

NTT 技術ジャーナル

ISSN 0915-2318 平成2年3月5日第三種郵便物認可
令和5年4月1日発行 毎月1回1日発行 第35巻第4号(通巻409号)

4 APRIL
2023
Vol.35 No.4

特集

量子技術イノベーションに向けた取り組み

トップインタビュー

岡 敦子

NTT常務執行役員 研究企画部門長

グループ企業探訪

NTTデータ フィナンシャルテクノロジー

from NTTデータ

広がるメタバースのビジネス活用——期待と課題を探る



NTT 技術ジャーナル

4 APRIL
2023
Vol. 35 No. 4

CONTENTS

4 トップインタビュー

1つでも多くのセレンディピティを創出。
ミッションやフェーズは違っても、
「知の泉」スピリットはすべての研究所, 研究者に通じる
岡 敦子
NTT常務執行役員 研究企画部門長



8 特集

量子技術イノベーションに 向けた取り組み

- 10 量子技術イノベーションへの期待と展望
- 14 連続量光量子コンピュータに向けた光技術
- 18 超伝導量子回路に基づく量子情報技術
- 23 重力ポテンシャルセンシング網に向けた光格子時計ネットワーク技術
- 29 量子コンピュータの能力を引き出すアルゴリズムとその検証技術
- 33 量子鍵配送の高性能化に向けた取り組み
- 36 量子インターネットに向けて

40 挑戦する研究者たち

宮本 裕

NTT未来ねっと研究所 フェロー
非常識を常識に変えて
「当たり前」にするのがシステム研究。
キャパシティブランチ克服に挑み続ける



45 挑戦する研究開発者たち

安達 仁

NTTデータ 技術革新統括本部
技術開発本部 IOWN推進室
シニア・エキスパート
時流をとらえた技術の専門家として、
常に新しい何かを考え、
先を見据えて社会の方向性を意識する



50 明日のトップランナー

井田 安俊

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所
特別研究員
超高次元データで未来を拓く
「高速スパースモデリング技術」



54 グループ企業探訪

株式会社NTTデータ フィナンシャル
テクノロジー
金融・決済業務の深い知見と高い技術力で
お客さまの信頼を得る



58 from NTTデータ

広がるメタバースのビジネス活用
——期待と課題を探る

Webサイト オリジナル記事の紹介 …………… 62

5月号予定

編集後記

NTT技術ジャーナルはWebで閲覧できます。

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



本誌掲載内容についての
ご意見、ご要望、お問い合わせ先

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

本誌ご購入のお申し込み、
お問い合わせ先

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 <https://group.ntt.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2023

●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。

View from the Top

NTT常務執行役員
研究企画部門長

岡 敦子

PROFILE :

1988年日本電信電話 ソフトウェア研究所に入社。2006年NTTコミュニケーションズ ネットビジネス事業本部IPサービス部担当部長、2010年NTTナビスペース代表取締役社長、2017年NTTレゾナント取締役ソリューション事業部長、2019年NTT取締役技術企画部門長を経て、2022年6月より現職。



1つでも多くのセレンディピティを創出。

ミッションやフェーズは違っても、

「知の泉」スピリットは

すべての研究所，研究者に通じる

新しい技術の研究開発に取り組むとともに、NTTグループ各社をはじめ産業界のさまざまな分野のパートナーとともに、社会的課題の解決をめざすNTT R&D。人々が意識せずに技術の恩恵を享受できる「スマートな世界」の実現に向け邁進する岡敦子研究企画部門長に研究開発の考え方とトップとしての姿勢を伺いました。

75年の歴史を受け継ぐ

2019年以来、コロナ禍を経て2度目のご登場です。2022年には技術企画部門長から研究企画部門長となりましたが、仕事はどのように変わったのでしょうか。

2022年6月に技術企画部門長から研究企画部門長となり、研究所を指揮することとなりました。研究者としてNTTにおけるキャリアをスタートした私にとっては、R&D部門以外に籍を置いていた時代も長く、「戻っ

てきた」という感覚です。

さて、「技術企画部門」と「研究企画部門」の違いについてご質問をいただくことが多いので、まずは簡単に各部門をご説明します。技術企画部門では、NTT全体のネットワークやITなどのインフラの方針戦略を策定したり、現在の技術を用いてDX（デジタルトランスフォーメーション）を推進していくのに対して、研究企画部門はさらにその先を意識した技術を研究実用化していくことで、現在、そしてさらに将来に向けた事業や社会課題の解決へ貢献していくた

めの礎を築く部門です。

私は技術企画部門において、NTTの主要事業のベースである通信インフラの工事・保守・災害対策、スマートエネルギー事業、資材調達、次世代ネットワーク等の施策検討と推進等、グループ全体の事業の方針策定と推進。そして、ICTを活用したDX推進を主なミッションとして取り組んできましたが、その中で対峙してきた社会課題解決の重要性を実感しました。

研究企画部門長という立場になり、こうした課題の解決に研究所が生み



出す成果をもって臨む責任をひしひしと感じています。とはいえ、研究には百発百中はありませんし、2～3年後に実用化されるものもあれば、かなり遠い未来に実現する技術もあり、場合によっては、当該研究の周辺技術の発達により初めて実現することもあります。だからこそ、斬新な研究はもちろんのこと、日々の研究活動と並行して、過去から受け継がれている研究や技術を絶やすことなく継承して、変化させながら成果につなげていくような営みも大切だと思っています。

NTTグループの研究開発は長い歴史がありますね。そして、時代に合わせて再編成もなされてきたそうですね。

1948年に通信省の電気通信研究所（通研）として発足し、1952年に日本電信電話公社の電気通信研究所となり、初代所長の吉田五郎氏の「知の泉を汲んで研究し実用化により世に恵みを具体的に提供しよう」という言葉の理念に向かって、現在まで体制を柔軟に変化させつつ研究開発が行われています。私たちのような規模の研究開発部門を有する通信会社は世界で類をみないと言われていいますから、NTTの特徴の1つであり、大きな強みといえるかもしれません。

現在、NTTの研究開発体制は4つの総合研究所で構成されています。ネットワーク上で実現する革新的なコミュニケーションサービスや、未来社会予測とその実世界への

フィードバックを行う技術等の研究開発を行う「NTTサービスイノベーション総合研究所」、新たなサービスを実現する次世代情報ネットワーク基盤技術や、環境エネルギー技術等の研究開発を行う「NTT情報ネットワーク総合研究所」、世界トップクラスの光関連技術をはじめとする新原理、新部品を生み出す先端基礎研究を行う「NTT先端技術総合研究所」、そしてIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想を具現化する「オールフォトニクス・ネットワーク (APN)」、「移動と固定」・「ネットワークとコンピューティング」の融合等の技術分野横断の研究開発を行う「NTT IOWN総合イノベーションセンター」です。研究所全体では、基礎研究から応用研究まで多岐にわたる技術領域に、約2300人の研究者が研究開発に取り組んでいます。

IOWN1.0の商用化いよいよスタート

こうした盤石な研究体制で、現在、重点的に取り組まれている研究テーマをお聞かせいただけますでしょうか。

IOWN関連はもちろんですが、パートナーと組んで私たちの研究とパートナーの持つ技術を連携させて社会貢献につなげていくような取り組みに注力しています。最近の事例として、京都大学のベンチャー企業であるリージョナルフィッシュ株式会社

とともに取り組んでいる食料問題やカーボンニュートラルにかかわるサステナブルな研究開発について紹介します。

地球上を循環しているCO₂のうち34%を占めるといわれる海洋において、藻類と魚介類の食物連鎖にゲノム編集技術を適用して、海洋中に溶け込んだCO₂量を低減させる二酸化炭素変換技術の実証実験を行っています。実験をとおして、藻類の持つ形質にかかわる遺伝子を選定する手法を確立し、CO₂吸収量の増加が期待できる遺伝子の特定に成功しました。これにより、藻類が海水中に溶け込んだCO₂をより多く吸収するようになり、藻類をエサとする魚介類の身や骨、貝殻により多くのCO₂が吸着されるといった副次的な効果も期待できます。

今後は、特定された遺伝子に対するゲノム編集を実施し、CO₂吸収量の評価を実施するとともに、その他の有用形質にかかわる遺伝子も特定していきます。また、CO₂吸収にかかわる遺伝子は、植物やその他の光合成生物にも適用できる可能性がありますから、さまざまな生物における遺伝子と形質変化の関係を数値データ化し、機械学習によって発見されるパターンやルールから形質変化を予測するモデルも構築していきます。

なお、この成果はリージョナルフィッシュをはじめとするパートナーとともに構想するグリーン&フード事業において順次活用することを想定しており、人類の環境負荷低減と食料不足の解決に貢献していきます。

やはり社会貢献が大前提なのですね。ところでIOWN構想もいよいよ具現化してきましたね。

IOWN構想のコンセプトが発表されて2023年で4年となりました。NTTは1960年代から光ファイバに関する研究開発を続けており、私がNTTに入社した1980年代後半も将来的に光による技術革新がもたらされると当時の研究者はすでに気付いていました。しかし、2022年度のNTT R&Dフォーラムでもお話をいたしました。当時はまだそれを実現する技

術が追いついていませんでした。ところが2019年に『Nature』において、NTT物性科学基礎研究所が世界最小の消費エネルギーで動作する光変調器と光トランジスタを実現したことが報じられると、光技術をベースとしたIOWN構想につながり、その活動が一気に加速したと実感しています。

当初は、2030年の実現をめざしていたのですが、昨今の環境や電力等における社会課題解決に資する技術革新への期待の高まりを受けて、研究開発のピッチを上げ実現時期を前倒しています。これを受けて、インフラの整備は商用化に先駆けて始めていかないと間に合いませんから、テストベッド等の環境整備も合わせて進めています。

そして、2023年3月にはNTT東日本・西日本において、APNサービス第一弾として、IOWN1.0を商用化しました。提供を開始したAPNサービスの大きな価値は「超低遅延」です。今後は、現在開発中の光電融合デバイスを搭載した「低消費電力サーバ」を2026年度に商用化し、APNと組み合わせることにより、低消費電力、

大容量化、低遅延を達成していきたいと考えています。

また、2025年の大阪・関西万博はIOWNのショーケースとして、パビリオン出展に加え、バーチャル会場や来場者向けパーソナルエージェントの提供、そして、IOWN2.0サービスも発表する予定です。

技術の押し売りをしてはいけない

研究企画部門長として大切にされていることはどのようなことですか。

NTTの常務執行役員となり、中期経営計画等を着実に実現していく責任をこれまで以上に強く実感しています。実現の過程で発生する課題をどう解決するか、自分1人でできることは少ないですから、周囲に助けを求めつつ進めています。各総合研究所のトップと月に一度、方針や戦略を分かち合い、方向性がぶれないよう努めています。また、各研究所のオリジナリティや研究テーマを活かした研究所間の連携も増えていま

すから、こうした取り組みをいくつも生み出していきたいと考えています。

ところで、研究成果や開発した技術をどこへ応用するか、つなげていくか、私たちだけでは分からないことがありますし、私たちの技術の押し売りもしてはいけません。あくまで社会課題の解決を前提として、研究成果を事業につなげることに努めていきたいのです。

そのためにもさまざまな方との連携が重要なカギを握ります。連携にあたっては私たちをお選びいただけるように、多くはICTの専門家ではないパートナーの方々とコミュニケーションを図り、コラボレーションを企画する、そして技術についても分かりやすく説明できるように努力しています。例えば、コロナ禍を経て、久しぶりに開催したNTT R&Dフォーラムでも、より理解を深めていただくためにポップアップパネルを分かりやすく大きくする等、さまざまな改善を図っています。IOWNの構成要素の1つであるデジタルツインコンピューティングの医療健康分野の事例として、「バイオデジタルツイン」があります。心拍や血液検査結果のデータなどを入力し心臓をデジタル空間上にモデル化するというものです。これを説明する際は、現在の自身の心肺機能が平均的か、少し衰えがあるのかを示すだけでなく、未来を予想し、このまま改善しないとどのように衰えていくのかを瞬時に提示するシミュレーションを示すなど、情報の受け手が思わず自分も知りたいと思っていただける情報を提示します。このように、一般の方、医師の方などの目線や立場を意識した説明により理解を深めていただくことに努めています。

研究者、パートナーへのメッセージと今後に向けた思いをお願いします。

前述のとおり、NTTのR&Dの理念・存在意義は、吉田初代所長の言葉に集約されています。この理念の下、蓄積された「知」を世の中に還元していくことが求められていると思っています。また、私たちはNTTという1つの企業の研究所ですから、当然ながら事業貢献も必要です。そのうえで、私たちは事業を通じて社





会に貢献するというマインドやDNAをこれからもずっと持ち続けていくのです。

各研究所、研究者によってフェーズやミッションは違いますし、成果の出るタイミングも異なります。それでも、「知の泉」のマインドはすべてに通じると思います。世の中の移り変わりも激しい中で、1人でできることには限界がありますから、研究者の皆さんにはさまざまな方とコミュニケーションを図り、ひらめきやヒントを得てブラッシュアップし

ていただきたいですね。

また、多くの方に私たちと共創したいと思っていただきたいのですが、どうしてもNTTは会社が大きいのので声をかけづらいというお話も伺ったことがあります。そんなときにはNTTの研究員であれば、しっかりと研究について分かりやすくご説明できますので、ぜひお声がけください。

最後に、IOWN Global Forumは全世界から116社（2023年2月6日時点）のメンバーで世界の技術革新をめざしています。皆さんと一緒に

IOWNの名のついたプロダクトやサービスをどんどんと生み出していきたいです。

皆さんとの連携によって、1つでも多くのセレンディピティを創出したいのです。私たちの想像を超える素晴らしい価値創造や発見につなげていきたいと考えています。

（インタビュー：外川智恵/撮影：大野真也）

※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

コロナ禍を経て再会した岡部門長。相変わらず、仕事に興味の歌舞伎にとお忙しそうですが、ご苦勞を感じさせない爽やかさでどんな質問にも明快にお答えくださいました。

まず、研究企画部門長に就任された実感について伺うと、「鮭は戻らないけれど、岡は戻ってきましたよ。NTT入社的时候は研究者として一生を終えると思っていたのに、国際本部や事業会社の業務、子会社の社長等いろいろなことをさせていただいて再び研究所に戻った今、これらの経験から、研究ばかりではないさまざまな視点を持つことができラッキーですね」と微笑まれる岡部門長。そして、解釈によっては失礼にあたる質問かもしれないと思

いつ、「NTT初の女性役員」とマスメディアで紹介されることについてお尋ねすると、「私が女性初であることは事実です。報じていただくことで女性役員の存在は特異なことではないし、NTTがダイバーシティ&インクルージョンに取り組んでいるとご理解いただけるのではないのでしょうか」と答えられ、女性役員有志による「チームSelf as We」の活動をはじめ、キャリアパスや働き方についてアドバイスしてくださいました。

岡部門長のお話はとても歯切れよく、どんな話題も前向きな結論で締めくくられます。物事はとらえ方1つでストーリーが変化する。自らの歩みをどう彩るかは自分自身で決められるのだと実感したひと時でした。



特集

量子技術イノベーション に向けた取り組み

NTT先端技術総合研究所の量子関連技術の紹介として、
光量子コンピュータ、超伝導量子ビット、光格子時計、量子アルゴリズム、
量子鍵配送、量子ネットワーク技術の基礎研究を取り上げる。
本特集では、量子コンピューティングのみならず、
センシングやネットワークについても紹介する。

量子コンピュータ

光量子

超伝導量子回路

光格子時計

エラー耐性向上

Quantum Technology

量子技術イノベーションへの期待と展望 10

量子技術を取り巻く動向、およびNTTにおける量子コンピューティング、量子センシング、量子ネットワークについて、実験、理論の両面から幅広く紹介する。

連続量光量子コンピュータに向けた光技術 14

NTTがめざしている光ファイバ通信技術を基にした光量子コンピュータへの取り組みと量子光源などの光技術の動向について紹介する。

超伝導量子回路に基づく量子情報技術 18

高感度・高空間分解能な電子スピン共鳴測定装置と極低温で動作する微小な高感度温度計、および共振器中の多自由度を活かして量子誤り訂正を実施するボソニック量子ビットについて紹介する。

重力ポテンシャルセンシング網に向けた光格子時計ネットワーク技術 23

光格子時計ネットワークの要素技術を紹介し、首都圏エリアにおいて構築した超高精度光周波数基準伝送ファイバリンクと、その伝送精度評価実験について紹介する。

量子コンピュータの能力を引き出すアルゴリズムとその検証技術 29

量子アルゴリズムとそれを支える量子回路最適化技術、およびその実行の信頼性を高めるための検証技術に関する最近の成果について紹介する。

量子鍵配送の高性能化に向けた取り組み 33

NTTの最新の取り組みである多値情報を用いた量子鍵配送（高次元量子鍵配送）と、そのエラー耐性向上技術について紹介する。

量子インターネットに向けて 36

量子インターネットとは何か、実現には何が必要か、また最近の分野での取り組みについて紹介する。

Innovation

量子技術イノベーションへの期待と展望

NTT研究所では、量子コンピュータ研究がさかんとなる前の、1980年代半ばから量子情報をはじめさまざまな量子関連技術の基礎研究に取り組んできています。本特集では、最新の量子技術をめぐる世界動向とNTTにおける量子技術研究のポートフォリオを紹介いたします。なお、量子コンピューティングのみならず、量子センシングや量子ネットワークについても、実験、理論の両面から幅広く解説します。

そうがわ てつおみ
寒川 哲臣

NTT先端技術総合研究所

量子技術を取り巻く動向

第1次量子コンピュータブームは、1994年発表のショアのアルゴリズムが公開鍵暗号を基礎としたIT社会の安全性を脅かすおそれがあるという注意を喚起したのがきっかけでした。学界を中心に、さまざまな物理系での量子ビット動作の実証や量子誤り訂正理論の構築など数多くの重要な進展がありました。2010年ごろになると、コンピュータとして造り込む際の技術的困難性が広く認識されるようになり、過剰な期待は収まりつつありました。

一方で、2011年にD-Wave社が従来とは全く異なる量子アニーリング技術による組合せ最適化問題の専用マシン（量子アニーラ）を突如発表したことは関係者に驚きを与えました。2014年ごろに超伝導量子ビットの性能が大きく向上したことを契機として、Google、IBM、Microsoft等のIT企業が量子コンピュータの研究開発に本格的に参入し、第2次量子コンピュータブームが一気に盛り上がり、その後、

ベンチャー投資も増え続けるなど、ブームは今も継続しています。

量子コンピュータ、量子セキュリティ、量子センシングといった量子技術の研究開発は、安全保障の観点も加わって、熾烈な世界的競争の真っ只中にあります。2015年ごろから欧米ならびに中国が量子戦略を掲げて公的支援を大幅に拡充し始めましたが、日本としては、数年遅れたものの、2020年に「量子技術イノベーション戦略」を策定し⁽¹⁾、2022年に産業の成長機会の創

出や社会課題解決に向け「量子未来社会ビジョン」を策定しました⁽²⁾。その動きに呼応するように、2021年に産業界を中心にグローバルでの「量子技術イノベーション立国」をめざすべく「量子技術による新産業創出協議会（Q-STAR）」が設立され⁽³⁾、量子技術の社会実装の取り組みを加速させています。

量子の基本性質と応用領域

図1は、左側の私たちが暮らしてい

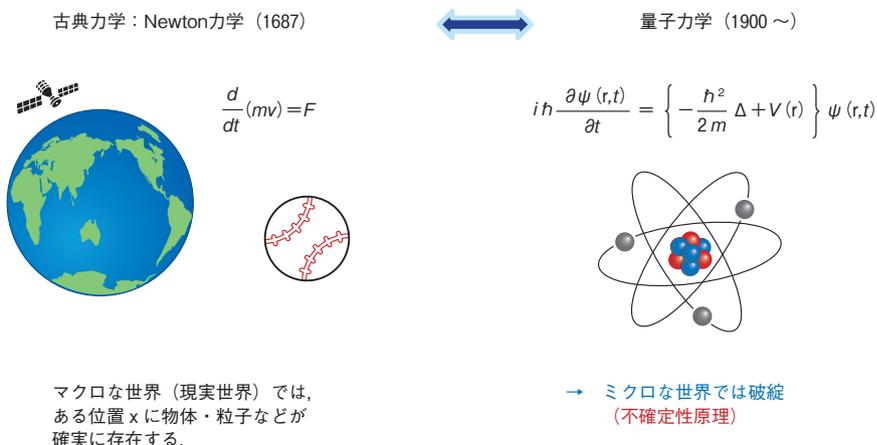


図1 現実（古典）世界と量子世界の対比



図2 量子の振る舞いの3つの特性

る世界がニュートン力学に代表される古典力学で記述され、実際に目で見て触って実感できることに対し、右側の原子や電子の振る舞いに代表される量子の世界は、量子力学の下、存在確率の波を表現する数式で定義されるため、私たちの常識や経験とはかけ離れていることを説明しています。量子は原子や電子といった極めて小さなもののほかに、光や比較的尺寸が大きい超伝導量子回路などさまざまな種類が存在しますが、たとえ種類が違っていても、図2に記載しているように、「二重性」「量子重ね合わせ」「量子もつれ」という共通した特徴を有しています。二重性とは粒子と波動の性質を同時に持つことです。量子重ね合わせは、図で上向き矢印（0に相当）と下向き矢印（1に相当）を並べて描いているように、1つの状態なのに0と1の2つの値を保有できます。量子もつれとは、2つの量子の個々の状態は未確定ながら2つの量子間の関係性だけは定まっている状態のことであり、これらの量子どうしが地球と宇宙の果てまで

離れていても、片方を測定すると瞬時に影響を及ぼし合うという現象です。この量子もつれの不可解な振る舞いに関して、まだ理論が不十分であるためだとアインシュタインが1935年にクレーム論文を発表し、その後80年間多くの理論家・実験家による論争の末、2015年に「量子もつれは正しい」と最終的な結論が出されました。なお、この論争における重要な業績に対して2022年のノーベル物理学賞が与えられています。これらの量子の不思議な特性を活用することが大容量、高精度、高信頼、省電力を実現する技術につながるという期待から、多様な分野でのイノベーションの可能性に注目が集まっています。

図3は量子の活用領域を示しており、①量子をビットとして高速計算に使う量子コンピューティング、②量子は複製できないという性質を使って安全を保障する量子通信・セキュリティ、③量子が外部環境に敏感である特性を利用して高感度な検知を行う量子センシング、④量子的振る舞いが発現する

環境を創り出す量子マテリアルや量子特有の機能を活用する量子デバイス、と大きく4つあります。

各量子技術の最近の進展状況

■量子コンピュータ

量子コンピュータは、多様なアルゴリズムが実行可能かつ汎用コンピュータとなり得る「ゲート型」と、組合せ最適化問題を解く専用ソルバーである「イジング型」の2種類に大別されます。ゲート型は、超伝導、イオントラップ方式ともに複数社から商用機が発表されていますが、まだ小規模の問題しか解けないという状況です。その他、中性原子、光量子、半導体量子ドットなどさまざまな方式もさかんに研究開発されています。一方、イジング型は、ある程度の規模の実問題を解けるレベルまで実用化が進んでいます。また、NTTで開発中のコヒーレントイジングマシン：LASOLV[®]は10万ノードの特定の組み合わせ最適化問題をデジタルマシンよりも約千倍高速に解けることを報告しています⁽⁴⁾。さらに、デジ

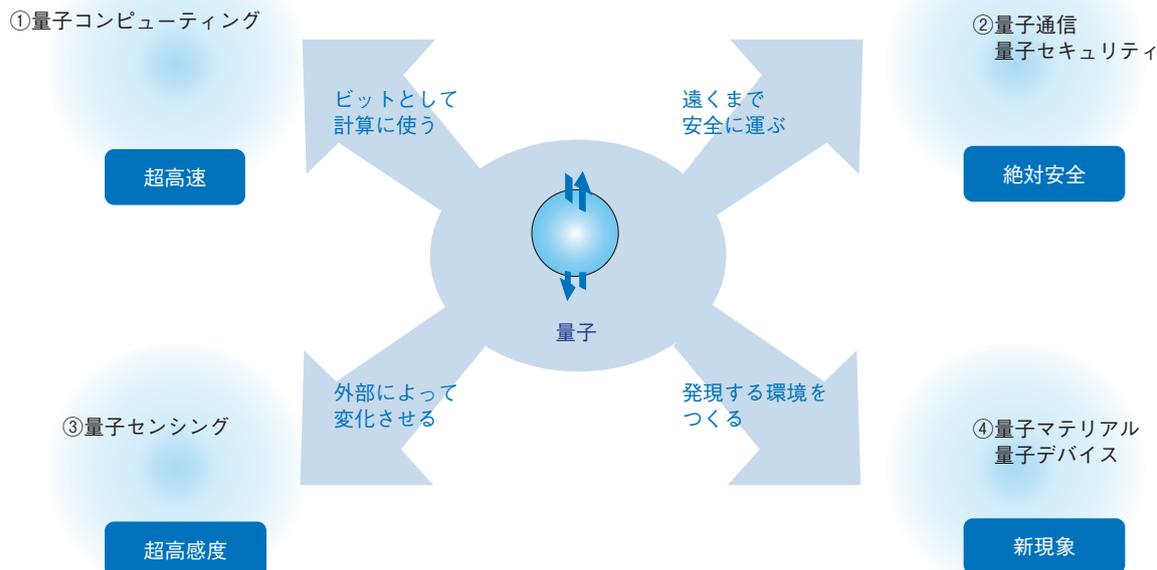


図3 量子技術適用の4つの方向性

タル技術によるアニーリング専用機も複数社から商用化され、日本の存在感が強い領域となっています。

NTTの独自指標でまとめた量子コンピュータ開発の俯瞰図を図4に示します。現状のゲート型はNISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum Computer: ノイズのためスケールしない量子コンピュータ) と呼ばれ、エラー訂正機能がないため用途が制限されます。量子エラー訂正を実装するには、多数(数10~1万個)の量子ビットを組み合わせるため、大規模な集積化や量子ビットチップ間を量子ネットワークで接続することが必要となります。さらに、冷凍機の巨大化、制御系の複雑化など技術的に困難な課題が多数存在します。このような理由から、まだ本命の量子ビットが何になるかは不透明な状況です。超伝導型は素子サイズが大きいため、1000量子ビット以上の集積化には不向きであり、さらなる高集積化に向けては半導体加工技術を使ったシリコン量子ビットが期待さ

れます。また、時間軸上に大量の量子ビットを配置できる光量子方式も検討が進んでいます。トポロジという物質固有の安定な性質に保護されてエラー訂正が不要となるトポロジカル量子コンピュータも注目されています。これらのハード開発に加えて、量子コンピュータの高速性を活かすための量子アルゴリズムの研究開発も活発に取り組まれています。

■量子通信・量子セキュリティ

日本では、総務省が中心になってTOKYO-QKDと呼ばれる量子暗号テストベッドを2010年に世界に先駆けて立ち上げたことから、量子暗号通信に関して日本は世界的に高い技術力を保有しており、ゲノム情報・電子カルテ、金融取引等の実証実験が進められています。一方、中国は上海から北京までの2000 kmの長距離量子暗号網を整備し、人工衛星を使ったさらなる長延化を行っています。量子暗号は光の最小単位である単一光子という極めて強度が弱い光を使う必要があることから、光ファイバの伝送損失のため量子暗号

の伝送距離に制限があり、実利用には100 km程度が限度と考えられます。

また、米国を中心に、量子コンピュータでも解けない暗号PQC (Post-Quantum Cryptography: 耐量子計算機暗号) の開発も進んでおり、量子暗号とPQCのような現代暗号を組み合わせ合わせたハイブリッド方式も開発されています。将来技術である量子インターネットに向けては、量子中継技術が必須であり、受信した量子状態を保持するための量子メモリが活発に研究されています。一方、量子メモリを使わない全光型量子中継方式の実証も進められています。

■量子センシング・デバイス・マテリアル

量子センシングにはさまざまな種類があり、例えば室温でも量子効果が存在するダイヤモンドNV (Nitrogen-Vacancy) センタを使って磁場や温度などを従来型センサに比べて高感度に検出することが期待されています。量子センシングを医療・創薬に応用する取り組みもさかんであり、同位体制

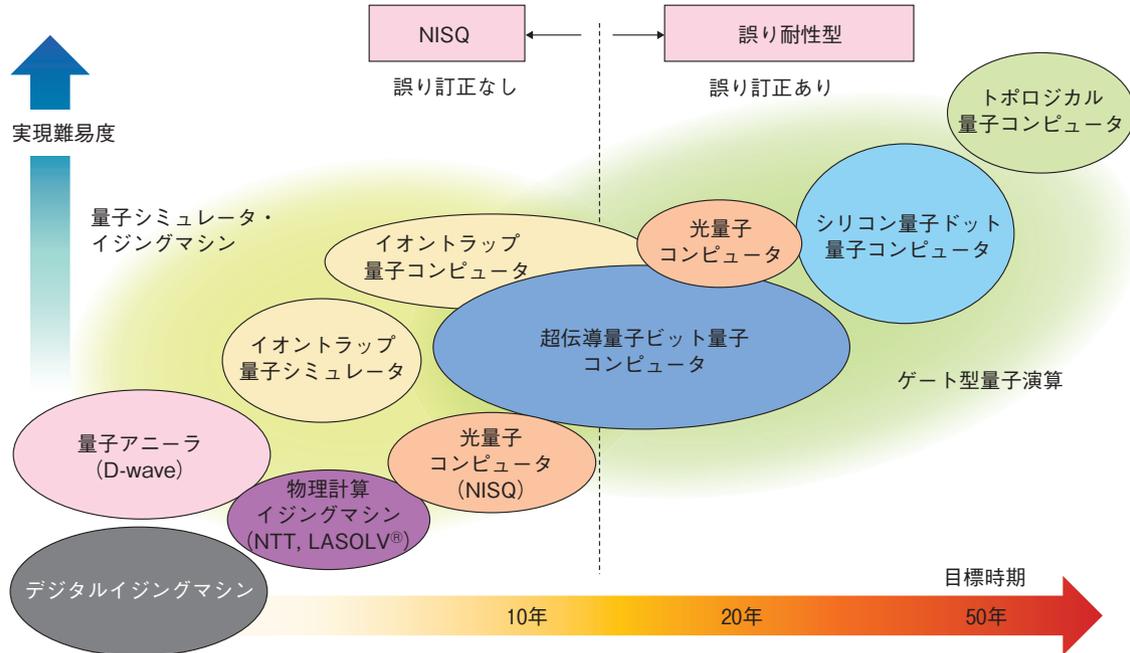


図4 量子コンピュータ開発の俯瞰図

御した元素を含む物質と核スピン超偏極技術を組み合わせることで薬剤の効能をMRIによってリアルタイムで観察する技術などが急速に立ち上がりつつあります。その他、光ジャイロよりも理論的に10桁性能が良くなる原子波干渉計による量子慣性センサや、超高精度の時計（光格子時計）の開発が進行しています。

量子デバイスとしては、単一光子・もつれ光源や高感度の光検出器、単電子デバイス、スピンゼーベック素子などが、量子材料としては、ダイヤモンドNVセンタ、量子ドット、トポロジカル材料や原子層物質などが注目されています。

量子技術の今後の展望

これまで述べたように、現在のデジタルコンピュータを計算能力で凌駕し得る量子コンピュータの実現はまだまだ先ではありますが、量子暗号、量子センシングはコスト面をクリアできれば早期の社会実装が期待されています。将来、量子コンピュータ間や量子セン

サと量子コンピュータを量子的に接続するという要請が想定されますが、それには量子インターネットと呼ばれる量子状態を伝送できるネットワークが必要です。しかし現状のインターネットの仕組みでは量子状態を扱えないため、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) オールフォトリクス・ネットワークなどの画期的なインフラの重要性がますます高まると考えられます。また量子コンピューティングは原理的にエネルギーを使わない演算であることから、IT社会のエネルギー消費の観点からも重要です。

本特集では、NTTの量子技術の代表例として、光量子コンピュータ、超伝導量子ビットによる量子情報技術、光格子時計ネットワーク、量子コンピュータの高速なアルゴリズム、量子鍵配送の高性能化、全光量子インターネットに関して詳細に解説します。

参考文献

- (1) <https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/ryoushisenryaku.pdf>
- (2) https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/ryoshimirai_220422.pdf

- (3) <https://qstar.jp/>
- (4) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2021/09/30/210930a.html>



寒川 哲臣

IOWNに代表されるように、今後、情報処理・通信技術の飛躍的發展が進む中、量子技術は、それをさらに加速する推進力となり、社会課題の解決も含めさまざまなイノベーションにつながる事が期待されています。

◆問い合わせ先

NTT先端技術総合研究所
企画部
TEL 046-240-4000
FAX 046-240-2222
E-mail science_coretech-pr-ml@hco.ntt.co.jp

連続量光量子コンピュータに向けた光技術

従来のコンピューティング技術では計算困難な問題を計算できるコンピューティング技術として量子コンピュータへの期待が高まっています。光量子情報処理技術は光子の特性を反映して常温で高速な操作が可能で、「量子もつれ」と呼ばれる量子状態を大規模に実現できるため、大規模汎用量子コンピュータを実現する技術として期待されています。本稿では、NTTがめざしている光ファイバ通信技術を基にした光量子コンピュータへの取り組みと量子光源などの光技術の動向を紹介します。

はしもと	としかず	うめき	たけし
橋本	俊和	梅木	毅伺
かしわざき	たかひろ	いのうえ	あすか
柏崎	貴大	井上	飛鳥

NTT先端集積デバイス研究所

はじめに

持続的に社会を発展させていくうえで、経済や気候変動、エネルギーなどの大規模な社会課題の解決や、これまでの知見を超えた物質や生命現象の発見など、より複雑な問題、より困難な問題を解決するために、計算機技術も持続的に発展していくことが求められます。「ムーアの法則」に代表される半導体技術も限界に近づきつつあるといわれており、新たな計算技術に対する期待が高まっている中で、量子の特性を使って計算を行う量子コンピュータは、従来のコンピュータでは現実的な時間では計算できない問題を計算可能にする計算機として注目されています。量子コンピュータにおいては、量子アルゴリズムを実行する計算の媒体として、超伝導やイオントラップや冷却原子、電子などで実現される量子性を持った物理的な状態、すなわち量子状態が用いられます。光の量子（光量子）を使った量子コンピュータも有力な候補の1つと考えられています。光

量子コンピュータの特徴として、①室温で動作すること^{*1}、②大規模な量子もつれを実現可能であること、③高速に動作可能であること、の3点が挙げられます。①は光量子本来の性質であるのに対して、②、③は光量子の持つ特性を活かして技術により実現させていく部分であり、NTTでは光ファイバ通信向けの光デバイス技術の適用により光量子コンピュータの実現をめざしています。本稿では、光量子コンピュータに向けたNTTの取り組みを紹介します。

連続量光量子情報処理と大規模な量子もつれ生成

多くの量子コンピュータでは2つ量子状態の重ね合わせを用いた「量子ビット」と呼ばれる物理的な状態を空間的に配置して、それらの状態の重ね合わせや量子的な相関（量子もつれ）を利用して量子情報処理を行います。それに対して、本稿で紹介する光量子コンピュータは、光の振幅の量子状態（光の振幅は複素数の連続値で表され

るのでそれを量子化したものは「連続量光量子」と呼ばれます）を基に、波の重ね合わせや干渉等がそのまま量子的な操作になることを利用して量子情報処理を行います。この方式では、パルス状の光量子状態を時間軸上に並べることが可能となり、空間的な配置に制限されることなく、大規模な演算が可能となります。また、大規模な演算を行うためには、量子状態としても大規模なもつれ状態が必要となりますが、光量子の波としての性質に由来してビームスプリッタ等の簡単なデバイスを使って比較的容易に大規模な量子もつれ生成が可能であることも連続量光量子を用いるメリットとなります。さらに、連続量光量子コンピュータでは、複素振幅の光の振幅の実部と虚部（複素平面上のcos成分とsin成分）を用いて表される直交位相振幅の重ね

*1 光量子のエネルギー ε を温度に換算すると $T = \frac{\varepsilon}{k_B} = 2.93 \times 10^4 \text{K}$ (k_B はボルツマン定数)であり、室温に対して十分高く安定した状態であることから室温で動作することが分かります。

合わせを用いるため、直交位相振幅変調を用いる光ファイバ通信におけるデジタルコヒーレント伝送等に用いられる多くの技術を適用することが可能となります(図1)。光ファイバ通信におけるコヒーレント伝送では、直交位相振幅変調として直交した成分(cos成分とsin成分)をそれぞれ変調して重ね合わせたレーザ光(コヒーレント光)を伝送し、局発光を干渉させて成分ごとの信号振幅を取得してデジタル信号処理により元の信号を再構成します。連続量光量子の場合も同様に直交位相振幅変調を用いますが、cos成分とsin成分の光を単純に足し合わせても量子状態の重ね合わせになりません。量子的な効果を得るためには、「スクイーズド光」と呼ばれる状態を用いる必要があります。コヒーレント光は不確定性原理によりcos成分とsin成分に対する揺らぎ(広がり)が同程度であるのに対して、広がりを意図的に偏らせたものがスクイーズド光です。図

1(b)では、この広がりを点線の楕円として表しています。このスクイーズド光を基に量子的な操作を行い計算するのが連続量光量子コンピュータです。スクイーズド光源(量子光源)から出射されたスクイーズド光のパルス(図1(b)中の球)は光ファイバ中を伝搬し、ハーフミラーとして機能するビームスプリッタにより量子光源から出力されたスクイーズド光パルスが分けられて、同時に異なるスクイーズド光パルスが重ね合わされた状態が実現されます。この状態は量子力学的にもつれた状態であり、光パルスを時間的にずらし、さらにビームスプリッタで混合を繰り返すことにより時間領域でもつれた巨大な状態が生成されます⁽¹⁾。この巨大なもつれた状態を基に、ゲート型の量子計算と同等であることが知られている測定型量子計算*2を実行します。測定型量子計算は大変興味深い計算方法ですが、ここでは連続量光量子コンピュータに向けた光技術とし

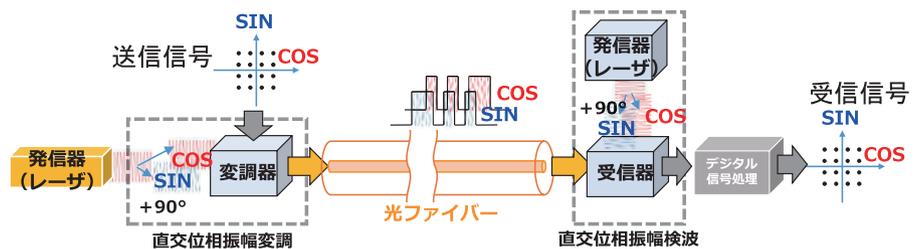
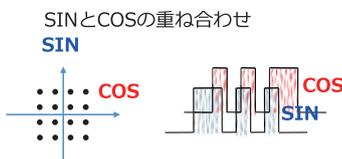
て、連続量光量子コンピュータで必要になる技術と光ファイバ通信の技術との対応関係をみていきます。

連続量光量子コンピュータへの光ファイバ通信技術の適用

光ファイバ通信と連続量光量子コンピュータの対応と相違点を表に示します。連続量光量子で任意の量子計算を行うのには、①スクイージング操作、②光の分波器(ビームスプリッタ)、③位相シフタ、④変位操作(光変調器)、⑤3次位相ゲートがあればよいことが知られています^{(2),(3)}。②~④

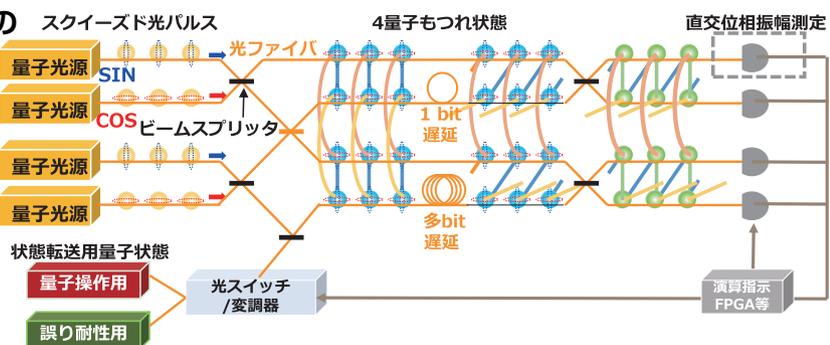
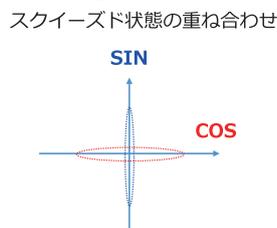
*2 測定結果を基にその後続くパルスに対して射影測定(射影方向を変化させるという)を繰り返すことで量子演算と同等の操作を実現する量子計算の手法であり、量子回路モデルで表された回路を量子ゲートで実現する計算手法と同等であることが知られています。射影測定は直交位相振幅測定で入射する状態や参照状態を変えることにより、特定の状態成分を出力として得る方法です。典型例としては「ベル状態」と呼ばれる量子もつれ状態の成分を抽出するベル測定があります。

COS, SIN 成分の振幅を複素平面上の点として表示



(a) 光ファイバ通信(デジタルコヒーレント伝送)

スクイーズド状態の複素平面状の広がり(COS,SIN成分)として表示



(b) 連続量光量子コンピュータ

図1 光ファイバ通信と連続量光量子コンピュータの構成の模式図

表 光ファイバ通信と連続量光子量子コンピュータの対応と相違点

	光ファイバ通信	連続量光子量子コンピュータ
動作	デジタルコヒーレント伝送 (大きな分散を補償)	測定型量子計算 (大きな量子もつれを使った計算)
信号や情報を表す空間	コヒーレント光(搬送波) × 直交位相振幅	スクイーズド光 × 直交位相振幅
搬送波の生成	レーザ光源(コヒーレント光源)	量子光源(スクイーズド光源)
信号生成・演算操作	直交位相振幅変調器 ビームスプリッタ 位相シフタ 変位操作(変調器)	連続量光子量子ゲート ビームスプリッタ 位相シフタ 変位操作(変調器) スクイージング操作 3次位相ゲート
信号復調・出力	直交位相振幅検波	直交位相振幅測定

※赤字は相違点

は、従来からある古典光学で用いられる素子であり、光通信においてもよく使われる光部品です。また、直交位相振幅測定は光ファイバ伝送の直交位相振幅検波と同じ構成で実現されます。残りは①のスクイージング操作と⑤3次位相ゲートであり、光子量子コンピュータを実現するために、これまでの通信デバイスの単なる延長ではない技術が必要とされます。

スクイーズについては、光ファイバ通信におけるレーザ光源のように、連続量光子量子コンピュータの出発点となる量子光源としても用いられる重要なデバイスです。スクイーズド光は通信には使われてきませんでした。スクイージングはパラメトリック増幅の1つの動作状態で、パラメトリック増幅は、位相感応増幅状態用いるとノイズを増加させない理想的な光アンプ技術として提案されています。実際の光通信システムに適用するには大きな非線形性が必要となるためこれまで実用化が困難と考えられてきましたが、NTTで研究開発を進めてきた導波路型の

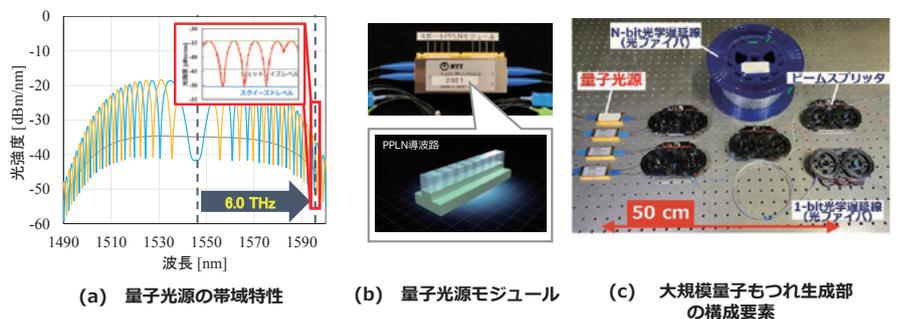


図2 量子光源モジュールとファイバ型連続量光子量子コンピュータ(大規模量子もつれ生成部の構成要素)

PPLN (Periodically Poled Lithium Niobate) 技術により大幅に特性が向上し、大容量伝送の中継に適用可能であることが実証されています⁽⁴⁾。NTTではこれをスクイージングに用いて量子光源モジュールを実現しています。図2は量子光源モジュールとファイバ型デバイスを連結して構成した連続量光子量子コンピュータの大規模量子もつれ生成部です。量子光源モジュールは導波路型のPPLNを採用しており、PPLNにより増強された非線形変換効率を、導波路構造による光の閉じ込めにより、さらに増強させて、共振器中

で光を往復させて結合長を稼ぐ必要をなくすることで6 THzという広帯域性を実現しています。また、スクイージング光の揺らぎの圧縮の非対称性を示す指数であるスクイージングレベルとしても6 dBを実現しており、共振器を用いないタイプのスクイーズとしては世界最高レベルの特性を実現しています⁽⁵⁾。この広帯域性は光ファイバ伝送と同様に多くの量子パルスの収容を可能にします。実際に、このモジュールを用いて、時間スロットに任意の量子状態をパルス生成可能であることが示されています⁽⁶⁾。最後に残された⑥の



図3 連続量光量子コンピュータのロードマップ

3次位相ゲートについては、現状の光デバイスでの実現は難しく、量子テレポーテーションを応用した非ガウス型量子測定により生成する手法など⁽⁷⁾が提案されており、今後実証されていくものと期待されています。

まとめと今後の展望

連続量光量子コンピュータを構成する要素の多くが光ファイバ通信に使われる技術が適用可能であり、新たに必要になる技術についても、光ファイバ通信で培った技術を発展させることで実現されつつあります。今後はこれらを連続量光量子コンピュータシステムとして実現していくことも重要な課題です。連続量光量子コンピュータで実行する測定型量子計算では、測定した結果を瞬時に測定器や量子状態の転送系に伝えて実行することが必要となります。また、量子アルゴリズムを実機に反映するためにはミドルウェア等も重要になってくることから、電子制御やソフトウェアといった量子や光だけに閉じない技術開発を進める必要があります。NTTでは図3に示すように、2030年に光ファイバ型の連続量光量子コンピュータの実現を、さらには、2050年に光量子コンピュータのチップの実現をめざしています。デバイスについても、特性面ではまだ十分なものとはいえない状況です。大規模な量子

もつれ状態はGKP符号と呼ばれる量子状態を用いることで誤りを修正可能であることが知られていますが、GKP符号で修正可能な誤り範囲に収め、さらに実用的なものを実現するためには現状よりも数dB高いスクイジングレベルが求められます⁽⁸⁾。それ以外にも、構成するすべての光部品における損失は量子状態に対するノイズ源となることから、究極的な低損失が求められます。これらはデバイス技術においてチャレンジングな課題ではありますが、連続量光量子コンピュータの実現という大きな目標を原動力として、光技術そのものをさらに発展させ、光ファイバ通信と同様に量子コンピュータに爆発的な発展をもたらすことをめざしていきます。

本研究成果は東京大学古澤研究室との連携によるものです。また、本研究の一部は、JST、ムーンショット型開発事業、JPMJMS2064の支援を受けたものです。

参考文献

- (1) W. Asavanant, Y. Shiozawa, S. Yokoyama, B. Charoensombutamon, H. Emura, R. N. Alexander, S. Takeda, J. Yoshikawa, N. C. Menicucci, H. Yonezawa, and Akira Furusawa: "Generation of time-domain-multiplexed two-dimensional cluster state," *Science*, Vol. 366, No. 6463, pp. 373-376, Oct. 2019.
- (2) L. Seth and S. L. Braunstein: "Quantum computation over continuous variables," *Physical Review Letters*, Vol. 82, No. 8, Feb. 1999.

- (3) S. L. Braunstein and P. V. Loock: "Quantum information with continuous variables," *Reviews of modern physics*, Vol. 77, No. 2, 2005.
- (4) T. Kobayashi, S. Shimizu, M. Nakamura, T. Umeki, T. Kazama, R. Kasahara, F. Hamaoka, M. Nagatani, H. Yamazaki, H. Nosaka, and Y. Miyamoto: "Wide-Band Inline-Amplified WDM Transmission Using PPLN-Based Optical Parametric Amplifier," *IEEE JLT*, Vol. 39, No. 3, pp. 787-794, Feb. 2021.
- (5) T. Kashiwazaki, T. Yamashima, N. Takanashi, A. Inoue, T. Umeki, and A. Furusawa: "Fabrication of low-loss quasi-single-mode PPLN waveguide and its application to a modularized broadband high-level squeezer," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 119, 251104, 2021.
- (6) K. Takase, A. Kawasaki, B. K. Jeong, T. Kashiwazaki, T. Kazama, K. Enbutsu, K. Watanabe, T. Umeki, S. Miki, H. Terai, M. Yabuno, F. China, W. Asavanant, M. Endo, J. Yoshikawa, and A. Furusawa: "Quantum arbitrary waveform generator," *Science Advances*, Vol. 8, No. 43, 2022.
- (7) K. Miyata, H. Ogawa, P. Marek, R. Filip, H. Yonezawa, J. Yoshikawa, A. Furusawa: "Implementation of a quantum cubic gate by an adaptive non-Gaussian measurement," *Physical Review A*, Vol. 93, No. 2, 022301, 2016.
- (8) K. Fukui: "High-threshold fault-tolerant quantum computation with the GKP qubit and realistically noisy devices," *Phys. Rev. X*, Vol. 8, No. 2, April 2019.



(上段左から) 橋本 俊和/ 梅木 毅詞
(下段左から) 柏崎 貴大/ 井上 飛鳥

夢のコンピュータである光量子コンピュータの実現を光ファイバ通信で培ったデバイス技術を発展させて近い将来に引き寄せて、未来に貢献できればと考えています。

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所
企画部研究推進担当
TEL 046-240-2022
FAX 046-240-4328
E-mail sende-kensui-p@hco.ntt.co.jp

超伝導量子回路に基づく量子情報技術

超伝導量子回路研究は、古くは超伝導量子干渉計による磁場センサ応用、最近では超伝導量子ビットによる量子コンピュータ開発など、幅広く展開されています。本稿では、近年発展の著しい超伝導量子回路の量子センシングへの応用例として、高感度・高空間分解能な電子スピン共鳴測定装置と極低温で動作する微小な高感度温度計を紹介します。さらに、量子計算への応用として、共振器中の多自由度を活かして量子誤り訂正を実施するボソニック量子ビットの研究を紹介します。

さいとう 齊藤	しろう 志郎	みずの 水野	こうすけ 皓介
たけなか 竹中	たかあき 崇了	といだ 樋田	ひらく 啓
かくやなぎ 角柳	こうすけ 孝輔		

NTT物性科学基礎研究所

超伝導量子回路

超伝導量子回路^{*1}は、その回路設計の自由度を活かして、基礎から応用まで幅広く研究されています。まずは、基礎研究の例を紹介します。超伝導量子回路研究の原点は、「ミクロな世界で成立する量子力学は、どこまでマクロな系に適用可能か」という根本的な疑問にあります。NTTではこの疑問に答えるために超伝導磁束量子ビット^{*2}を用いた実験を行い、量子ビットのループを、1秒間に1兆個もの電子が時計回りに流れる電流状態と反時計回りに流れる電流状態の量子重ね合わせが実現することを実証しました⁽¹⁾。その結果、電子や原子のようなミクロな系だけではなく、 μm 程度のマクロな人工構造においても量子力学が成立することを示しました。次に、情報通信研究機構との共同研究により、回路設計を工夫することで、通常原子と光の結合では到達することのできないような強結合を実現し、共振器量子電磁力学^{*3}の新しい領域を探索す

ることが可能となりました。ここでは、超伝導人工原子（超伝導磁束量子ビット）とマイクロ波光子を用いて、それぞれのエネルギーよりも両者の結合エネルギーのほうが大きくなる深強結合領域を実現し、これまでにない物理現象を観測しました⁽²⁾。

このように基礎物理研究において新境地を開拓してきた超伝導量子回路ですが、その応用もさかんに研究されています。もっとも有名な例は、Google、IBM、中国科学技術大学、理化学研究所などが開発を手掛けている超伝導量子コンピュータです。ここで利用される超伝導量子回路はトランズモンと呼ばれる量子ビットです。トランズモンは外部磁場に対して遷移周波数がほとんど変化しないため、コヒーレンス時間^{*4}が長く、量子コンピュータの構成要素に適しています。一方、超伝導磁束量子ビットは外部磁場に対して遷移周波数が大きく変化するため、磁場センサへの応用が期待されています。また、遷移周波数の制御性を利用して、D-Waveや産業技術総合

研究所などでは量子アニーラ^{*5}への応用も進められています。

本稿では、量子センサの例として磁束量子ビットをベースにした局所電子スピン検出とハイブリッド温度計を紹介します。さらに、トランズモンを補

*1 超伝導量子回路：量子力学で記述される回路素子を含む超伝導回路。超伝導量子回路を構成する回路素子としてはジョセフソン接合、インダクタ、キャパシタなどが挙げられます。ジョセフソン接合は極めて薄い絶縁膜を2つの超伝導体で挟んだ構造。超伝導体の位相に対して非線形な超伝導電流が流れるため、超伝導量子回路における非線形素子として利用されます。超伝導量子ビットにおいては、超伝導体としてアルミニウム、絶縁膜として酸化アルミニウムが多く利用されます。

*2 超伝導磁束量子ビット：複数のジョセフソン接合を含む超伝導ループで構成される超伝導回路で、適切な磁場バイアスをかけることで時計回りの電流状態と反時計回りの電流状態の2つの状態を量子2準位系として扱うことができます。

*3 共振器量子電磁力学：共振器中に閉じ込められた光と原子の相互作用を記述する量子論。超伝導量子回路からなる人工原子と共振器中のマイクロ波が相互作用する系を記述する場合は、回路量子電磁力学と呼ばれることもあります。

*4 コヒーレンス時間：量子ビットが量子情報を保持することのできる時間。

*5 量子アニーラ：規模が大きくなると現在のコンピュータでは解くことの難しい最適化問題を量子力学の性質を利用して解く装置。

助量子ビットとして用いる新しいタイプの量子ビット（ボソニック量子ビット）の展望を述べます。

磁場センサ

超伝導磁束量子ビットは、量子準位間の遷移周波数を測定することにより、ループを貫く磁場の変化を高感度に検出することができます。後述のように、この磁場センサは、少数の電子スピンのつくり出す磁場を検出する感度を有しています。さらに、磁束量子ビットのループサイズは数 μm 程度であり、高空間分解能な磁場測定も可能です。そこで、NTTでは高感度・高空間分解能な電子スピン共鳴（Electron Spin Resonance：ESR）測定装置の研究を開始しました。

ESRは、物質中でペアを組まない電子（不対電子）の情報を得ることができるため、材料探索、物性評価、創薬、医療分野において不可欠な分析手法です。通常のESRでは、体積が数mL程度のスピン試料を空洞共振器（キャビティ）中に設置し、キャビティの共振周波数でのマイクロ波応答を測定します。キャビティと電子スピン1個の相互作用が弱いため、この手法によりESR信号を観測するためには、試料中に 10^{13} 個程度の電子スピンの含まれている必要があります。また、ESR信号はスピン試料全体を平均化したものとなり、局所的な情報を得ることはできません。

一方、超伝導量子回路を用いた局所ESR測定装置は、磁束量子ビットや超伝導量子干渉計〔Superconducting QUantum Interference Device：SQUID（SQ）〕などの「センサ」とその情報を取り出す「読み出し回路」から構成されています（図1）。電子スピン試料にマイクロ波を照射すると、スピンのつくり

出す磁場が変化し、この変化をセンサが検出します。ここでは、センサ制御用の μT 程度の磁場 B_{\perp} と電子スピン偏極用のmT程度の磁場 B_{\parallel} を印加しています。電子スピン検出に共振器を使わず、広帯域なマイクロ波ラインからマイクロ波を照射するため、測定可能な周波数領域に制限がありません。すなわち、周波数と磁場 B_{\parallel} を掃引しながら広いパラメータ領域でESRスペクトルを測定することができ、測定対象からより多くの情報を得ることが可能です⁽³⁾。

次に、局所ESR測定の性能指数向上に向けたこれまでの取り組みを紹介します。本研究開始当初は、磁場センサとしてSQを用い、読み出し回路にSQのスイッチング読み出し回路（SW）を適用することにより、光学結晶（ Y_2SiO_5 ）中のエルビウム由来する電子スピンの感度 10^6 スピン/ $\sqrt{\text{Hz}}$ で検出することに成功しました⁽⁴⁾。その後、磁場センサ部分をSQから磁束量子ビット（Flux Qubit：FQ）に置き換え、読み出し回路をSWからジョセフソン分岐増幅器*⁶のスイッチング読み出し回路（JBA）に変えることで感度が約5桁改善し、20スピン/ $\sqrt{\text{Hz}}$ を達成しました⁽⁵⁾。また、検出体積は、磁場センサ部分のループサイズを小さくすることで、150 fLから6 fLまで低減することに

成功しました。これらの結果を、他研究グループの2次元超伝導共振器（RES）を用いたセンサの性能指数とともに図2に示します。

温度センサ

ナノダイヤモンド中の電子スピン集団を温度計として利用し、磁束量子ビットを電子スピン検出器として利用することで、超小型温度計を実現し（図3）、極低温における温度を精密に測定することに成功しました⁽⁶⁾。

小型の温度センサは熱容量が小さく被測定系から温度計に流れ込む熱量が小さいため、応答速度が速く、被測定系への影響を抑えた測定が可能です。また、温度測定の空間分解能を上げることができるので、微小領域の温度の空間分布を測定するような新たな応用も期待されます。しかし、温度センサの小型化と高感度化の両立は難しいこ

*6 ジョセフソン分岐増幅器：ジョセフソン接合を含む共振器は、接合の非線形性のために双安定状態を示します。この状態を利用し、微小な信号を増幅するデバイスをジョセフソン分岐増幅器と呼びます。磁束量子ビットを読み出す際は、量子ビットの状態に応じて共振器の終状態が異なることを利用します。SQUIDのスイッチングを用いた読み出し回路と異なり、ジョセフソン分岐増幅器を用いた読み出し回路では、共振器の終状態が電圧を発生しないため、発熱を抑えるための冷却時間を必要としません。その結果、短い周期での繰り返し測定が可能となり、平均化により信号の精度が向上します。

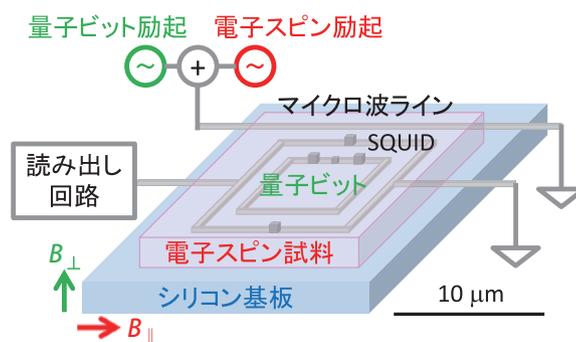


図1 局所ESR測定装置

とが知られています。なぜならば、温度センシングでは温度計を構成する物質の物理量の温度変化を測定しますが、温度計を小型化すると物質の量が減り、測定感度が低下するためです。この問題を解決するために、磁束量子ビットとナノダイヤモンド中の常磁性スピンを結合させたハイブリッド系による量子センシングを実現しました(図3)。

ナノダイヤモンド中にはNV中心*⁷やP1中心*⁸をはじめとしたさまざまな種類の欠陥が存在し電子が束縛されています。この電子はスピンを持ち、外部から磁場を印加するとスピン状態に応じてエネルギーが変化するゼーマン分裂が生じます。電子スピン系のエ

ネルギー準位は磁場に加えて、原子核スピンとの超微細相互作用やスピンの1以上の場合に現れる磁気異方性のエネルギーによって決まります。熱平衡状態になるとそれぞれのスピン状態の占有率は温度とエネルギーによって決まるため、ナノダイヤモンドは温度に依存した磁化を生じます。この磁化の変化が、磁束量子ビットを貫く磁束の変化として測定されます(図3)。磁束量子ビットの磁場感度を温度感度に換算した結果、希釈冷凍機の最低温度9.1 mKにおいて、1.3 $\mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$ という高感度な性能指数が確認されました。

各種温度計の性能指数を比較すると(図4)、本成果が小型かつ高感度な温度計を実現していることがわかりま

す。一般的に利用されている抵抗温度計は、全温度領域において温度計を校正する必要がありますが、本温度計は、測定している磁化の温度変化が理論的に予測できるため、ある1点の温度において校正するだけで全温度領域を測定することができます。小型の温度計としては単一量子ドットを用いたセンサもありますが、本温度計は格子温度の測定ができるという利点があります。また、本温度計で測定可能な温度は極低温ですが、温度計の自己発熱や大きな熱容量による応答の遅さ等のために正確な温度測定が難しい極低温下での温度測定に新たな技術として貢献すると期待されます。

ボソニック量子ビット

超伝導量子コンピュータの研究開発は、2019年にGoogleから53量子ビットプロセッサ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」の発表があり⁽⁷⁾、2022年には、IBMが433量子ビットプロセッサを発表するなど、日進月歩で進展しています。しかしながら、実用的な誤り

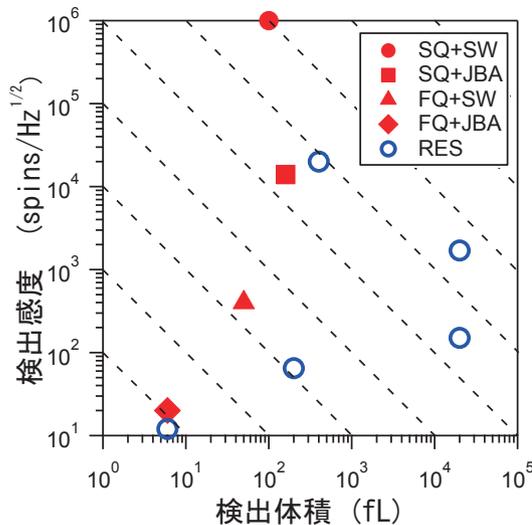


図2 局所ESR測定装置の性能指数

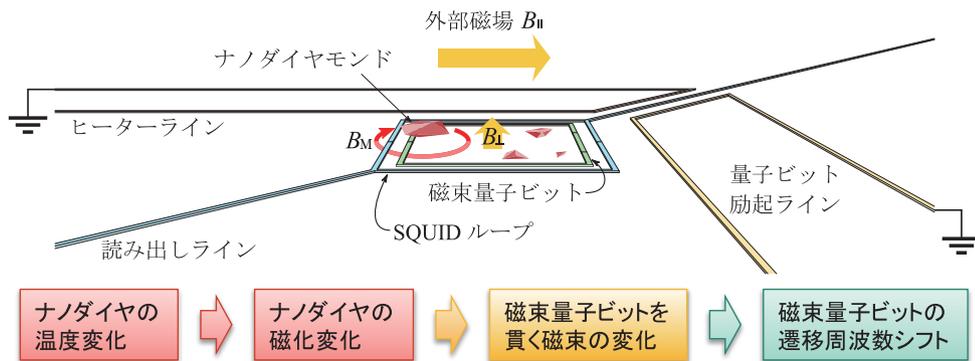


図3 ハイブリッド温度計

*7 NV中心：ダイヤモンド中の炭素を窒素が置換し、その窒素と、炭素が欠損した空孔とが隣り合った複合欠陥をNV中心と呼びます。ダイヤモンドにピンク色に近い色を生じさせる色中心です。

*8 P1中心：ダイヤモンド中の炭素を窒素が置換した欠陥をP1中心と呼びます。ダイヤモンドが黄色味を帯びる原因となる色中心です。

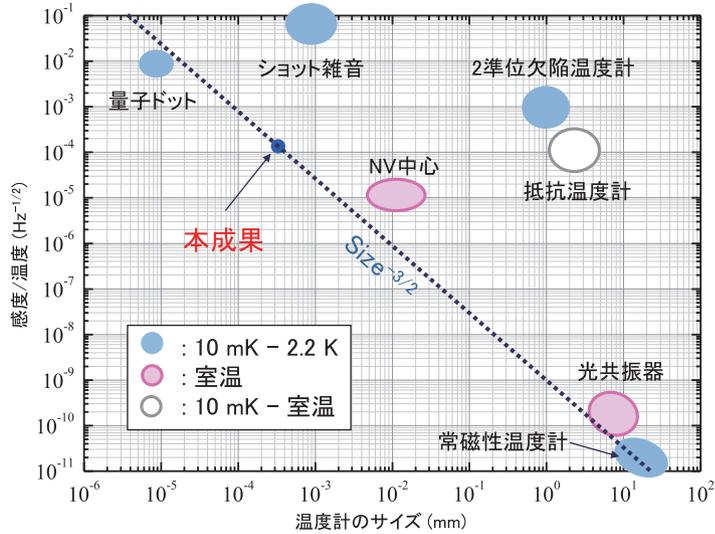


図4 温度計の性能指数

耐性型汎用量子コンピュータを実現するには膨大な数の量子ビットが必要とされています。これは、量子ビットが外部ノイズに弱くエラーが頻繁に発生するため、量子誤り訂正用に冗長な量子ビットが必要になるためです。例えば、2048ビットの数を因数分解するために2000万個の量子ビットが必要という試算があります⁽⁸⁾。現在のデザインでは、チップ上に配置可能な量子ビット数は1000個程度であり、それ以上はチップ間配線等の新しい技術が必要となります。また、膨大な数の量子ビットを制御するための高周波配線や冷凍機技術にもブレークスルーが必要となります。

この量子ビット数の問題を解決し得る技術として注目されているのがボソニック量子ビットです。ボソニック量子ビットでは、超伝導キャビティ中の原則、無限にあるエネルギー準位に量子情報をエンコードすることにより、その冗長性を利用して量子エラー訂正を行います。記憶キャビティ中に複雑な量子状態を準備するために、トランズモンを補助量子ビットとして利用します。さらにトランズモンの状態を読み出すための共振器も必要です。ボソ

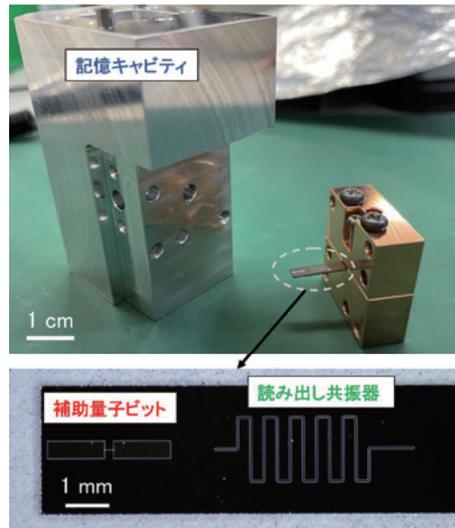


図5 ボソニック量子ビットの構成要素

ニック量子ビットの構成要素を図5に示します。各構成要素（記憶キャビティ、補助量子ビット、読み出し共振器）の周波数と要素間の結合強度を注意深く設計し（表）、記憶キャビティ中の光子数状態^{*9}を識別することに成功しました（図6）。この結果は、各光子数状態にアクセスし、複雑な量子状態を準備するための第一歩となります。今後、記憶キャビティ中にボソニック量子ビットをエンコードしていく予定です。

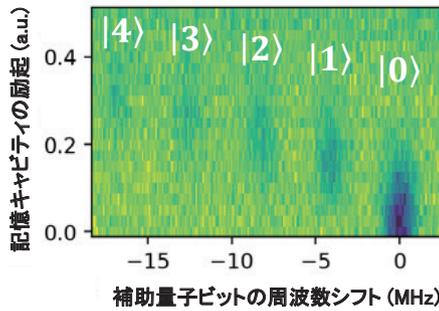
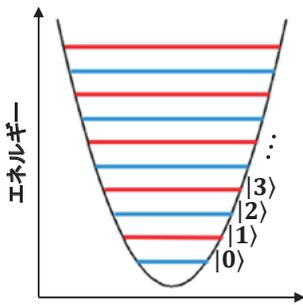
今後の展開

本稿では、高度に発展した超伝導量子回路の量子情報技術への応用として、局所ESR測定装置、超小型温度計、およびボソニック量子ビットを紹介しました。

*9 光子数状態：キャビティ中にマイクロ波光子がn個存在する状態を光子数状態と呼び、|n>と表します。マイクロ波で記憶キャビティを励起すると、コヒーレント状態と呼ばれる光子数状態の重ね合わせ状態が現れ、単一の光子数状態を準備することはできません。光子数状態を準備するためには、補助量子ビットの非線形性が必要となります。

表 ボソニック量子ビットのパラメータの設計値と実測値

(MHz)	設計値	実測値
記憶キャビティ (S)	4419	4425
補助量子ビット (A)	5368	5531
読み出し共振器 (R)	7534	7400
Aの非線形性	129	152.3
SとAの結合強度	2.06	4.2
AとRの結合強度	0.34	0.32



(a) 記憶キャビティ中の光子数状態

(b) 記憶キャビティを励起した際の補助量子ビットのスペクトル

図6 記憶キャビティ中の光子数状態の観測

局所ESR測定装置においては、長寿命磁束量子ビット⁽⁹⁾や量子電磁力学を応用した読み出し回路を用いて、さらなる感度向上を進め、単一電子スピン検出感度をめざします。測定対象に関しても、固体電子スピン試料に限らず、ニューロンや株化細胞などの生体電子スピン試料の測定を進める予定です。

ボソニック量子ビット研究の当面の目標は、ボソニック量子誤り訂正コードの一種である、binomial (1,1) コード^{*10}を超伝導キャビティ中に実装することです。その後、エラー訂正を行い、キャビティの寿命よりも長寿命な

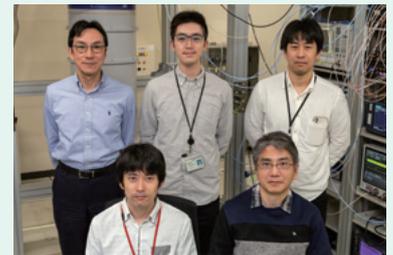
ボソニック量子ビットの実現、すなわちbreak-even pointの達成をめざします。

■参考文献

- (1) 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.
- (2) 齊藤・角柳・Ashhab・吉原・布施・仙場: “光子と人工原子から成る安定な分子状態を発見,” NTT技術ジャーナル, Vol.29, No.3, pp.67-71, 2017.
- (3) H. Toida, Y. Matsuzaki, K. Kakuyanagi, X. Zhu, W. J. Munro, H. Yamaguchi, and S. Saito: “Electron paramagnetic resonance spectroscopy using a single artificial atom,” Commun. Phys., Vol.2, 33, March 2019.
- (4) H. Toida, Y. Matsuzaki, K. Kakuyanagi, X. Zhu, W. J. Munro, K. Nemoto, H. Yamaguchi, and S. Saito: “Electron paramagnetic resonance spectroscopy using a direct current-SQUID magnetometer directly coupled to an electron spin ensemble,” Appl. Phys. Lett., Vol.108, 052601, Feb. 2016.
- (5) R. P. Budoyo, K. Kakuyanagi, H. Toida, Y. Matsuzaki, and S. Saito: “Electron Spin Resonance with up to 20 Spin Sensitivity Measured using a Superconducting Flux Qubit,” Appl. Phys. Lett., Vol. 116, 194001, May 2020.
- (6) K. Kakuyanagi, H. Toida, L. V. Abdurakhimov, and S. Saito: “Submicrometer-scale temperature sensing using quantum coherence of a superconducting

qubit,” New J. Phys., Vol.25, 013036, Feb. 2023.

- (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. Zalcman, H. Neven, and J. M. Martinis: “Quantum supremacy using a programmable superconducting processor,” Nature, Vol.574, pp.505-510, Oct. 2019.
- (8) C. Gidney and M. Ekerå: “How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits,” Quantum, Vol.5, p.433, 2021.
- (9) Abdurakhimov・Mahboob・樋田・角柳・齊藤: “ボソニック量子計算に向けた超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.



(後列左から) 齊藤 志郎/ 水野 皓介/
竹中 崇

(前列左から) 樋田 啓/ 角柳 孝輔

超伝導量子回路の適用範囲の広さと、その奥深さを感じていただくと幸いです。これからも基礎から応用まで守備範囲を広く取り研究を進めていきます。

◆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

*10 binomial (1,1) コード: ボソニック量子誤り訂正コードの一種。比較的単純なコードで、論理状態はキャビティ中の光子数状態を用いて $|0\rangle = (|0\rangle + |4\rangle)/\sqrt{2}$, $|1\rangle = |2\rangle$ と定義されます。補助量子ビットを用いると、キャビティ中の量子状態を保ったまま、光子数の偶奇性を測定することが可能です。測定された偶奇性が奇数の場合は光子ロスが起きたと見なし、光子を追加することで量子誤り訂正が可能となります。

重力ポテンシャルセンシング網に向けた 光格子時計ネットワーク技術

光格子時計は、セシウム原子時計を桁違いに上回る驚異的な周波数精度を実現しており、地表のわずか1 cm程度の高度差に相当する重力ポテンシャルの量子センシングを可能とします。複数の光格子時計を光ファイバで相互接続する光格子時計ネットワークは、精度1 cmレベルの水準点や地殻変動の日常監視など、新たなインフラストラクチャへの展開が期待されています。本稿では、光格子時計ネットワークの要素技術を紹介し、首都圏エリアにおいて構築した超高精度光周波数基準伝送ファイバリンクと、その伝送精度評価実験について紹介します。

光格子時計とは

光格子時計は、「光のかご（光格子）に捕まえた原子」における「光波長領域の電子遷移」を時計の刻み（周波数）の基準として参照した世界最高精度の原子時計*¹のことを指し、2001年に東京大学の香取秀俊教授によって提案されました⁽¹⁾。その時間精度は、現時点で“300億年に1秒ずれる”レベルにまで到達しており、一般的なクォーツ時計が“1日で1秒ずれる”精度であることを考えると、光格子時計の途方もない正確さが実感できます。一般的に、時計の精度は、（周波数の不確かさ Δf ）/（時計の周波数 f ）で評価され、現在実現されている光格子時計の精度は 1×10^{-18} となります。現在の私たちの時間は、セシウム原子時計を基準として定められており、世界の“1秒”は、“セシウム原子が9,192,631,770回振動”するのに要した時間と定義されています。現在のセシウム原子時計の典型的な精度は、 $1 \times 10^{-15} \sim 1 \times 10^{-16}$ 、すなわち“3000万年に1秒ずれ

る”レベルです。光格子時計は、すでにその精度を2～3桁も上回っていることから、次世代の「秒」の定義の有力候補として世界中で研究されています。光格子時計の仕組みを図1に示します。光格子時計の心臓部は、“魔法波長”と呼ばれる特別な波長でつくられた“光格子”にトラップされた、極低温（～1 μ K）まで冷却された原子です。量子力学によれば、原子を構成する電子は、“共鳴周波数”と呼ばれる特定の周波数でのみ電磁波を吸収（電子遷移）することが知られています。この共鳴周波数にぴったり合うように、レーザー発振器の周波数をコピー（安定化）して、読み取ることができるようにした装置が光格子時計です。

例えば、原子としてもっともよく使われるストロンチウム（Sr）を例にとると、共鳴周波数は、429 228 004 229 872.99 Hzであり、波長にするとおよそ698 nmに相当します。この共鳴周波数は、原子を取り巻くさまざまな環境（温度、密度、電場、磁場など）との相互作用が全くないと仮定した場合、極め

て正確であり、周波数の基準となります。しかし、実際は容易に影響を受け、環境の揺らぎによって、本来全く環境の影響を受けない場合に期待される周波数の値から共鳴周波数は揺らいでしまいます。“光格子”^{*2}は、光の干渉によって多数のかごをつくり、その1つひとつのかごに極低温に冷却した原子を1つずつ捕まえることで、環境の影響を可能な限り抑えるようにするためのものです。環境の揺らぎを抑えた多数の原子を同時に計測することにより、原子の持つ本来の共鳴周波数を短い時間で精度高く読み取ることが可能とした点が光格子時計のもっとも優れた特徴です。

*1 原子時計：原子の共鳴吸収周波数（決まった周波数の電磁波を吸収・放射する性質もしくはその周波数）を周波数基準として用いた標準周波数発生器のことを指します。周波数は時間の逆数であることより、時間基準と同等であるという意味で時計と表現します。SI単位系における秒の定義も、この原理に基づく原子時計を用いています。

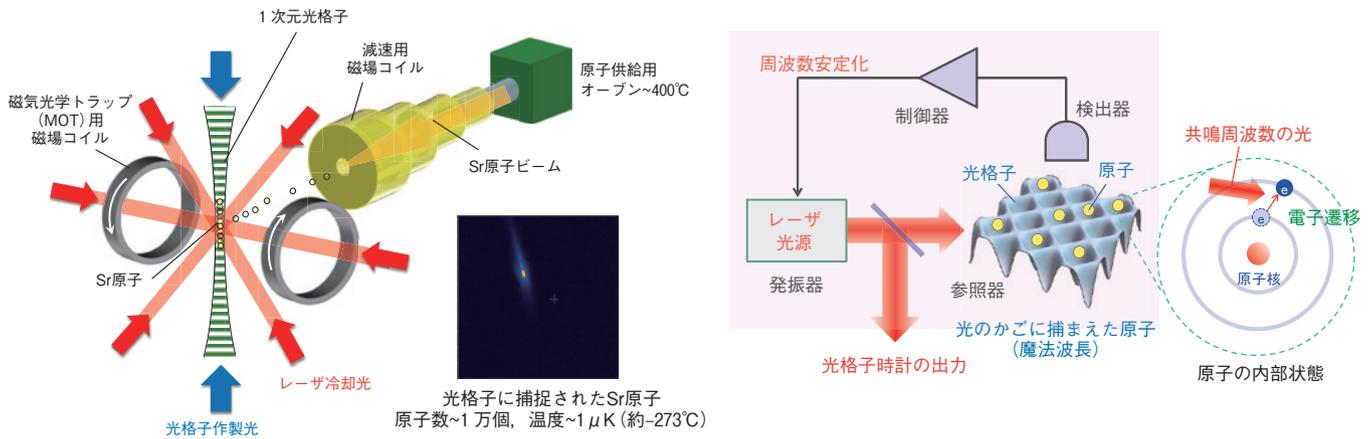
*2 光格子：対向するレーザーの光によって定常波をつくり出し、その定常波を格子状に配列させ、格子状の周期的ポテンシャルを実現したものです。

おぐり 小栗	かつや 克弥 ^{†1}	あかつか 赤塚	ともや 友哉 ^{†1}
いまい 今井	ひろみつ 弘光 ^{†1}	はしもと 橋本	としかず 俊和 ^{†2}
そうがわ 寒川	てつおみ 哲臣 ^{†3}		

NTT物性科学基礎研究所^{†1}

NTT先端集積デバイス研究所^{†2}

NTT先端技術総合研究所^{†3}



(a) 光格子による原子の捕捉：真空中に高温(約400℃)で原子ビームを放出し、レーザーによる減速・冷却を行います。磁場も利用して、約10万個の原子を1か所に集めた後、光格子に原子1つひとつを捕捉し、約1万個の原子をお互いの距離を十分に離して配列させます。写真はストロンチウム(Sr)原子の例です。

(b) 時計周波数の読み取り：光格子に捕まえた原子の共鳴周波数(時計周波数)にぴったりと合うように、レーザー光源の周波数を安定化させ、出力させます。図は分かりやすさのため2次元の光格子として描いています。

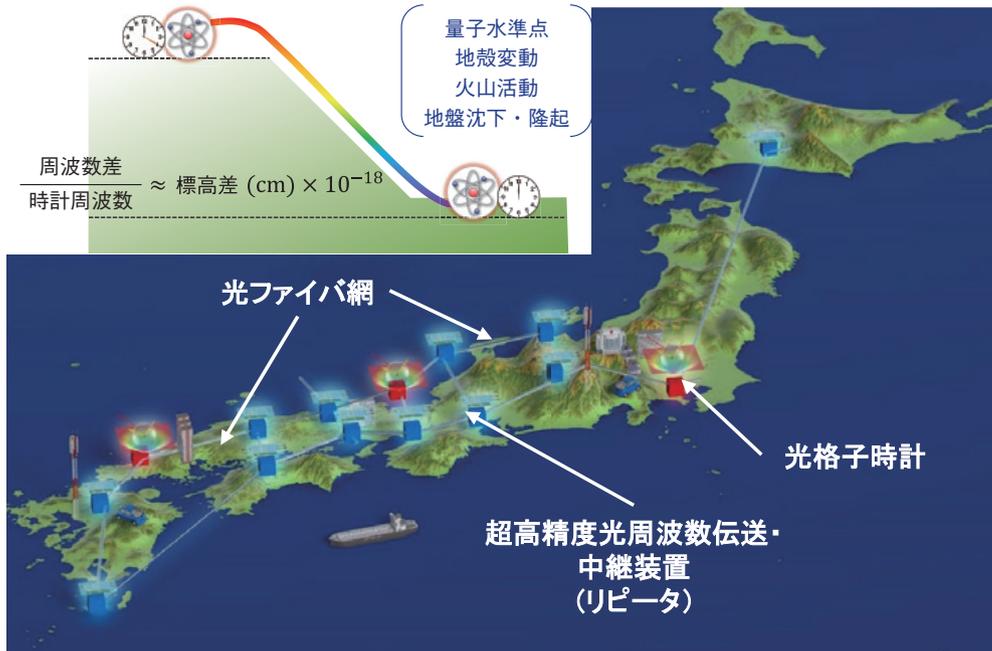
図1 光格子時計の仕組み

光格子時計のネットワーク化による相対論的測地網への期待

アインシュタインの一般相対性理論によれば、異なる高さで置かれた2台の時計の進み方を比較すると、高いほうの時計は地球の重力ポテンシャルの値が大きく、速く時を刻む(周波数が高くなる)ことが知られています。この原理を用いて、全国的に複数の遠隔地に設置した光格子時計を光ファイバで接続し、その周波数差を遠隔比較する「相対論的な効果を使った標高差測定(相対論的測地)」ネットワークが、新しい超高精度時計の応用として注目されています(図2)。実は、この時計に対する相対論的効果は、従来の原子時計でもよく知られており、例えば、高度2万kmといった軌道にある人工衛星に搭載された原子時計は、地球の重力ポテンシャルが地表と比べて大きいので、その周波数は、 10^{-10} 程度地

表より高くなります。従来型原子時計よりも精度が格段に向上した光格子時計では、地表におけるわずかな重力ポテンシャルの違い(高さの違い)に由来する相対論的効果を検出することを可能にしました。宇宙空間といった巨大な空間スケールでのみ顔を出した相対論的効果を、光格子時計を媒介にした、日常の効果として認識できるようになった点が、これまでと決定的に異なるといえます。現時点で世界最高精度を実現している周波数精度 1×10^{-18} の光格子時計では、約1cm精度の標高差に相当する重力ポテンシャルが検出可能な精度を備えています⁽²⁾。光格子時計ネットワークにより、各地の標高を1cm精度で常時モニタすれば、重力ポテンシャル計測に基づく水準点(標高の基準)や、地殻変動の長期監視など、光ファイバネットワークの新たなインフラストラクチャへの展開が期待できます。現在のGNSS(Global

Navigation Satellite System) による測地精度では困難な1cm精度の標高差測定を検出可能になるだけでなく、重力ポテンシャルに大きく影響を与える巨大な質量の地下の物質の動き、例えば、火山におけるマグマなどの長期監視にも応用できるかもしれません。また、光格子時計ネットワークは、このような量子センシングとしての応用だけでなく、現在のGNSSが提供しているような正確な周波数基準配信の役割も果たすことはいまでもありません。しかも、光格子時計ネットワークの提供する周波数は“光領域”にあることを思い返せば、極めて正確な“光波長基準”にも姿を変えます。タイミングと波長が超高精度に同期可能なインフラストラクチャをバックボーンにすれば、既存の波長多重通信に資するだけでなく、新しい光通信アーキテクチャへの展開を促すプラットフォームになることが期待できます。



重力ポテンシャルが大きいところ（標高が高い場所）の時計は速く進むという一般相対性理論の効果を用いると、 1×10^{-18} の精度で光格子時計の周波数差を計測した場合1cmの精度で標高差を検知できます。光ファイバ網で各地の光格子時計をつなぎネットワーク化することで、重力ポテンシャル計測に基づく水準点（量子水準点）や地殻変動のモニタリングなど、新たなインフラストラクチャへの展開が期待できます。

図2 光格子時計のファイバネットワーク化による相対論的測地

超高精度光周波数伝送・中継装置 (リピータ)

光格子時計ネットワークでは、複数の光格子時計を光ファイバ接続し、その周波数差を計測する必要がありますが、光ファイバはこのような超高精度光周波数基準を伝送する媒体としては脆弱です。敷設されている光ファイバには、日々の温度変化によるファイバの伸縮や、敷設環境に由来する振動などさまざまな雑音があり、伝送される光周波数の精度劣化を引き起こします。また、光通信で通常用いられるファイバアンプ等の増幅装置も周波数精度を劣化させる原因となるため、使用は困難です。このファイバ伝送に由来する雑音を補償し、精度を維持する

と同時に、ファイバ伝送に伴う伝搬損失をリカバリさせ、遠隔地へ伝送・中継する装置が超高精度光周波数伝送・中継装置 (リピータ) です (図3)。リピータは、ファイバ雑音補償機能と再生中継機能を1つの装置にまとめたものであり、ファイバ雑音補償された光周波数を次の区間へ中継し、またファイバ雑音補償するという繰り返し (カスケード) 接続により、精度劣化を可能な限り抑えて遠隔地へ伝送することが可能です。また、超高精度光周波数の伝送波長は、ストロンチウム光格子時計の時計周波数に相当する698 nm のちょうど2倍の波長である1397 nm 波長帯を用いました。波長が2倍という関係により、波長変換デバイスを1つ用いるという簡素な構成で、光

格子時計の光周波数基準をファイバ伝送可能な波長帯に変換することが可能です⁽³⁾。

リピータにおける2つの主要機能を実現するために、もっとも重要な部品が光干渉計です。ファイバ雑音補償では、送信元の光と、ファイバ伝送後受信先から同じファイバを逆向きに打ち返されてきた光を干渉させ、伝送したファイバに由来する周波数雑音の情報を検出し、その雑音と逆位相の雑音を送信元の光に加えることによって、雑音を補償します。また、再生中継では、コピーしたい超高精度光周波数と、送信用レーザを干渉させ、両者の周波数差の情報を検出し、送信用レーザの周波数をフィードバック制御することで、周波数精度を送信用レーザにコピーし

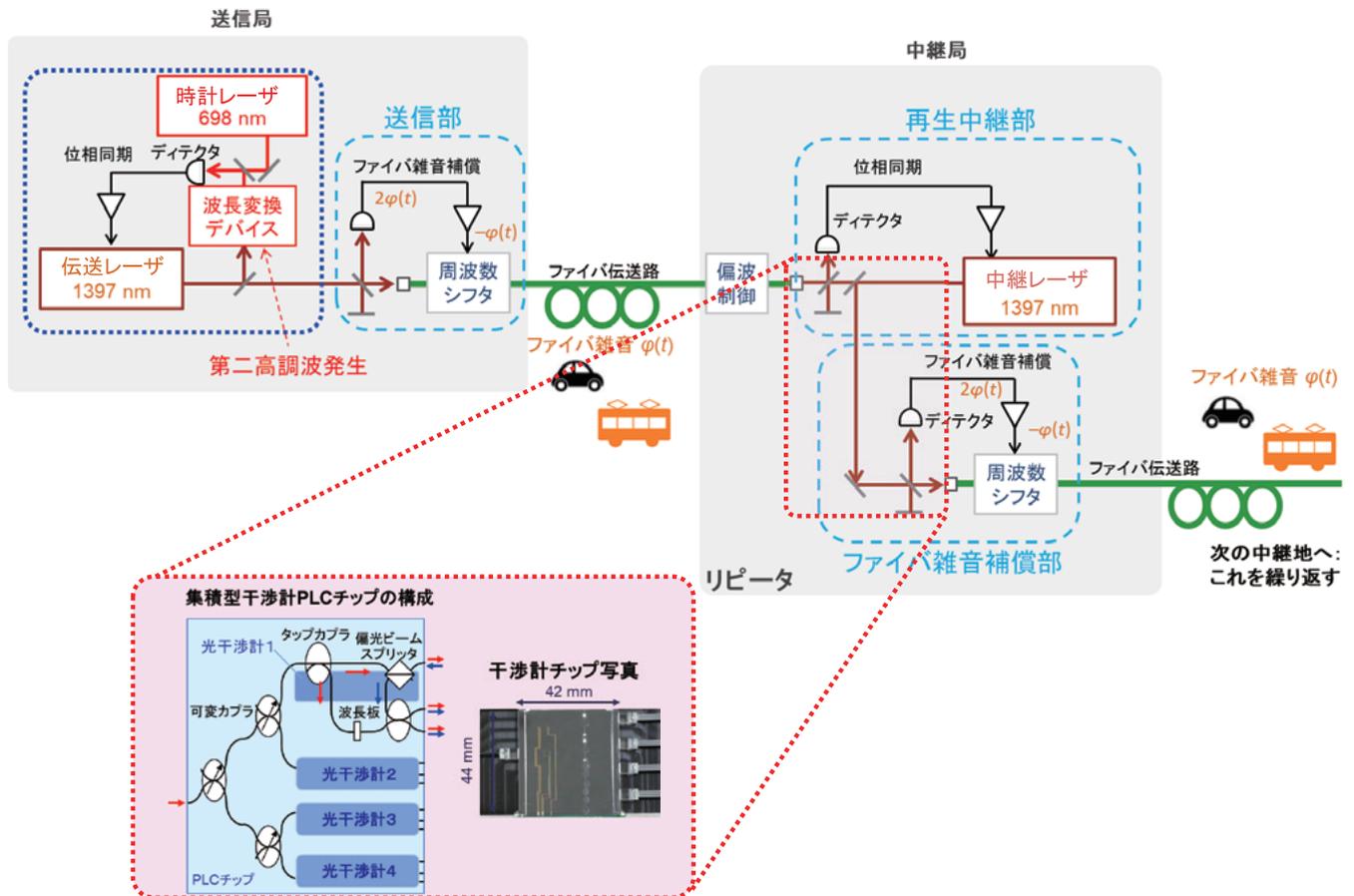


図3 超高精度光周波数基準伝送・中継技術と集積型干渉計PLCチップ

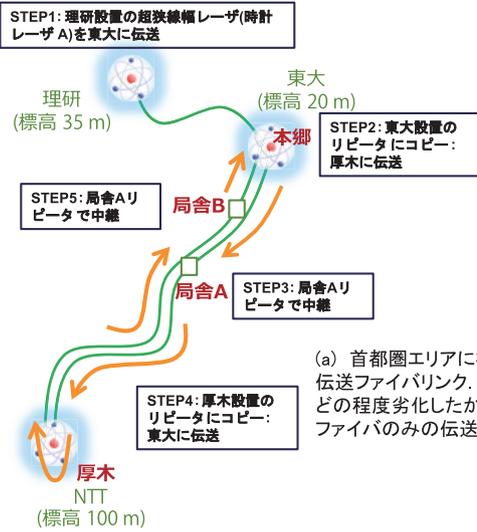
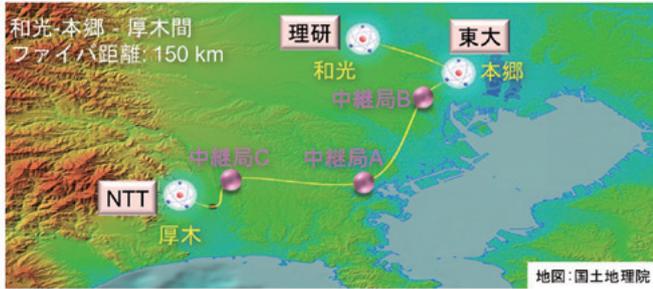
ます。従来のリピータで用いられてきた光干渉計は、空間光学系やファイバカプラで構成されていましたが、光干渉計自体が発する雑音を除去できないという問題がありました。そこで、NTT先端集積デバイス研究所が開発した石英系平面光波回路（PLC）*3に

よる差動検波型マツハツエンダー干渉計を用いることで、リピータが小型化されるとともに、安定性や検出感度の向上が実現されました。光路長が精密に設計された干渉回路を光チップ内に作り込むことで、温度等の環境変動にも強く、光干渉計自体に由来する雑音を極限まで低減することに成功しています。また、光干渉計の光の差動出力を利用することにより光干渉信号の差動検波を可能とし、検出感度の向上を図っています。

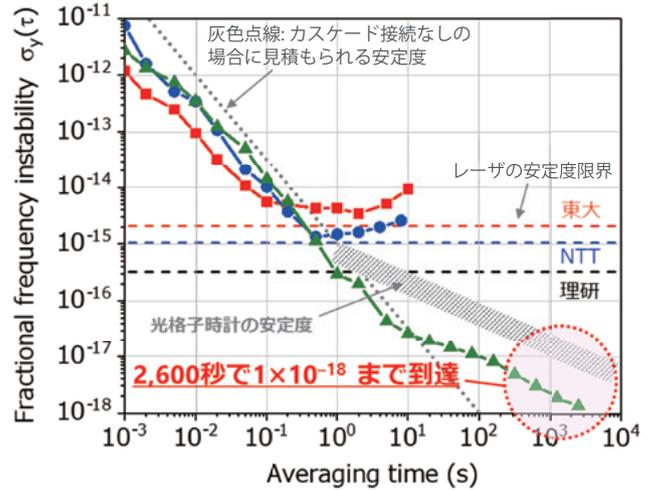
首都圏エリアにおける超高精度光周波数伝送ファイバリンクの構築と伝送精度評価

この光格子時計ネットワークの実現に向けて、NTT物性科学基礎研究所では、2015年より東京大学（東大）・理化学研究所（理研）の香取研究室とNTT東日本と連携し、フィールド実証実験を行ってきました。現在、世界最高精度レベルの光格子時計では、10000秒以上の測定（データ積算）時間で、周波数精度 1×10^{-18} に到達します。したがって、その光格子時計の精

*3 石英系平面光波回路：NTTが実用化してきた光導波路技術で、光導波路をLSI同様のプロセスで製造でき、さまざまな干渉計を集積することができます。PLCは製造の自動化が可能であるため量産性に優れ量産時のコスト低減効果大きいという特徴と、光ファイバと同じガラス素材で導波路を形成できるため低損失で信頼性が高いという特徴があります。



(a) 首都圏エリアに構築した超高精度光周波数伝送ファイバリンク。時計レーザーAを伝送させて、どの程度劣化したかを自分自身と比較することでファイバのみの伝送精度を評価します。



赤(実験1): 理研と東大に設置の超狭線幅レーザーどうしの比較
 青(実験2): 理研とNTTに設置の超狭線幅レーザーどうしの比較
 緑(実験3): 東大-厚木-東大ループ網による自己参照比較

(b) 本郷-厚木-本郷ループ網の周波数伝送安定度計測。世界最高精度レベルの光格子時計の周波数安定度(灰斜線)より、ファイバ伝送精度(緑三角)のほうが高いことが分かります。

図4 首都圏エリア超高精度光周波数伝送ファイバリンクと伝送精度評価実験

度を劣化させずに伝送させるために、光ファイバによる光伝送が10000秒よりも短い測定時間で周波数精度18桁に到達することが必要不可欠です。さらに、このような光格子時計の光伝送ファイバネットワークを全国規模に敷設することを想定すれば、そのファイバ距離の拡張性も重要な要素です。今回私たちは、開発したリピータを用いて県レベルの域内における光格子時計ネットワークを想定し、理研和光本所を基点に、東大本郷キャンパスを經由して、NTT厚木研究開発センタまで、複数の中継局（電話局）を接続した実証実験用の超高精度光周波数伝送ファ

イバリンクを構築しました（図4）。中継局には、19インチラックサイズ1基に収まるようにコンパクト化した遠隔制御可能なリピータシステムを設置しました。伝送精度の評価は、超狭線幅レーザーを東大のリピータを經由して厚木まで伝送させ、さらにもう同じ経路の別の光ファイバを伝送させて東大まで戻すファイバ長240 kmのループ網を用いて行いました。東大において、厚木へ送信した光周波数と、ループ網により戻ってきた光周波数の干渉をとり、その周波数安定度^{*4}を計測しました。送信した光と、ファイバ網を經由して戻ってきた光の周波数差を

計測することで、伝送したファイバに由来する雑音（どのくらい周波数精度の劣化を引き起こしているか）が評価できます。その結果、1秒間の計測時間で 3×10^{-16} 、2600秒で 1×10^{-18} の周波数安定度および精度での伝送を実証しました⁽⁴⁾。この周波数伝送安定度は、世界最高精度レベルの光格子時計の精度劣化を引き起こさないレベルであり、1 cm精度の相対論的測地応用につながる成果です。これまでに、東

*4 周波数安定度：周波数がどれだけ正確かを表す精度の指標の1つです。ある出力周波数が一定時間内でどの程度一定であるかを示します。

大・理研では、相対論的測地のもっとも基本的な実験として、本郷（東大）ー和光（理研）間において、30 kmの無中継ファイバ伝送による2台の光格子時計の周波数比較を実現し、数cm精度の遠隔地間標高差測定の実証が行われています⁽⁵⁾。ファイバ伝搬損失により無中継で伝送できるのは100 kmまでが限度であり、今回実証したリピータを介したカスケード中継方式により、超高精度を保ったまま数100 kmの県レベルや数1000 kmの全国レベルにまで拡張可能性があることを実証しました。

まとめと今後の展望

本稿では、世界最高性能の光格子時計の有する光周波数を、その精度を損なうことなく、200 kmを超える光ファイバ伝送が可能な超高精度光周波数基準伝送技術について紹介しました。今後、今回構築したファイバリンクを用いて、和光および厚木に設置する光格子時計の周波数比較実験を実施する予定です。これにより、200 km級の遠隔地間で、数cm精度の標高差を検知する相対論的測地の実証に挑戦します。さらに、光格子時計の全国規模のファイバネットワーク化を想定し、より多中継で安定な運用が可能なりピータの開発を進め、この超高精度光周波数基準のファイバ伝送技術を1000 km級まで拡張する予定です。

本研究は、東京大学 香取秀俊教授並びに牛島一朗講師、理化学研究所 高本将男専任研究員並びに大前宣昭准教授（現福岡大）と共同で行われまし

た。また、研究遂行にあたり、NTT先端集積デバイス研究所 郷隆司博士（現NTTエレクトロニクス）、NTT物性科学基礎研究所 石澤淳教授（現日本大学）並びに後藤秀樹教授（現広島大学）と協力して実施するとともに、フィールド実証実験は、NTT東日本と協力して実施しました。

本研究の一部は、日本学術振興会（JSPS）科研費特別推進研究（JP16H06284）および科学技術振興機構（JST）未来社会創造事業「クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築」（JPMJMI18A1）の支援を受けました。

参考文献

- (1) H. Katori: "Optical lattice clocks and quantum metrology," *Nature Photonics*, Vol. 5, pp. 203-210, 2011.
- (2) W. F. McGrew, X. Zhang, R. J. Fasano, S. A. Schäffer, K. Beloy, D. Nicolodi, R. C. Brown, N. Hinkley, G. Milani, M. Schioppo, T. H. Yoon, and A. D. Ludlow: "Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level," *Nature*, Vol. 564, pp. 87-90, 2018.
- (3) T. Akatsuka, H. Ono, K. Hayashida, K. Araki, M. Takamoto, T. Takano, and H. Katori: "30-km-long optical fiber link at 1397 nm for frequency comparison between distant strontium optical lattice clocks," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 53, 032801-1-5, 2014.
- (4) T. Akatsuka, T. Goh, H. Imai, K. Oguri, A. Ishizawa, I. Ushijima, N. Ohmae, M. Takamoto, H. Katori, T. Hahimoto, H. Gotoh, and T. Sogawa: "Optical frequency distribution using laser repeater stations with planar lightwave circuits," *Optics Express*, Vol. 28, No. 7, pp. 9186-9197, 2020.
- (5) T. Takano, M. Takamoto, I. Ushijima, N. Ohmae, T. Akatsuka, A. Yamaguchi, Y. Kuroishi, H. Muneke, B. Miyahara, and H. Katori: "Geopotential measurements with synchronously linked optical lattice clocks," *Nature Photonics*, Vol. 10, pp. 662-666, 2016.



（上段左から）小栗 克弥/ 赤塚 友哉/
今井 弘光

（下段左から）橋本 俊和/ 寒川 哲臣

光格子時計ネットワークの研究は、最先端の基礎研究と現在のファイバネットワークへの実装技術の間に横たわる“死の谷”を越え、ファイバネットワークに新たな価値を創造する営みです。さらに、究極のレーザ制御・光技術の研究に直結します。多彩な顔を持つ豊かな研究トピックのワクワク感を感じ取っていただければ嬉しいです。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
フロンティア機能物性研究部
量子光デバイス研究グループ
TEL 046-240-3461
FAX 046-270-2358
E-mail katsuya.oguri.hf @ hco.ntt.co.jp



量子コンピュータの能力を引き出す アルゴリズムとその検証技術

量子コンピュータは、既存の計算原理に基づく計算機の延長線上では得られない超高速な計算を実現し、情報処理に革命を起こすと期待されています。このためには、量子ハードウェアとともに、その能力を引き出すための量子アルゴリズムが不可欠です。本稿では、量子アルゴリズムとそれを支える量子回路最適化技術、および、その実行の信頼性を高めるための検証技術に関する最近の成果について紹介します。

たに せいいちろう
谷 誠一郎

あきぶえ せいせき
秋笛 清石

たけうち ゆうき
竹内 勇貴

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

中核技術としての量子アルゴリズム

現代社会で使用されているコンピュータと同様に、量子コンピュータにおいても、ハードウェア上で走るソフトウェア（計算手順＝アルゴリズム）の良し悪しが計算性能を大きく左右します。この意味で、量子アルゴリズムは、量子コンピュータの有用性を決定付ける中核技術といってよいでしょう。

古典問題を解く 高速量子アルゴリズム

私たちの日常生活に密接に関係している問題のほとんどは、量子の概念とは一切関係のない問題（古典問題）です。もし、量子コンピュータを用いて、既存の計算原理に基づくコンピュータ（＝古典コンピュータ）よりも圧倒的に速く、古典問題を解くことができれば、私たちの生活・社会に大きなインパクトを与えられると期待されています。

これまでの研究により、量子コンピュータを用いて計算を高速化できる

古典問題が次々と明らかになってきました⁽¹⁾。特に、衝突発見問題は、量子ウォークに代表される、さまざまな量子アルゴリズム技術を生み出す際に中心的な役割を演じました。ここで生み出されたアルゴリズム技術を基礎として、行列乗算など応用上重要な多くの古典問題に対する高速量子アルゴリズムが考案されました。以降では、衝突発見問題を例に、量子アルゴリズム技術を、少し異なる観点、すなわち、情報通信の安全性の観点から考えてみます。

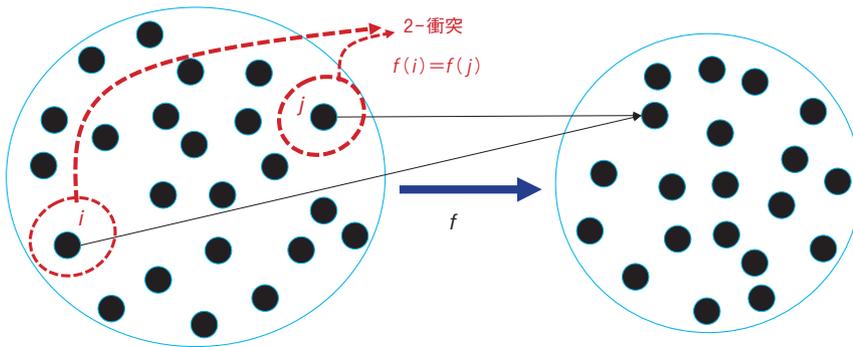
高い計算能力を期待されている量子コンピュータは、良いことに使われるばかりでなく、「暗号を破る」という悪いことにも利用されるおそれがあります。このため、近年、量子コンピュータによる強力な攻撃を考慮した、暗号の安全性評価が求められています。この安全性評価を行うためには、攻撃者の攻撃能力を知る必要があります。したがって、具体的な攻撃手法を考える必要があります。量子コンピュータを用いた攻撃手法とは、量子アルゴリズム

にほかなりません。

私たちは、これまで培ってきた量子アルゴリズムの基礎技術を基に、暗号の中核技術であるハッシュ関数に関して、量子コンピュータを用いた最高速攻撃手法を考案しました⁽²⁾。

ハッシュ関数とは、長いデータを入力として、短いデータを出力する関数です。ただし、暗号では、出力データから入力データの推測が難しいものが使われます。ハッシュ関数の応用範囲はとても広く、例えば、電子署名や公開鍵暗号など、私たちの生活に密着したのものにも使われています。

では、ハッシュ関数に対する攻撃とは何か、ということを「衝突」という概念を用いて説明します。ハッシュ関数 f により同じ値に移される複数の要素を衝突と言います（図1）。一般に、ハッシュ関数 f により同じ値に移される ℓ 個の要素を ℓ -衝突と言います。また、 ℓ を衝突の多重度と言います。例えば、図1の場合、2つの要素 i, j が f によって、同じ値に移されているので、 (i, j) は衝突であるといえます。



要素のペア (i, j) が関数 f により同じ値に移されると $f(i) = f(j)$ 、ペア (i, j) を2-衝突と言う。同様に、 f により同じ値に移される ℓ 個の要素を ℓ -衝突と言う。(例えば、3-衝突の場合、 $f(i) = f(j) = f(k)$)

図1 ハッシュ関数の衝突

1. 部分集合 $I \subset [N]$ をサンプルし、 I の像 $f(I)$ を計算 ($[N] = \{1, \dots, N\}$)
2. I の要素とともに2-衝突を構成する部分集合 $J \subset [N] \setminus I$ を量子探索し、像 $f(J)$ を計算
3. I および J の要素とともに3-衝突を構成する要素 $k \in [N] \setminus (I \cup J)$ を量子探索
4. 得られた3-衝突 (i, j, k) を出力

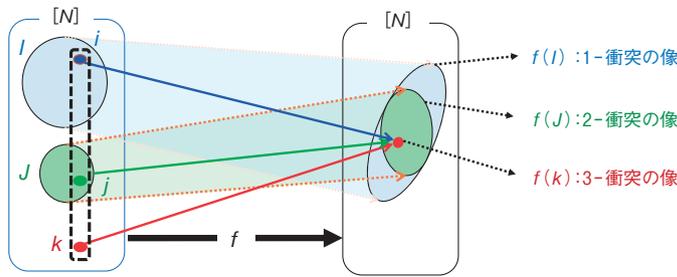


図2 量子アルゴリズムの動作 (3-衝突発見問題の場合)

ℓ (多重度)	2	3	4	5	...	ℓ
既存手法 [HSX17]	$\frac{1}{N^3}$	$\frac{4}{N^9}$	$\frac{13}{N^{27}}$	$\frac{40}{N^{81}}$...	$N^{\frac{1}{2}(1-\frac{1}{3^{\ell-1}})}$
提案アルゴリズム	$\frac{1}{N^3}$	$\frac{3}{N^7}$	$\frac{7}{N^{15}}$	$\frac{15}{N^{31}}$...	$N^{\frac{1}{2}(1-\frac{1}{2^{\ell-1}})}$

[HSX17] A. Hosoyamada, Y. Sasaki, and K. Xagawa. Quantum multicollision-finding algorithm. In Proceedings of the 23rd International Conference on the Theory and Application of Cryptology and Information Security, ASIACRYPT 2017, Part II, pp.179-210, 2017.

図3 既存アルゴリズム [HSX17] との計算速度比較 (各多重度 ℓ) に対する、ハッシュ値の総数 (N) と多重衝突を発見するために要する時間の関係)

衝突を発見できると、例えば、同じ認証データを持つ別の文書に改ざんできてしまう可能性があります。このため、ハッシュ関数 f を暗号に使うためには、衝突発見の困難性 (=膨大な時間を要するかどうか) を評価する必要があります。この評価のために、衝突

を発見するアルゴリズムが必要となります。私たちは、任意の多重度 ℓ に対して、 ℓ -衝突を発見する高速量子アルゴリズムを考案しました (図2)。提案アルゴリズムの計算速度は、すべての多重度において、理論限界を達成しており、これにより、ハッシュ関数

を用いた暗号の、より正確な安全性評価が可能になると期待されます。

図3は、各多重度 (ℓ) に対する、ハッシュ値の総数 (N) と多重衝突を発見するために要する時間の関係を既存の手法と比較したものです。数学的には、 N は、ハッシュ関数の値域のサイズです。多重度2の場合の計算時間が両手法で同じ理由は、既存手法が理論限界を達成しているからです。多重度3以上では、すべての場合において、既存手法より高速になっています。

具体的な数値例を考えてみます。多重度 $\ell = 3$ 、ハッシュ値の総数 N が2000 bit値の場合、既存手法の計算時間に比べ、提案手法の計算時間は10億倍程度高速になっています。

量子アルゴリズムを高速に実行するには量子回路レベルでの最適化が必要です。次に量子回路の最適化技術に関する成果を紹介します。

量子回路のコンパイル技術

光子や電子など、どのような量子系についても、その状態の変化の様子はユニタリ行列で表現されます。それゆえに、量子アルゴリズムから量子コンピュータに送られる「命令」も本質的にはユニタリ行列のかたちで与えられます。例えば、素因数分解を効率的に解くことで知られるShorのアルゴリズムに登場する重要な命令として、量子フーリエ変換と呼ばれるユニタリ行列が挙げられます。ところが、雑音に弱いという量子系の特性から、それらのユニタリ行列 (が表現する状態変化) を完全な精度で実現することはできません。そこで通常は、高精度に実現できる数種類のユニタリ行列 (これらを基本ゲートと呼びます) を適切な順序で実行することで所望のユニタリ行列を実現します。したがって、(a)基本

ゲートの総数 = (b) 命令数 × (c) 1 命令分のユニタリ行列を実現するための基本ゲート数、という関係が成り立ちます。量子アルゴリズムの実行時間はおおむね(a)の基本ゲートの総数で見積もることができるので、総数を減らすための最適化手法が数多く提案されてきました。それらは大まかに、各々のアルゴリズムの構造を活かして (b) の命令数を削減する手法と、アルゴリズムの構造とは独立に(c)の基本ゲート数を削減する手法に分類することができます。ここで、アルゴリズム設計時に基本ゲートを1つの命令だとみなせば、後者の最適化は不要に思われるかもしれませんが、しかし、基本ゲートは量子コンピュータをどのような量子系で実装するかによって変わってくることで、個々の量子系に依存しない直感的な命令群でアルゴリズムを設計したいことを踏まえ、後者の最適化が必須となります。

(c)の最適化では、連続自由度を持つユニタリ行列を有限個の基本ゲートの列で厳密に実現するのは不可能なので、許容誤差内で近似的に実現できる基本ゲートの列を探索します（これをコンパイルと呼びます）。適切に選ばれた基本ゲートの十分長い列を用いれば、任意のユニタリ行列を任意の精度で実現できることが知られています。したがって、そのような基本ゲートの列のうち、与えられたユニタリ行列を許容誤差内で近似できるもっとも短いものを出力することが(c)の最適化の目標となります。多くの先行研究ではもっとも短い1つの基本ゲート列を探索する（これを決定的コンパイルと呼びます）ことを目標としていたのに対し、近年、確率的に基本ゲート列を実現する（これを確率的コンパイルと呼びます）ことで、ゲート列の長さを増

やさずにユニタリ行列の近似誤差を改善できることが発見されました。これは、同じ許容誤差の下では確率的コンパイルを行うことで、従来の決定的コンパイルと比較してより短い基本ゲート列でユニタリ行列を近似できることを意味します（図4）。しかし、さまざまな関連研究がある一方、確率的コンパイルの限界能力は分かっていませんでした。

今回私たちは、確率的コンパイルが達成し得る近似誤差の理論限界を解明しました⁽³⁾。また、効率的に実行できる確率的コンパイルの手順も考案し、既存の確率的コンパイラと比較して、最小の近似誤差を達成できることを理論的に示しました。いくつかの具体的な例で計算したところ、この確率的コンパイラにより(c)の基本ゲート数を、決定的コンパイラの場合と比較して、50%程度削減できることも分かりました。確率的コンパイルを解析するための理論は、コンパイルにおいて実用的な価値があるだけでなく、今後、古典・量子ハイブリッド型の情報処理を探索

していくうえで、幅広い応用が期待されています。

量子アルゴリズムの実行の信頼性を高めるためには、コンパイラで得られた量子回路が実際のデバイスでどの程度正確に実現されているかを検証する必要があります。

量子コンピュータの検証技術

量子コンピュータは、雑音等に起因するエラーが発生しやすいという性質があります。発生したエラーに対処するための代表的な2つの手法として、「量子エラー訂正・抑制」と「量子計算の検証」があります。これら2つの手法は、お互いの欠点を補い合う相補的な関係にあります。量子エラー訂正・抑制はエラーが発生した際に訂正または抑制できる代わりに、どのようなエラーがどの程度発生しているのかをある程度知っている必要があります。一方で、量子計算の検証はエラーが未知の場合でも適用可能ですが、エラーを訂正することはできず、量子コンピュータの計算結果にエラーが発生

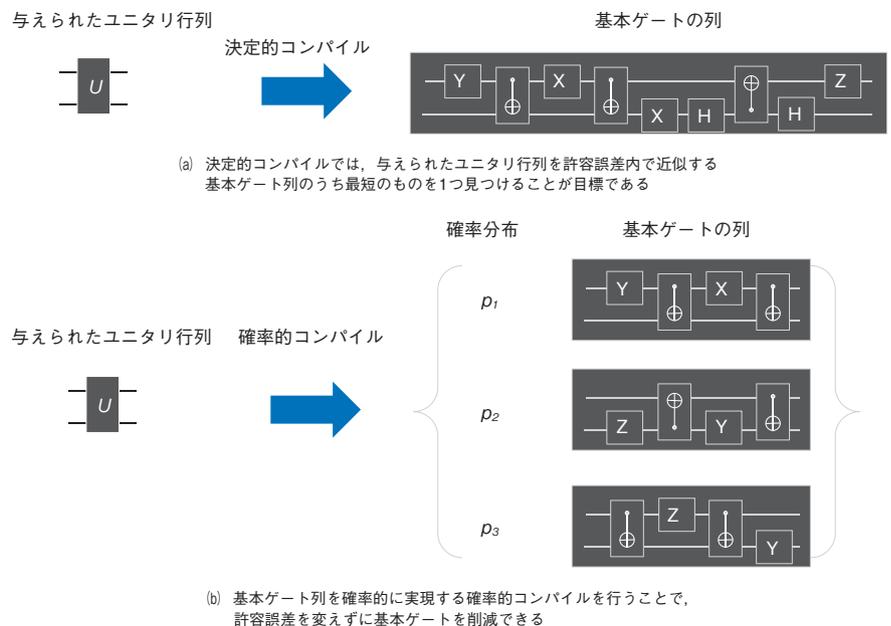


図4 確率的コンパイルによる基本ゲート数の削減

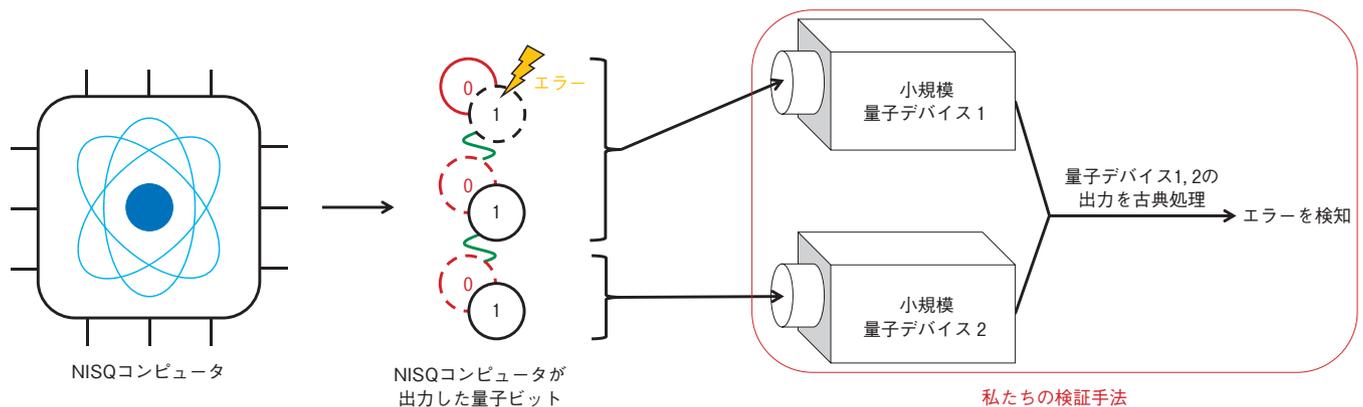


図5 NISQ コンピュータを検証するための私たちの手法

しているかどうかを判断することしかできません。しかし、エラーの有無を判断できれば、エラーが発生していないときの計算結果だけを抽出することで正しい計算結果を知ることができるため、有用なエラー対処法になり得ます。特に、遠隔地の量子コンピュータに通信を介してアクセスするクラウド量子計算ではエラーが未知の場合が多いため、量子計算の検証が威力を発揮します。また、近年では、量子計算の検証を量子エラー抑制に応用するという研究も行われています。以降では、量子計算の検証に関する最近の私たちの成果について紹介します。

これまで、量子計算の検証を行うためのさまざまなプロトコルが提案されてきましたが、そのほぼすべてがエラー訂正可能な大規模量子コンピュータを想定したものでした。一方で、現在実現している、また今後数年間で実現すると予想されている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おり、エラー訂正を行う能力がありません。そこで、このギャップを埋めるため、私たちはNISQ コンピュータ用の検証手法を構築するという研究に取り組みました⁽⁴⁾。単純な検証手法では、NISQ コンピュータを検証する

ためには、それと同サイズの別の量子コンピュータが必要になってしまいます。ここでは、量子コンピュータのサイズは扱える量子ビット数を意味しています。この問題を解決するために、私たちは検証用の量子コンピュータを2つの小規模量子デバイスに分割するというアイデアを用いました(図5)。その結果、NISQ コンピュータを小規模量子デバイスで効率良く検証する新規な手法を提案することに成功しました。

今後の展開

本稿で紹介した技術は、さまざまなサイズの量子コンピュータに適用できるスケーラブルな技術です。これを可能にしているのは、私たちが得意とする数理科学的アプローチです。今後、量子コンピュータの開発が進むにしたがい、このようなスケーラブルな技術は、ますます重要になってきますが、今なお解明すべき点が多いのが実情です。私たちは、引き続き必要な基礎技術構築に取り組んでいきます。

参考文献

- (1) 谷・高橋：“高速量子アルゴリズムの開発,” 電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ Fundamentals Review, Vol. 14, No. 1, pp. 15-27, 2020.
- (2) A. Hosoyamada, Y. Sasaki, S. Tani, and K. Xagawa: “Quantum algorithm for the

multicollision problem,” Theoretical Computer Science, Vol. 842, pp. 100-117, 2020.

- (3) S. Akibue, G. Kato, and S. Tani: “Probabilistic unitary synthesis with optimal accuracy,” arXiv:2301.06307, 2023.
- (4) Y. Takeuchi, Y. Takahashi, T. Morimae, and S. Tani: “Divide-and-conquer verification method for noisy intermediate-scale quantum computation,” Quantum, Vol. 6, p. 758, 2022.



(左から) 谷 誠一郎/ 秋笛 清石/
竹内 勇貴

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

量子鍵配送の高性能化に向けた取り組み

暗号技術は通信ネットワークを安全に使うために必要不可欠です。量子鍵配送（QKD）という量子力学の性質を利用した手法を用いると、究極的に安全な暗号通信を実現できます。NTTではQKDによる安全なネットワーク実現に向けて、安全性解析などの理論から光の量子状態制御実験など、幅広い領域で研究を進めています。本稿では、最新の取り組みである多値情報を用いたQKD（高次元QKD）と、そのエラー耐性向上技術について紹介します。

いくた たくや 秋笛 せいせき
生田 拓也^{†1} 秋笛 清石^{†2}

NTT物性科学基礎研究所^{†1}

NTTコミュニケーション科学基礎研究所^{†2}

量子鍵配送技術とNTTの取り組み

インターネットを安全に利用するには情報の暗号化が必要不可欠です。例えば、オンラインショッピングでクレジットカード情報を暗号化せずに送信してしまうと、悪意ある盗聴者に情報を盗まれるかもしれません。現代では、このような場合にRSA暗号などの公開鍵暗号方式が利用されています。これは、現代コンピュータでは計算が難しい問題を利用した暗号（計算量的安全性）ですが、近年さかんに研究されている量子コンピュータが実現すると容易に解読できることが知られています。一方、共通鍵暗号方式の1つに、ワンタイムパッド暗号という手法があります。この暗号は計算が難しいのではなく、解くための情報が足りないという状況を利用した暗号（情報理論的安全性）で、どのようなコンピュータを用いても解読が不可能です。しか

し、この解くための情報が足りないという状況をつくるために大きな制約が存在します。通信では情報を0と1のビットとして送信しますが、ワンタイムパッド暗号が安全であるには、本来送信したい情報と同じ長さの乱数^{*1}（秘密鍵）を送受信者だけが知っている必要があります。直観的にはこの秘密鍵の共有方法があるなら、本来送信したい情報をその手法で送ればよく、限られた状況でしか使えない暗号にみえます。

この課題を解決する技術が量子鍵配送（QKD）です。図1のように、QKDでは量子状態をコピーしようとする状態が変化することを利用して、情報

がどの程度外部に漏洩したかを見積もることができます。通信路で一切漏洩しないわけではないため、暗号化した情報を直接送ることはできません。しかし、漏れても意味のない乱数を送信すれば、後から漏洩分の情報を消去することで外部漏洩のおそれのない秘密鍵をつくるのが可能です。この秘密鍵をワンタイムパッド暗号と組み合わせれば、解読不可能な暗号通信を実現できることになります。

近年報道などでもよく目にするようになったQKDですが、1984年の最初の提案⁽¹⁾から約40年もの間研究が続いている技術です。NTTにおいても、理論的な安全性解析や実装実験に加

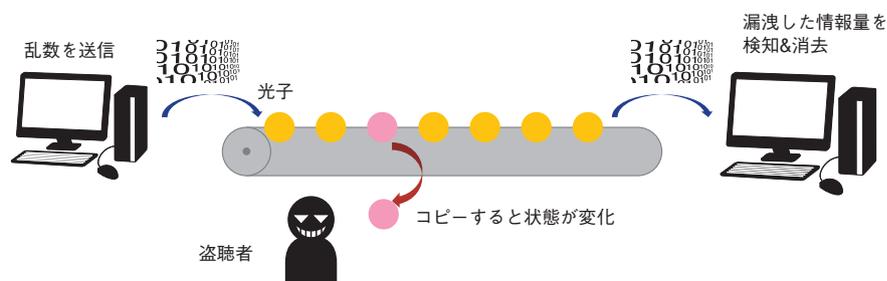


図1 QKDの模式図

*1 乱数：事前に予測することが不可能なランダムな数値。

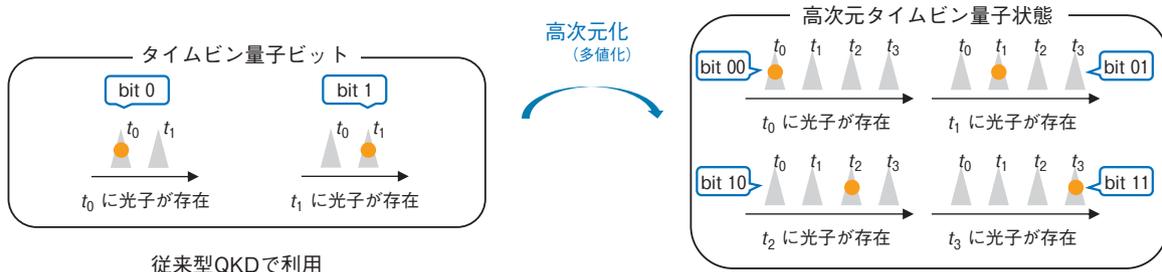


図2 タイムビン量子状態の模式図

え、独自のプロトコルである差動位相シフトQKDの提案実証など、長年にわたり研究を続けてきました⁽²⁾。今回は、最新の取り組みである高次元QKDと、そのエラー耐性向上技術について紹介します。

高次元QKDとスケーラブルな測定装置

高次元QKDは、高次元量子状態と呼ばれる量子状態を用いることで、QKDの通信速度にあたる秘密鍵生成率を向上させる技術です。従来型のQKDでは、0と1の情報を光の量子状態で表現した量子ビットを利用します。私たちが研究しているタイムビン量子状態の場合、2つの時間位置を考えて、そのどちらに光子^{*2}が存在するかで情報を表現します(図2左)。一方、ビットではなく0, 1, 2, …, と多値の情報を表現することで、光子当りの情報量を増加させることが可能です(図2右)。このような多値の情報を扱う状態が高次元量子状態であり、通常

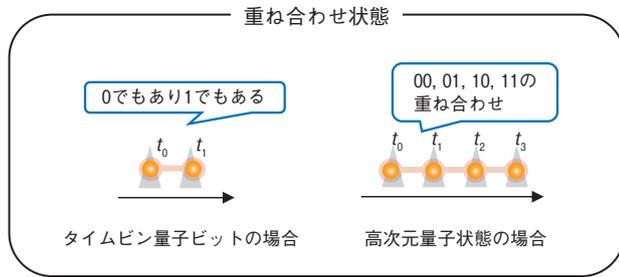


図3 重ね合わせ状態の模式図

の光通信でのPAM^{*3}やQAM^{*4}などに類似したコンセプトといえます。実際に、4つの時間位置を利用した4次元タイムビン量子状態を使って、QKDとしては非常に高速な26.2 Mbit/sの秘密鍵生成が報告されています⁽³⁾。

先ほど説明したように、安全な鍵共有を行うには、送信した乱数がどの程度外部に漏れたかを見積もることが重要です。このために、QKDではいわゆる重ね合わせ状態を利用します。量子ビットの場合は0か1かが本質的に分からないような状態、高次元の場合は0, 1, 2, …のどの値であるかが本質的に分からないような状態です(図3)。中でも特に、相互不偏というある特殊な関係にある重ね合わせ状態を利用することで、送信した乱数がどの程度外部に漏れたかを見積もることができます。d次元の場合、この特殊な関係にある状態の測定は最大で(d+1)種類行うことが可能です。先ほどの26.2 Mbit/sの鍵生成実験では、2種類の測定を使って乱数がどの程度外部に漏れたかを見積もっています。一方で、(d+1)種類の測定が実

装できれば、通信路での量子状態の変化についてさらに多くの情報を得ることができます。そのため、外部に漏れた情報をより正確に見積もることで、鍵生成率の改善が可能です。つまり、よりエラーに強い高次元QKDが実現できます。

今回NTTでは、この(d+1)種類の測定を、タイムビン量子状態に対してスケーラブルに実装する手法を提案・実証しました⁽⁴⁾。タイムビン量子状態の測定には、遅延マッハツェンダー干渉計^{*5}(MZI)や光子検出器を利用します。先行研究では2種類の測定の実装だけでも、(d-1)個のMZIと(d+1)個の光子検出器が必要でした。今回の提案手法を用いると、 $d=2^N$ の場合ではN個のMZI、さらに、dに関係なく3個の光子検出器と1台の光位相変調器を使うことで、(d+1)種類の測定をすべて実装することができます(図4)。実際に4次元タイムビン量子状態に対する5種類の測定を行い、秘密鍵生成に必要なしきい値よりも十分小さなエラーレートの観測に成功しました(図5)。

*2 光子：光を極限的に弱めたときに観測できる、光のエネルギーの最小単位。素粒子の一種。
 *3 PAM：パルス振幅変調の略称。光や電波の振幅を複数の値に設定して情報を表現し、通信を高速化する手法。
 *4 QAM：直交振幅変調の略称。光や電波の振幅と位相両方を利用して情報を表現し、通信を高速化する手法。
 *5 遅延マッハツェンダー干渉計：光を二分岐した後、一方に時間遅延を与えてから合波する光干渉計。タイムビン量子状態の測定や、光通信の差動位相検波などに用いられます。

したがって、今後この測定装置を利用することで、エラーに強い高次元 QKDの実装が期待できます。

安全性証明の拡張

先ほど $(d+1)$ 種類の測定により、エラーに強い高次元 QKD が実現できると説明しました。しかしながらこの手法で厳密に安全性を示すことができるのは、 d が素数 (2, 3, 5, ...) の場合に限られていました。そのため、今回実装した 4 次元の場合は当てはまらず、このままでは厳密な安全性を保証できません。そこで今回、既存の安全性証明⁽⁵⁾の素数の累乗次元 (2,4,8や3,9,27など) への拡張にも取り組みました。安全性証明では、量子状態に対する操作を記述する演算子というものを利用します。実は既存の安全性証明で使われていた演算子に対応して、符号理論などで利用されるガロア体^{*6}を利用して一般化した演算子が存在することが知られています⁽⁶⁾。ガロア体は d が素数の累乗の場合に用いることが可能なため、この一般化した演算子を使って既存の証明を拡張することで、素数の累乗次元でも厳密な安全性を示すことができました。これにより、先ほどの 4 次元の測定装置を使った高次元 QKD でも、安全性を保証することが可能になります。

実用的な QKD システムに向けて

QKD の高性能化に向けた NTT の最近の取り組みとして、高次元 QKD とそのエラー耐性向上技術について紹介しました。今回私たちが行ったのは、そのような QKD のための状態生成装置と測定装置に関する実証実験です。実際に QKD を行うためのシステムと

*6 ガロア体：有限個の要素の中で四則演算 (+, -, ×, ÷) が適切に行えるように計算ルールを定めた集合。有限体とも呼ばれます。

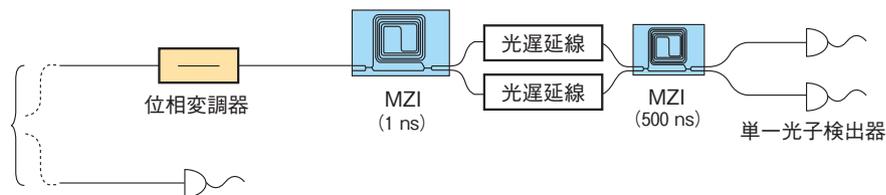


図4 実験で用いた 4 次元タイムビン量子状態に対する測定装置

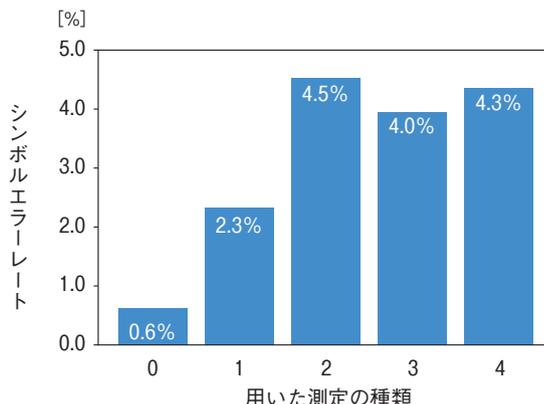


図5 実験で得られたエラーレート

して実装するためには、有限長解析として知られる統計誤差の影響の取り込みなど、まださまざまな課題が残っています。また、原理の説明で紹介した相互不偏という性質は QKD 以外の量子通信・量子情報処理でも現れるため、提案装置の QKD 以外への応用探索も重要な課題です。今回は高次元状態を使ったアプローチの紹介でしたが、これに限らず NTT では今後も量子技術の高性能化に向けて精力的に取り組んでいきます。

参考文献

- (1) C. H. Bennett and G. Brassard: "Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing," in Proceedings of IEEE International Conference on Computers Systems and Signal Processing, pp. 175-179, 1984.
- (2) 特集: "量子暗号," NTT 技術ジャーナル, Vol.23, No.6, pp.38-66, 2011.
- (3) N. T. Islam, C. C.W. Lim, C. Cahall, J. Kim, and D. J. Gauthier: "Provably secure and high-rate quantum key distribution with time-bin qudits," Sci. Adv., Vol.3, No.11, e1701491, 2017.
- (4) T. Ikuta, S. Akibue, Y. Yonezu, T. Honjo, H. Takesue, and K. Inoue: "Scalable implementation of $(d+1)$ mutually unbiased bases for d -dimensional quantum key distribution," Phys. Rev. Res., Vol.4, No.4, L042007, 2022.

- (5) L. Sheridan and V. Scarani: "Security proof for quantum key distribution using qudit systems," Phys. Rev. A, Vol.82, No.3, 030301 (R), 2010.
- (6) T. Durt, B.-G. Englert, I. Bengtsson, and K. Życzkowski: "On mutually unbiased bases," Intl. J. Quantum Inf., Vol.8, No.4, pp.535-640, 2010.



(左から) 生田 拓也/ 秋筈 清石

量子情報は量子光学などの物理から、その符号化や安全性証明などの情報理論的な話まで幅広いトピックが合わさった面白い分野です。さまざまな研究所が集まる NTT の強みを活かして今後も挑戦を続けていきます。

◆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
量子光制御研究グループ
TEL 046-240-3463
FAX 046-240-4726
E-mail takuya.ikuta@ntt.com

量子インターネットに向けて

量子インターネットは地球上の任意のクライアント間での量子通信を可能にするだけでなく、量子計算や量子計測、さらには量子多体系のシミュレーションまでをも包含するパラダイムで、その構築は分野の長期的課題であり、究極的挑戦といえます。本稿では、量子インターネットとは何か、実現には何が必要か、また最近の分野での取り組みについて解説します。

あすま 東 浩司

NTT 物性科学基礎研究所

はじめに

現代物理学において、素粒子レベルから宇宙に至るまでのさまざまな自然現象を、もっとも精巧に記述するのは量子力学であるとされています。量子力学は、起こり得る事象が生じる確率を言い当てるだけで古典力学が与えてきた決定論的世界観を包含する、より一般性が高いものとなっています。事実、決定論的世界観で構築された理論があったとしても、それを量子化することは、現代物理学における基本的な取り組みの1つであり続けています。前世紀末からは、そのような量子力学の枠組みで許される情報処理、すなわち量子情報処理の可能性が考察され始め、今となっては量子情報処理が、従来の情報処理の枠組みを包含するのみならず、その枠組みでは困難とされる情報処理タスクまでをも可能にすることが分かっています。

例えば、量子コンピュータは、現在のコンピュータでは難しいとされる大きな整数の素因数分解を効率的に行うことができます。そのため、量子コンピュータが実現され、もしそれが盗聴

者の手に渡れば、日常生活でもっとも利用されているRSA暗号の安全性を脅かします。他方、量子鍵配送 (QKD) は、たとえ盗聴者が量子力学で許される任意の盗聴行為を行ったとしても (つまり、任意のサイズの量子コンピュータに基づく盗聴行為に対しても) 情報理論的に安全な暗号通信を提供します。つまり、量子力学が自然界の正しい記述である限り、そのような量子力学で許される量子情報処理が、実現可能な情報処理の究極形であると考えられます。

では、そのような量子情報処理の究極形とはなんでしょう。現在のインターネットが地球上の最大の情報処理ネットワークであると考えられるならば、

その量子版である「量子インターネット⁽¹⁾」は、究極の情報処理ネットワークとなるはずですが、本稿では、量子インターネットとは何か、実現には何が必要か、また最近の分野での取り組みについて解説します (詳細は包括的総説論文⁽²⁾を参照)。

量子インターネットとは

量子インターネットは、(量子コンピュータや量子メモリなどの) 量子情報処理ノードを、(光ファイバや自由空間などの) 量子通信路で結びつけた地球規模の量子情報処理ネットワークで (図1)、地球上の任意のクライアントの、さまざまな量子情報処理タスクの実行を可能にします。このような

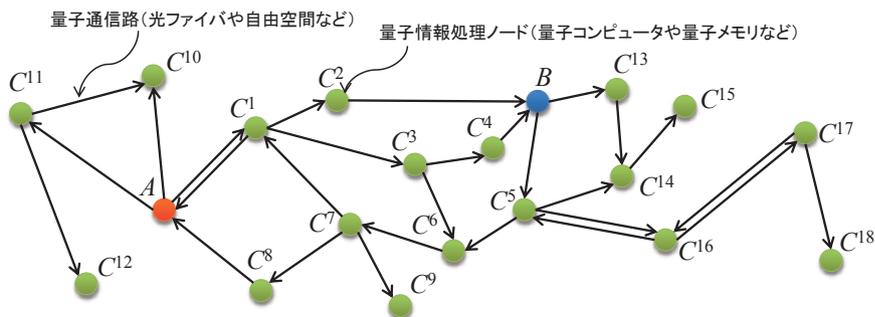


図1 量子ネットワークの模式図

量子インターネットは、現在のインターネットの枠を超えたさまざまな応用を持っています⁽³⁾。例えば、それはネットワーク上の任意のユーザ間での量子鍵配送を可能にします。そのため、国民投票や首脳会談、金融取引、遺伝情報や生体情報のやり取りが可能になります。また、量子インターネットは、量子テレポーテーションによって未知の量子系の情報を遠く離れた地点に光速で忠実に転送することも可能にします。これは、分散型量子計算、クラウド量子計算、あるいは量子コンピュータネットワーク構築の基礎となります。さらに量子インターネットは、現存するもっとも高い精度の時計である原子時計を正確かつ秘密裏に同期することにも利用でき、安定で正確で安全な世界時計の共有を可能にし、高精度のナビゲーションシステムへの応用も期待できます。ほかにも、望遠鏡アレイの長基線化を可能にするため、天文学の発展にも貢献します。

量子インターネットを構築するには

では、どのように量子インターネットを構築すればよいのでしょうか。量子インターネットの役割は、クライアントに対し、「量子もつれ」を効率的に配布することです。量子もつれは、原子や光子などの量子系でしか持つことができず、古典力学や従来の情報理論の枠組みでは説明がつかない奇妙な相関です。この量子もつれは元々、アインシュタイン、ポドルスキー、ローゼンによって、量子力学が局所实在論と相容れない予想を含むことを指摘する際に利用された状態で、ある意味、量子力学の正当性を批判するために引き合いに出されました⁽⁴⁾。しかし、皮肉なことに、結果的には量子もつれの存在は実験で再三確認されてきまし

た。2022年には、この実証実験を行ってきたアスペ、クラウザー、ザイリッガーの3名にノーベル物理学賞が授与されました⁽⁵⁾。さらに現在では、その量子もつれは量子通信だけでなく、量子計算の実行をも可能にする万能リソースであることが明らかにされています。したがって、そのようなリソースとしての量子もつれを効率的に配る役割を担うことで、量子インターネットはクライアントにさまざまな機能を提供することをめざすこととなります。

実際には、欧州のSECOQCネットワーク、日本の東京QKDネットワーク、中国の2000 kmに及び上海・北京ネットワークのように、量子鍵配送を目的とする量子ネットワーク自体は世界各地で構築されてきました。しかし、これらのネットワーク中のノードは、量子情報処理ノードではなく、たとえ量子的な信号を入力として受け取ったとしても、それを古典的な信号に落としてから処理する能力しかない「古典的」な情報処理ノードです。そのため、それらのネットワークは、ネットワーク中の任意のノード間に量子もつれを配ることはできず、たとえ量子鍵配送だけを行うことに特化しても、すべてのノードが信頼できる状況でない限り、安全な秘密鍵の配送はできません。この意味で、それら既存のネットワークはトラステッドノードネットワークと分類され、量子インターネットと区別されます。

他方、クライアント間を量子通信路で全結合する、すなわちすべてのクライアントがポイント・ツー・ポイントで量子通信を行うのであれば、安全な量子鍵配送ネットワークになります。しかし、このようなネットワークを地球規模に拡大するのはコストや効率という観点から現実的ではありません。例えば、量子通信路として光ファイバ

を用いた場合、その透過率はその長さに対して指数関数的に減少します。具体的には、送信者が発した、量子情報が埋め込まれた単一光子レベルの光が、受信者に検出される確率は、標準的な光ファイバの透過率を考慮するだけで、50 kmで約10%、100 kmで約1%、150 kmで約0.1%というように、50 kmごとに約0.1倍となっていくます。したがって、たとえ1 GHzクロックで動作するシステムであったとしても、1000 kmの光ファイバを通じてポイント・ツー・ポイントの量子通信を行う場合、送受信者が1対の量子もつれを得るのに必要な時間の期待値は100年オーダとなり、これは現実的ではありません。したがって、ポイント・ツー・ポイント量子通信だけでは、量子インターネットは実現できず、それを実現するためには、量子中継⁽⁶⁾、⁽⁷⁾が必要とされます。

量子中継とは

従来の通信においても、送信者と受信者の距離が離れている場合は、送受信者はポイント・ツー・ポイントで結ばれているわけではなく、送受信者間に設置された中継器を利用しています。ここでの中継器の役割は、弱まった受信信号を増強し、次の中継器（あるいは受信者）に向け、信号を再発信することにあります。しかし、この原理は量子の世界では通用しません。なぜなら、量子複製不可能定理⁽⁸⁾により、量子的な信号の複製や増幅が原理的にも禁止されているからです。ゆえに量子中継は、そのような信号増幅に基づきません。

量子中継では、中継器を利用して、主に「量子もつれ生成」と「量子もつれスワッピング」という操作を行います。量子メモリ方式⁽⁶⁾では（図2）、物質量子メモリと量子インタフェース

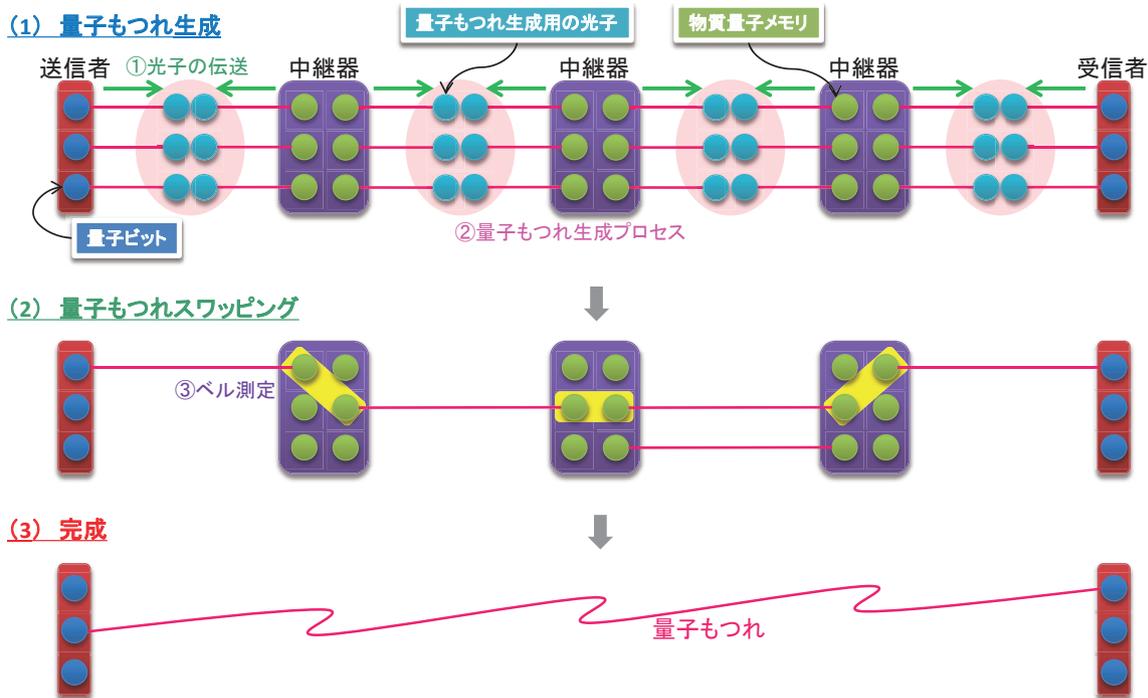


図2 量子メモリに基づく量子中継

を内蔵した量子中継器を光ファイバで結び、最近接中継器間で光子をやり取りすることで、最近接中継地点を結び量子もつれの生成を試み、生成に成功したら、その量子もつれを物質量子メモリに保存しておきます（量子もつれ生成）。この量子もつれ生成を成功するまで繰り返すことで、すべての最近接中継地点間が量子もつれで結ばれたら、中継器内の量子もつれの片割れの対にベル測定を施すことで、最近接中継地点を結んでいた量子もつれを、送受信者を直接結ぶ量子もつれへと変換します（量子もつれスワッピング）。このように、量子メモリ方式では量子もつれ生成を行い、その後量子もつれスワッピングを行います。

他方、全光方式⁽⁷⁾は（図3）、量子もつれスワッピングに対応する操作を最初に行い、その後量子もつれ生成を行うという時間反転方式に基づきます。具体的には、全光方式では各中継地点において、量子もつれスワッピングを実装するために、「グラフ状態

と呼ばれる量子もつれ状態にある光子を準備します。ここで準備されたグラフ状態にある光子は、光ファイバを通じて最近接中継地点に分配され、それを受け取った中継器は、量子もつれ生成操作を施し、成功・失敗に応じて残りの光子を測定すると、高い確率で送受信者間に量子もつれが供給されます。全光方式における中継器は、量子メモリ方式とは異なり、物質量子メモリや量子インターフェースを必要とせず、光デバイス（単一光子源、線型光学素子、アクティブフィードフォワード技術、光子検出器）だけで機能し、方式の繰り返しレートは通信距離によらず、光デバイスの動作速度だけで決まります。そのため、従来の通信分野における全光アプローチとも親和性が高く、量子もつれの供給速度も極めて速くなります。

おわりに

量子ネットワークに関する理論研究の近年の進展（詳細は総説論文⁽⁹⁾を参

照）により、透過率 η の光ファイバが持つ量子通信容量 [= (伝送可能な量子ビット数)/(使用モード数)] や秘匿通信容量 [= (秘匿伝送可能なビット数)/(使用モード数)] が、 $-\log_2(1-\eta)$ となることが明らかにされました。これは、光ファイバを用いたポイント・ツー・ポイントの量子通信の限界を表し、（透過率 η がファイバの長さ l と定数 l_{att} に対して $\eta = e^{-l/l_{att}}$ となることを考慮に入れると）量子中継がなければ、効率的な長距離量子通信、ひいては量子インターネットは実現できないことを示します。また、任意の光ファイバネットワーク中の2者間通信に対する量子/秘匿通信容量が導出され、この容量が量子中継を並列化することで達成可能であることが示されました。これは量子中継が、原理限界の効率を持つ、あるいはそれに近いハイパフォーマンスの量子インターネットを構築する際においても、基本的な役割を担うことを示しています。

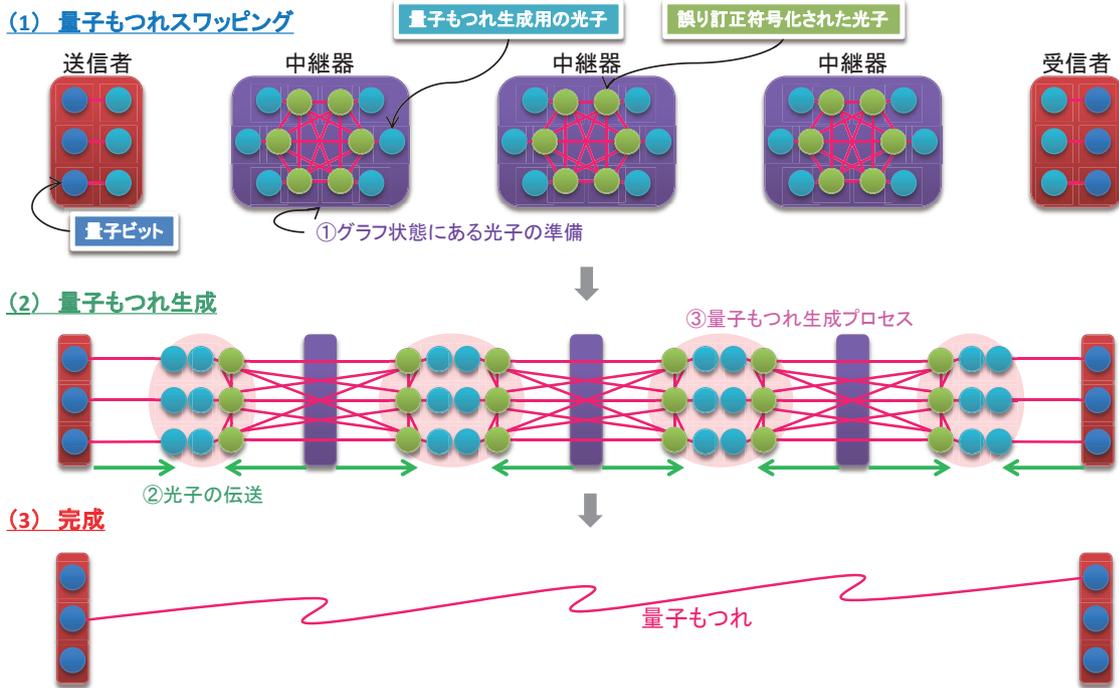


図3 全光量子中継

他方で、現状で実用化段階にあるポイント・ツー・ポイント量子鍵配送と、量子インターネット実現に不可欠な量子中継には技術的、概念的な間隙が存在します。この間隙を埋める方式の探索と実装は、量子鍵配送分野の大きなトレンドとなっています⁽¹⁰⁾。例えば、適応型測定装置無依存QKDやツイン・フィールドQKDなどはこれに分類されます。また、量子中継の原理検証実験についても、メモリ方式、全光方式ともに近年さかに行われています⁽²⁾。量子メモリ方式について、オランダのデルフト工科大学ではダイヤモンド中のNV中心を用いて、米国のハーバード大学・MITではシリコン中の空孔を用いて、中国の清華大学ではRb原子集団を用い、量子メモリを利用した量子もつれスワッピングの原理検証実験が行われています。また、全光方式については、パラメトリック下方変換と線形光学素子を通じて生成されたGHZ状態と呼ばれるグラフ状態に基づき、日本の大阪大学、NTT、

富山大学、カナダのトロント大学の研究チームと、中国の中国科学技術大学の研究チームが独立に、時間反転型の量子もつれスワッピングの原理検証実験を報告しています。

■参考文献

- (1) H. J. Kimble : “The quantum internet,” Nature, Vol.453, pp.1023-1030, 2008.
- (2) K. Azuma, S. Economou, D. Elkouss, P. Hilaire, L. Jiang, H.-K. Lo, and I. Tzitrin: “Quantum repeaters: From quantum networks to the quantum internet,” arXiv:2212.10820, 2022.
- (3) S. Wehner, D. Elkouss, and R. Hanson: “Quantum internet: A vision for the road ahead,” Science, Vol.362, No.6412, 2018.
- (4) A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen: “Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?,” Phys. Rev., Vol.47, pp.777-780, 1935.
- (5) <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/press-release/>
- (6) H. J. Briegel, W. Dür, J. I. Cirac, and P. Zoller: “Quantum repeater: The role of imperfect local operations in quantum communication,” Phys. Rev. Lett., Vol. 81, No.26, pp. 5932-5935, 1998.
- (7) K. Azuma, K. Tamaki, and H.-K. Lo: “All-photonic quantum repeaters,” Nat. Commun., Vol.6, No.6787, 2015.
- (8) W. K. Wootters and W. H. Zurek: “A single quantum cannot be cloned,” Nature, Vol.299, pp.802-803, 1982.
- (9) K. Azuma, S. Bäuml, T. Coopmans, D. Elkouss, and B. Li: “Tools for quantum

network design,” AVS Quantum Sci., Vol.3, 014101, 2021.

(10) M. Curty, K. Azuma, and H.-K. Lo: “A quantum leap in security,” Phys. Today, Vol.74, No.3, pp.36-41, 2021.



東 浩司

量子インターネットについての理論的理解は近年急速に進み、その結果、量子中継の研究開発の重要性が再認識されました。実際、欧州をはじめ、中国、米国と大型の研究プロジェクトが走っています。日本においても追従すべく、量子インターネット研究への注目が高まっています。

◆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 046-240-3440
FAX 046-240-4722
E-mail koji.azuma.ez@hco.ntt.co.jp

挑戦する 研究者たち CHALLENGERS



宮本 裕

NTT未来ねっと研究所
フェロー

非常識を常識に変えて 「当たり前」にするのが システム研究。 キャパシティランチ 克服に挑み続ける

映像データの流通拡大やクラウド技術の進展、5G（第5世代移動通信システム）サービスなど新しい情報通信サービスやリモートワークの急速な普及に伴い、情報通信トラフィックが増大し、今後もその傾向がさらに強くなっていくことが予想されます。今後のさまざまなデータトラフィック需要にこたえるためのIOWN オールフォトリクス・ネットワークの実現には、通信容量の飛躍的な拡大とともに、抜本的な低電力化・低遅延化が求められています。新たな「ねっと」の価値を先進の通信技術で切り拓くNTT未来ねっと研究所 宮本裕フェローに研究の進捗と研究活動の醍醐味を伺いました。



大容量スケーラブル光ネットワーク 基盤技術の確立

現在、手掛けていらっしゃる研究概要をお聞かせいただけますでしょうか。

将来的なクラウドサービス拡大やスマートフォン普及などにより増大する通信トラフィックを収容可能な、Pbit/s級のリンク容量を有するスケーラブル光トランスポートネットワークの実現に向け、光通信用大規模デジタル信号処理技術、光電気融合集積技術、極低雑音光増幅SN比向上基盤技術、空間多重光伝送方式基盤技術の4つの基盤技

術の確立をめざして研究をしています。

光通信技術の研究開発において世界をリードしてきたNTTは1981年の時分割多重（TDM）光ファイバ通信方式の実用化以来、光増幅中継方式、波長多重（WDM）方式、デジタルコヒーレント方式といった光伝送方式の3つのパラダイムシフトを連続的に起こし続け、40年間で約100万倍の伝送容量拡大を実現してきました。

近年もデータ通信量が引き続き年率1.4倍程度の割合で増加し続けており、5G（第5世代移動通信システム）やIoT（Internet of Things）が本格的に導入されはじめ、6G（第6世代移動通信システム）も見据えると、今後も

通信トラフィックが指数関数的に増大することが予想され、2030年代にはPbit/s級容量の長距離伝送が必要と予測されています。このような通信需要に将来的に対応していくために、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想ではオールフォトニクス・ネットワーク (APN) により、さらなる大容量化を経済的に実現することをめざしています。

一方で、現在実用化されている既存の光ファイバを用いた長距離伝送時の物理的な伝送容量限界が100 Tbit/s付近で顕在化すること (キャパシティランチ) が近年の研究により分かっています。このキャパシティランチの技術課題を克服し、現在の100倍以上のデータトラフィックを低電力かつ経済的に収容可能なPbit/s級の光インフラを実現するために私たちが取り組んでいるのが、スケーラブル光通信技術の研究開発です。実現にはこれまで取り組んできた光伝送技術の高度化とともに、光ファイバそのものの新たな光媒体技術をセットで考えた技術革新による第4のパラダイムシフトを追究しています。

2年前のインタビュー時から、継続してキャパシティランチの技術課題に挑まれているんですね。

今回は、私たちの最近の研究開発成果として、リンク当りの伝送容量を、既存の光ファイバを用いた実用WDMシステム容量 (100 Gbit/s/波長) の125倍以上にあたる1 Pbit/s以上に拡大可能な空間多重光通信技術の取り組み

や、世界初の1波長当りの1 Tbit/s超の長距離WDM伝送実験実証など、当時の世界一、世界初の成果についてお話ししました。これらの成果は、所内の光媒体研究部門やデバイス研究部門や所外研究機関とタイムリーに連携した成果です。今期も引き続き、各研究部門の密な連携を通して、特に若手の研究者らを中心にこれらの技術をさらに発展させることで、数々の世界初、世界一の研究成果を創出することができました。

例えば、2022年には、世界で初めて、1波長当たり2.02 Tbit/s容量のデジタルコヒーレント光信号を用いて、240 kmにわたる光増幅中継伝送実験に成功しました (図1)。

この実現にあたり、シリコンCMOSによる半導体回路の速度限界を克服して1波長当りの伝送容量を拡大するためには、光変調器駆動用のドライバアンプのさらなる広帯域化と高出力化の両立、光送受信回路部における信号経路長差や信号経路による損失ばらつき等に対する極めて高精度な補償といった課題がありました。実験では、NTTが独自に開発した超広帯域ベースバンド増幅器ICモジュールと、光送受信回路における損失ばらつきや歪みを超高精度に補償可能とするデジタル信号処理技術を開発し、これらを高度に融合させることで、2.02 Tbit/sで240 kmの距離の光増幅中継伝送を実現し、大容量化と長距離化を両立可能なデジタルコヒーレント光伝送技術のさらなるスケーラビリティの可能性を示したものです。この技術は欧州光通信国際会議ECOC2022 (European Conference on

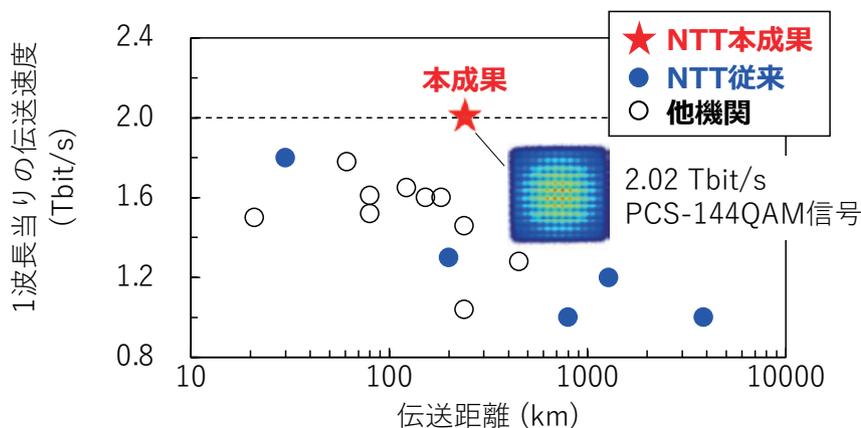


図1 変調速度高速化による、マルチテラビット級光信号の伝送距離延伸



Optical Communication) の最難関発表セッションであるポストデッドライン論文として採択されました。



横須賀研究開発センターの 歴史的な施設で実証実験に挑む

IOWNのAPNの中継網を支えるコア技術ですね。期待が高まります。

他にも、NTT独自の分極反転二オブ酸リチウム (PPLN: Periodically Poled Lithium Niobate) 導波路デバイスを用いた広帯域光増幅中継技術にも大きな進展がありました。具体的には、デバイス研究部門と密に連携することで、現在の主流となっている偏波多重デジタルコヒーレント変復調光信号に対応した光パラメトリック増幅を組み合わせた光増幅中継方式を提案し、12 THzの広帯域波長多重信号を用いて1波長当り1 Tbit/sの光信号を多重し、世界初の光パラメトリック増幅器による240 kmにわたる広帯域光増幅中継伝送に成功しました(図2)。現在、広く用いられている光増幅器(EDFA@C帯)の波長多重信号帯域は約4 THzであるのに対して、今回開発した光パラメ

トリック増幅中継器は、EDFAの約3倍の12 THz以上の帯域を増幅でき、光ファイバが低損失となる波長領域(S, C, L帯)をカバーすることで広帯域化による波長資源の拡大が期待できます。広帯域性と低歪み性を持つ本提案技術は、NTTが提唱するIOWN構想において、豊富な波長資源がダイナミックに活用されるAPNの実現に向けたさらなる大容量光増幅技術として期待されています。本成果も、2021年と2022年の北米光通信国際会議OFC(Optical Fiber Communication Conference)の最難関発表セッションであるポストデッドライン論文として採択されました。

空間多重光通信技術においては媒体研究部門と密な連携をされていますね。

私たちは従来のシングルモード光ファイバ(SMF)における広帯域化と合わせて、キャパシティランチを抜本的に克服するための空間多重光通信技術の研究開発を推進しています。具体的には、1本の光ファイバに光の通り道であるコアを複数有するマルチコアファイバや、1つのコアに複数の伝搬状態(空間モード)を有するマルチモードファイバなど、媒体研究部門と密に連携し、さまざまなタ

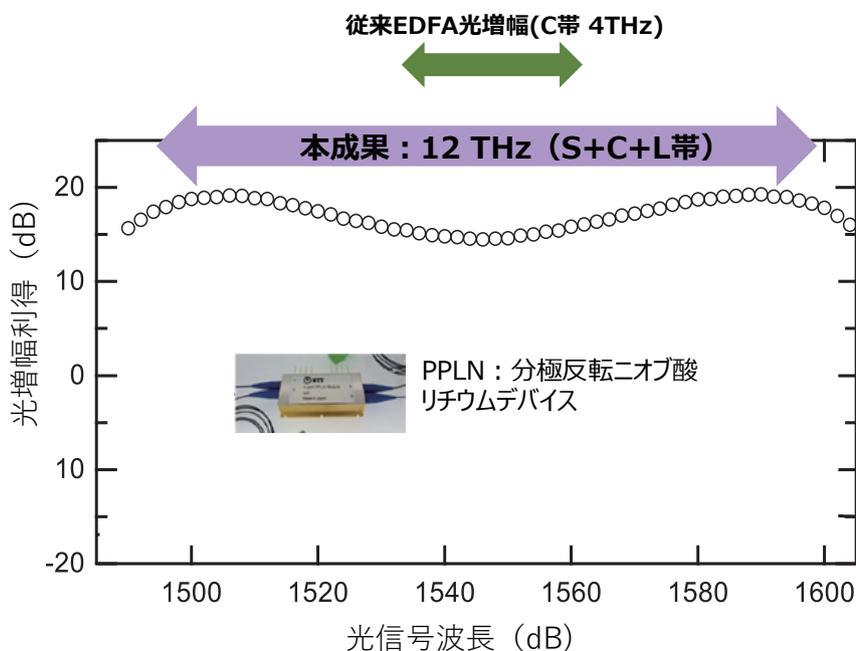


図2 PPLN光パラメトリック増幅中継方式による広帯域化・波長資源の拡大

イブの空間多重光ファイバを試作し、将来の新しい伝送媒体としての実現性の研究開発を進めています。また、同時に、それらの新しい伝送媒体の性能を最大限に引き出すための大容量空間多重光通信システムの検討を両輪で進めています。近年では、光ファイバの直径が、既存のSMFと同じ標準クラッド径125 μmの空間多重光ファイバが、光ファイバケーブルの量産性に適していることから、標準クラッド径を有しつつ、既存のSMFの10倍以上に大容量化が可能な空間多重光通信技術を検討しています。中でも、複数の空間モードを積極的に活用・制御したモード多重伝送技術は、空間多重光通信システムで課題となっている異なる空間多重光信号間の漏話（クロストーク）等による伝送距離の制限を克服できる技術として期待されており、最近研究を加速検討しています。具体的には、空間モード制御が可能なモード多重光ファイバ実装技術、また、ケーブル敷設特性に起因する動的光学特性に対応して同じ波長で複数の異なる光信号を多重分離可能なモード多重MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) デジタル信号処理構成技術、さらに両者を統合した空間モード多重光増幅中継技術を有機的に連携させた基盤技術の確立です。

モード多重MIMO デジタル信号処理構成技術に関しては、今期は、NTTで6つの独立な空間モードを用いたモード多重光通信において、異なる空間モード間で発生する伝送損失差や伝搬遅延差に対して強い補償特性を有するMIMO 信号処理方式や光増幅中継方式を提案することで、6000 km以上の長距離伝送の原理実証に成功しました。今年の3月には、さらに10モード多重の長距離伝送実験についても発表予定です。

これらの要素技術群の確立に向けて、一部をNICT（国立研究開発法人情報通信研究機構）委託研究の支援の下で、2021年度から「B5G (Beyond 5G) 時代に向けた空間モード制御光伝送基盤技術の研究開発」において、NTTアクセスサービスシステム研究所とともに、国内の4研究機関と共同で本技術の研究開発を加速させています。B5G 時代の大容量・長距離基幹光ネットワークを実現する空間多重光伝送システムにおいて、空間モードを制御可能な標準クラッド外径を有する結合型マルチコア光

ファイバ (MCF : Multi Core Fiber) ケーブル設計・実装・接続技術と、それに適合する光増幅中継技術、加えて、伝送リンクの動的変動に追従可能な新たな低負荷 MIMO 信号処理技術を検討することで、空間多重数を10以上に拡大して長距離伝送可能な空間モード制御光伝送基盤技術の確立をめざしています。

この2年の間には、研究所内の地下設備を利用して、種々の空間多重光ファイバケーブルを敷設して現場環境に近い条件下で伝送特性試験を行う段階に進みました。2022年で開設50周年の横須賀研究開発センタには、1970年代に有線通信システム技術の検証をするためにつくられた地下設備（とう道）があります。1970年代半ばの光ファイバ通信システム黎明期に開発された光ファイバケーブルが敷設され、実用化に向けた光ファイバケーブル特性試験が行われました。40年以上前からここで、先人たちが技術を検証して実用化に至ったという歴史的な場所で、新たな実証実験に挑んでいます。



三本の矢のごとく他者と連携して 実績を積み重ねる

研究活動においてカギとなることを教えていただけますでしょうか。

光通信システムの研究開発・実用化では、1つの技術のみで実用化することはできません。必要に応じてさまざまな企業等と連携することで、自らの技術ととともに複数の要素技術を組み合わせて目標性能を実証するというプロセスが重要です。現代は、世の中の変化のスピードが速くなっていることから、技術の標準化やグローバルな競争に負けないためには、タイムリーに他の研究機関や研究所内の連携を進めることが非常に重要になります。複数の強い技術を「三本の矢」の話のごとく連携して成果を上げて、実績を積み重ねていく必要があるのです。

フェローとしての役割の1つとしては、若手の研究者が自らのアイデアを試しつつ他の有力な研究者と効果的に連携する場を、いかにタイムリーにつくれるかという点が求められていると感じています。それを実現するには自らが強い技術を持っていることはもちろんですが、強い技術を



持つ他の研究者・研究機関との間で、実現するゴールを共有し、信頼関係を築くことが重要になります。普段の学会活動等での情報交換や共同実験等をとおして、実現するゴールを共有できるパートナーを見つけ、タイムリーに連携することを心掛けています。最終的なゴールが、連携するパートナーと一致していれば、何かの困難が発生しても初心に立ち返ってブレることなく先に進むことができますと思っています。海外の研究機関などが連携先であれば、文化や商習慣、メンタリティに差があり、微妙な駆け引きなども必要になることもありますが、基本的には国内外意識せずとにかく新しい技術にチャレンジする際には「まずは面白そうでやりがいがあるので、やってみましょうか」という前向きなマインドを大事にしたいと思っています。

さらに、前回もお伝えしたとおり「今ここ」という大事な瞬間を見逃さないように日頃の準備を重ねておくことも大切だと思っています。そのためにも、私たち自身がどの分野で何を凌駕して、価値を見出せる技術を生み出しているかを理解していることも重要です。また、私たちと組むことで連携パートナーにとって、どんな価値が提供できるかということも意識しておきたい点です。先端技術のことばかり考えていると、このような視点が抜け落ちてしまうので、私たちは、実用化部門の仲間とともに研究開発と実用化を両輪で進めています。

研究者とはどのような存在だと思いますか。

私はシステムの研究者に大事な視点として「非常識を常識に変えて、それを当たり前の技術として社会で役立てていく」ことをお話ししました。若い研究者の方にも伝えたいことですが、何事も、最初は「非常識」だと言われることも多いと思います。例えば学会で最初に発表したときには反応はそれほどでもなかったけれど、次の学会では多くの人が似たようなことを始めていて、それがその後の技術トレンドになったということもあります。

是非、失敗を恐れずに面白いと思ったことをまずは買ってもらいたいと思います。一方で、いつまで買えばいいのか、その見極めが難しいかもしれません。ただ、これまでも、なかなか日の目をみなかった技術が、20年後にある技術と

組み合わされることで爆発的に普及するという事例も多くありました。目の前の成果に一喜一憂することなく長いスパンで物事を検討し、いつか実用化されるときに備えて自らのアイデアを権利化しておくことも大事です。

最後に、令和3年春に、「コヒーレントマルチキャリア多値変調大容量光伝送方式の開発」に対して関係者を代表して「紫綬褒章」を受章いたしました。今回の受章の対象は、1995年ごろから2010年ごろまでに携わった長距離大容量光ファイバ通信システムの研究開発に関するものです。受章対象の開発技術は、2007年に、NTTグループの1波長当りのチャンネル容量40 Gbit/sの波長多重(WDM)光通信システム(システム容量:1.6 Tbit/s)において、初めて実用化されました。主な貢献としては、WDM光ネットワークによりデータトラフィックを柔軟に収容するための強力な誤り訂正符号を具備したデジタル多重信号フレーム技術(OTN: Optical Transport Network)、および、従来の2値強度変調直接検波方式にかわる多値差動位相変調技術の実用化とその国際標準化です。開発したこれらの技術は、インターネットの普及や光アクセス回線・スマートフォン(4G)を通じたブロードバンドサービスのグローバルな普及を支え、人々のビジネスやライフスタイルの変革に深くかかわる通信インフラ実現技術として、今なお、役立っています。何よりも嬉しいのは、ご指導いただいた諸先輩、苦楽を共にして研究開発・実用化を共に進めてきた多くの関係者を含む「私たち」が追究してきた分野、領域における貢献が、このようなかたちで認められたことです。世の中に実用化される研究開発に従事できること、社会に貢献できることは研究者にとっての醍醐味です。これからもその喜びを大切にしていきたいと思います。

挑戦する 研究開発者たち CHALLENGERS



安達 仁

NTTデータ
技術革新統括本部
技術開発本部 IOWN推進室
シニア・エキスパート

時流をとらえた 技術の専門家として、 常に新しい何かを考え、 先を見据えて社会の 方向性を意識する

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想の実現に向けて、社会・お客さまのニーズをいち早くとらえ、最先端の技術シーズとの連携を強化するためIOWN推進室を立ち上げたNTTデータ。IOWNを社会実装していくためには検証や実証実験が必要となりますが、この環境づくりを担うNTTデータ 安達仁氏に取り組みの概要と研究開発者としての姿勢を伺いました。



IOWN構想における先進技術の 実証実験に従事

現在、従事しているIOWN構想について教えてください。

NTTデータのIOWN推進室に所属して、NTT研究所において研究開発をしているIOWN関連技術の実証実験の環境づくりを担当しています。

ご存じのとおり、IOWN構想は情報通信システムを変革し、従来のICTの限界を超えた新たな情報通信基盤の実現をめざしています。構成する3つの主要な技術分野は、ま

ず、端末からネットワークまで、すべてにフォトニクス（光）ベースの技術により、エンド・ツー・エンドでの光波長パスを提供する「オールフォトニクス・ネットワーク（APN）」、実世界とデジタル世界の掛け合わせにより、サイバー空間上にリアルな対象物を再現することで未来予測等を実現する「デジタルツインコンピューティング」、そして、あらゆるものをつなぎ、その制御を実現する「コグニティブ・ファウンデーション」です。これらの技術を用いて、さまざまな価値観を包括した多くの情報をリアルタイムかつ公平に流通・処理させることで人や社会の「つながり」の質を高め、より豊かな社会の実現をめざしています。



NTTグループにおいては、IOWN関連技術の早期実装と普及は、NTT IOWN総合イノベーションセンタに属するIOWNプロダクトデザインセンタ（IDC）がけん引しています。IDCは市場ニーズや社会の要請からバックキャストしたIOWN技術の開発展開戦略を策定し、戦略に基づいた技術開発および実証などの活動を推進しています。現在、複数のIOWN関連の新規技術や市中技術を組み合わせて市場ニーズや社会の要請に対する提供価値を高め、NTTグループ、IOWN Global Forumの参画企業、官公庁、大学、通信機器メーカーをはじめ、多岐にわたる企業の皆様との実証をとおして市場の潜在的なニーズを抽出して、技術を精練しています。

このIOWN構想において、NTTデータのIOWN推進室はどのような役割を担うのですか。

一方、私たちNTTデータのIOWN推進室は、NTTの研究所で研究実用化されたIOWN関連の要素技術を、サービスやプロダクトとしてお客さまに提供・展開していくための支援や技術的環境づくりを担っています。2021年の組織発足当初は100人規模でしたが、2025年には技術者500人体制でIOWN構想の実現に貢献しようと努めています。

IOWN関連の技術により従来技術の限界を超えた非常に高機能で高性能・高品質なサービス提供が可能となりますが、この特長を最大限に利用していくためには、その利用形態であるユースケースを想定してサービス等として実装していくことが必要となります。IOWN推進室では、このユースケース検討から、アプリケーションがIOWN技術を利用できるようにする実行基盤の開発や、これらの実効性を確認するPoC（Proof of Concept：実証実験）を実施しています。

さて、IOWN構想の実現には研究開発だけでなく、技術を活用したビジネス創出・拡大が必要であり、適用先となる有力なターゲットを設定し、ユースケースの深掘りと技術課題の洗い出しを行う取り組みを重ねなければなりません。

また、NTT R&Dから段階的に提供される最新の研究成果を活用したPoC等による早期具現化（プレIOWN）も実現に向けて効果的だと考えています。さらに、APNのみならず、APN上で動作するアプリケーション基盤も重要であると考えています。

こうした中で、私自身はシニア・エキスパートとして、APNを中心にPoCに向けて環境整備から検証まで、研究所と連携して取り組んでいます。APNをデータセンタに引き込んで動作確認や性能面のチェックを行いつつ、アプリケーション基盤の一部ともなるミドルウェアの構築、検証を担っています。



「汎用性」を意識する

PoCの環境づくりにはどのようなスキルを求められているのでしょうか。

PoCは、検証案件ごとに払い出し、ユースケース固有のアプリケーションを配置する「案件個別部」、そして、検証を実施するうえで必要となる汎用的な技術群を提供する環境の「基本機能部」、そして、評価対象の技術を持ち込む環境で、研究所の技術や事業会社アセットを配置、または接続する想定「評価機能部」の3部で構成されています（図1、2）。

実際にサービスとして実装されることを想定して作業を進めていますが、例えば、基本機能部においては、データHUBと呼ばれる、大量のデータを一時的に蓄積し、複数のシステム間インタフェースを1カ所で管理・分析するシステム領域を用意し、さらにはそのデータどうしをつなぐためのパイプラインを用意します。そこに秘密計算AI（人工知能）や仮想データ等を搭載した「評価機能部」を接続して検証を進めていきます。こうした環境を整える際に私に求められているのは「汎用的」にすることです。特定の案件に特化せず、誰もが使うであろう「共通」する部分に

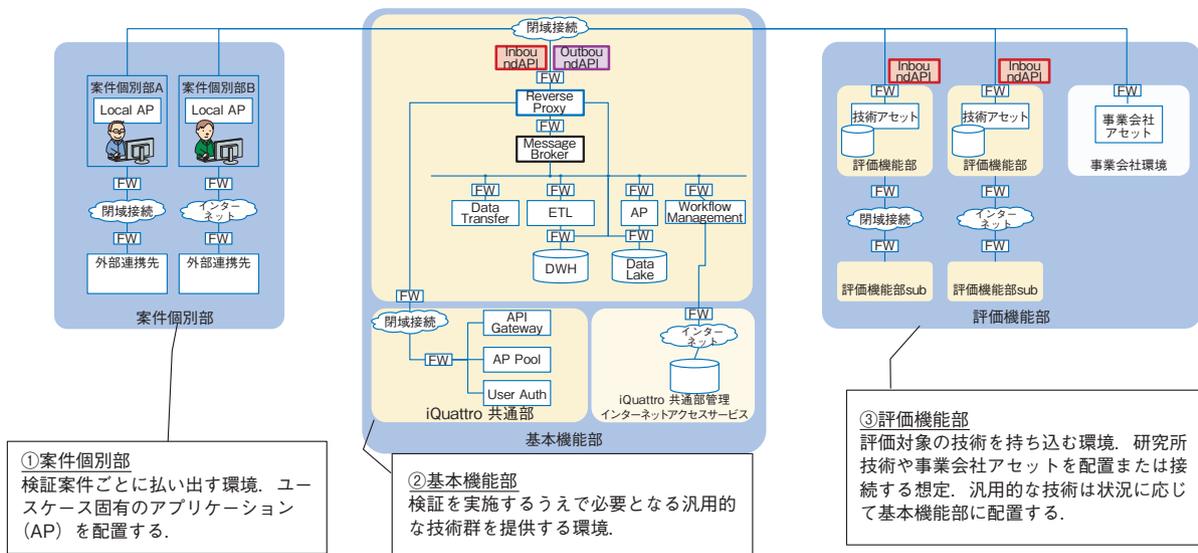


図1 実証実験環境の構成

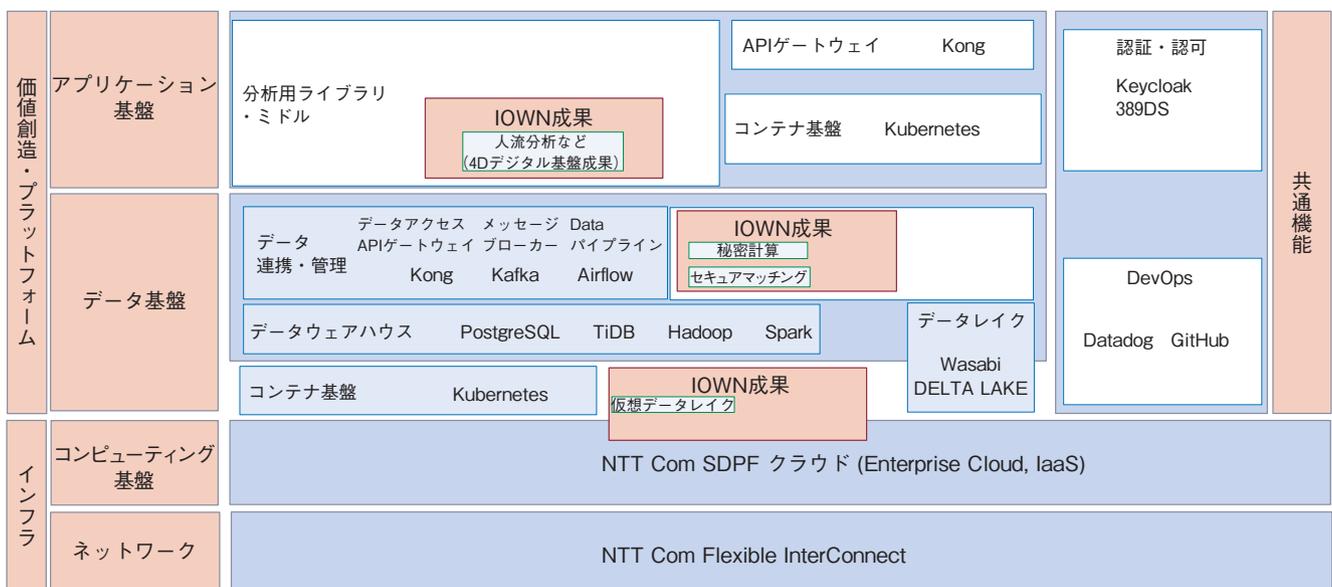


図2 実証実験環境の技術スタック



着目してデータHUB、基本機能部を構築することが重要です。こうした中で、どの部分が汎用的であるのかという判断は、これまでの経験に基づくことも多く、これについてもある意味必要なスキルだと考えます。

私はNTTデータに入社して16年目になりますが、IOWN推進室を含むNTTデータのR&D部門への異動前は、政府や自治体等のシステムに関する事業を行う公共事業部門に所属していました。地方税のシステムや厚生労働省のシステム等の開発拠点に伺って、ITアーキテクトとして技術支援する仕事をしていました。そこで、お客様のシステムの開発現場の最前線でどのようなことが求められるかをつぶさに見てきました。こうした現場では、お客様の要望は具体的で、当然のことながら高いクオリティを求められ、スケジュールや機能において最終的なゴールも設定されています。一方で、IOWN推進室では技術その他の日々の変化が激しいため、ゴールはお客様のシステムと比較してそこまでは明確にすることはできませんが、その分、常に最高のゴールを意識して自ら追究することになります。そこに、公共事業部門で培った高いクオリティを求める姿勢が繋がっていると実感します。

IOWN 構想という大きなプロジェクトの検証環境を整備するために、苦勞されていることはありますか。

検証環境の準備は2021年度から始まっていて、実際にその環境が構築されてリリースされるのは2023~2024年度という長期にわたるプロジェクトです。その中で、私は2022年10月からプロジェクトに参加しましたので、それまでの経緯を踏まえつつ自身のスキルを活かして技術開発が進められるように、周囲の皆さんに相談しながら日々仕事をしています。このプロジェクトにはNTTグループから複数の会社が参加しています。めざすゴールは同じでも、各社の持つ固有の事情がありますから、意思統一等の調整が必要です。チームメンバーが対等にコミュニケーションを図れるように、コミュニケーションツールをメールから

Slackに変えて、これまで以上に気軽に相談ができるようにしたことで、ゴールや意識を共有できるようになりました。

プロジェクトはある程度のリスクは計画に織り込み済みであり、そのリスクによる遅延はよくあることです。PoCではその遅延の原因が何らかのトラブルに起因するものが多いですが、そもそも検証なので試行錯誤するのは当然です。そのトラブル要因を究明するにあたり、検証環境の問題なのか、検証対象の研究所技術・装置の問題なのかといった原因切り分けにおいて、試行錯誤であるがゆえにその探索方法すらも手さぐりにならざるを得ないことも多く、その点は苦勞が伴います。

トラブル発生時のみならず、日ごろから構築資材が老朽化していないか、壊れていないか等の点検によりトラブル発生を未然に食い止める努力をしています。研究所から提供されたドキュメントを読み直して、基になっているオープンソースを理解したうえで、どのような技術を追加したのか、そしてその技術の価値をしっかりと理解して、関係者の皆さんが簡単に使える環境をつくり出せるように心掛けています。



求められる事業と研究のバランス 感覚

技術開発において、大切にされていることを教えていただけますか。

事業会社のR&D部門で研究開発された成果は、事業会社であるがゆえに最終的には利益につなげていく必要があります。とはいえ、成果を利益につなげることをだけを考えるのが良いとはいえなくて、研究活動とバランスを取りながら短期中期の目標を達成していくことが重要だと思います。私は、このバランス感覚を養うためにも、自分の出した成果は自己満足ではないかを確認し、常に何か新しいことを考え、その先を見据えて、社会のトレンドを意識し

ています。そのうえで、やはり、生み出した技術は実際に使っていただくことが重要です。「構築に1カ月かかります」などと、悠長に構えてもいただけませんし、お客さまは「ボタンを押したらすぐに使えます」という簡単な環境が当たり前だと感じているのが今の世の中です。この感覚に私自身もこたえて、「現場で使える」技術を提供していきたいと思っています。

そのためにも私はアンテナを高くして、インターネットで広く情報収集をしたり、社外の勉強会に参加しています。オープンソースの文化が花開いて以来、インターネットでその道のエキスパートが無料の勉強会を開いてくれる時代になりました。こうした場を利用して新しい知識を獲得すれば、そこからまた枝葉が伸びて、その先の知識や技術まで興味は次々と広がっていきます。このようにして知識や技術を蓄えています。残念なことに、最近では社内のメンバーと直接会ってフィードバックをする機会が減ってしまいましたが、Slack等の技術専門の雑談コーナーのスレッドで、仕事ではあまり使わない技術の話をすることもあります。こうしたフランクな場で、ヒントを得ることもあります。そこには、受注先、発注元という立場はありませんし、誰でも平等に、対等に興味のある話ができますから気軽に利用しています。

研究開発者とはどんな存在だとお考えでしょうか。そして、後進の皆さんに一言お願いします。

自分自身のことでは、技術の活用法を知っている技術の専門家だと思います。研究開発者はかなりのスペシャリストで、研究室などに閉じこもって1つのことを追究しているという印象をお持ちかもしれませんが、そのようなことはありません。ここまでのお話でお気付きのとおり、事業会社の研究開発は商用化されることが大切ですから、案件や社会生活まで広い視野を携えて、研究開発のための研究開発にならないよう努めたいですね。実際に、NTTデータの技術開発本部の社員の中には、専門性を持ってい

るからといって最初から配属になるよりは、ある程度他部署で経験を積んでから、「自分の専門性はR&Dで活かすことができる」と自覚されてから技術開発本部を希望される方が多くいます。

これらの傾向を踏まえて、後進の皆さん。事業会社の研究開発者であれば、1つのことに取り組むことはもちろん大事ですが、利益を追求することやお客さまのメリットを常に意識して研究開発に取り組んでいただきたいと思います。

また、これから事業会社の研究開発をめざす大学生や大学院生等の皆さん。自らの専門性を活かしてその道を極めるならばNTTの研究所をめざしたほうがよいでしょうけれど、もっと直接的に利益を追求して、使った人に喜ばれる研究開発や社会実装を実現させることに興味のある人はぜひNTTデータのR&D部門をめざしていただきたいですね。

学生のうちにできることは少ないかもしれませんが、プログラムが組めるとか、自分でシステムが構築できるように研究開発者としての「基礎体力」をつけておくのもよいと思います。自宅のパソコンでJavaのアプリケーションをつくってみる、オープンソースのデータベースをインストールしてみるといったレベルで構いませんから、経験を積んでおくことをお勧めします。少しでも経験があると、入社していきなりつまづくことはないのではないかと思います。

明日のトッパー



NTTコンピュータ&データサイエンス研究所

井田安俊 特別研究員

超高次元データで未来を拓く 「高速スパースモデリング技術」

NTTが掲げるIOWN構想の柱の1つである、デジタル上に現実世界を構築するデジタルツインコンピューティングでは、ヒト・モノからセンサで取得されるデータを利活用することが不可欠です。しかしセンシング技術の発達によって「データの次元数が増加し、それに伴い処理時間が長くなることで、現実的な時間内でデータを分析・活用することが難しくなる」という課題が発生しています。今回はこのような課題を解決する「高速スパースモデリング技術」について、井田安俊特別研究員にお話を聞きました。



◆PROFILE：2014年早稲田大学大学院修士課程修了。同年、日本電信電話株式会社入社。2021年京都大学大学院博士課程修了。博士（情報学）。2022年より日本電信電話株式会社NTTコンピュータ&データサイエンス研究所特別研究員。スパースモデリングの高速化・高精度化の研究およびサービス導入支援に従事。NTTグループのAI系技術者が情報交換のために集まる連絡会（NTTディープラーニング連絡会）を運営。該当分野の複数のトップカンファレンス（NeurIPS/ICML/AAAI/IJCAI/AISTATS）にて開発技術の論文採録。

超高次元データの処理時間の増加に打ち勝つ 新たな手法を創出

◆ご研究されているスパースモデリングとはどのようなものなのでしょうか。

スパースモデリングとは「得られた情報の中でも必要なものはごく一部で、その他の大部分は不要である」というスパース性を利用してデータを活用する技術です。「スパース」とは本来「まばらな」という意味であり、14世紀のイギリスの神学者オッカムの「ある事柄を説明するために、必要以上に多くを仮定するべきではない」という考え方（オッカムの剃刀）に基づいています。

そのスパースモデリングの例として、日本全国の気温・風向・気圧などの天候データから翌日の東京の気温予測を行う場合について考えてみましょう。この場合には地理的な関係性を考慮して「東京の気温予測に関連するデータは周辺の一部の都道府県だけである」という仮説が立てられます。この仮説は「全体のデータのうち重要なものはごく一部で、その他のデータは不要である」というスパースモデリングを利用するための基本的な前提になっています。このスパース性という事前知識を分析に組み込むことにより、翌日の東京の気温を予測しつつ、その予測に関連する都道

府県を特定できます。

この技術が求められている背景としては、近年のセンシング技術の発達により取得できるデータの次元数が増加していることが挙げられます。例えば近年の天候分析では縦軸の年度数（サンプル数）に対して、各地域で観測できる天候情報（次元数）の数量は数万から数億にも達しています（図1）。しかし近年の機械学習は膨大な数のサンプルを学習に用いて精度を引き出すアプローチが主流であり、サンプル数が次元数よりも相対的に少ないデータを扱うことは困難です。そこでスパースモデリングでは、スパース性を用いて分析に必要な次元だけを選び出すことによって、この課題を部分的に解決しています。

スパースモデリング技術の他の活用例としては、深層学習が挙げられます。現在のAI（人工知能）の基盤技術ともいえる深層学習では、モデルのパラメータ数を増加させることによって精度を改善し続けてきました。しかし膨大なパラメータ数によってメモリ消費量や処理時間が増加するため、例えばメモリ容量に制約のあるエッジ側のハードウェアにAIを適用することは困難です。そこで「全体のパラメータのうち重要なものはごく一部で、その他のパラメータは不要である」というスパース性を深層学習に取り入れることで、AIのパラメータ数を減らしてメモリ消費量の削減などを実現しています。

高次元データの例

- ◆ 船舶・ブイ・航空機・気象衛星などで構成される全球監視システムにおいて、センシングネットワークによって取得される天候データの次元数は数万~数億以上に達します。



図 1 天候データにおける次元数とサンプル数

◆従来技術と比較した「高速スパースモデリング技術」の強みを教えてください。

私が研究している「高速スパースモデリング技術」では、従来のスパースモデリング技術と比較して最大35倍の高速化に成功しています。従来のスパースモデリング技術では、各次元の重要度を表すスコア計算に多くの処理時間がかかっていました。一方で「高速スパースモデリング技術」では、スコアの代わりに高速に計算可能なスコアの上界・下界を用いることで、精度劣化を防ぎながら計算時間の大幅な短縮に成功しています。このアプローチは、私のNTT入社時の研究指導者であった藤原靖宏特別研究員がデータベース研究で用いていた高速化手法に影響されたものです。一見関連がなさそうなデータベースとスパースモデリングの研究を組み合わせることで、従来のスパースモデリングの研究分野にはなかった独自の方法で高速化を実現することができました(図2)。

このアプローチをベースとし、従来のスパースモデリング技術ではあまり事例がない次元数が数億以上の超高次元データを処理することをめざしています。2019年には前述した高速化アルゴリズムが最大で35倍の高速化を達成し、その論文が本分野のトップカンファレンスであるNeurIPSに採録されました。さらにこの技術をグループ会社に提供すべく1年をかけてさまざまな環境下で技術検証を実施し、本アルゴリズムによって多くの分析事例が高速化できることを確認しています。

しかし一方で、ごく少数のユースケースであり高速化できないことも確認しています。なぜ高速化できないかを細かく分析してみると、扱うデータの性質によっては高速化アルゴリズムのスコアの上界計算のオーバーヘッド(前計算)が大きくなってしまいうケースがあることが分かりました。このオーバーヘッドを極限まで削るアルゴリズムを現在開発しており、これが成功すればさらに2倍の高速化が見込めるため、35×2で最大70倍の高速化を実現できると考えています。

またそれと並行して、大規模データにおいて高い精度を達成する深層学習とスパースモデリングを組み合わせたアプローチを検討中です。深層学習は基本的に多くのデータを必要とするため、データ数が少ない場合にどのように深層学習を適用するかという研究が進んできており、この知見とスパースモデリングを組み合わせることで、データ数が少なく高次元なデータでも高い精度を達成する技術の検討を進めています。こちらはより長期的な視野の研究になると考えていて、これによってスパースモデリングの10%の精度改善をめざしています。

◆「高速スパースモデリング技術」によりどのような世界が実現されるのでしょうか。

「高速スパースモデリング技術」は、主に超高次元データから分析・予測を行うタスクに応用できます。例えば工場IoT(Internet of Things)では、生産量増減に影響がある時間帯を特定する分析の前処理で活用することで、データ分析のPDCA



高速スパースモデリング技術 全体のアルゴリズム

- ◆ 1 → 2の順番で実行することで、全てのパラメータを漏れなく最適化し、精度劣化を防ぎます。また、精度劣化が起こらないことを理論的にも保証しました。

1. 重要そうなグループのみを重点的に最適化

スコアの下界で重要なグループを抽出



2. 不要なスコア計算をスキップしながら全パラメータを最適化

スコアの上界で不要なグループを特定



図2 「高速スパースモデリング技術」の計算アルゴリズム

サイクルを高速化し意思決定までのリードタイムを短縮できます。加えて高速化によってさらに長い期間の時系列データを扱えるようになり、それまでではできなかった高度な分析も可能になります。同様にゲノムワイド関連解析では、がんなどの疾患に関連する遺伝的要因（SNPs）を特定する分析の前処理へ適用できるため、高速化によってさらに大規模なSNPsデータの分析が可能となります。また核融合炉では、プラズマの崩壊や持続に関連する制御操作やセンサを特定する分析の前処理で活用し、核融合炉を安定して稼働させるための現象解明に貢献できると考えています。

そしてIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想におけるデジタルツインコンピューティング（DTC：Digital Twin Computing）では、ヒト・モノに取り付けられたセンサから取得される大量のセンサデータを活用してデジタルツインを構築します。こうした未来の実現に向けた取り組みの中で、センシング技術が発達しセンサデータも高次元化しているため、高次元データ分析を得意とするスパースモデリングの利活用の機運も高まっていると思います。また高次元化が進むにつれてスパースモデリングの処理時間も増加していくため、スパースモデリングの高速化技術の確立は重要といえると思います。

◆「高速スパースモデリング技術」の研究は、今後どのように進んでいくのでしょうか。

今後は空間計算量、つまり「メモリ消費量をどれだけ抑えら

れるか」が課題となります。高速スパースモデリング技術の高速化倍率は世界的にみてもトップクラスであり、処理時間の短縮という目的ではマイルストーンを達成しつつありますが、データが高次元になるほどメモリ消費量は当然増えるという点にも着目しなければいけません。例えば開発技術のサービス導入支援のための技術検証の現場では、高速化の倍率に問題がなくともメモリ消費量が大きすぎて処理できる次元数が頭打ちになるという事態が発生します。もちろん追加設備投資でメモリを増強してこの課題を解決することも可能ですが、サービスによってはその方法で採算が取れなくなってしまうという問題が発生します。このような課題を解決するため、高速化倍率を維持しながらメモリ消費量を抑える新たな高速スパースモデリング技術の方法を模索しています。

またもう1つの方向性として「飛躍的な高速化」があります。センシング技術の発達によってデータの高次元化が進み、いずれアルゴリズムによる高速化の限界が訪れた場合に、分散処理基盤や最新ハードウェア活用などのアプローチも含めた総合的な高速化アプローチが必要になると思います。この研究課題は他分野の専門家との連携が不可欠であり、より長期的な視野でじっくりと解決策を見つけなければいけません。NTTコンピュータ&データサイエンス研究所では先進的な計算機の研究開発にも取り組んでおり、これらをうまく活用してさらに高速なスパースモデリング技術を実現できるのではないかと検討中です。

「死の谷」の経験によって 実用的な技術を創ることを決意

◆研究開発を進めるうえで、大切にされている考え方を教えてください。

学生時代に参加したベンチャー企業での教訓から「実用性を重視した研究開発」という観点を大切にしています。私は学部3年生だった2010年ごろに機械学習に初めて出会い、文書がどのようなトピックで構成されているかを可視化することができるトピックモデルという技術を研究していました。その中で「この技術を実際にサービスに組み込んでみたい」という思いが強くなり、友人からの誘いでベンチャー企業へ参加しました。しかしそこでは「想定していなかったデータが学習データに混入する」「それによってモデルが想定外の挙動をする」「出力結果が人間にとって解釈可能でなくなる」「全体のデータの規模が大きすぎて学習が終わらない」などといった研究段階にはなかった問題に多数直面し、サービスへの実装には至りませんでした。研究とサービスの間の障壁を「死の谷」と表現することもあります。これは機械学習のサービス化において「死の谷」を越えられなかった私の初めての経験でした。こうした経験から、実際の現場の課題を解決できる機械学習技術をつくりたいという思いが芽生え、現在は「実際のサービスで動作する実用的なアルゴリズムを開発する」ことにこだわりを持って現場の方々や情報交換をしながら日々研究に取り組んでいます。

しかしもちろんそれだけではなく、飛躍的・独創的な研究成果を出すために、実用からある程度離れて長期的に取り組む研究も検討する必要があると思います。短期的・長期的研究の両方を1人で取り組むことで、例えば実用的な研究で得た知見が長期的な研究に役立ち、長期的な研究でじっくり考えていたアイデアの一部が実用的な研究に役立つこともあります。現場からの課題を

実用的な研究で取り組み、そこで得た知見を長期的な研究へフィードバックする。逆に長期的な研究で熟成させたアイデアを実用的な研究に分け与えて現場の課題を解く。チャンスがあれば長期的な研究から飛躍的な結果を出せるような技術や論文をアウトプットしていく。このような2種類の異なる性質の研究の間で相互作用やフィードバックループを起こす、という状態を研究の理想形にしています。

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

NTTの研究開発の分野は非常に多岐にわたり、世界的にみても独特な研究分野のポートフォリオを持っていると感じます。これは課題解決にとっても非常に有利であり、例えば深層学習高速化の案件などでは高速化倍率に関して厳しい目標を課せられることがあるのですが、NTTにはアルゴリズムからハードウェア、インターコネクに至るまで多岐にわたる専門家がそろっているため、すぐ隣の席にいる同僚に話を聞くだけで10分もかからずに総合的な解決策を見出すことができたりします。このように難しい課題へのアプローチを短期間で考案できるというのは、独自のポートフォリオを持ち多様な研究人材がそろっているNTTの環境ならではの強みだと思います。

また私が所属しているNTTコンピュータ&データサイエンス研究所は、データサイエンスに関して分野的にも時間軸的にも幅広いレイヤーの技術を研究している組織だと思っています。例えば現場課題に密着して開発されたデータ分析技術は事業への導入が短い期間で検討されており、NTTのサービスの付加価値化に貢献していると思います。その一方で、最先端の計算機の研究開発や応用の模索は長期的なデータサイエンスの発展にとって重要な位置にあるのではないかと思います。

最後に、企業研究者として働いていると周りの状況が組織再編などによって急激に変化することがあります。このときに環境の変化へ適応しようとするあまり研究の方向を変えすぎてしまうと、それまで身に付けてきた技術力を活かせず結果が出せなくなるなどして、ストレスや自信の喪失につながってしまいます。しかし私の経験では、自分の中で普遍的でぶれない軸を持ち妥協しないようにしておく、自分の良さを損なうことなく環境に適応できることが多いです。これは「外柔内剛」、つまり「自身の核となる研究哲学は妥協しないが、それ以外の部分は環境に応じて柔軟に適応していく」という考え方です。これを読んでいる企業研究者をめざしている学生の皆さんにも、ぜひ自分自身の軸を見つけて大切にしながら研究を楽しんでほしいと思います。



(今回はリモートにてインタビューを実施しました)

NTT DATA

株式会社NTTデータ フィナンシャルテクノロジー

金融・決済業務の 深い知見と高い技術力で お客さまの信頼を得る

NTT データ フィナンシャルテクノロジーは、NTTデータのビジネスの中核である金融業界関連システムの開発・維持を担う会社だ。電電公社時代から培ってきた金融業界の業務に関する知見と高い技術力でお客さまの信頼を得ている事業と、それを実現するうえでの人材育成に対する思いを植木英次社長に伺った。



NTTデータ フィナンシャルテクノロジー 植木英次社長

金融業界の専門的な業務ノウハウを 礎に多くの基幹システムを開発

◆設立の背景と会社の概要について教えてください。

NTTデータ フィナンシャルテクノロジーは、NTTデータの金融分野の開発子会社であるNTTデータシステム技術とNTTデータ・フィナンシャルコアが、2022年4月に統合されて設立されました。

NTTデータシステム技術は、日本銀行のシステムをオンラインで結ぶための国家プロジェクトにNTTが参画・受注したことをきっかけとして1985年にNTTのシステム子会社「NTTシステム技術」として設立され、1988年にNTTデータの子会社として引き継がれ、2002年にNTTデータシステム技術に社名を変更しました。一方、NTTデータ・フィナンシャルコアは、クレジットカード決済のプラットフォームである「CAFIS」や、電話やインターネットにより残高照会や振込など金融機関の窓口に行かなくても実行可能とするサービスである「ANSER」の開発体制強化のために1998年に設立されたNTTデータネットと、主に地方銀行向けのバンキング勘定系PKGである「BeSTA」を使った「地銀共同システム」の開発をきっかけにバンキング開発体制強化のために2000年に設立されたNTTデータフィットが、2009年に統合されてNTTデータ・フィナンシャルコアとなりました。

近年、金融自由化による新規参入、規制緩和による業容の変化、低金利による収益悪化、キャッシュレス化やデジタル化の推進等、金融業界を取り巻く環境は激しく変化す

るとともにますます厳しいものになっています。このようなお客さま環境の変化の下、勘定系等基幹系を中心としたコアビジネス領域の深化・拡大はもちろんのこと、今後の成長に向け新ビジネス領域にもチャレンジしていくことが重要です。社会問題化しているIT人材不足を乗り越えて、リソース拡大並びにリソースシフトをしていく必要があります。グループ内の金融関連のシステム子会社を統合して、これらに対応していくことを目的として新会社を設立しました。

NTTデータグループとして、NTTデータは企画機能を強化することで新しいサービスの創出に注力し、NFTはお客さま業務や新技術を身に付けながら成長を促進するとともに、NTTデータが企画する新サービス創出においては、当社が保有するお客さまの業務やシステムに関する知見や技術的ノウハウを連携させることで新しいサービス創出につなげていくつもりです。

◆具体的にどのような事業展開をしているのでしょうか。

基本的にはNTTデータが金融系のお客さまに提供しているシステムやプラットフォームについて、その開発から維持まで一貫して行っています。売り上げ規模で90%以上がNTTデータと連携したビジネスとなっています。金融業界といってもその領域は多岐にわたり、かつ提供するシステムも大規模でその領域ごとに業務も異なるため、顧客軸を意識した事業部と、技術・ソリューション軸を強みとした事業部でビジネス拡大をめざしています(表)。

表 事業部と対象業務

事業部	対象業務（システム）
日銀システム事業部	日本銀行（日銀）に関連するさまざまなシステムの開発・維持，およびミッションクリティカルを支えるオープン基盤の開発。 全国銀行協会（全銀）の決済ネットワークにも参画予定。
グローバルIT事業部	メガバンク，資金証券・ファイナンス，グローバルペイメントに関連するシステムの開発・維持。
保険システム事業部	生損保業界の企業の基幹システムの開発・維持。
第一バンキングシステム事業部	バンキング勘定系PKG（BeSTA）の開発・維持，およびこれを用いた地方銀行，第二地方銀行の基幹系システム共同センターの開発・維持。
第二バンキングシステム事業部	JAバンクの基幹システム（JASTEM），および信用金庫，信用組合等のバンキングの基幹系システム共同センターの開発・維持。
eBDX事業部	ANSER関連の開発・維持。
決済イノベーション事業部	CAFISの開発および関連する決済ネットワークの開発・維持。
クレジットシステム事業部	クレジット会社側の審査業務を担う共同オーソリゼーション関連システムの開発・維持。
テクノロジー&ソリューション事業部	急成長するDXニーズに対応するために，クラウド，セキュリティ，AI，RPA，生産技術，eビジネスなどの新技術領域を中心として既存のシステム等への適用支援等。

激動の金融業界のお客さまに 付加価値を提供できる人材育成

◆事業を取り巻く環境はどのような状況でしょうか。

前述のとおり，金融自由化による新規参入，規制緩和による業容の変化，低金利による収益悪化等，金融業界を取り巻く事業環境はこれらを要因とした競争激化もあり，ますます厳しいものになっています。また，キャッシュレスの推進やデジタルトランスフォーメーション（DX）の普及に対応していくために，クラウド，セキュリティ，AI，RPA（Robotic Process Automation）といった新しい技術への対応やDXに関するさまざまな知見も必要となっています。

当社にはエンジニアを中心として約1800名の社員がおり，NTTデータには高度なスキルやノウハウを有するコンサルタントもいます。こうした人たちがお客さまへのコンサルティングからシステム構築・維持をサポートしますので，お客さまには安心してお任せいただけると思います。さらには共同センターやプラットフォームサービスをご利用のお客さまには，私たちがニーズを先取りした対応を行っていくこととなりますので，大きな付加価値になると思います。

その意味で，私たちの1800名近くのエンジニアはまさに当社の強みであり，財産でもあります。お客さまのご期待にしっかりとこたえ，付加価値を提供していくためには，

人材確保・育成によりエンジニアの価値を高めていくことが，今後も継続していく経営課題だと認識しています。幸いなことにNTTデータグループとして人材育成プログラムがあり，いい環境がありますので，これを最大限活用して絶え間なく人材育成に取り組んでいくつもりです。

◆今後の展望についてお聞かせください。

事業概要にもありますが，私たちの事業は金融分野に広く深くかかわっています。金融分野の事業はNTTデータにおいては，電電公社の時代からの歴史がある重要なビジネスであり，当然90%以上がNTTデータとの連携ビジネスである当社に対してNTTデータの期待とそれに伴う責任は大きなものとなります。したがって，それにこたえていくためのパワーとスキルの基盤をより盤石なものとしていくことに注力していきます。NFTは設立後約1年しか経過していませんが，会社統合の目的を一刻でも早く成就させるためにも，この取り組みは重要なものです。

とはいえ，当社には技術もノウハウも人材もあるので，こうした取り組みの延長として技術等の適用領域を広げて，残りの10%の当社独自のビジネスも拡大していきたいと考えています。

金融業界で得た知見で地域活性化をサポートする新ビジネス創出



テクノロジー&ソリューション事業部
青木 滋 さん

◆担当されている業務について教えてください。

テクノロジー&ソリューション事業部の技術戦略企画担当で、NTTデータ フィナンシャルテクノロジーが持つ専門的な技術、ノウハウを活用して、新ビジネス創出を行っています。NTTデータとの連携による新ビジネス創出がメインではありますが、私が参加していた社外のコミュニティにおける縁があって、NTTデータ フィナンシャルテクノロジーとして栃木県様の地域活性化関連施策を担当しています。

地方銀行や信用金庫といった地域の金融機関は、経済のプロとして顧客企業の生産性向上の支援をすることで、地域経済を活性化させることに課題意識を持っています。このためにはデジタル化やその先のDXがキーとなるのですが、その人材がほとんどいないので、業務知識もあり日頃からお付き合いのある当社との連携になります。一方で、栃木県様は、①サービス業の生産性向上による企業の活性化、②商店街・商工会議所といった団体をベースとした地域活性化という2つの側面から課題解決に取り組んでいます。こちらでもデジタル化やDXがキーとなるので、自治体、地域の企業、NTTデータ フィナンシャルテクノロジーによる連携プログラムを走らせています。当社としては、ソリューションやサービスの提供もありますが、それ以上にお客さまにおけるこれらの利用支援をとおして、生産性向上やDXに向けてお客さまの自立自走をめざしています。自立自走がないことには継続的な活性化につながらないからです。

NTTデータにしてもNTTデータ フィナンシャルテクノロジーにしても大企業とお付き合いはあるものの、地域の中小企業とお付き合いはほとんどありません。大

企業と中小企業の間にはビジネス環境をはじめさまざまなギャップがあり、当然課題も異なってきます。オフィスで考えていてもそのギャップにすら気付くことができません。現地に飛び込んでいくことが大切で、最近ではオフィスの外にいる時間のほうが長くなっていますが、リモートワークのおかげで効率的に仕事ができます。

◆今後の展望について教えてください。

まずは、お客さまの自立自走に向けて足しげく現場に入っていくことに注力します。そして、これを1つの成功事例としてほかへの展開を図っていきたいと思います。そして、複数の事例の中で共通的な項目をプラットフォーム化、パッ

Xon Opsでシステムの故障対応力強化



決済イノベーション事業部
山田 裕央 さん

ケージ化していくことで新たなビジネスの創出につなげていきたいと思っています。

◆担当されている業務について教えてください。

決済イノベーション事業部第二担当ではCAFISを中心とした決済システムの開発・保守・システムオペレーションを行っています。私はその中でも特に、故障対応力強化を目的とした保守・運用改善プロジェクトに取り組んでいます。

CAFISのようなシステムはトラブルが発生するとその社会的影響が非常に大きなものとなります。この影響を小さくするためにはトラブルを未然に防ぐことが最重要なのですが、トラブルをゼロにすることは不可能です。そこで、トラブル発生時には原因分析を行い、暫定対処を含めて速やかに復旧させなければなりません。

原因調査は各種の警報やシステムからのメッセージを解析しながら（罹）障箇所や現象、原因等を分析し、それにより対処方法を検討していきます。システムからのメッセージは膨大な量になり、トラブルと直接関係ないものま

で含まれています。その中から必要なメッセージを抽出し、他の警報情報等と合わせて解析することで、原因特定に至ります。そして、その原因と過去の事例等を対比させながら、あるいは有スキル者の過去の経験等に立脚して対処方法を決めて、それを現場と共有しながら対処していきます。この説明でもお分かりかと思いますが、このプロセスを実行するには多大なる稼働と高度なスキルが要求され、復旧までの時間が長時間化する要因でもあります。トラブルが複雑なものであれば、この時間はさらに延びます。

そこで、プロジェクトでは有スキル者のナレッジを蓄積し、複数チームの固有ナレッジを活用しながら警報検知・メッセージ抽出から原因特定までのプロセス・対応を可視化し、必要情報のみを関係者で共有するシステム「Xon Ops (エクソンオプス)」を開発しました。Xon Ops 導入前後で、当該プロセスに要した時間が半分以下になり、不要メッセージが大幅に削減されたことにより、運用担当の稼働も15%以上削減されました。

◆今後の展望について教えてください。

当面はNTTデータグループ内のシステムにXon Ops を広めていくことが中心となります。システムの運用・

保守を担当する人は、トラブルを発生させないことや正確なオペレーションに気を遣うため、綿密な行動パターンをとる傾向が強くなります。トラブル時のメッセージには実際に必要のないものも多数あり、Xon Ops がその取捨選択をしている、つまり多くのメッセージを捨てていることに驚きと感覚的な抵抗を示されることが多いのですが、実際の利用者の評判はすこぶるいいので、その紹介とともにとにかく一度使っていただくことをとおして普及を図りたいと思います。その先にはNTTデータグループ外のお客さまへの拡大を視野に入れていくこととなりますが、Xon Ops のチームとしては「システムトラブルで困っている人をなくしたい」との思いを一貫して持っており、困りごとのある方がいらっしゃればぜひ意見交換させていただきたいと思っています。

問い合わせや詳細は、下記URLをご参照ください。

■ URL : https://landing.xonops.com/?utm_source=ntj&utm_medium=web&utm_campaign=lp2023_2



NTTデータ フィナンシャルテクノロジー ア・ラ・カルト

■VRリモート会議

リモートワークがすっかり世の中に定着してきましたが、NTTデータ フィナンシャルテクノロジーも多くの人がリモートワークをしているそうです。リモート会議もよく行われているのですが、その中であるチームがVR (Virtual Reality) リモート会議をしているそうです。あるメンバーがVRゴーグルを買ってきてやってみようということになり、毎朝の朝会、およびその他の会議は必要に応じて実施しています。音声も立体感を持って聞こえ、他のリモート会議ツールと比べて、相手が近くにいるような感じになり、親近感がわいてくるとのことです。それほどまでの没入感もあるため、会議が終わってゴーグルを外すと、パソコンに向かって話していたつもりが実は壁のほうを向いていた、といったこともあるそうです。

■日替わりで景色が変わるオフィス

本社はJRの浜松町駅のすぐ前にあるのですが、山手線に新しくできた「高輪ゲートウェイ」駅の近くにもオフィスがあるそうです。付近は再開発の最中で、次々と新しいビルが建築されたり、新橋－横浜間に国内初の鉄道を通すため1870年に着工された「高輪築堤」の遺構が発見されたり、日替わりでその景色も変わっているそうです。この景色の変化を楽しみにして、品川駅からわざわざ歩いてくる社員もいるそうです。近くには、線路の下を通るトンネルの高さがあまりに低く、屋根にランプのあるタクシーや、自転車に乗ったままで通過できない、背の高い人がかがんで通るといって「お化けトンネル」もありますが、これがなくなるとのことです寂しさを覚えている社員もいるようです。

広がるメタバースのビジネス活用 ——期待と課題を探る

近年、バズワードとしてあらゆる業界から注目を集めるメタバース。まだまだ発展途上であるメタバースですが、ビジネス領域への活用も本格化し始めています。NTTデータでは世界6カ国（日本、米国、中国、イタリア、ドイツ、インド）において、メタバースの最新技術の検証や先進顧客との共同検討を推進しています。ここでは、活用例や構成要素を紐解きながら、メタバースのビジネス活用における期待と課題について解説します。

はじめに

メタバース（Metaverse）という言葉は、1992年にニール・スティーヴンスン氏の小説内で架空の仮想空間サービスとして登場した造語で、超越という意味のMetaと宇宙を意味するUniverseが掛け合わさって成立したものです。ここ数年で急速に一般化したメタバースですが、世界中で確立された定義は存在しておらず、定義が乱立している状況です。そのため、一概に「これがメタバース」と結論付けることはできませんが、複数の定義の中で以下のような共通要素が確認できます。

- ・ 三次元（3D）の仮想空間であること
 - ・ 複数のユーザが同時参加し、空間を共有できること
 - ・ 高い没入感が体験できること
- これらの要素を集約すると「多くのユーザが同時に参加

でき、現実に近いリアルな体験が可能な三次元の仮想空間」と理解できます。経済活動の存在や実世界との連動（デジタルツイン^{*1}）などを求める定義もありますが、現時点でビジネス上の活用を考えるうえでは上記のようなイメージを持っておけば十分でしょう。

メタバースのビジネス活用例

ここからは具体的なメタバースのビジネス活用を考えていきます。想定されるメタバースの活用例を表1にまとめました。

*1 デジタルツイン：現実のヒト・モノ・コトのデジタルコピーを仮想空間上に表現する技術。データ分析や未来予測などのシミュレーションを実行し、その結果に基づく最適な方法や行動を現実にフィードバックします。

表1 メタバースのビジネス活用例

活用例	業界	適用イメージ
店舗の出店・運営	小売、メーカー、金融、不動産、地方自治体等	<ul style="list-style-type: none"> ・ 仮想空間上で実際の店舗を再現し、現実の商品を販売する ・ アバターによる場所や時間にとられない接客サービスも提供可能
ショールームの設置	小売、メーカー、不動産等	<ul style="list-style-type: none"> ・ 3Dモデルや魅力的なプレゼンを活用した商品のアピールの場として利用する ・ 「触る」「動かす」といったインタラクティブな体験を提供できる
オンラインミーティング	全業種	<ul style="list-style-type: none"> ・ 表情や仕草などを表現したアバター機能で、自然なコミュニケーションを実現する ・ 感情認識や会話の自動翻訳機能でミーティングをサポート
トレーニング・研修	小売、メーカー、金融、インフラ、スポーツ等	<ul style="list-style-type: none"> ・ 接客、非常時、装置利用、勉強会等をメタバース空間で開催する ・ 五感にアプローチした体験が可能のため、事故・防災訓練やスポーツにも適性
街並み再現（ミラーワールド）	観光、地方自治体等	<ul style="list-style-type: none"> ・ 現実の都市や観光地を仮想空間上に再現する（ミラーワールド） ・ 観光資源のアピールや町おこしのほか、デジタル上での文化財保存の役割もあり
共同作業	小売、メーカー、インフラ等	<ul style="list-style-type: none"> ・ 設計中の製品を仮想空間上で共有し、多人数で共同作業可能な空間を提供 ・ 同時作業での設計～テストの効率化とコラボレーションによるアイデア創出を支援

ここからは表中で主要なメタバースの活用事例と考えられる3つをピックアップして解説していきます。

まずは仮想空間上に実際の店舗を再現し、商品を販売する「店舗の出店・運営」です。通常の実店舗を運営する場合、物理的な制約が存在するため対人での接客が必須となり、遠隔地にいる顧客への対応が難しくなるなど顧客接点の創出において障壁となり得ます。仮想空間上に店舗を運営することによって、距離の壁を越えて新規顧客へのアプローチやアバターを介した非接触での接客を可能とし、さらには通常のオンラインショッピングでは提供できない、インタラクティブな購買体験を提供できると考えられます。

また「トレーニング・研修」領域もメタバースと親和性が高い活用先として認知されています。一般的なトレーニングや研修の場合、座学では机上レベルのレクチャーにとどまりがちであるため、一方で実地研修や体験学習は人・時間・費用面のコストが高くなります。対して、メタバース空間上でのトレーニングが実現できれば、現実に近く、より臨場感の高い教材コンテンツを場所や時間を問わずに提供することが可能です。加えて、実際には再現が難しいような危険体験や災害体験にも効果を発揮すると考えられます。

メタバース上での「共同作業」は、業種を問わず広く活躍できる領域と考えられます。例えば、企画段階の製品を3Dモデルとしてメタバース空間内に配置し、複数人で話しながら成果物のレビュー・改良を行うことができれば、合意形成の迅速化や共同作業によるアイデア創出が期待できます。また、遠隔地にいるエンドユーザにも門戸を開くことで、開発者とエンドユーザがコラボレーションした新しい商品開発の手法をつくり出せるかもしれません。

表1のとおり、ほかにも数多くの活用事例が想定され、既存のサービスの組合せ次第でメタバースの活用先は無限に広がります。メタバースの強みや特徴を踏まえて、現状のビジネスとどう融合させるのか、十分に検討することが重要です。

メタバースの構成要素

ここではメタバースの特徴理解のため、構成要素を分解しその全体像を整理していきます。メタバースを俯瞰的に理解することで、ビジネス活用において留意すべきポイント

を明確化していきます。

Application, Platform, Technologyの3層構造としてメタバースを分解すると、図のように表現できます。

まず、Applicationについては、通常私たちが目にするメタバースの姿であり、現在、特定のサービスを提供するメタバース・コンテンツは一般的にここに属します。目的や活用シーンに合わせて、独自のデジタル空間の作成やカスタマイズが行われるのが特徴です。

2番目のPlatformは、メタバースを構成するために必要な共通機能を備えた基盤です。2023年現在、メタバースの作成と公開に特化した「メタバース・プラットフォーム」が複数存在しています。主要なものとして、Mozilla Hubs⁽¹⁾やNTTコノキューが提供するDOOR⁽²⁾、国内のメタバースの先駆的サービスとして知られるCluster⁽³⁾、世界でもっとも接続者の多いVR (Virtual Reality) 仮想空間と知られるソーシャルゲームのVRChat⁽⁴⁾が挙げられます。特に、Mozilla Hubsはオープンソースソフトウェア(OSS)として提供され多数のユーザによる改良が行われており、個人利用からビジネス活用まで幅広いユースケースに適用が可能なメタバース・プラットフォームとして認知されています。

押さえておくべき点は、現在のメタバースの多くはメタバース・プラットフォーム上で提供されている点です。したがって、メタバースのビジネス活用を考えた場合、どのプラットフォームを選択するかが重要となります。既存のメタバース・プラットフォームは対応するヘッドマウントディスプレイ(HMD)の対応機種、PC・スマートフォンでの利用可否やユーザのアクセシビリティ、描画性能など特徴が異なるため、こういったサービス実現したいか、ターゲットは誰かなど、多角的な視点で検討することが必要です。

3番目はTechnologyについてです。図で示したとおり、VRデバイスやモーションキャプチャといった周辺機器は当然のこと、さらに視野を広げれば第5世代移動通信システム(5G)・第6世代移動通信システム(6G)といったネットワーク技術、チップ・プロセッサといった演算装置など、数多くの技術が現在のメタバースを支えています。これらの1つひとつの技術の発展が相互に絡み合い、メタバースの進化をさらに加速させていると理解できます。ビジネス活用においては、期待する要件をPlatformが提供する機

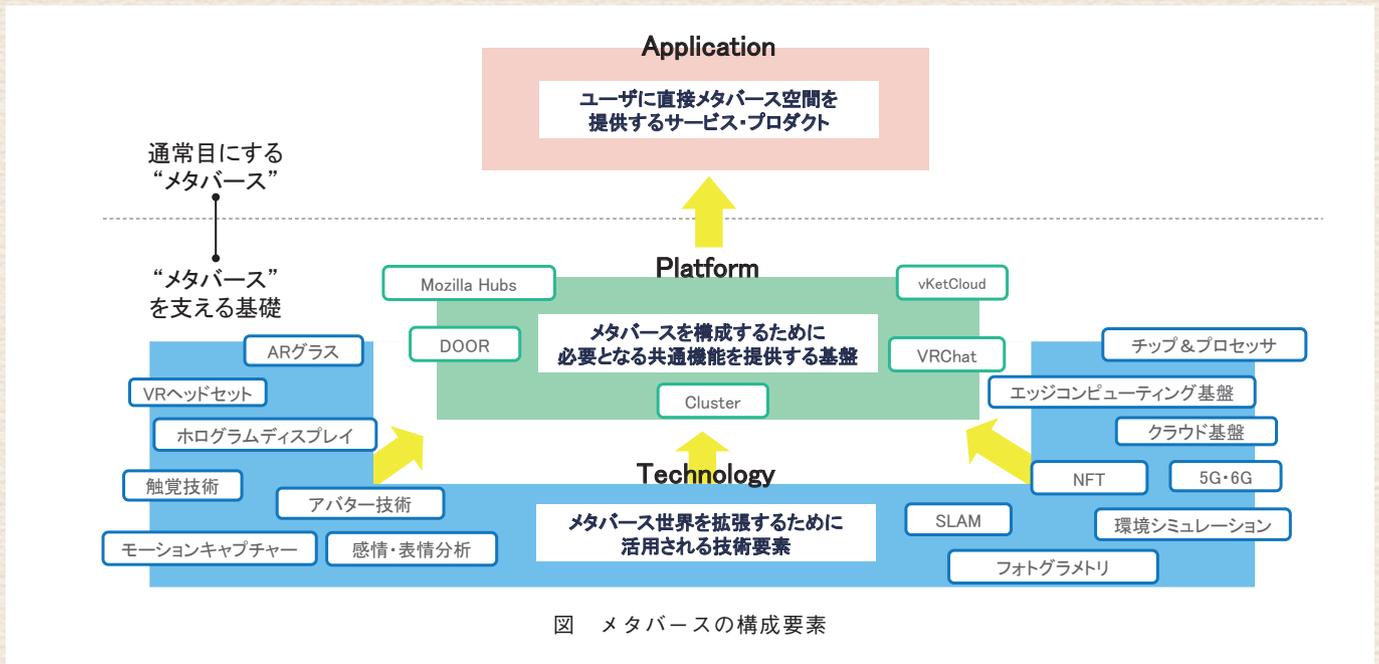


図 メタバースの構成要素

能だけでは達成できない場合、最新技術を積極的に採用することで課題を解決し、より先進的で魅力的なサービスを実現できる可能性があります。他メタバースサービスとの差別化やキラーコンテンツとしてのメタバースを実現したい企業・団体は、関連する技術群を継続的にウォッチし、最新技術の活用のあり方を検討することが重要です。他者に先駆けて先駆的なメタバースを展開することができれば、黎明期であるメタバース領域において優位性を確保できると考えられます。

メタバースの課題

期待が先行しているメタバースですが、多くの課題があります（表2）。この中で特に留意しておきたい点について触れていきます。

まず技術的・運用的な課題として、もっとも大きいものが「デバイスの成熟度と普及」です。ここで言う「デバイス」とは、メタバースを高い没入感をもって体感できるHMDなどのVR機器を指します。Meta Quest 2⁽⁵⁾を筆頭に、ここ数年でHMDは急速に進化し、低価格で高性能な製品を入手できるようになったものの、リアリティの再現

表2 メタバースの課題

技術・運用面の課題	<ul style="list-style-type: none"> ・デバイスの成熟度と普及 ・ワールドの製作コスト ・1ワールド当りの同時接続数 ・接客が必要な場合の人員配置 ・企業利用時のセキュリティ対策等
制度面の課題	<ul style="list-style-type: none"> ・匿名性と実名制の保証 ・行動データの適切な取り扱い ・AML/CFT（マネーロンダリングおよびテロ資金供与対策） ・消費者保護、詐欺的行為の防止 ・いやがらせ、暴力的行為の防止・監視等

度や「VR酔い」への対処には改良の余地があり、一般消費者における普及率もスマートフォンには遠く及ばない状態です。臨場感やインタラクティブな体験といったメタバースの真の価値は、HMDなどのデバイスを通して発揮されるものであるため、限られたデバイス性能でもユーザーに魅力的と思われるバーチャルコンテンツの作成が必要と考えられます。また参加者の裾野を広げるという意味では、PCやスマートフォンでも参加できるプラットフォームを選定するなど、課題を踏まえた工夫が必要です。

他の技術的・運用的な課題としては高品質の3D空間の作成コストが高いことや、同時接続可能な人数が少ない(多くのメタバース・プラットフォームでは15~30名程度を上限に設定)、メタバース上に接客用の人員を配置する必要があることなどが挙げられます。特に3D空間の作成コストに関しては、現実に近い高品質なワールド*²を作成したい場合、モデリングソフトウェアやUnity⁽⁶⁾・Unreal Engine⁽⁷⁾などのゲームエンジンを活用した専門的なモデリングスキルが必要とされるため、現状では時間・費用の両面で大きなコストが掛かります。この課題に対しては、写真から現実の物体や空間の3Dモデルを生成するフォトグラメトリ(Photogrammetry)*³やレーザスキャナによる空間キャプチャ、NeRF*⁴、またはAI(人工知能)による3Dオブジェクトの自動生成など最新技術の応用が期待されます。

次に制度的な課題ですが、一貫していえるのはメタバースという概念に対して法制度が追いついていない点が挙げられます。特に個人情報保護は消費者にとって身近な問題であるため、最低でもメタバース上での匿名性の担保や行動履歴の取得有無・提供範囲などは、プライバシーポリシーで明記しておく必要があるでしょう。さらにメタバース上での反道徳的・反社会的な行為に対しては、法制度の充実とともに、サービスを提供する側も不正ユーザの監視や公的機関への情報提供といった然るべき対策を要請される可能性があります。欧州刑事警察機構(ユーロポール)は、2022年10月に法執行機関から見たメタバースの現状や懸念をまとめたレポートを公開⁽⁸⁾しています。その中では利用者の60%以上が16歳以下といわれているメタバース・ゲームROBLOX⁽⁹⁾が、2021年に検知されたオンライン上でのフィッシング件数でワースト8位を記録したことが報告さ

れていること、マネーロンダリングやテロリズムの拠点としてメタバースが犯罪者の注目を集め始めていることに警鐘を鳴らしています。運用者・利用者を問わず、メタバースを土壌とした新しいサイバー犯罪の発生リスクも年々高まってきていることも理解しておく必要があります。

メタバースのビジネス活用を考える場合、上記のような課題やリスクを広く認識しておくことは不可欠と考えられます。技術面、制度面いずれについても、状況は流動的であるため国内外の最新情報のキャッチアップが重要です。

メタバースのこれから

ここまで見てきたとおり、メタバースは期待と課題が渦巻く状況であり、今すぐ誰もがメタバースに参加する世界にはならないかもしれませんが、しかし、企業の投資や国内での法整備の動き⁽¹⁰⁾は活発さを増しており、前述の課題は近い将来解決される可能性が高いと考えられます。

今からメタバースのビジネス活用について議論し、現時点での技術で実践してみることは、将来メタバースビジネスを創出するうえで重要な知見を与えてくれることは確実です。そしてそれは、来たるべき「メタバース新時代」を生き抜くための第一歩となるでしょう。

■参考文献

- (1) <https://hubs.mozilla.com/>
- (2) <https://door.ntt/>
- (3) <https://cluster.mu/>
- (4) <https://store.facebook.com/jp/quest/products/quest-2/>
- (5) <https://hello.vrchat.com/>
- (6) <https://unity.com/>
- (7) <https://www.unrealengine.com/>
- (8) <https://www.europol.europa.eu/publications-events/publications/policing-in-metaverse-what-law-enforcement-needs-to-know>
- (9) <https://www.roblox.com/>
- (10) https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/metaverse/index.html

◆問い合わせ先

NTT データ
技術開発本部 イノベーションセンタ
TEL 050-5546-9741
FAX 03-3532-0487
E-mail ic_pr@kits.nttdata.co.jp

- *2 ワールド：メタバースで提供される仮想的な3D空間のこと。目的に合わせて、建造物の再現や商品の3Dモデル配置など、さまざまなワールドが作成されます。メタバース・プラットフォームによっては、ワールドの作成ツールやユーザが自由にワールドを公開する機能が提供されています。
- *3 フォトグラメトリ：複数の写真から三次元形状を復元する3Dスキャン方式の1つ。写真データを使用するため、模様や形状を3Dモデルにリアルに反映することができ、最新事例ではドローン空撮による巨大建造物の3Dモデル化や水中カメラを使用した海中遺跡の再現にも活用されています。
- *4 NeRF：Neural Radiance Fieldsの略であり、物体や空間を撮影した複数の写真から、深層学習を用いて自由視点の画像を生成する技術。自由な視点から見た対象物の画像を生成することができるため、HMDを通した高解像度の仮想空間や3D動画の投影などに応用が期待されています。