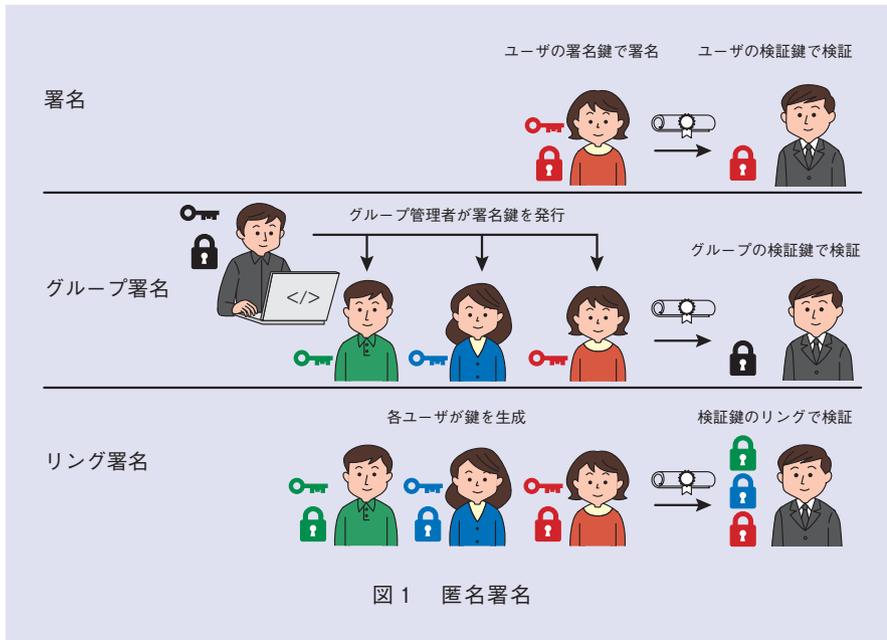


図1 匿名署名

例などを受けて、2020年にISO/IEC 20008-3としてリング署名の規格化が始まりました。NTTでもリング署名の黎明期から研究開発を行っており、提案やフィードバックを積極的に行っています。



公開鍵暗号は、数学的な問題を基に作られることが基本になっています。例えば、公開鍵暗号を提唱したDiffieとHellmanの論文⁽³⁾では離散対数問題に基づく鍵交換方式が載っています。その後、1985年ごろに楕円曲線上の離散対数問題に基づく公開鍵暗号の構成が提唱されました。通常の離散対数問題よりも鍵や暗号文のサイズを小さくできることが分かり、研究開発が進みました。2000年ごろには、楕円曲線上で定義されるペアリング関数をうまく使うことで、これまでできなかった暗号方式（IDベース暗号、効率の良いしきい値暗号等）が、構成できることが分かりました。

WG2では楕円曲線暗号の標準化を行っており、1999～2004年にかけてISO/IEC 15946シリーズとしてまとめていました。のちに暗号方式の標準は技術の内容ごとに分類され直しました。そのため、現在では楕円曲線暗号の用語を定義するISO/IEC 15946-1と、楕円曲線やペアリング関数と相性の良い楕円曲線の構成方法をまとめたISO/IEC 15946-5が残っています。

Kim（当時NTT）とBarbulescu

ます。そのために匿名署名と呼ばれる技術が研究されてきました。ISO/IEC 20008シリーズでは匿名署名を扱っています（図1）。

■グループ署名 (ISO/IEC 20008-2)

1991年に提唱されたグループ署名では、グループ管理者が各ユーザに署名鍵を発行します。ユーザは署名鍵を用いて文書に署名を行い、検証者はグループの検証鍵と文書と署名をそろえて検証を行います。この場合、検証者には相手がグループに所属しているという情報しか分かりません。そのため、ユーザの匿名性が守られることになります。

2010年ごろからISO/IEC 20008-2としてグループ署名の規格化が始まり、2013年には標準規格として出版に至っています。

■リング署名 (ISO/IEC 20008-3)

2001年に提唱されたリング署名では、ユーザは各々通常の署名の署名鍵・検証鍵を持っています。ユーザは署名鍵を用いて文書に署名を行うのですが、そのときに他の検証鍵も一緒に用います。検証者は検証鍵の組（リングと呼ばれる）と文書と署名をそろえて検証を行います。

この場合、検証者には相手がリングの中のどれか1つの検証鍵の持ち主であるということしか分かりません。そのため、ユーザの匿名性が守られることとなります。グループ署名と比べるとグループ管理者を必要としないため、非中央集権的であるといえます。

非中央集権的であることや、電子現金の匿名性を達成するための技術としてブロックチェーンに組み込まれる事



は2016年にペアリング関数と相性の良い楕円曲線上の離散対数問題を解く新たなアルゴリズムを提案しました⁽⁴⁾。このアルゴリズムは既存のアルゴリズムよりも高速に問題を解いてしまうため、これまでの楕円曲線の安全性レベルが低下してしまいます。このアルゴリズムの登場を受けて、新しい楕円曲線の安全性評価・選定が研究者・開発者の間で行われてきました。

WG2でも、ISO/IEC 15946-5に掲載されている楕円曲線の安全性レベルが低下してしまったことから、2018年より、安全性レベルの向上のために規格の改定の検討が始まりました。ペアリング関数と相性の良い楕円曲線の見直し・選定・パラメータ設定が議論され、最終的には2021~2022年ごろの標準化をめざしています。NTTもこの解析アルゴリズムの提案を受け

て、新たな楕円曲線の研究を行っており⁽⁵⁾、WG2での議論においても積極的な貢献を行っています。

秘密分散 (ISO/IEC 19592-1, 2)

秘密分散は、秘密としたいデータを適切な符号化の下、複数の断片に分割します。断片からは元のデータの情報が洩れず、また、いくつかの断片が消失しても復元が可能であるという点が特徴です (図2)。

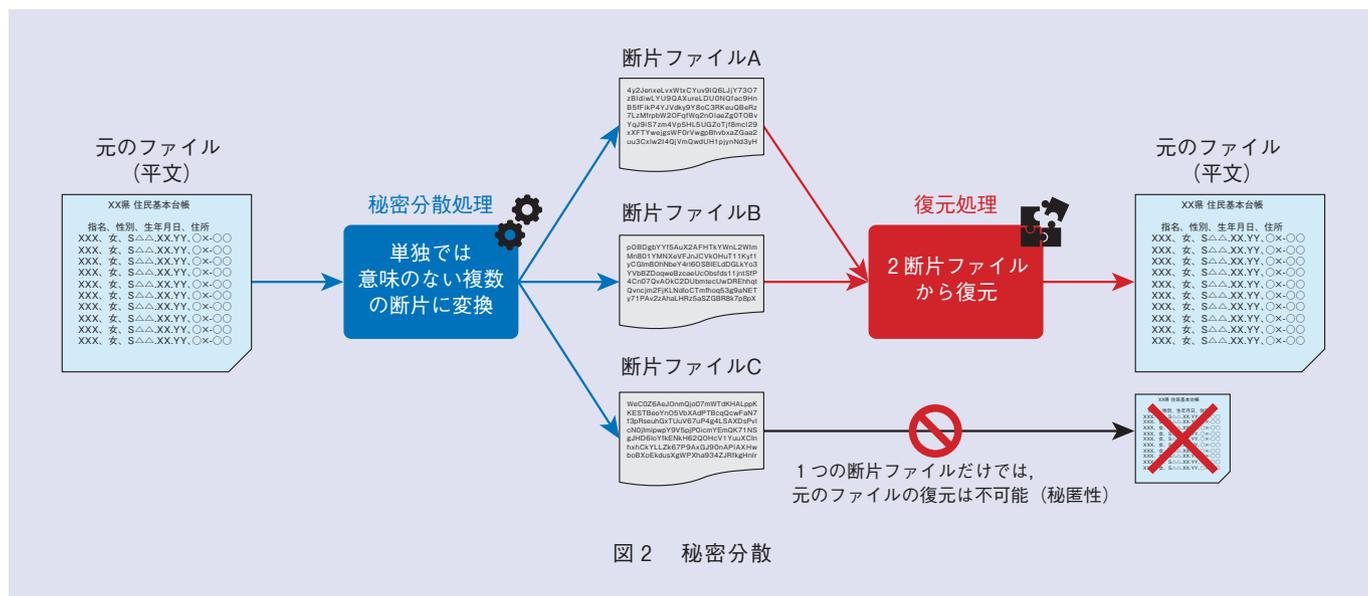
断片からは元の秘密情報が漏れないという点から、機微情報の漏洩対策に用いることができます。普段は断片のかたちで複数人が分散して保持しておき、秘密を復元する際には断片を持ち寄って復元を行います。また、後述する秘密計算の基幹技術でもあります。

さらに、いくつかの断片が消失して

もデータが復元可能であるという点から、データの分散保存技術や災害時にデータ消失した場合のデータ復元技術としても用いることができます。

1979年にShamirとBlakleyによって独立に提案されて以降、非常に多くの方式が提案されています。安全性や分割の仕方・復元の仕方などさまざまな違いがあり、使い方によって適切な秘密分散を選定する必要があります。また学術的には同じ方式であっても、実装方法によって違いがあることも考えられます。

2014年からISO/IEC 19592シリーズとして秘密分散の標準化が始まりました。NTTはISO/IECでの秘密分散の標準化において活発に活動し、19592-2のエディタとして規格の作成を主導し、2017年の出版に大きく貢献しました。NTTの秘密分散・秘密



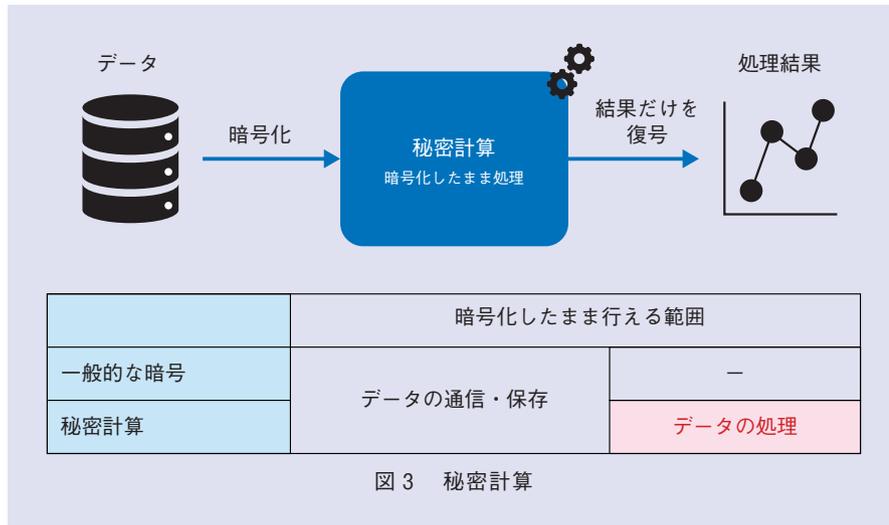


図3 秘密計算

計算そのものの研究や、秘密分散を用いたさまざまなプロダクト（秘密分散技術trust-ss、分散ストレージSHSS、秘密計算技術「算師[®]」）の開発で得た知見をフィードバックし、扱いやすい秘密分散の選定に貢献しています。

NTTのプロダクトでは、3つの秘密分散方式を適切に使い分けて利用しています。2017年出版のISO/IEC 19592-2ではそれら3つの秘密分散方式を含む、5つの秘密分散方式が規定されています⁽⁶⁾。

さらに、最近ではこの秘密分散を基盤技術とした秘密計算の標準化も始まりました。

秘密計算の紹介 (ISO/IEC 4922-1, 2)

秘密計算は、データを暗号化したまま計算を行うための技術です。一般的な暗号はデータの通信・保存を保護し

ます。秘密計算は、さらにデータの計算過程も保護することができます。秘密計算を使うことにより、個人のパーソナルデータや企業の営業秘密を用いる分析業務で、データを漏らさないだけでなく「データの中身を見ない」運用が可能になります（図3）。

これにより、より安全なデータ処理はもちろんのこと、今まで他組織に開示することが難しかったデータを持ち寄って、企業や業界の枠を越えた新しい統合分析が可能になると考えられています。

NTTでは暗号化の部分に秘密分散技術を利用した秘密計算の研究・開発を行っています。すなわち、データを秘密分散で断片に変換してからサーバに渡し、サーバはその断片を元データに戻すことなく計算を行います。新たなデータ流通・活用を可能にする技術として注目されており、NTT以外にもさまざまな企業・大学・研究機関で

秘密計算の研究・開発が行われ、切磋琢磨している状況です。

2020年からISO/IEC 4922シリーズとして秘密計算の標準化が始まりました。ISO/IEC 4922-1は秘密計算全般に関する標準、ISO/IEC 4922-2は秘密分散に基づく秘密計算に関する標準になる予定です。NTTは両方のエディタとして積極的に規格作成を主導しています。

今後の展開

NTTの研究・開発の知見に基づき、暗号技術・プロトコルの国際標準の整備に貢献していきます。

参考文献

- (1) <https://www.cryptrec.go.jp/report/cryptrec-gl-2003-2016jp.pdf>
- (2) <https://standardsdevelopment.bsigroup.com/projects/9020-03695#/section>
- (3) W. Diffie and M. Hellman: "New directions in cryptography," In IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 22, No. 6, pp. 644-654, Nov. 1976.
- (4) T. Kim and R. Barbulescu: "Extended Tower Number Field Sieve: A New Complexity for the Medium Prime Case," Proc. of CRYPTO 2016 Part I, Vol. 9814, pp. 543-571, Santa Barbara, U.S.A., August 2016.
- (5) Y. Kiyomura, A. Inoue, Y. Kawahara, M. Yasuda, T. Takagi, and T. Kobayashi: "Secure and Efficient Pairing at 256-Bit Security Level," Proc. of ACNS 2017, pp. 59-79, Kanazawa, Japan, July 2017.
- (6) <https://www.ntt.co.jp/news2017/1710/171023a.html>

量子コンピュータの小型化・高速化を実現する回路圧縮手法を開発

国立情報学研究所とNTTは、大規模な量子コンピュータ上の計算回路の圧縮化とコンパイラ設計のための新しいアプローチを定式化しました。本手法を用いることで、量子計算サブルーチン回路を平均約70%圧縮することが可能となり、大規模量子コンピュータの開発に必要なとされるリソースの低減化を実現しました。大規模量子コンピュータに必要なとされる量子ビット数の大幅な削減と、計算時間の短縮化による量子コンピュータの高速化が期待されます。

本研究成果は、Phys. Rev. Xに米国東部時間2020年11月11日に掲載されました。

■概要

将来開発が期待される大規模な量子コンピュータは、ユーザが量子コンピュータに入力する量子アルゴリズムから、量子コンピュータ内のハードウェア動作までの間に、コンパイルと最適化が何段階にもわたって行われると考えられています。また、このような大規模な量子コンピュータは誤り耐性型汎用量子コンピュータとも呼ばれ、誤りに耐性を持つ符号化の構造を持つことを特徴としており、誤りに耐性を持つ符号へのコンパイルや最適化の手法の開発が、大きな課題の1つとなっていました。この誤り耐性のある符号化のうち、量子コンピュータの設計にもっとも多用されているのはトポロジカル符号で、中でも特に代表的なのは、超伝導量子ビット実装の2次元表面符号と、主に分散型の量子コンピュータの設計に用いられる3次元トポロジカル符号です。本研究では、これらのトポロジカル符号を統合化し、量子計算回路における最適化を通して、量子コンピュータの誤り耐性実装に伴う大規模なオーバーヘッドの低減と、コンパイラ設計の中心となる量子コンピュータ言語への新しいアプローチを提案しました。

■本研究成果

本研究では、まず、ZXカリキュラスを3次元トポロジカル符号上の量子計算回路に応用し、ZXカリキュラスの持つ演算機能を用いて量子計算回路の圧縮化を行いました。3次元トポロジカル符号では、論理量子ビットを定義するために挿入されたディフェクトと呼ばれる構

造が絡み合うことでトポロジーを変え、演算を実装するために、量子計算回路を絡み合うパイプ構造として3次元的に視覚化することができます。このパイプ構造がつくる体積を圧縮することにより、量子計算回路の圧縮化が達成されます。本研究では、よく使われる量子回路のサブルーチンに対して本手法を用いることにより、平均で約70%の圧縮率を達成することに成功しました。量子計算回路を圧縮した分、量子コンピュータに必要なとされる量子ビット数を削減できるだけでなく、量子計算回路の実行時間を短縮化できるため、量子計算を高速化できます。

■研究の詳細

これまでの3次元トポロジカル符号上の量子計算回路の圧縮は、パイプ構造の変形法則が不完全であることが

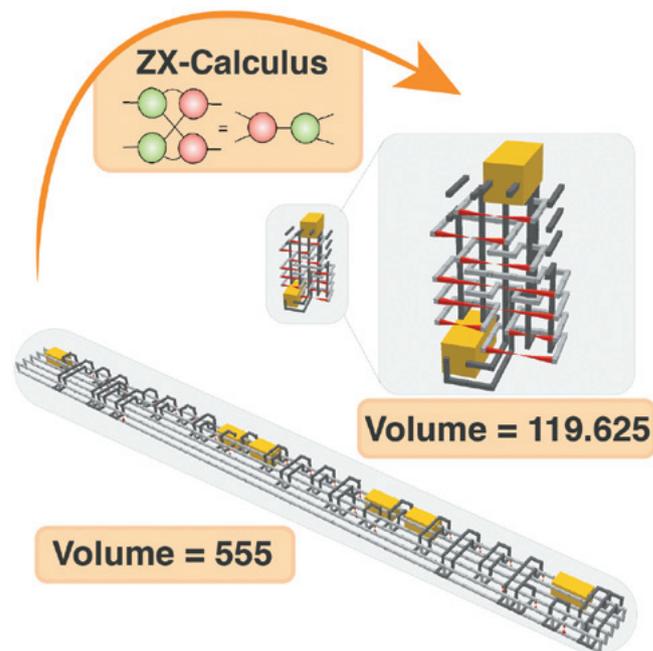


図 3次元トポロジカル符号上の量子計算回路の最適化

ら、圧縮過程で量子計算回路まで変えてしまうなどのさまざまな問題を含んでいました。これらの問題から、2次元表面符号の方が量子計算回路の圧縮に適しており、優れた性質を持つとの考えが定説となっていました。

本研究ではまず、3次元トポロジカル符号上の量子計算回路の圧縮が回路の性質を変えてしまう問題を回避するため、論理ゲートの変形法則が定式化されているZXカリキュラスに注目し、ZXカリキュラス上で回路の圧縮を行うことにしました。ところが、ZXカリキュラスと3次元トポロジカル符号上の量子計算回路表現（パイプ構造）の間の関係性が解明されていなかったため、この関係性を明らかにし定式化する必要がありました。本研究では、ノードのテンソルネットワークとして表現されるZXカリキュラスに、従来とは異なる新しい解釈を導入することで、3次元トポロジカル符号上のパイプ構

造との間に新しい関係性が成り立つことを初めて発見することに成功しました（図）。

ZXカリキュラスを中心に、2次元表面符号と3次元トポロジカル符号の量子計算回路を統合することで、従来の定説を覆し、3次元トポロジカル符号での高い回路圧縮が可能であること、また2つの符号化をハイブリッドしたより効率的な圧縮方法が可能であることを示しました。具体的な例として、多用される量子計算サブルーチンの圧縮に本手法を用いて、従来方法での圧縮回路よりさらに圧縮度の高い量子計算回路を得ることで、手法の有用性を示しました。圧縮後の量子計算回路は、ZXカリキュラスと3次元トポロジカル符号上の量子計算回路表現間の関係をコンパイルに用いて、ハードウェアに回路実装することができます。

誤り耐性量子コンピュータのためのコンパイラとは

根本 香絵

国立情報学研究所
量子情報国際研究センター
情報学プリンシプル研究系

研究者
紹介

量子コンピュータの中で情報処理をするとき、その情報は多数の量子ビットがつくる量子状態に格納されています。量子状態はとても壊れやすいので、量子コンピュータの中で処理される量子情報もまた、ノイズによって大きな影響を受けます。そのため、量子コンピュータのサイズを大きくしたり、難しい問題を長い時間かけて計算するためには、誤りに対して耐性を持たせることが必要です。誤りに対して耐性を持つ量子コンピュータは、誤り耐性量子コンピュータと呼ばれ、量子コンピュータ開発の中でも長期的な課題で、この開発へ向けて現在研究が活発化しています。誤り耐性量子コンピュータではまず、量子誤り訂正符号を用いて論理量子ビットをつくり、この論理量子ビット上に論理量子ゲートを誤り耐性実装することで、誤り耐性のある量子情報処理が実装されます。数多くの量子ビットから守られた量子ビットを1つつくるという冗長性だけでなく、量子論理ゲートを誤り耐性実装することに非常に大きな物理的リソースが必要になるため、全体として誤り耐性量子コンピュータはとても大きな装置となります。

今回私たちはNTT物性科学基礎研究所と共同で、誤り耐性量子コンピュータ中で実行される量子回路の形式化を、ZXカリキュラスを用いて行い、この形式化が量子誤り訂正符号の違いを超えて共通の形式として用いることができることを示しました。この新しい方法を、サブルーチン量子回路の圧縮化に用いることで、誤り耐性量子コンピュータの高速化や必要となるリソースの大幅な低減化を可能にしました。本研究成果は、誤り耐性量子コンピュータの実装を早めるだけでなく、コンパイラ設計の中心となる量子コンピュータ言語への新しいアプローチを提案するもので、将来のコンパイラ的设计や量子コンピュータ言語の基礎として重要な役割を持つと考えています。



■将来的な展望

量子コンピュータに実装される量子ビットの数は年々増えていますが、量子コンピュータの本格実用化には、エラーの克服が最重要課題となっており、世界的に誤り耐性を特徴とする大規模量子コンピュータの登場が期待されています。本手法を用いて誤り耐性の実装に必要とされるリソース負荷を低減することにより、より早い大規模量子コンピュータの実現が期待できます。3次元トポロジカル符号に基づく大規模量子コンピュータの制御性の改善とリソースの低減を大幅に進めることができたことは、分散性のあるネットワーク的な量子コンピュータの可能性を飛躍的に高めるものでもあり、NTTが進めるIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想の実現に向けて量子技術からのアプローチ

を加速するものです。

また、大規模量子コンピュータを設計するうえで、本手法は量子コンピュータアーキテクチャと合わせて中心的な位置を占め、命令制御アーキテクチャやコンパイラ設計の基礎としての役割を担っていくことが期待されます。

◆問い合わせ先

NTT先端技術総合研究所

広報担当

TEL 046-240-5157

E-mail science_coretech-pr-ml@hco.ntt.co.jp

URL <https://www.ntt.co.jp/news2020/2011/201112a.html>

誤り耐性量子コンピュータの量子回路圧縮

William John Munro

NTT物性科学基礎研究所

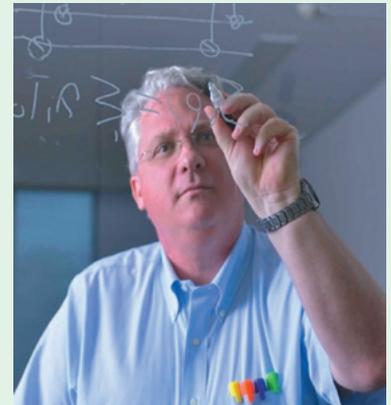
量子科学イノベーション研究部 理論量子物理研究グループ

理論量子物理研究センタ

量子力学の原理は新しいICTを可能にし、現在のICTに革命的な発展をもたらすと期待されています。そのような量子デバイスの開発によって、現在の技術では困難な問題や取り扱いが不可能な問題までも解くことができると予想されています。現在までに、50から100量子ビット程度のNISQデバイスが開発されています。NISQデバイスのNはnoisyを意味し、その名前のとおりノイズのある量子デバイスです。これらNISQデバイスを用いて、従来のコンピュータでは計算するのが難しいほどの複雑性を生みだすことができることがすでに示されています。ただし、ノイズがあるということは、量子計算に大きな制限があるということで、難しい問題や、大きな（多数の量子ビットを必要とする）問題は解くことができません。この制限を受けないようにするには、誤り耐性量子コンピュータの開発が必要です。誤り耐性量子コンピュータの開発は、量子コンピュータ開発における究極的な目標で、想像もできないような問題をも解くことができるようになると考えられている一方、NISQデバイスが実現している量子ビット数の100万倍もの数の量子ビットを必要とします。NISQデバイスと誤り耐性量子コンピュータの間にある、この大きなギャップを橋渡しすることが必要です。2020年11月に私たちは、量子プログラムを実行するのに必要とされる論理量子ゲートと量子ビットの数を大幅に低減する、誤り耐性量子コンピュータのための量子回路圧縮方法を提案しました。私たちの研究成果は、誤り耐性量子コンピュータの実現を早めることに寄与するもので、米国物理学会のPhys. Rev. X誌に掲載されました。量子回路の圧縮を自動化しやすいことと、圧縮後の量子回路の検証が自然にできることも、この方法の優れた点の1つです。

この研究成果は、国立情報学研究所のMichael Hanks博士、Marta Estarellas博士、根本香絵教授との共同研究で、Q-LEAP基礎基盤研究の支援を得ています。本研究では、物理学、工学、コンピュータ科学、そして化学と、非常に多様な分野背景を持つ研究者が参加しています。私たちが開発した方法は、量子コンピュータ設計やその実装研究のさらなる発展を活性化していくものと思います。

研究者 紹介



ロボット農機や5G, IOWN関連技術による農機の圃場間自動走行と遠隔監視制御を実現

北海道大学（北大）、岩見沢市、NTT、NTT東日本、NTTドコモは、最先端のロボット農業技術に、第5世代移動通信システム（5G）、革新的ネットワーク技術IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）を実現する技術の1つである複数ネットワーク最適活用技術や高精度な測位技術等を用いて、農機完全自動走行に向け、通信や映像の途切れを防止する等、安定的で円滑な農機の広域自動走行とその遠隔監視制御を実現しました。

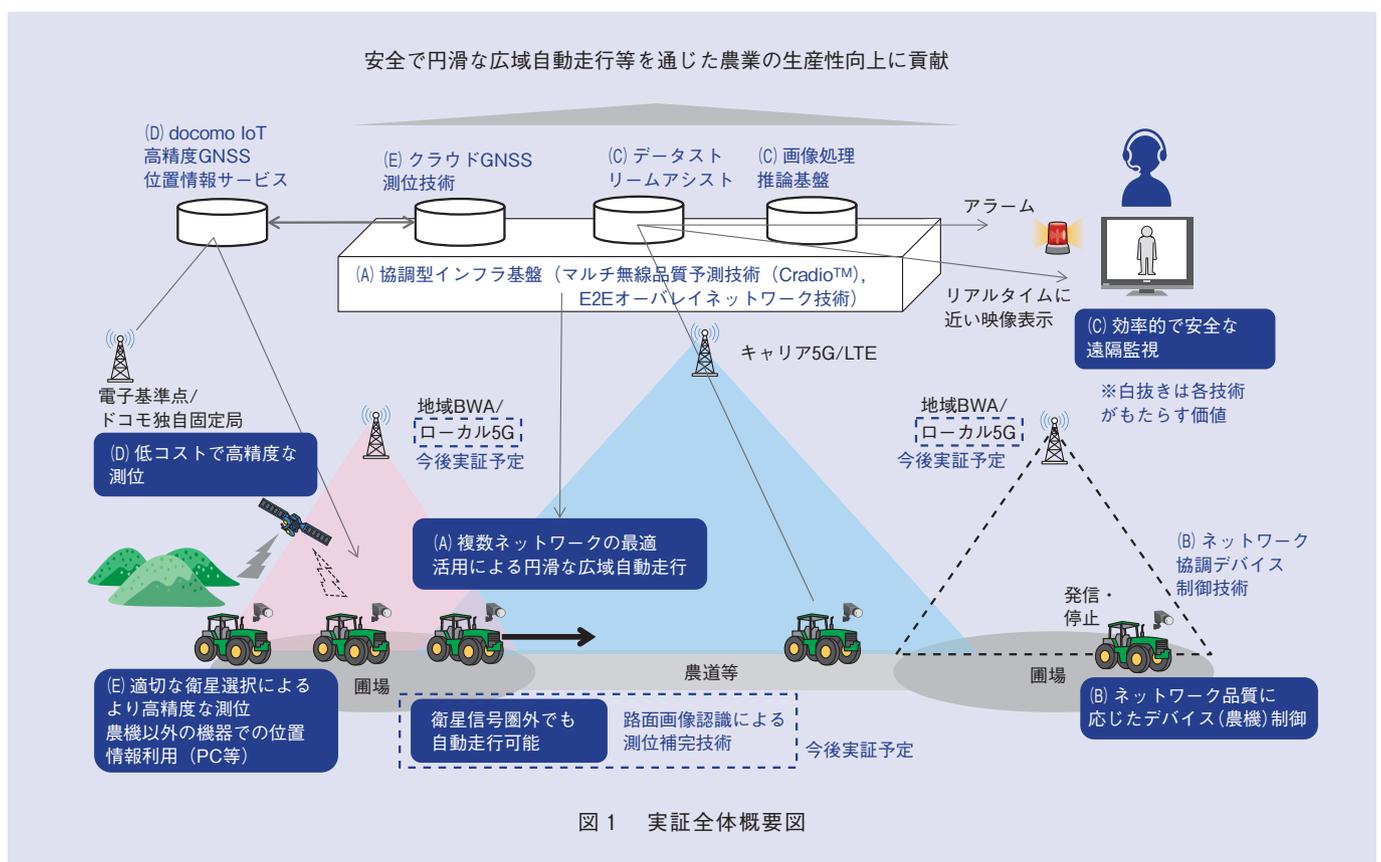
■背景

日本の農業は長年にわたる就農人口の減少や高齢化等による人手不足が続いています。また、昨今の新型コロナウイルス感染拡大の影響により、外国人技能実習生が

減少する等、農業現場の労働力減少に拍車がかかっています。このような状況において、日本の農業を維持、発展させるためには、農家当りの耕作面積拡大等につながる飛躍的な生産性向上が求められますが、農家自身の努力だけで実現するには限界があります。そのため、ロボット農機等を活用して、農作業を可能な限り自動化することにより、直面する人手不足を解消することが期待されています。

■取り組み概要

このような背景のもと、北大、岩見沢市、NTT、NTT東日本、NTTドコモは2019年6月28日に産官学連携協定を締結し、最先端の農業ロボット技術と情報通信技術の活用による世界トップレベルのスマート農業およびサステナブルなスマートアグリシティの実現に向け



た研究、技術開発等を進めてきました。

これまで、農機からの高精細映像や監視センタからの発進・停止等の制御信号の安定的な伝送をめざし、5G等の高速・大容量・低遅延のネットワークを活用して実証を進めてきました。しかし農機完全自動走行対応には圃場間での移動も含め、遠隔地からトラクタやコンバイン等の農機をモニタ等で監視、制御することが必要となります。

例えば、対象の農地が5Gのサービスエリア外であったり、その無線通信の特性上、遮蔽等の影響を受けて自動運転農機が必要な通信品質を得られなかった場合、遠隔地にある監視センタへ送信する監視映像が乱れたり、途切れたりすることにより遠隔監視の継続的・安定的な実施が難しい等の課題があり、その解決策として、複数のネットワークを安定的に切り替えるなどの対策が有効です。

そこで、今回の実証では、以下5つの技術を実現し、その有効性を確認しました(図1)。

まず、(A)IOWNを実現する技術の1つとなる協調型インフラ基盤技術〔マルチ無線品質予測技術(Cradio™)、E2Eオーバレイネットワーク技術〕を用いて、複数のネットワークをまたがって農機が自動走行する中で、通信品質の変動をAIが予測して通信品質が劣化する前に適切なネットワークに自動で切り替えることで、遠隔監視を中断させることのない、安定的な自動走行を実現しました。岩見沢市の農道で実際に農機を自動走行させ、同技

術を用いて通信を中断させず自動でのネットワーク切り替えに成功しました。これらの技術は、アプリケーションに利用ネットワークを意識させない、ナチュラルな利用を可能とする、将来の移動固定融合サービスにつながる技術の1つとしても位置付けられます(図2)。

また、(B)ネットワーク協調デバイス制御技術を用いて、ネットワークの品質変化に応じた農機の制御指示を実現し、監視映像が伝送できないレベルにネットワーク品質が劣化した際に、自動でトラクタを安全に停止させるなど、その有効性を確認しました(図2)。

さらに、(C)監視拠点で映像をパケットレベルで低遅延に複製することでネットワーク負荷を低減しながら、遠隔監視と画像解析などの複数の用途でのリアルタイム映像の同時利用を可能とするデータストリームアシスト技術、また深層学習では、サーバ収容率を高めるために、複数の映像ストリームを効率的に処理するストリームマージ機能やCPUやGPUなどさまざまなリソースを最適化する推論処理基盤技術により、処理を効率化しています。これらの機能により監視者の負担軽減につながる効率的な遠隔監視を実現し、その有効性を確認しました(図2)。

また、農機が自動走行するためには、高精度な測位が必要です。そのため、衛星信号を受信する固定局を農機の周辺環境に設置し、固定局から位置補正情報を配信することが求められます。従来は、農家が当該固定局を設置することから、費用面や運用面で農家の負担となる等

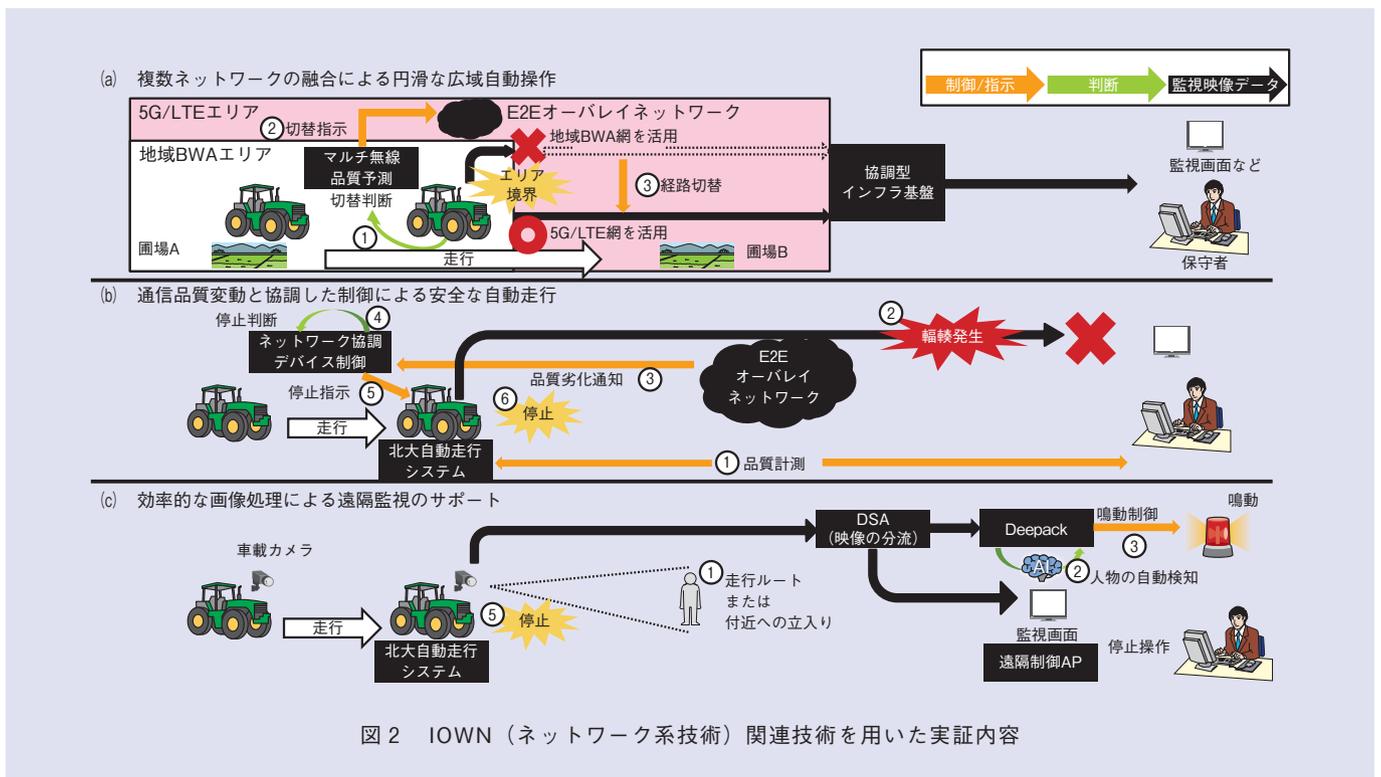


図2 IOWN (ネットワーク系技術) 関連技術を用いた実証内容

の課題がありました。

そこで、(D)農家による固定局の設置が不要となる、「docomo IoT高精度GNSS (Global Navigation Satellite System) 位置情報サービス」を用いた農機自動走行の実証を行い、高精度の測位を実現し、有効性を確認しました。これにより、低コストで高精度な測位情報の利用が可能となります。

さらに、(E)IOWNを実現する技術の1つであるクラウドGNSS測位技術を用いた農機の自動走行の実証も行いました。農機に搭載した受信機で受信されたGNSS信号と固定局からの位置補正情報を使用して、クラウド上で測位演算処理を行い、リアルタイムの測位結果を農機の自動走行の制御に使用することで、その有効性を確認しました。

クラウド上で測位の演算処理を行うことで、農機のみならず、PCやタブレット等の機器でも同時に位置情報の利用が可能になること、また、樹木などの障害物が圃場周辺にある環境下で、利用にふさわしくない衛星信号を測位処理に利用して測位精度が劣化する課題に対しても、クラウド上の潤沢な計算リソースを使い、適切な衛星信号を選択することで高精度な測位を実現することが可能となります。

■今後の展開

今後は、農機自動走行の安全性をさらに高めるため、衛星信号を用いた測位可能なエリア圏外でも農機自動走行を可能にする路面画像認識による測位補完技術の実証

も行います。

また、ドローンや草刈・収穫ロボット等農機以外への遠隔監視制御対象の拡大や5Gや現行光ネットワークよりもさらに高速・大容量・低遅延なIOWN関連技術の導入を通じた、より多数の農機の遠隔監視制御、より広域での農業の自動化をめざします。

さらには、農業の生産分野にとどまらず、流通・販売・消費分野にまたがるフードバリューチェーンへと取り組みを拡大させるとともに、そこで構築した通信インフラを防災や健康等他分野での活用に広げる等、スマート農業を軸とした、生活に必要なさまざまなサービスのスマート化へとつながるスマートアグリシティの実現をめざします。

◆問い合わせ先

NTT研究企画部門

プロデュース担当

E-mail ta.murayama@ntt.com

URL <https://www.ntt.co.jp/news2020/2011/201116b.html>

先端通信技術でロボットトラクタを次の段階に引き上げます

Ospina Ricardo

北海道大学大学院農学研究院

ビークルロボティクス研究室 博士研究員

研究者
紹介

日本農業の問題として農業従事者の急減と高齢化が挙げられます。それに対応するため農作業の省力化・軽労化などが求められており、最先端技術による農業再生に期待が高まっています。

そこで、当研究室ではロボットトラクタ技術や情報通信技術を駆使して農作業の効率化と安全性向上を図るための研究を行ってきました。ロボットトラクタの自動運転技術は実用段階を迎えましたが、今後は目視による監視に代わって遠隔地からの監視を行うための技術が求められています。

新しい5G通信技術とマシンビジョン用AI、レーザスキャナ、GNSSなどのさまざまなセンサを組み合わせることでロボットトラクタシステムを次のレベルに引き上げることができます。遠隔監視者の下、周辺状況を遅滞なく確認できる通信システム・環境を持つロボットトラクタが圃場から次の圃場へと移動して連続的に作業を行います。危険（障害物や道路上の人など）を検知した際には緊急停止し、監視者に通知します。

当研究室・岩見沢市・NTTグループの共同プロジェクトにおいては、NTTグループの持つ高度な通信技術とデータ分析技術の農業分野への導入を積極的に進めていきたいと考えています。



産学官連携とICT活用による共創 ～地方で起こるイノベーション～

担当者 紹介

山崎 拓也

岩見沢市 企画財政部 企業立地情報化推進室 情報化推進係 主事

人口減少や少子高齢化が急速に進行する昨今、特に就業人口減少や担い手不足が深刻化する農業分野において、2020年農林業センサスによると、日本の農業従事者の平均年齢は約68歳、基幹的農業従事者のうち65歳以上が占める割合が69.8%で5年前と比較して4.9ポイント上昇するなど、生産性向上や労働力不足の解消が喫緊の課題となっていることは周知の事実です。労働力不足の側面以外にも、熟練農家の貴重な知恵や技術、ノウハウが失われていくことも懸念されており、暗黙知も含めた形式知化の仕組みづくりも急がれています。

2019年度からNTTグループと国立大学法人北海道大学、岩見沢市による産学官連携のもと、Society 5.0時代を見据えた地域社会づくりがスタートしており、各分野のフロントランナーとして取り組まれている大学、企業の知見や研究開発、ICT基盤や人材などのさまざまな資源等が集結し、次世代地域ネットワーク活用によるロボット農機の自動運転や遠隔監視・制御機能をはじめ、高精度測位・位置情報配信基盤、AI活用など、「可能な限り圃場の作業をロボットに任せたい」という農家のニーズを社会実装するためのイノベーションが岩見沢市で起きています。

ICTは今や社会のEssential Techとなり、これまで以上にその重要性が増しており、農業分野においても、諸課題の解決に向けてICTを駆使したスマート農業の普及と実装が求められています。若い世代を含めた農業者が日本の農業を担うという矜持を持ち、活躍ができる未来の農業をめざし、岩見沢市は産学官連携と共創のもと、スマート・アグリシティの実現に向けて取り組んでいきます。



ネットワーク、デバイス、コンピューティングの協調による スマートな社会の実現に向けて

研究者 紹介

石橋 亮太

NTTネットワーク基盤技術研究所
コグニティブファウンデーションNWプロジェクト 主任研究員

NTT研究所は、IOWNの実現につながるさまざまな技術の研究開発を行い、社会課題の解決を通じてよりスマートな社会の実現をめざしています。

北海道大学、岩見沢市、NTTグループの産学官連携によるスマート農業の実現に向けた共同検討の取り組みはその代表例です。この中でNTT研究所は、通信ネットワーク、スマート農機制御、映像転送・解析、高精度測位など多岐にわたる技術群を統合的に活用し、遠隔監視制御によるトラクタ無人自動走行の実現に向けた実証に取り組んできています。

研究には、単独の技術を磨くだけでも一筋縄ではいかない難しさと面白さがありますが、今回は、無線ネットワーク・仮想化ネットワークや画像処理などさまざまな領域に属する5つの技術群を、個別に評価するのではなく、実際のトラクタや商用の通信ネットワークも含めて協調させ総体として動作するよう組み上げ、北海道岩見沢市の実フィールドでトラクタを自動走行させて検証を行うというアプローチで取り組みました。

このチャレンジングなプロジェクトを、未曾有のコロナ禍で実験作業や準備作業などが多くの制約を受ける中にありながらも、産学官連携の関連メンバの協力によって遂行できたことは、大変な喜びです。

この取り組みをさらに発展させ、スマート農業をはじめ、NTTの技術と総合力でよりスマートな社会を実現するための研究開発活動にこれからも取り組んでいきます。



生体音を遠隔に伝送できる装着型音響センサレイシステムを開発

NTTは、多数の音響センサにより生体の各部分から生じる音響信号（生体音）を収集し、ネットワークを通じて遠隔伝送する機能を備えた装着型（ウェアラブル）の音響センサレイシステムを開発しました。

開発したシステムは、多チャンネルの音響センサを備えた検査着、送信端末、および受信端末から構成されます。対象者が検査着を着用すると、音響センサが各部分の生体音をとらえ、送信端末を通じて遠隔にある受信端末に送信します。受信端末を操作することで、対象者の身体各箇所が生体音を聴取したり記録したりすることができます。

本システムが医療用として実用化されれば、医療者が患者と直接接触することなくさまざまな場所の生体音を聴取することが可能となり、オンライン診療などに有用であると期待されます。また本システムは、さまざまな

場所の生体音を同時にかつ高音質で収集する機能を持つため、生体音に基づく体の状態の可視化など、新しい技術の研究開発に役立つと考えられます。

■背景

生体からは、心音や呼吸音をはじめとしてさまざまな音（生体音）が発生しています。これらを聴き取ることによって体の状態を把握することは聴診と呼ばれ、健診や医療の現場で長年にわたり活用されています。聴診は、体への侵襲がなく繰り返し実施できる、その場ですぐに結果が得られる、大規模な設備が不要であり在宅や介護などの居住系施設などでも実施できる、といった長所があります。その一方で、聴診は患者と医療者が1対1の接近した状況で行われますので、新型コロナウイルス感染症のような感染性疾患の場合には実施に困難を伴いま

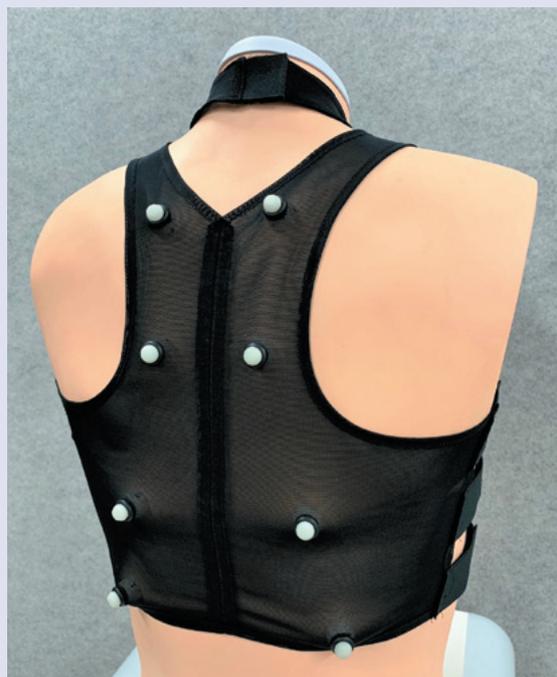


図 検査着の例

す。オンライン診療で電子聴診器を用いる場合でも操作者との近接は避けられません。患者自身が聴診器を当てることはできますが、非医療者が行う場合には位置の設定などに不便さや困難さを伴いました。さらに、高齢者人口の増大等により患者数が増加した場合に、聴診を実施する専門医の負担増にどのように対応するかも懸念事項です。

■システムの概要

本システムは、検査着、送信端末、および受信端末から構成されます。検査着には内側に多数の音響センサが設置されています。聴取の対象者がこの検査着を着用すると、それぞれの音響センサが体の各部分における音をとらえます(図)。これらの音は送信端末から、ネットワークを介して遠隔にある受信端末へと伝送されます。

受信端末では、画面上に人体の形が表示されており、音を聴きたい個所を指やマウスなどで指定することで、その個所における音(複数のセンサの信号から合成された推定音)を聴くことができます。また、各センサがとらえた音響信号波形が表示されており、波形を指定することで、その音を直接聴くこともできます。受信したすべての音響信号の記録や再生も可能です。

本システムでは、生体から生じる音響信号を網羅的に取得できるよう多数のセンサを使用します。現在の試作機では、18チャンネルの音響信号と1チャンネルの心電波形を同時に収集します。従来の聴診で主に用いられている周波数帯域だけではなく、それ以外の帯域も含め、より多くの情報を多次元的に得られるように設計されています。

本システムは、NTTの医療健康ビジョンのもとに研究開発されました。

■テレ聴診への活用

本システムが医療用として実用化されれば、遠隔での聴診(テレ聴診)が可能になると考えられます。本システムでは、患者が各自の体型に合った検査着を自ら着用

することで、音響センサが体に装着されます。したがって、スマートフォンを用いた画像通信などによって患者と医療者とがコミュニケーションをとりながら、患者と医療者とが直接接触することなく、検査着が覆う領域(例えば胸部)の聴診を行うことができると期待されます。

■AI聴診(音に基づく体内状況の分析)への活用

本システムは、さまざまな場所の生体音を同時にかつ高音質で収集する機能を持つため、日常生活における健康のセルフケアに向けた新しい技術の開発にも役立つと考えられます。

その例として、NTTでは、生体音に基づいて体内の状況を分析する「AI聴診」の研究を進めています。例えば、とらえた生体音を基にどのような体の状態であるかを文章で説明する技術もその1つです。この技術は、音の信号の時系列を、単語の系列に変換する系列変換モデルと呼ばれる手法に基づいています。これにより、異常の有無や病名といった分類の情報だけではなく、例えば病状や異常が疑われる個所の推移、疑われる異常の程度の情報などを含めて、指定した詳しさの文章を生成することができますと期待されます。

■将来の展望

本システムは、今後、使いやすさや聴きやすさのさらなる向上を図り、テレヘルス時代の診療支援の一環として、病気の予防や早期発見に資する「テレ聴診器」として早期の実用化をめざします。また、日常生活の中でとらえた生体音やその変化から、異常が疑われる個所を明示したり、その音の意味するところを文章にしたりする技術の研究をさらに進めるとともに、生体モデルやビッグデータに基づく予知・予防指標の定量評価による健康マネジメント支援など、Well-Being 向上への活用をめざします。

◆問い合わせ先

NTT先端技術総合研究所

広報担当

TEL 046-240-5157

E-mail science_coretech-pr-ml@hco.ntt.co.jp

URL <https://www.ntt.co.jp/news2020/2011/201117b.html>

音から出来事や様子を推理する

研究者 紹介

柏野 邦夫

NTTコミュニケーション科学基礎研究所 メディア情報研究部

NTT物性科学基礎研究所 バイオメディカル情報科学研究センター

近くで子どもが遊んでいる、雨が激しくなってきた、など、直接見えないことでも、音から周囲の出来事や様子が分かることがあります。このような機能は聴覚的情景分析と呼ばれます。私は、この機能をコンピュータで実現することをめざした研究に約30年前の学生時代から取り組んできました。近年関心を持つ研究者も増え、研究分野として広がりをみせています。

医療や健診の場では、直接見るできない器官の動きや体内の様子を知るために、約200年も前から聴診が行われてきました。今では高度な検査機器で体の中を目視できるようになりましたが、聴診が重要でなくなったわけではありません。聴診は場所を選ばず実施できるうえ、経験を積んだ医師には体内をイメージできるほどの情報が得られるそうです。聴診の自動化や高度化は、健診、オンライン診療、在宅や居住系施設での医療、日常の健康のセルフケアなどさまざまな場面において、むしろこれから一層活用が期待されるのではないのでしょうか。

私たちの研究チームでは、研究の蓄積と最新の知見、そして心電信号のセンシングや解析などNTTのユニークな技術も活用して、生体内の情景分析に新たに挑戦しようとしています。技術的には、結果（観測）からさまざまな手掛かりを使って原因（出来事や状態）を解明しようとする、推理小説のような問題（逆問題）です。難問ですが、医療や健康に貢献するデジタルツインとしての結実をめざし、果敢に挑戦していきます。



世界で初めて半導体ソフトエラーを引き起こす中性子のエネルギー特性を測定

NTTおよび名古屋大学、北海道大学は共同で、中性子の持つエネルギーごとの半導体ソフトエラー発生率を“連続的な”データとして実測することに成功し、その全貌を世界で初めて明らかにしました。

この「ソフトエラー発生率の中性子エネルギー依存性のデータ」は、宇宙線による半導体影響の研究・対策においてもっとも重要なものですが、これまでは飛び飛びのエネルギーでの測定値しかなく、連続的な測定データを得ることは不可能でした。本研究では、光速に近い中性子の速度を測定可能にする超高速エラー検出回路を開発し、1 MeVから光速に近い800 MeVまでの非常に広範囲なエネルギーの中性子によるソフトエラーの測定を可能としました。

今回測定に成功したソフトエラー発生率のデータは、その発生に関するもっとも基本的かつ重要なデータの1つです。このデータにより、地上のみならず、上空・宇宙・惑星などあらゆる環境下での中性子起因ソフトエラーの故障数を算出できるようになります。今後、宇宙ステーションにおける半導体信頼性の評価、半導体の材料レベルのソフトエラー対策、加速器によるソフトエラー試験、さらにはソフトエラーの発生過程シミュレーションへの適用など、さまざまな領域への貢献が期待されます。

本成果は2020年11月19日にIEEE Transactions on Nuclear Scienceにて公開されました^{(1),(2)}。

■背景

高性能な電子機器が、さまざまな分野で私たちの暮らしを支えている一方で、宇宙現象による「ソフトエラー」が増加しています。宇宙から降り注ぐ宇宙線が、大気圏にある酸素や窒素に衝突すると、中性子が発生します。この中性子が、電子機器の半導体に衝突すると、保存されたデータが書き変わる現象「ソフトエラー」を引き起こし、場合によっては社会インフラに重大な影響をおよぼす可能性があります。

■研究の成果

本研究では、光速に近い中性子のエネルギーを飛行時間法で特定するため、数ナノ秒（10億分の数秒）でソフ

トエラーを検出できる高速エラー検出回路を開発しました。実験は米国ロスアラモス国立研究所の高出力800 MeV陽子線形加速器施設において、それぞれデザインルール異なる3種類（28 nm, 40 nm, 55 nm）のFPGA（Field Programmable Gate Array）について行いました。この実験では、図1に示すようにエネルギーごとのソフトエラー発生率を連続的に高分解能で実測することができました。

ソフトエラー発生率のエネルギー依存性は、大まかには3種類のFPGAでほぼ同様の傾向がみられ、3 MeVから20 MeVで急速に増加していて、それ以上はほぼ一定のままであることが分かりましたが、詳細を見るとそれぞれ別々の振る舞いをしていることが分かります。

■技術のポイント

(1) 飛行時間法

中性子の（運動）エネルギー E は中性子の速度、すなわち、中性子がある一定の距離を飛行させたときの時間を測定することにより測定可能となります。それは特殊相対性理論によって式(1)で表され、中性子の静止質量 m_0 と速さ v に依存します（ c ：光速）。

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - m_0 c^2 \quad \text{式(1)}$$

そのため、今回の実験では、125ピコ秒（1兆分の1秒）という非常に短時間で中性子を発生させ、20 m飛行させたときの時間を測定することにより、このようなほとんど光のスピードとなった中性子エネルギーの測定を可能としました。

(2) 超高速エラー検出回路（NTT、名古屋大学、北海道大学）

ソフトエラーを発生させる中性子は非常に高速で、そのエネルギーを識別するにはナノ秒オーダの分解能でソフトエラーを検出する必要があります。しかしながら、通常のSRAM（Static Random Access Memory）などのメモリはデータを順次読み出すため、ソフトエラーを検出するのに十分なデータ（メガビットオーダ）をスキャンするには数ミリ秒（1000分の1秒）必要なため、

飛行時間法による中性子エネルギーの測定は不可能でした。そこで、FPGAを用い、ソフトエラーに起因する論理回路の誤動作を超高速で検出する回路を開発しました

(図2)。

これにより、FPGAの論理回路を構成する数十Mbitに相当する容量のCRAMに発生したソフトエラーを

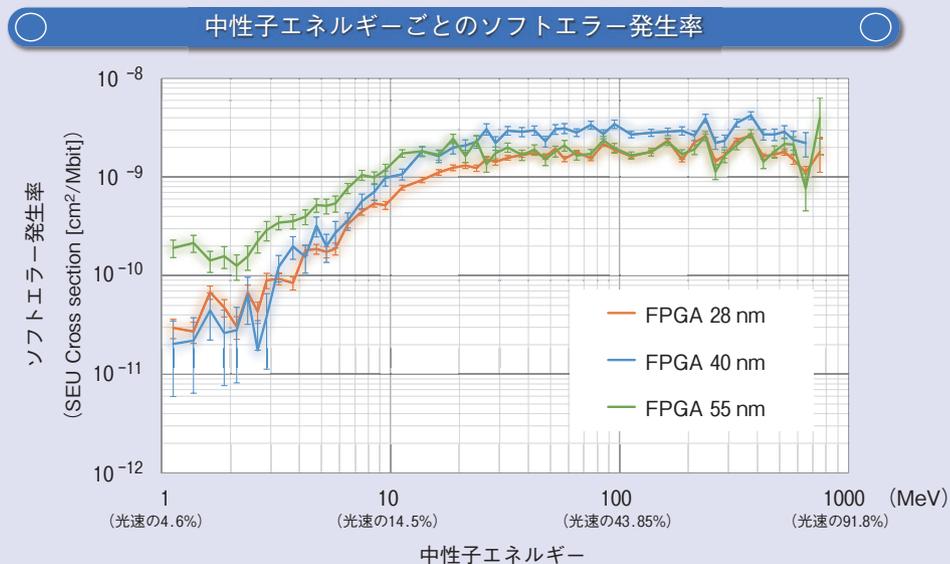


図1 今回の技術（ソフトエラー発生率の測定結果）

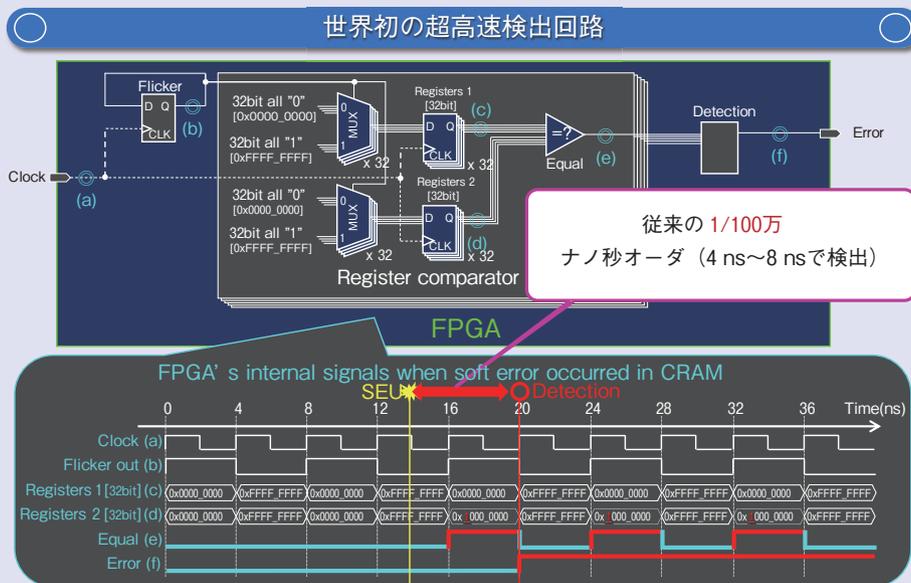


図2 超高速エラー検出回路

FPGAの動作周波数（ナノ秒オーダ）で検出することが世界で初めて可能となりました。この高速エラー検出回路を用いてソフトエラーを引き起こした中性子のエネルギーを特定しました。

(3) 高出力800 MeV陽子直線加速器施設と中性子計測技術（ロスアラモス国立研究所）

今回、ロスアラモス国立研究所の大型加速器を用いて、開発した超高速エラー検出回路での連続的なソフトエラー発生率の測定を行いました。本加速器は、陽子を光速の約90%の800 MeVまで加速し、ターゲットであるタングステンに当てることによって、800 MeVまでの、自然界とほぼ同じエネルギー分布の中性子を照射できます。また、本施設ではフィッション・チャンバーと呼ばれる特殊な中性子検出器によって照射した中性子のエネ

ルギースペクトルを測定しています。

■今後の展開

今回得られたデータにより、地球上のみならず上空・宇宙・他惑星などあらゆる環境における中性子によるソフトエラー故障数を算出できるようになりました。また、ソフトエラー試験に最適な加速器の選択や、中性子源の開発、半導体の材料レベルのソフトエラー対策、さらには発生過程シミュレーションへの応用など、さまざまな領域の研究開発を劇的に促進・向上できる可能性が広がっています。

不可能を可能にした中性子ビームの新しい使い方

佐藤 博隆

北海道大学 大学院工学研究院
応用量子科学部門 物質量子工学分野 中性子ビーム応用理工学研究室
准教授

今回の研究における重要な技術の1つが、中性子の飛行時間（TOF）分析による広エネルギー帯域にわたる中性子のエネルギー分解です。この技術自体は決して珍しいものではなく、私自身も北海道大学（北大）の電子加速器駆動パルス中性子実験施設「HUNS」において頻繁に利用しています。しかし、それは低速中性子の場合の話で、HUNSにおける高速中性子を利用したソフトエラー加速試験においては利用していません（できません）。1番目の理由は、HUNSの中性子源の長いパルス幅（4マイクロ秒）では高速中性子のTOF分解ができないためです。2番目の理由は、高速中性子の検出効率が極めて低いうえに、超高速TOF分析が求められるためです。また、そもそも中性子強度が十分ではありません。

以上のような理由から、中性子実験に慣れている私ですら難しいと感じる「高速中性子起因ソフトエラーの発生確率の中性子エネルギー依存測定」という研究課題を、NTT岩下秀徳氏を中心に解決することができました。間違いなく、発想力と実行力の賜物です。ちなみに、中性子が速すぎてTOF分析の際に特殊相対性理論を使う必要があったことに途中で気付く、岩下氏と計算法を確認し合ったことは良い思い出です。

学生時代に北大の鬼柳善明教授研究室の同期であった岩下氏から「HUNSで宇宙線対策のソフトエラー実験ができないか」と電話を受けて8年以上が経ちます。研究ステージはどんどん新たな局面を迎えており、今後まさに「宇宙全体」に貢献できそうな勢いの研究活動に発展してきています。私も微力ながら貢献していく所存です。

研究者紹介



■参考文献

- (1) <https://ieeexplore.ieee.org/document/9201514>
- (2) <https://youtu.be/nPWsmpF9qiY>

◆問い合わせ先

NTT情報ネットワーク総合研究所
企画部 広報担当
TEL 0422-59-3663
E-mail inlg-pr-pb-ml@hco.ntt.co.jp
URL <https://www.ntt.co.jp/news2020/2011/201125a.html>

米国ロスアラモス国立研究所での中性子照射実験

研究者 紹介

岩下 秀徳

NTT宇宙環境エネルギー研究所
レジリエント環境適応研究プロジェクト プロアクティブ環境適応技術グループ
主任研究員

今回測定したデータは、中性子によるソフトエラーを研究するうえで、もっとも重要な基礎データです。2013年にNTTがソフトエラーの研究を始めた当初から、この実測データが存在しないことが大きな課題でした。また、今回の測定手法である飛行時間法を可能とする超高速エラー検出回路自体は2016年に私たちが考案したのですが、実験可能な施設は国内にはありませんでした。そこで、海外で測定が可能な施設を探索し、海外研究者との調整を経て、ついに米国ロスアラモス国立研究所が保有する加速器施設で実験ができるようになったのです。

今回の実験は、中性子エネルギーごとに、ある程度ソフトエラーを発生させる必要があったため、合計で1万回以上のソフトエラーを発生させる必要がありました。そのためには、中性子線を30時間以上照射する必要があり、深夜も自動で測定ができるように測定機器を開発しました。さらに、このような大量の中性子線を照射するとFPGAや周辺回路でもさまざまな誤動作が発生します。そこで、まずは国内の加速器施設にて、どのような誤動作が発生するのかを確認し、それを復旧させるための処理について何度も確認実験を行い、ロスアラモス国立研究所にて念願の照射実験に挑みました。

全く新しい手法による測定のため、うまくデータが取れるかどうか、かなり心配しましたが無事にデータが測定できたときは感動しました。この結果は、中性子によるソフトエラー研究の基礎データとなるため、応用範囲が広く、今後、幅広い領域に貢献できるよう研究に取り組んでいきたいと思っております。



世界で初めて複雑なデータを無限の柔軟度で分類できる機械学習技術を実現

NTTは、ネットワークやグラフを含む関係データ（例：ユーザの商品購買歴やユーザ間のソーシャルネットワークを表す行列データ）解析のための機械学習技術として、事前にモデルの構造やパラメータが与えられない場合でも、これらをデータ駆動的に最適化して学習し、データをクラスタリングする手法を実現しました。

統計的機械学習技術の設計において、統計モデル・学習モデルの規模やパラメータの設定は、一般にデータ解析結果に大きな影響を及ぼす重要な問題です。しかし複雑化する現代において、データの規模も増大し、その特性も多種多様となり、モデルの規模やパラメータを、与えられたデータに合わせて適切に設定する作業を人手で行うことは膨大な時間と労力を要する難しい課題です。そこで、統計モデル・学習モデルが、モデルの規模やパラメータをデータ駆動で自動的に調整する手法の需要が高まっています。本成果は、任意のサイズの関係データを長方形分割によってクラスタリングする際に、長方形分割の候補となるあらゆる組合せパターンを生成できる新しい確率的生成モデルと、最適な長方形分割をデータ

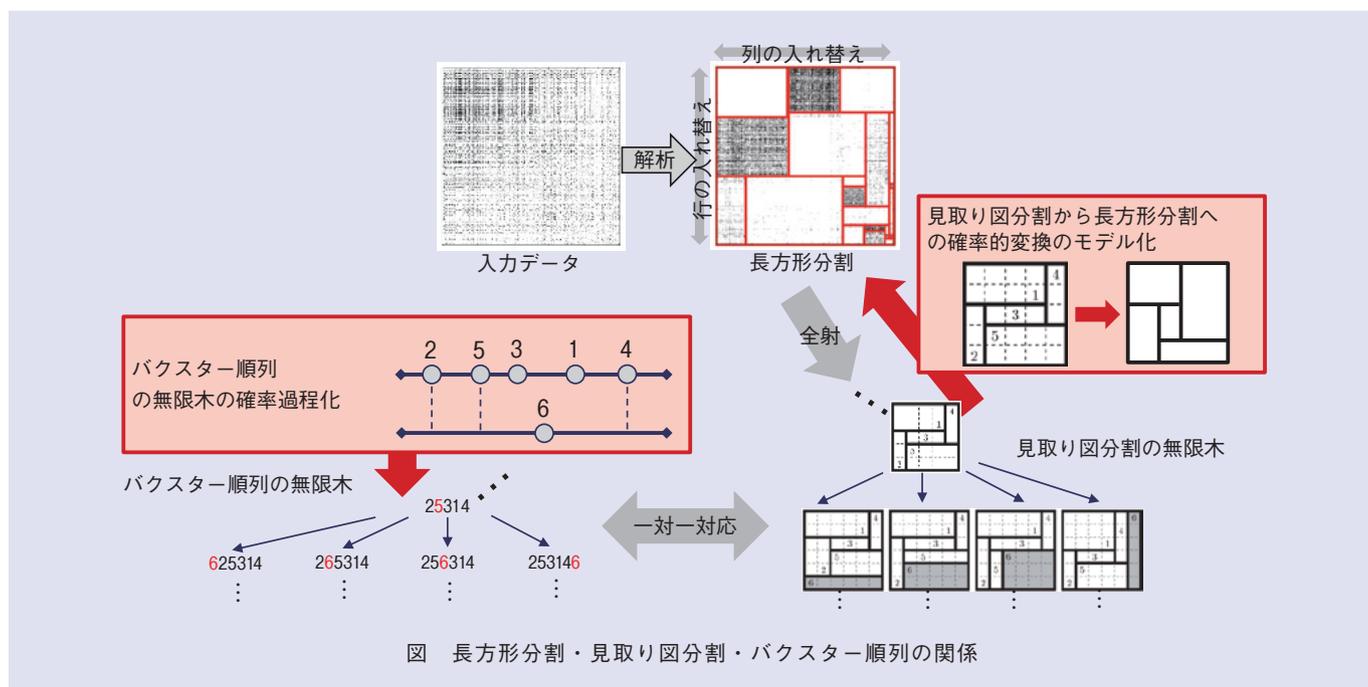
に合わせて調整しクラスタリングする効率的なデータ解析法を構築しました。今後は、本技術の研究開発を進展させることで、より柔軟で自律的な人工知能の実現に向けた要素技術として貢献していきます。

本成果は米国太平洋時間の2020年12月6日の国際会議NeurIPS (Advances in Neural Information Processing Systems) 2020のspotlight発表として口頭発表しました。また、本成果の潜在的な応用可能性の検証を目的として、関連したコードをGitHubにて公開しています。

■成 果

ネットワークやグラフを含む関係データを二次元配列（行列）として表し、その関係データから互いに類似するデータが集まっている長方形の領域（長方形クラスタ）に分割することは、データ解析の基本的な手法の一つです。

本成果では、任意のサイズのデータに対する長方形分割クラスタリングにおいて、あらゆる組合せ候補を生成



できる新しい確率的生成モデル（確率的無限長方形分割モデル）を考案し、これを用いることで、長方形クラスタの分割数やそれぞれの大きさなどのモデルパラメータを、従来よりも分割パターンに関する制約が少なく、かつ実現可能な時間内で、データ駆動的に最適化できる機械学習技術を実現しました。

従来、関係データからのデータ駆動型の長方形分割クラスタリング手法の多くでは、解析の結果得られる組合せ候補に何らかの制約を設ける必要がありました。例えば、候補を生成する際に、サイズの不規則な碁盤の目のように、格子状の領域に限定して分割する手法（regular grid partitioning）⁽¹⁾や、データを大きなサイズの長方形に分割したのちに段階的に小さなサイズの長方形に分割するような手法（階層的分割：hierarchical partitioning）⁽²⁾が提案されています。しかし、これらの手法では、生成できない組合せ候補が存在します。

一方、提案する手法では、あらゆる長方形分割の候補を生成できることが理論的に保証されています。私たちは同等の能力を持った解析技術を2014年にも提案しました⁽³⁾が、実装が非常に複雑で、多くの計算時間が必要でした。今回の手法では、2014年の手法と比較して実装が大幅に簡単になり、ベンチマークデータ課題に対する計算速度は2014年の手法を大きく上回ることが実験的に確認されています。例えば、入力データの要素数が250,000のとき、提案手法では2014年の手法に対し、同等の予測精度に達する計算時間が約半分に短縮されました。

この手法は、入力データに対して、あらゆる長方形分割クラスタリングの候補をベイズ推論することによって解析結果を得ることができます。したがって、この手法を用いたデータ解析では、事前にモデルやパラメータに特定の条件を与える必要がありません。このような事前の知識・条件設定が不要である提案手法は、AIが人間の脳のように、さまざまな状況に合わせて自律的に適応する、自律的AIモデルを実現する可能性を大きく広げたいと思います。

■技術のポイント

本成果のポイントは、二次元配列（行列）の長方形分割に対して、任意のサイズの行列に対してあらゆる長方形の組合せ候補を生成できる、新しい確率的生成モデルを発見したことにあります。その確率的生成モデルの構成にあたっては、組合せ論の世界で発見された長方形分

割の重要な性質を利用しています。

入力データにふさわしい長方形分割を見つける問題は、一見すると図形の操作を扱う幾何学的な問題のようにとらえられますが、以下の手続きによって数字列の操作を扱う代数的な問題にすり替えることができます。長方形分割（図上）において、各長方形クラスタのサイズを不問とすると、それは見取り図分割（図右下）とみなすことができます。いかなる長方形分割も、ありとあらゆる見取り図分割の中のいずれか1つに対応することが知られています（長方形分割から見取り図分割への全射が存在します）。この見取り図分割の各長方形クラスタに対して特別な手順によって数字を割り当てると、各見取り図分割に対して一意に定まるバクスター順列（図左下）⁽⁴⁾と呼ばれる特別な数字列を一对一に対応させることができます。結果として、ありとあらゆる長方形分割の候補から所望のものを見つける問題は、ありとあらゆるバクスター順列の中から所望のバクスター順列と、各長方形クラスタのサイズという2種類のパラメータを表す数字列を見つけ出す問題に置き換えることができるようになりました。

本成果では、この問題に対して確率的生成モデルを用いた統計的機械学習手法によって解決する手段を提案しました。前述の長方形分割、見取り図分割、バクスター順列の間関係を利用して、データ解析へ適用可能な長方形分割の確率的生成モデルを構成しました。私たちは、あらゆるバクスター順列を過不足なく取りつくすことのできるような確率的生成モデル（図左下）を構成し、次にバクスター順列に対応する見取り図分割から長方形分割へ変換するための確率的なアルゴリズム（図右下）を構成しました。結果として、任意のサイズのデータに対する長方形分割クラスタリングにおいて、本成果において提案する確率的生成モデルが、あらゆる組合せ候補を生成できることを理論的に保証できました。この確率的生成モデルは、モデル自身の構造やパラメータをデータ駆動的に調整して、入力された関係データを最適にクラスタリングできます。

■将来の展望

関係データに対するデータ駆動型の解析技術は、近い将来、さまざまな機械学習・人工知能技術へ積極的に導入されていくことが期待されます。例えば、ソーシャルネットワーキングサービスから得られる複雑で大量の

データの解析において、エンジニアによる学習モデルの高度な調整を補助するような活用が考えられます。また、ニューラルネットワーク深層学習における学習済みネットワークからの知識獲得や、データ・アプリケーションに最適なネットワーク構造の設計を補助する場面での利用可能性もあります。

■参考文献

- (1) C. Kemp, J. B. Tenenbaum, T. L. Griffiths, T. Yamada, and N. Ueda : “Learning systems of concepts with an infinite relational model,” Proc. of AAAI Conference on Artificial Intelligence, pp. 381-388, 2006.
- (2) D. M. Roy and Y. W. Teh : “The Mondrian process,” Proc. of Advances in Neural Information Processing Systems, 2009.
- (3) M. Nakano, K. Ishiguro, A. Kimura, T. Yamada, and N. Ueda : “Rectangular tiling process,” Proc. of International Conference on Machine learning, pp. 361-369, 2014.

- (4) G. Baxter : “On fixed points of the composite of commuting functions,” Proc. of American Mathematical Society, Vol. 15, pp. 851-855, 1964.

◆問い合わせ先

NTT先端技術総合研究所

広報担当

TEL 046-240-5157

E-mail science_coretech-pr-ml@hco.ntt.co.jp

URL <https://www.ntt.co.jp/news2020/2012/201207a.html>

環境に応じて永続的に自律する人工知能の実現をめざす

研究者 紹介

中野 允裕

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
メディア情報部 メディア認識研究グループ

私が子どものころに読んだサイエンス・フィクションにおける近未来では、しばしば人工知能が人間と共存・自律して生活している様子が描かれていました。現在の機械学習・人工知能技術の発展は、まさに子どものころに夢見たような自律的人工知能が実現される未来を予感させてくれます。実際、近年では、膨大なデータを大規模なパラメータを通して学習したモデルの中に、特定の課題においては人間よりも高い性能を示すようなものまで登場しつつあります。

私は子どものころに見たサイエンス・フィクションの世界に登場するような人工知能の実現を夢見て、自律的に環境に適用しながら未来永劫破綻することなく学習を続けられることの保証された機械学習技術の理論・応用の研究に従事しています。多様な環境への適応とは、計算機によっては無限に多くの観測データを与えられるような状況に似ています。それに伴って、モデルの表現に必要なパラメータも際限なく大きくなっていくかもしれません。それでは、データ・モデルが再現なく大きくなっていったとき、果たして人工知能はそれに伴って正しく自身のモデル学習を行っていくことはできるのでしょうか。このように、データ・モデル規模が無限に大きくなったときにもモデル学習が正常に機能するか否かを問う問題は、技術的に非常に難しい問題を含んでいます。私の研究の目標は、無限の彼方で正常に機能する機械学習モデルを実装し、未来永劫自律的に環境に適用し続けることのできるような人工知能を実現することです。



マルチテナント型物流施設「DPL市川」においてAIを活用した実証実験を開始

大和ハウス工業とNTTコミュニケーションズ（NTT Com）は、大和ハウス工業が開発したマルチテナント型物流施設「DPL市川」において、NTT Comが提供するAI映像解析ソリューション「COTOHA Takumi Eyes[®]」を活用し、物流施設で初めて施設内に設置したカメラ映像から利用者のマスク着用有無や、施設内カフェテリアの混雑度を自動で検知する実証実験を2020年12月4日より開始しました。

本実証実験では、利用者が当施設に入館する際に、「COTOHA Takumi Eyes[®]」がマスク着用の有無を判定し、マスク装着を促すメッセージを当施設入口のモニタに表示することや、共用スペースであるカフェテリアの混雑度を検知し、エリア別の混雑状況や入場を制限するメッセージをカフェテリア入口に設置されたモニタを介して利用者に伝えることで、新型コロナウイルスなどの感染症拡大防止対策としての有効性を検証します。

■「COTOHA Takumi Eyes[®]」の特長と新機能

「COTOHA Takumi Eyes[®]」は、防犯カメラなどの映像から、顔照合技術と全身照合技術を組み合わせることで、人物を検出・追跡するNTT ComのAI映像解析ソリューションです。コロナ禍の状況を考慮し、マスク着用の状態でも人物照合を可能とする機能を追加しました。この機能を応用することにより、カメラ映像からリアルタイムにマスク着用の有無を検知し、マスクをしていない人物に対して注意を促す「COTOHA Takumi Eyes[®] マスク検知機能」（マスク検知機能）を新たに提供します。

■背景

物流施設に入居されているテナント企業様は、感染症拡大の防止策をいかに講じられるかという課題を抱えています。そのような中、大和ハウス工業は、NTT Comが開発した「マスク検知機能」と、カメラ映像からあらかじめ指定したエリア内の混雑度をリアルタイムに計測し可視化する「COTOHA Takumi Eyes[®] 混雑度可視化機能」（混雑度可視化機能）を導入し、感染症対策を強化することで、テナント企業様の安全・安心に配慮したマルチテナント型物流施設の運営をめざします。

■実証実験概要

① マルチテナント型物流施設「DPL市川」の利用者のマスク着用を判定し、マスク着用推奨メッセージを表示：「マスク検知機能」を使い、当施設の入口付近に設置したカメラ映像から利用者が入館する際にマスク着用の有無を判定します。マスク未着用の場合は、同じく入口付近に設置したモニタにマスク着用を促す警告文を表示することに加え、アラート音を鳴らすことで注意を促します。

② カフェテリアへの出入りの人数を測定し、滞在人数およびエリア別混雑度の可視化と、入室を制限：「混雑度可視化機能」を使い、当施設のカフェテリア入口付近に設置したカメラの映像を元に出入りの人数をカウントします。あらかじめ設定した人数を超えた場合は、同じくカフェテリア入口付近に設置したモニタに警告文を表示することに加え、アラート音を鳴らすことで注意を促し、利用者の入場を制限します。

また、カフェテリアのエリアごとに設置したカメラの映像を元に混雑度を計測し、利用者に各エリアの混雑状況をモニタに表示します。モニタではカフェテリアのリアルタイムな映像が確認できますが、個人情報保護のため、人物はシルエット表示されます（図）。

なお、実証実験で利用するカメラ映像は、2カ月間保存・利用し、期間終了後に消去します。

■今後の展開

大和ハウス工業は、実証実験の結果を踏まえ、一部のマルチテナント型物流施設に「COTOHA Takumi Eyes[®]」を標準で採用することを検討します。また両社は、本ソリューションの継続的な改善に取り組むとともに、ウィズコロナ・アフターコロナに対応したニューノーマルなマルチテナント型物流施設の実現をめざします。今後は、サーマルカメラ連携による利用者の体温測定および発熱者の施設内における追跡や、NTT Comが提供するIoTプラットフォームと各種センサを組み合わせることで、施設内の温度管理を行う仕組みの導入なども検討し、安全・安心な場の提供に取り組みます。



図 混雑度可視化画面と入場制限画面

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーションズ

経営企画部広報室

TEL 03-6700-4010

URL <https://www.ntt.com/about-us/press-releases/news/article/2020/1203.html>

平成2年3月5日第二種郵便物認可
令和3年3月1日発行毎月1回1日発行 第33巻第3号

企画編集／日本電信電話株式会社 〒100-8166 東京都千代田区大手町1-5-1 大手町ファーストスクエア
発行／一般社団法人電気通信協会 〒101-0003 東京都千代田区ツ橋2-1-11 如水会ビルディング6階
TEL 03-3288-0608

定価(本体90円+税)