

NTT 技術ジャーナル

9 SEPTEMBER
2026
Vol.38 No.9
©NTT

特集

光通信技術が拓く光量子コンピュータの未来
こころと知性を解き明かし、新たな世界を切り拓く

トップインタビュー

海老原 孝 NTT常務執行役員 技術企画部門長

グループ企業探訪

LIVE BOARD

from NTTドコモソリューションズ

IOWNを“見せる技術”から“使う技術”へ——現場実装を通じて見えてきた価値



4 トップインタビュー

**「技術を実装し続ける組織」であるために、
正しい問いを立てる力、戦略を実装までやり
切る力、そして知識・見識・胆識を磨き続ける**

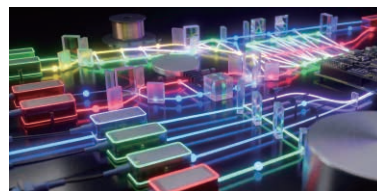
海老原 孝

NTT常務執行役員 技術企画部門長



8 特集1

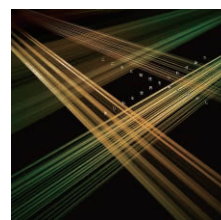
**光通信技術が拓く
光量子コンピュータの未来**



- 10 光量子コンピュータの実用化に向けたNTTの挑戦
- 14 光量子コンピュータの大規模・誤り耐性化に向けた広帯域・高レベルスクイーズド光源技術
- 19 量子コンピュータの超高速化のためのリアルタイム高速量子信号検出技術
- 25 光量子コンピュータを支えるソフトウェア技術
- 30 光量子コンピュータの誤り訂正に向けた先端研究
- 34 量子コンピュータを「つなぐ」技術：量子通信がもたらす計算アーキテクチャの変革

40 特集2

**こころと知性を解き明かし、
新たな世界を切り拓く**



- 42 「NTTコミュニケーション科学基礎研究所 オープンハウス2026」開催報告
- 46 勝てる人の「脳と身体」を科学する——eスポーツの勝敗に関与する脳・生理メカニズムの解明
- 51 デジタル・オルガノイドの可能性と未来
——生体組織のデジタル化が実現する未来の医療と健康
- 56 いつどこで何が起きるかを理解し、予測し、制御する
——点過程と機械学習を組み合わせたイベント時系列解析とその応用
- 60 主役登場 佐野 薫 NTT コミュニケーション科学基礎研究所



61 挑戦する研究者たち

谷保 芳孝

NTT物性科学基礎研究所 上席特別研究員

NTT発の次世代グリーン半導体
——AIN半導体でカーボンニュートラルに貢献



特集

For the Future

66 挑戦するイノベーター

田端 佑介

NTTデータグループ 技術革新統括本部
Innovation技術部 シニアエキスパート

フィジカルAIのプラットフォーム化で世界の企業現場を変革



特別企画

72 明日のトップランナー

宮田 将司

NTT先端集積デバイス研究所 特別研究員

世界を動かした「光メタサーフェス」、
ゼロから挑んだ平面光学の未来



挑戦する研究者たち

76 グループ企業探訪

株式会社 LIVE BOARD

Figure the Real World——インプレッションベースの
DOOHで広告の新たなスタンダードを切り拓く



挑戦するイノベーター

明日のトップランナー

80 From NTTドコモソリューションズ

IOWNを“見せる技術”から“使う技術”へ——現場実装を通じて見えてきた価値

84 Webサイト オリジナル記事の紹介

10月号予定
編集後記

グループ企業探訪

From

本誌掲載内容についてのご意見、お問い合わせ先
NTT技術ジャーナル事務局
問い合わせページ <https://journal.ntt.co.jp/contact>

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 <https://www.tta.or.jp/>

NTT技術ジャーナルは
Webで閲覧できます。
<https://journal.ntt.co.jp/>



グローバルスタンダード
最前線



NTT

常務執行役員 技術企画部門長

海老原 孝 Takashi Ebihara

PROFILE

1990年日本電信電話株式会社入社。2014年NTT東日本 経営企画部 中期経営戦略推進室長、2016年NTT 技術企画部門 ビジネスプロセス戦略担当部長、2022年NTT東日本 執行役員 デジタル革新本部長、NTTイーアジア代表取締役社長を経て、2025年より現職。



「技術を実装し続ける組織」であるために、正しい問いを立てる力、戦略を実装までやり切る力、そして知識・見識・胆識を磨き続ける

「技術を語る組織ではなく、技術を社会・事業価値に実装し続ける組織へ」を基本姿勢とするNTT技術企画部門。AI（人工知能）時代の競争はもはや単体技術の優劣ではなく、エコシステムを設計し、動かし続ける力の勝負です。部品レベルから、データセンタ、ネットワーク、AIコンピューティング基盤、ソリューションまでそろそろAI時代のフルスタック事業体であるNTTの強みを、IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）をAIOWNへと進化させ、社会実装で世界と勝負している海老原孝NTT技術企画部門長に、注力している技術領域と技術企画部門の姿勢について伺いました。

「机上の検討」から「社会で使われる技術」へと変えていく

技術企画部門長に就任して1年が経ちました。この一年を振り返り、どのような実感をお持ちですか。

私は2025年6月に技術企画部門長に就任して以来、NTTグループ全体を技術の力でどう底上げしていくかというテーマに向き合ってきました。技術企画部門には過去にも在籍していましたが、現在はネットワークだけでなく、AI（人工知能）、IT、

セキュリティなど扱う領域が大きく広がっており、部門自体も変わり続けなければならないと感じています。

持株会社の役割は、事業会社だけでは解決が難しい課題に取り組み、少し先の未来を見据えた方向性を示すことにあります。また、NTT東日本・西日本、NTTドコモ、NTTデータをはじめ、それぞれ異なる強みや役割を持つグループ会社と方向性を共有し、同じ方向へ導いていくことも重要な使命です。実際には大変なエネルギーを要する仕事ですが、グループとしての力を最大限発揮す

るためには欠かせません。技術企画部門長として私自身が託されている役割は、IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）やAIといった新しい技術を研究成果のまま終わらせるのではなく、社会へ実装することだと考えています。そのため、着任から特にIOWNの実装とAI活用の推進に力を注ぎ、「机上の検討」から「社会で使われる技術」へと変えていく取り組みに注力してきました。

研究成果を社会実装するという過渡期にあり、重責を担われているのですね。現在、注力している技術領域について教えてください。

私が現在もっとも注力しているのは、IOWNの実装とAIの活用です。先ほどお話ししましたとおり、IOWNは研究フェーズから実装フェーズへ移行する重要な段階にあり、APN（All-Photonics Network）の全国展開やAIコンピューティング基盤の整備を進めています。また、その先にあるAIOWNの実現も見据えています。AIについては、社内業務への実装とガバナンスの両面を重視しています。

単に生成AIを利用して便利になったというレベルではなく、業務プロセスや品質、お客さまへの価値提供そのものを変革するために、AIエージェントやデータ活用基盤の整備を進めています。

こうした技術に注力する背景には、社会全体でAI活用が急速に進んでいることがあります。AIを本格的に活用するためには、AIそのものだけでなく、それを支えるネットワーク、データセンタ、コンピューティング基盤が必要です。私は若いころ、光アクセスネットワークの研究開発に携わりましたが、当時も「本当に価値が生まれるのか」と上司や周囲に問われながら先行投資を続けてきました。おそらく、現在のAIやIOWNも同じだと思っています。技術企画部門は将来必要となるインフラを先行して整備しながら、その

活用方法も同時に考えることが重要です。AIを支えるインフラ整備と実際の活用を連動させながら実装していくことが、今の技術企画部門、ひいてはNTTに求められている役割だと考えています。

信頼関係を大切にしながら、 技術を社会価値へ変えていく

社会の未来を築くという意味でNTTに対する期待も大きいと思います。中でも、技術企画部門に求められている力とは何でしょうか。

私は、技術企画部門に求められているのは、優れた技術を生み出すことだけではなく、それを社会や事業の価値へと結び付ける力だと考えています。AI時代の競争は単体技術の優劣ではなく、AI、ネットワーク、IT、エネルギーなど多様な技術を組み合わせ、エコシステムとして価値を生み出せるかどうかにかかっています。そのため技術企画部門には、

研究成果を理解し、事業会社やパートナーと連携しながら社会実装まで推進する力が求められます。

また、目の前の課題に対応するだけではなく、将来の大きな課題、いわゆる「Big Rock」を見つけ出し、その解決に取り組むことも重要な役割です。私は、技術企画部門が「技術を語る組織」ではなく、「技術を実装する組織」であり続けなければならないと考えています。

その組織を現実のものとするために私自身が大切にしている姿勢があります。まず相手の話に耳を傾けることです。それは現場や事業会社が何を考え、何に困り、どのような未来をめざしているのかを理解することが、変革の第一歩だと考えているからです。また、知識だけでなく、本質を見抜く見識と、決断して踏み込む胆識を磨き続けることも意識しています。持株会社の仕事は未来を創ることです。私は、人と人、技術と事業をつなぎながら、社会実装を加速し、グループ全体の変革を牽引





していきたいと考えています。

あらゆるもの、人を「つなぐ」という姿勢はNTT人生の中でどのように培われてきたのですか。

私は1990年にNTTへ入社し、通信設備の建設・保守という現場からキャリアをスタートしました。その後、光アクセスネットワークの研究開発、国際標準化、通信政策、経営企画、ネットワーク運営、DX（デジタルトランスフォーメーション）推進、海外事業、そして現在のAI活用推進へと活動の幅を広げてきました。

また、シンガポール国立大学へのMBA留学や米国CSISへの出向、ベトナム事業の運営などを通じて、技術だけでなく経済や社会、国際情勢を俯瞰して考える視点も養うことができました。そして、東日本大震災では通信復旧に携わり、通信が人々の暮らしを支える社会インフラであることを改めて実感しました。振り返ると、私のキャリアは現場と研究、

技術と経営、日本と海外など、異なる世界をつなぐ経験の連続だったと思います。

その中で学んだのは、信頼関係の大切さと、自分自身の強みを磨き続けることの重要性です。若いころには、自分が必要だと思ったことを先走って進め、上司から「そこまでやってはいけない」と叱られたこともありましたが、しかしその経験から、自分の領域だけで仕事は完結せず、相手が何を考えているのかを理解しながら進めることの大切さを学びました。

例えば、ベトナムでは現地の商習慣に馴染むよう家族ぐるみのつきあいをし、シンガポールでは英語力を獲得するため、ディベート活動に挑戦し、多様な価値観や文化を持つ人たちとの議論を重ねました。その経験を通じて、まずは相手の話に耳を傾け、理解しようとする姿勢が重要だと実感したのです。現在も、信頼関係を大切にしながら、技術を社会価値へ変えていくことに取り組んでいます。

目の前の課題への対応だけでなく、その先にある未来を見据える

公私ともに幅広く、国内外でさまざまな経験を重ねてこられたのですね。一言で表現するのは難しいかもしれませんが、トップとして大切にしていることを教えてください。

私がトップとして常に意識しているのは、目の前の課題への対応だけでなく、その先にある未来を見据えることです。技術企画部門の役割は、日々発生する課題への対応にとどまらず、将来のNTTグループや社会にとって重要なテーマを見つけ出し、その解決に向けた道筋を描くことにあります。そのためには、正しい問いを立てる力、戦略を実装までやり切る力、そして知識・見識・胆識を磨き続けることが欠かせません。また、組織を動かすうえでは、繰り返になりますが、相手の話をよく聞くことを大切にしています。現場や事業会社が抱える課題や思いに耳を傾け、共感を得ながら進めることが変革の第一歩だと考えているからです。

今後、技術企画部門にはさらに広い視野が求められます。AIが社会のさまざまな分野で活用される中、ネットワークだけでなく、AI、IT、エネルギー、セキュリティを含めた社会インフラ全体をデザインする役割が重要になります。私は、IOWNを実装フェーズへ進めるとともに、その先にあるAIOWNの実現を通じて、AI時代を支える社会基盤づくりを進めていきたいのです。そして、技術企画部門自身も変革を続けながら、技術を社会実装し続けることで、日本そして世界の社会課題解決に貢献していきます。



技術者や技術企画部門の皆様、そしてパートナーの皆様へメッセージをいただけますか。

技術者の皆さんには、まず自分自身の専門性を徹底的に磨いてほしいですね。私は、どのような時代であっても、自分は何で価値を出せるのかを明確に持つことが大切だと考えています。そのうえで、技術は持っているだけでは価値になりません。社会やお客さまの現場で使われ、役立って初めて意味を持ちます。だからこそ、技術を知るだけでなく、そ

れを実装し、価値へと変えていくことに挑戦してほしいと思います。変化の激しい時代だからこそ、専門性を磨き続けながら、新しい環境にも柔軟に適應できる人材になってほしいと願っています。

また、技術企画部門のメンバーには、技術を社会実装することに全力で取り組んでほしいと伝えています。研究成果や基礎技術を実際の価値につなげるためには、多くの関係者と協力しながら汗をかく必要があります。その経験は必ず将来の糧になるはず

です。そしてパートナーの皆様には、AI時代に一社だけで価値を生み出すことはできないということをお伝えしたいと思います。これからはグローバルなエコシステムの中で、それぞれの強みを持ち寄りながら価値を創造していく時代です。私たちはオープンな姿勢で学び続け、そして、技術を社会実装し続け、皆様とともに社会課題の解決に取り組んでいきます。

(インタビュー：外川智恵／撮影：大野真也)

インタビューを終えて

仕事に向かう姿勢や戦略について、どっしりとした声でロジカルでありながらドラマティックに語られる海老原技術企画部門長。IOWNやAIといった最先端技術を論じる際に感じるのは「人の話に耳を傾ける」「信頼を築く」というぶれないご姿勢です。そんな海老原部門長にはもう1つ、ジャズシンガーとしての顔があります。「TAKA」として

ステージに立ち、Nat King Coleの「Stardust」やMichel Legrandの「What Are You Doing the Rest of Your Life」を愛唱されているのです。即興と対話を重ねながら1つの音楽をつくり上げるジャズの世界は、人と技術、研究と事業をつなぐ海老原部門長の仕事観ともどこか重なります。共感と調和をアーティスティックに力に変える匠の技に魅了されたひとときでした。



光通信技術が拓く 光量子コンピュータの未来

従来のコンピュータでは計算に膨大な時間を要する複雑な課題に対して、

量子コンピュータの活用が期待されている。

本特集ではスケーラブルで信頼性の高い実用的な光量子コンピュータの実現をめざす

NTTの研究開発について紹介する。

光量子コンピュータの実用化に向けたNTTの挑戦 10

NTTは光通信分野で培った技術を活かし、OptQCと連携して、スケーラブルで信頼性の高い光量子コンピュータの実現をめざしている。本稿では、量子コンピュータ開発の現在地、光方式の位置付け、NTTの研究開発の方向性を紹介する。

光量子コンピュータの大規模・誤り耐性化に向けた 広帯域・高レベルスクイーズド光源技術 14

周期分極二オブ酸リチウム導波路型光パラメトリック増幅器を用いたスクイーズド光生成技術について解説し、低損失導波路加工技術や高精度位相安定化技術による高スクイージング、超広帯域スクイーズド光源の実現について紹介する。

量子コンピュータの超高速化のための リアルタイム高速量子信号検出技術 19

光パラメトリック増幅により量子状態へ損失耐性を付与し、高速光通信用ホモダイン検出器を用いた高速量子信号検出技術について紹介する。

光量子コンピュータ

光パラメトリック増幅

高速量子信号検出

量子誤り抑制

量子もつれ

光量子コンピュータを支えるソフトウェア技術 ————— 25

光量子コンピュータ用ソフトウェアの全体像を示すとともに、量子の専門知識がなくても問題記述やパラメータ調整を行えるSDK (Software Development Kit) と、効率的かつ高信頼な実行を支えるシステムソフトウェアの研究開発について紹介する。

光量子コンピュータの誤り訂正に向けた先端研究 ————— 30

光などの調和振動子が持つ多数のエネルギー準位を利用するボソニック符号の考え方と、自律的量子誤り訂正、論理演算、読み出しを一体的に構成するNTTの理論研究について紹介する。

量子コンピュータを「つなぐ」技術： 量子通信がもたらす計算アーキテクチャの変革 ————— 34

量子通信を量子コンピュータのスケールアウトを支える基盤技術としてとらえ、モジュール型量子計算機に必要な要素技術について紹介する。



光量子コンピュータの実用化に向けたNTTの挑戦

AI（人工知能）の普及により計算需要と電力消費が増大する一方、従来のコンピュータでは現実的な時間内に解くことが難しい問題が残されています。量子コンピュータは、こうした課題に対する新たな計算手段として期待されています。NTTは光通信分野で培った技術を活かし、OptQC株式会社と連携して、スケーラブルで信頼性の高い光量子コンピュータの実現をめざしています。本稿では、量子コンピュータ開発の現在地、光方式の位置付け、NTTの研究開発の方向性を紹介します。

キーワード：#光量子コンピュータ、#誤り耐性型量子コンピュータ、#量子ネットワーク

しら い だいすけ
白井 大介

NTT未来ねっと研究所

はじめに

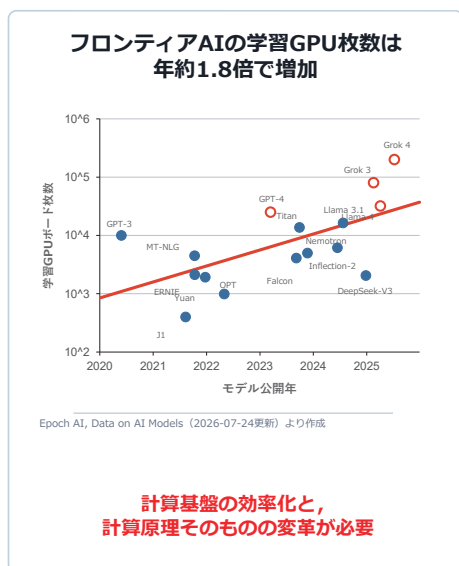
生成AI（人工知能）をはじめとするAI技術は、私たちの仕事や生活を大きく変えつつあります。文章や画像の生成にとどまらず、業務の効率化や研究開発の支援にも利用され始めています。この進展を支えるのが、大量のデータを処理する計算基盤です。一方、AIモデルの高度化に伴って必要な計算資源が増え、データセンタの消費電力も拡大していま

す。プロセッサを増やして性能を高める従来の方法だけでは、将来の計算需要を持続的に支えることは困難です。

また、計算資源を増やすだけでは解決しにくい問題も残されています。例えば、分子や材料の量子的な性質を精密に解析する問題では、対象が大きくなるにつれて計算量が急増します。多数の候補から望ましい組合せを探す最適化問題でも、同様の計算量の増大が生じます。こうした問

題に対応可能な新たな計算手段として期待されているのが、量子力学の性質を利用する量子コンピュータです。ただし、量子コンピュータがあらゆる計算を高速化するわけではありません。量子計算に適した問題を見極め、古典コンピュータと役割を分担させる必要があります。

このためNTTは、IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）やtsuzumiなどの技術開発を通して古典情報処理基盤を継続



NTTのアプローチ

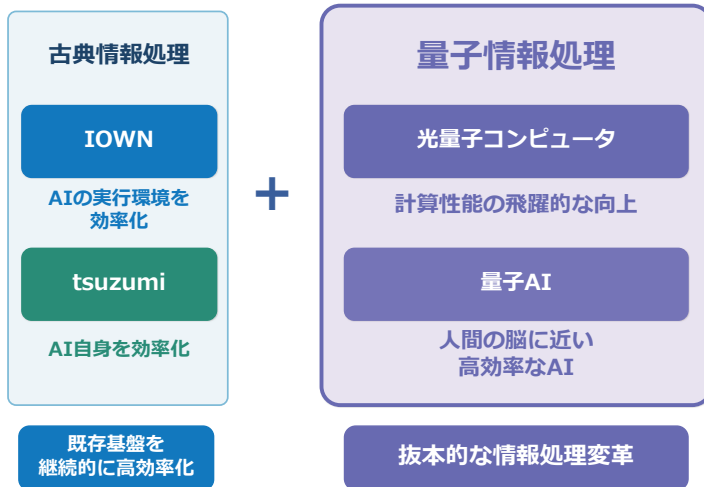


図1 増大する計算需要に対するNTTのアプローチ

的に効率化する取り組みを行いながら、未来の抜本的な情報処理改革をめざし、光量子コンピュータと量子AIの研究開発を進めています(図1)。

量子コンピュータ開発の 現在地と展望

量子コンピュータには、超伝導、中性原子、イオントラップ、光など、量子ビットを実現する物理系が異なる複数の方式があります。各方式では実機開発やクラウドを介した利用が進んでいますが、広範な実用問題を従来のコンピュータより高速かつ安定して解く、汎用的な誤り耐性量子コンピュータは実現していません。

超伝導方式は、超伝導電気回路によって量子ビットを実現します。高速な量子操作が可能である一方、極低温環境と多数の制御配線を必要とします。中性原子方式は、多数の原子を光で配列できることが特長である一方、真空中の原子を高精度なレーザーで安定して制御する必要があ

ります。光方式は常温環境で動作し、通信で成熟したデバイスや多重化技術を活用できます。その一方で、光損失の低減と量子状態の高品質化、非ガウス資源の生成が重要な課題です(表)。

このように、各方式は異なる強みを持ち、解決すべき課題も異なります。現時点で、すべての評価軸において優位な方式は定まっていません。各方式とも、それぞれの強みを活かして誤り耐性型量子コンピュータ(FTQC: Fault Tolerant Quantum Computer)を実現できるかを競う段階にあります。

NTTが開発を進めているのは、光の振幅に量子情報を載せる連続量量子コンピュータです。この方式では、スクイーズド光のパルスを時間的に並べ、光回路を通して大規模な量子もつれ状態を生成します。続いて、各光パルスの直交位相振幅を順次測定し、測定結果に応じて後続の測定条件を変えることで計算を進めます。光パルスを時間方向に多重できるため、計算に用いる量子ビッ

トを増やしても、光源数や主要な光回路の規模を同じ割合で増やす必要がありません。

NTTは、2030年に100万物理量子ビット*を持つFTQCを実現する目標に向けて、OptQCとの連携を開始しました^{(1),(2)}。NTTが光通信研究で培った光の生成・伝送・測定技術と、OptQCが持つ連続量光量子コンピュータの設計・実装技術を融合し、計算規模を拡張でき、長時間安定して動作するシステムの実現をめざします。

光通信技術を量子計算へ ——NTTのアプローチ

光量子コンピュータでは、量子光源で生成した光から大規模な量子もつれ状態をつくり、その光を順次測定することで計算を行います。測定結果は電子回路で処理され、後続の

* 連続量光量子コンピュータ内部で扱う物理的な情報単位は、正確には「量子モード」ですが、分かりやすさのため「量子ビット」と表現しています。

表 主な量子コンピュータ方式の特徴と技術課題

方式	量子情報の表現	主な利点	実用化に向けた主な課題
超伝導	超伝導回路の量子状態	高速なゲート操作が可能で、半導体製造技術との親和性がある	極低温環境で、多数の配線と量子ビットを安定して制御する
中性原子	光で捕捉した中性原子の内部状態	原子を柔軟に配列でき、多数の量子ビットを構成しやすい	真空中で多数の原子を保持し、レーザーで高精度に制御する
イオントラップ	電磁場で捕捉したイオンの内部状態	量子ビットの均一性が高く、高精度な操作が可能	演算速度を向上させ、装置間を接続する
離散量光	単一光子の偏光や経路など	常温で動作し、光通信デバイスを利用できる	確率的な光子生成・演算を、損失を抑えながら並列化する
連続量光	光の直交位相振幅	時間・波長多重により、装置規模を抑えて量子ビットを増やせる	光損失を抑え、高品質な量子状態と非ガウス資源を安定して生成する

測定条件に反映されます。制御ソフトウェアは、装置の制御と量子プログラムの実行を橋渡しします。これらの要素が連携して動作するため、計算性能は量子光の品質だけでなく、光回路の損失や測定・制御の性能にも左右されます（図2）。

特に連続量方式では、スクイージングの品質と光損失が計算精度を大きく左右します。量子光源で良質な状態を生成しても、伝送や測定の途中で光が失われると、量子雑音が増えて計算精度が低下します。また、大規模な量子もつれ状態を安定して生成するには、多数の光パルスの位相を高精度に保たなければなりません。これらの条件を長時間維持するには、デバイスの性能に加え、装置全体を安定して動かす設計・制御技術が重要です。

これらの課題には、光通信システムの研究開発と共通する部分があります。NTTは、長距離・大容量通信を実現するため、光信号を低損失で伝送する技術を磨いてきました。

また、光増幅や波長多重によって伝送容量を拡大し、コヒーレント検波と高速デジタル信号処理によって波長当りの情報量を増やしてきました。量子計算では量子雑音を扱う必要がありますが、光を安定して生成し、伝送して測定する基盤技術は共通しています。

例えば、スクイーズド光の生成に利用されている光パラメトリック増幅器は、光通信分野で中継信号増幅や波長変換に用いられてきたものです。また、量子信号の測定前に光パラメトリック増幅を行えば、通信向けの高速な光検出器を活用できる可能性があります。さらに、時間多重と波長多重を組み合わせることで、1つの光路に収容する量子ビット数を増やせます。このような光通信関連技術の応用により、高速化、大規模化をねらえることが光量子方式の強みともいえます。

ただし、量子ビット数を増やすだけでは、実用的な量子コンピュータにはなりません。光損失や有限のス

クイー징によって生じる誤りを訂正し、計算を継続できる誤り耐性型の量子計算能力（FTQC）の実現が必要です。これまでのNTTの量子誤り訂正の理論研究や、光通信向けの誤り訂正処理の知見を活かすことで、FTQCの実現を加速します。

真の実用化をめざして

量子コンピュータを真に実用化するには、装置の性能向上と並行して、社会課題の解決に結び付くアプリケーションを開発する必要があります。大規模計算能力の実現を待たずして、早い段階から実務上の課題への適用に取り組むパートナーと連携し、量子計算が有効な問題を検証することが重要です。

量子計算の応用先として、分子・材料シミュレーションや組合せ最適化などが検討されています。しかし、理論上は高速化できても、実際の処理全体で古典計算を上回るとは限りません。入力データの準備や計算結

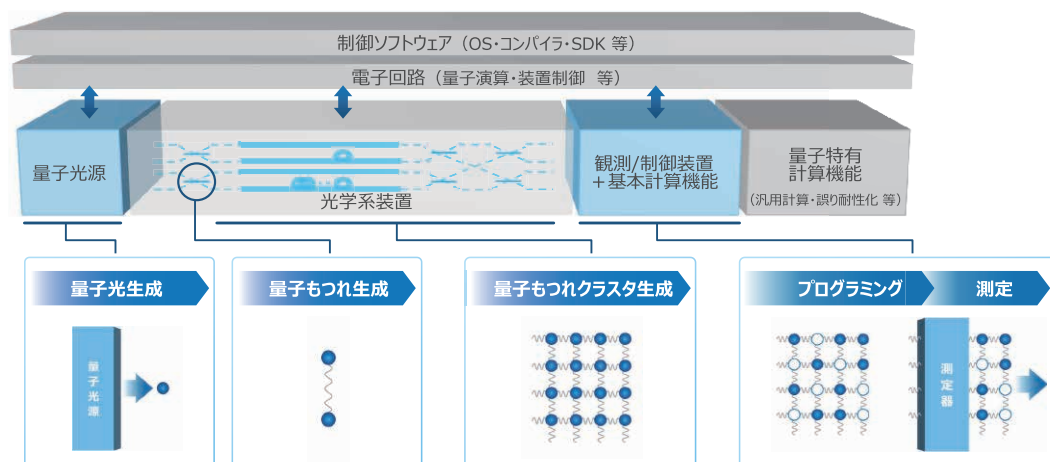


図2 光量子コンピュータの構成

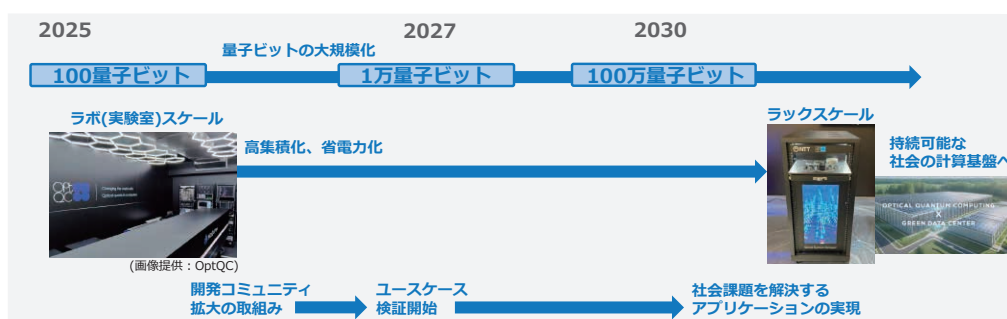


図3 ロードマップ

果の読み出しにも時間がかかるためです。対象とする問題の規模と必要な精度を定め、必要な論理量子ビット数と量子操作数を見積もったうえで、古典計算と比較する必要があります。

NTTはこの検証を進めるため、OptQCに加え、大学、研究機関、パートナー企業との連携を推進します。量子アプリケーションの研究成果の実機検証と、実用的に問題を解くための要件の装置開発への反映を並行し、いち早い真の実用化を図ります(図3)。

また将来の光量子コンピュータは、特殊な条件が必要となる大型装置ではなく、さまざまなデータセンタで安定して運用できる計算資源であることが求められます。このため、ラックスケールに集積化し、省エネルギーかつ安定動作を可能にする技術開発もめざします。また、量子計算はこれ単体では完結せず、問題の分割や結果の処理、データの格納には古典計算資源も必要です。光量子コンピュータをIOWNの光コンピューティング基盤に接続した量子計算アクセラレータとして利用し、必要な

古典計算資源と高速に接続する構成をめざします。

おわりに

光量子コンピュータは、常温で動作し、光通信の多重化のアプローチによる計算能力の大規模化が可能で、NTTが光通信分野で培ってきた技術の活用も期待できます。一方、FTQCの実現には、さまざまな課題の解決が必要です。さらに、実用問題を通じて、量子計算が価値を生む条件を明らかにする必要があります。

NTTでは、大規模化と誤り耐性化の基礎となる、高品質な量子光源デバイス技術と量子信号の高速検出技術から、誤り訂正アルゴリズムの理論研究、応用ソフトウェアの研究まで、光量子コンピュータの実用化に向けた統合的な研究開発を推進しています。また将来の光量子コンピュータネットワークを支える量子通信技術にも取り組んでいます。研究者には、特定の分野に閉じた知識ではなく、非常に幅広い、分野横断的な知見とチャレンジする精神が求められます。

NTTは、光通信の限界を広げるために培ってきた技術を核としながら、この全く新しい量子計算の世界を切り拓こうとしています。何十年も先の未来の技術としてではなく、持続可能な社会を支え、現実の社会課題の解決に資する計算基盤として確立することを目指しています。分野や組織の境界を越え、さまざまなパートナーとの連携を通じて、光量子コンピュータの実用化に挑戦していきます。

参考文献

- (1) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2025/11/18/251118a.html>
- (2) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2026/08/03/260803a.html>



白井 大介

光通信で培った技術を量子計算へ発展させ、持続可能な社会を支える計算基盤の実現をめざします。本特集を通じて、デバイスからシステム、ソフトウェア、量子通信までを一体で進めるNTTの取り組みをご覧ください。

◆問い合わせ先

NTT未来ねっと研究所
フロンティアコミュニケーション研究部



光量子コンピュータの大規模・誤り耐性化に向けた広帯域・高レベルスクイズド光源技術

連続量光量子コンピュータでは、スクイズド光の広帯域化と高スクイージング化が、大規模化および誤り耐性化を実現するための重要な鍵となります。本稿では、周期分極ニオブ酸リチウム導波路型光パラメトリック増幅器を用いたスクイズド光生成技術について解説するとともに、低損失導波路加工技術や高精度位相安定化技術による10 dB超の高スクイージング、および約6 THzの超広帯域スクイズド光源の実現について紹介します。さらに、光量子コンピュータへの応用と今後の展望について述べます。

キーワード：#スクイズド光, #光パラメトリック増幅器, #周期分極反転ニオブ酸リチウム

かしわざき たかひろ やましま た い ち
 柏崎 貴大 / 山嶋 大地
 いのうえ あすか うめき たけし
 井上 飛鳥 / 梅木 毅伺

NTT先端集積デバイス研究所

スクイズド光と光量子コンピュータ

連続量 (CV: Continuous Variable) 光量子コンピュータでは、スクイズド光が量子計算のもっとも重要なリソース状態として用いられます。スクイズド光とは、光の波としての振動成分 (直交位相振動成分) に関して、ある位相の量子揺らぎ (量子雑音) がショット雑音以下まで圧縮された非古典的な量子状態

です (図1)。量子力学の不確定性原理により、直交する2つの位相の振幅成分の揺らぎを同時に小さくすることはできません。しかし、一方の揺らぎを小さくすることは可能であり、この状態を用いてさまざまな光量子技術を実現できます。

時間領域多重方式を用いた連続量光量子コンピュータ⁽¹⁾では、このスクイズド光を連続的に生成し、遅延干渉系によって大規模な量子もつれ状態 (クラスタ状態) を構築しま

す。この方式では、遅延干渉系を構成する光ファイバ内にどれだけ多くの時間モードを保有できるかが、生成可能なクラスタ状態の規模を決定します。したがって、光パケットを時間的にどこまで細かく定義できるかが重要であり、その性能はスクイズド光源の帯域幅によって決まります。帯域幅が広いほど時間幅の短いスクイズド光パケットを生成できるため、同じ長さの光ファイバでもより多くの量子モードを保有でき、

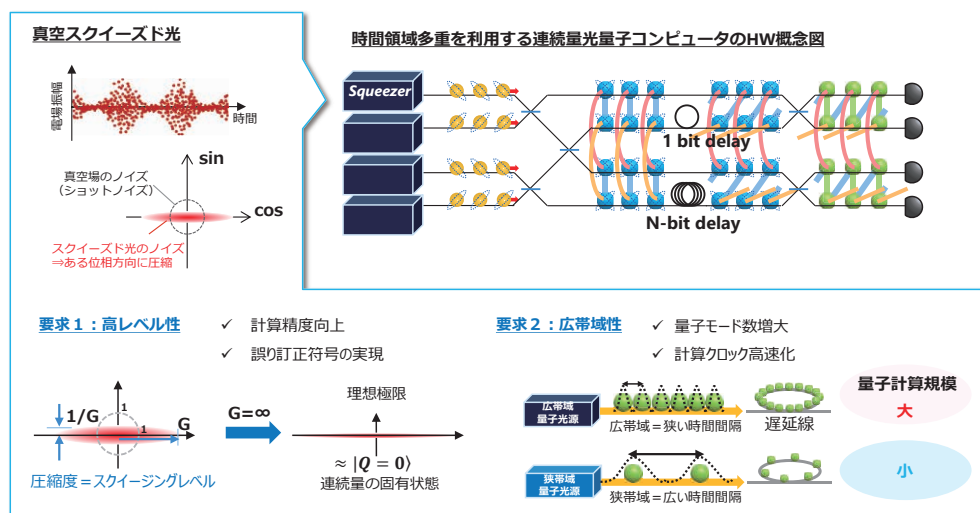


図1 スクイズド光の概念図と要求性能

光量子コンピュータの大規模化・高速化につながります。

また、スクィーズド光には高いスクイーディングレベルも求められます。スクイーディングレベルとは、ショット雑音に対して量子揺らぎがどの程度抑圧されているかを示す指標であり、その値が大きいほどリソース状態に含まれる余分な量子雑音は小さくなります。連続量光量子計算では、この残留量子雑音が演算誤差として蓄積されるため、高いスクイーディングレベルを実現することが誤り耐性量子計算の実現につながります。近年では、GKP (Gottesman-Kitaev-Preskill) 符号を用いた量子誤り訂正方式において、10 dBを超えるスクイーディングレベルが重要な目標の1つとなっています。

このように、時間領域多重型光量子コンピュータでは、「広帯域性」が大規模化・高速化を、「高スクイーディング」が誤り耐性化を実現するための鍵となります。しかし、一般にこれら2つの性能を同時に実現することは容易ではありません。高いスクイーディングを得るために光共振器を用いると帯域幅は共振器線幅によって制限される一方、広帯域化を優先すると十分な非線形相互作用を得ることが難しくなります。そのため、「広帯域性」と「高スクイーディング」を両立したスクィーズド光源の開発が、現在の連続量光量子コンピュータ研究における重要な課題となっています。

PPLN導波路型光パラメトリック増幅器

スクィーズド光は、非線形光学効果を利用して生成されます。代表的な生成方法としては、三次非線形光学効果 (χ^3) を利用した四光波混合 (FWM: Four-Wave Mixing) と、二次非線形光学効果 (χ^2) を利用したパラメトリック下方変換があります。現在、連続量光量子コンピュータ用のスクィーズド光源では、より大きな非線形係数を利用でき、かつ励起光と量子光を分離しやすいことから、二次非線形光学効果を用いた方式が広く採用されています。

二次非線形光学効果を利用する代表的なデバイスが、光パラメトリック増幅器 (OPA: Optical Parametric Amplifier) です。OPAでは、励起光 (ポンプ光) のエネルギーを利用して信号光の量子揺らぎを位相敏感に増幅・減衰させることでスクィーズド光を生成します。高効率なスクィーズド光生成を実現するためには、大きな二次非線形係数を有する材料と、高精度な位相整合技術が不可欠です。

NTTでは、この非線形媒体として周期分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN: Periodically Poled Lithium Niobate) 導波路を採用しています。ニオブ酸リチウムは大きな二次非線形光学係数を有する材料であり、その自発分極を周期的に反転させることで擬位相整合を実現できます。これにより、本来は位相

不整合によって失われる非線形相互作用を長距離にわたって維持でき、高効率なパラメトリック増幅が可能になります (図2)。

加えて、導波路構造を採用することで、光を数マイクロメートル程度の微小断面に閉じ込めながら数センチメートルに及び相互作用長を確保できます。その結果、バルク結晶と比較して非常に高効率な非線形相互作用を実現できます。

PPLN導波路は、光通信分野における光パラメトリック増幅器や波長変換器などの非線形光デバイスとして研究開発が進められてきました。NTTでは長年にわたり、低損失導波路形成技術、高品質な周期分極形成技術、高効率な光ファイバ結合技術などを蓄積してきました。これらの技術はスクィーズド光源にもそのまま適用できるため、光通信分野で培ったデバイス技術を量子情報処理へ展開する研究を進めています。

さらに、導波路型OPAは、従来広く用いられてきた光共振器型スクィーズド光源とは大きく異なる特徴を有しています。光共振器型では、高いスクイーディングレベルは得やすいものの、スクィーズド光の帯域幅は共振器の線幅によって制限されるため、時間領域多重量子計算に必要な広帯域化には限界があります。一方、導波路型OPAでは光共振器を必要としないため、位相整合帯域が許す限り極めて広帯域なスクィーズド光を生成できます。この特徴は、時間領域多重型光量子コンピュータ

周期分極反転ニオブ酸リチウム導波路

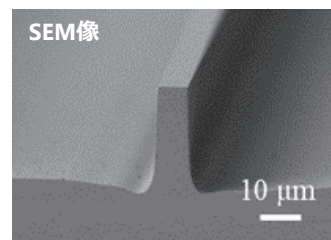
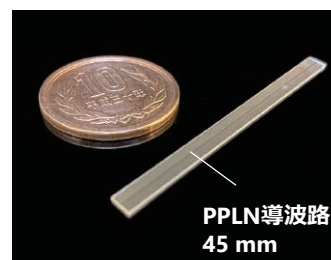
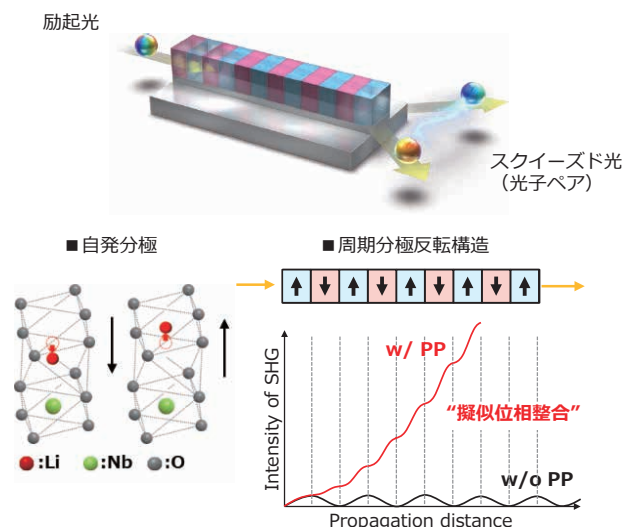


図2 周期分極反転ニオブ酸リチウム導波路

に必要な超広帯域スクイズド光源を実現するうえで大きな利点となります。

しかしながら、高効率なPPLN導波路を実現するだけでは、高品質なスクイズド光源は完成しません。高いスクウィングレベルを実現するためには、非線形相互作用の増強だけでなく、導波路そのものの伝搬損失や光学系全体の損失を低減するとともに、高精度な位相安定化技術を実現する必要があります。次に、NTTが取り組んだ高レベルスクイズド光の生成検出技術について紹介します。

広帯域高レベルスクイズド光生成

スクウィングレベルは、非線形相互作用の大きさに加え、導波路の伝搬損失、光学系全体の損失、受光系の検出効率、さらには測定位相の

揺らぎなど、さまざまな要因によって制限されます。そのため、高スクウィング光源の実現には、デバイス、光学系、および制御技術を総合的に最適化することが必要となります。

まず重要となるのが導波路の低損失化です。スクイズド光は光損失に極めて敏感であり、導波路中で発生するわずかな伝搬損失であっても、観測されるスクウィングレベルは大きく低下します。そのため、非線形効率を高めるだけでなく、導波路そのものの損失を可能な限り低減する必要があります。NTTでは、PPLN導波路の加工方法として、一般的に用いられるドライエッチング法ではなく、ダイシングソーによる機械加工技術を採用しています。ダイシングソー加工では、導波路側壁の表面粗さを低減できるため、散乱損失を抑制できます。実際に作製した導波路では、従来構造と比較して

低損失化を実現するとともに、高効率な光パラメトリック増幅が可能であることを確認しました⁽²⁾。この導波路技術は、その後の高スクウィング化を支える重要な基盤技術となっています。

高スクウィング領域では、励起光、スクイズド光、およびホモダイン検波に用いる局部発振光 (LO: Local Oscillator) の相対位相の制御も重要になってきます。これは高スクウィング領域では必然的にアンチスクイズド成分も大きい状態となり、相対位相がわずかに変動しただけでも、観測されるスクウィングレベルが大きく低下してしまうからです。特に10 dBを超える領域では、数ミリラジアン程度の位相揺らぎでも性能劣化が顕著となるため、高精度な位相安定化が不可欠となります。位相同期には励起光をPPLNに入射する際に位相基準となるプローブ光も同時に入射します。この

プローブ光を検出する際に、スクィーズド光生成PPLNの出射光から一部の光信号を抜き取ることで位相誤差信号を生成していました。

一方、この方式ではスクィーズド光も一緒に取り出してしまうため、取り出す光強度を抑える必要がありました。しかし、取り出す光強度を抑えてしまうと、位相誤差信号の信号対雑音比が劣化してしまい、高精度の位相制御の妨げとなっていました。

そこで、スクィーズド光用のPPLNとは独立した位相誤差信号生成用のPPLNを準備することで、従来の光損失と位相誤差劣化のトレードオフを解消する新しい位相安定化方式を採用しました⁽³⁾ (図3)。本方式により、スクィーズド光を損失させることなく、高い光強度を持つ位

相誤差信号が生成可能となり、従来よりも小さな位相誤差で測定できます。

これらの低損失導波路技術と高精度位相安定化技術を組み合わせることで、近年、導波路型OPAを用いて10 dBを超えるスクィージングの直接観測に成功しました⁽³⁾。本成果は、導波路型スクィーズド光源として世界トップレベルの性能を示すものであり、誤り耐性連続量量子計算に求められるスクィージングレベルを実証した重要な成果です。

加えて前述のとおり、時間領域多重型量子コンピュータでは、高スクィージングに加えて広帯域性も重要な性能となります。作製したPPLNを用いて広帯域性を評価したところ、約6 THzという極めて広い帯域幅を有するスクィーズド光の生

成を確認しました⁽²⁾。この帯域幅は、従来の光共振器型スクィーズド光源を大きく上回るものであり、時間領域多重技術を用いる光量子計算に必要な超広帯域スクィーズド光源として有効であることを示しています。この広帯域性を活かすことで、例えばシュレディンガーの猫状態といった、汎用量子計算には欠かせない非ガウス状態の高速生成などにも成功しています⁽⁴⁾。

光量子コンピュータ実用化に向けた取り組み

スクィーズド光源を実用的な光量子コンピュータへ適用するためには、高性能化に加え、高い安定性と再現性を実現することも重要です。NTTでは、PPLN導波路と光ファイバを

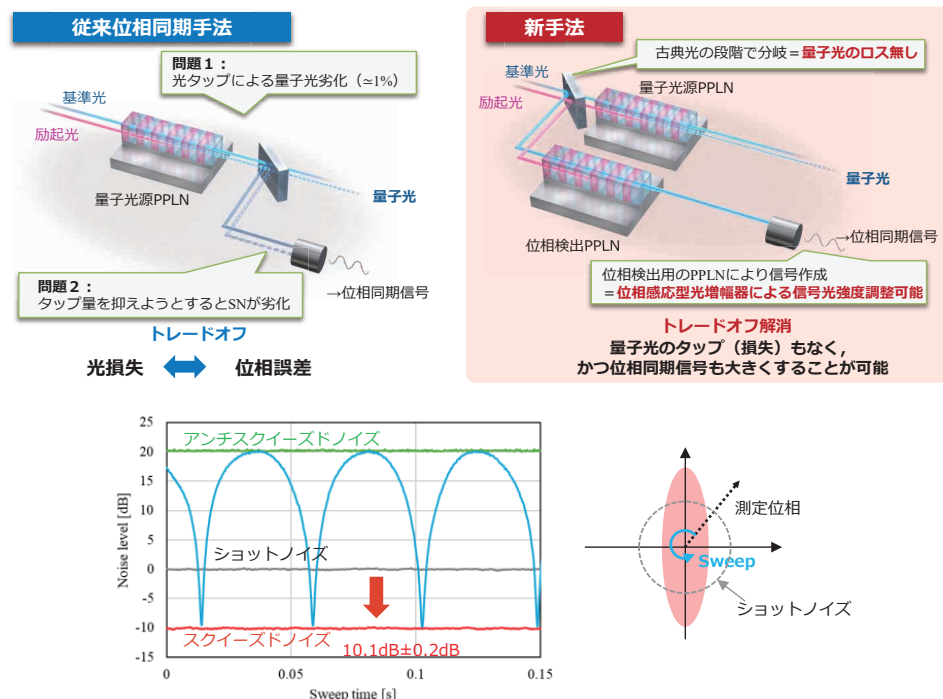


図3 新規位相同期手法と10 dBスクィージング⁽³⁾

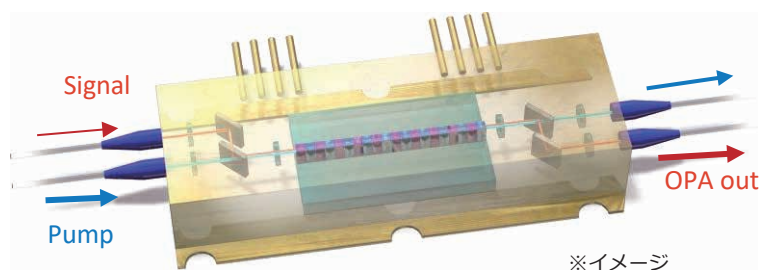


図4 PPLN モジュール

高精度に接続した光モジュールを開発し、長時間安定に動作するスクイーズド光源を実現しています(図4)。導波路のモジュール化は、小型化に加えて、光軸調整を必要最低限として、環境変動に対する安定性や保守性も向上させることができます。このような技術は、多数のスクイーズド光源を並列に利用する将来の光量子コンピュータにおいて重要な役割を果たすと期待されています。

本光源を用いて、2025年には理化学研究所において時間領域多重方式を採用した連続量光量子コンピュータの運用が開始されました⁽⁵⁾。同システムでは、101モードの線形量子演算が可能であり、今後、汎用量子計算へ拡張される予定です。

まとめと今後の展望

本稿ではPPLN導波路を用いた、連続量光量子技術の最重要リソースとなる広帯域かつ高レベルなスクイーズド光の生成に関して解説しました。本稿で紹介したPPLN導波路

技術は、光通信分野で培われた非線形光デバイス技術を量子情報処理へ展開した代表例です。今後も広帯域化、高スクイージング化、さらには光集積化を進めることで、大規模・高速・誤り耐性型光量子コンピュータの実現に貢献していきます。

参考文献

- (1) W. Asavanant and A. Furusawa: "Optical quantum computers: A route to practical continuous variable quantum information processing," AIP Publishing LLC, 2022.
- (2) T. Kashiwazaki, T. Yamashita, 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.
- (3) K. Hirota, T. Kashiwazaki, G. Ha, T. Yamashita, P. Jaturaphagorn, T. Suzuki, K. Takahashi, A. Kawasaki, A. Inoue, W. Asavanant, M. Endo, T. Umeki, and A. Furusawa: "Generation of 10-dB squeezed light from a broadband waveguide optical parametric amplifier with improved phase locking method," Opt. Express, Vol.34, pp.7958-7966, 2026.
- (4) A. Kawasaki, R. Ide, H. Brunel, T. Suzuki, R. Nehra, K. Nakashima, T. Kashiwazaki, A. Inoue, T. Umeki, F. China, M. Yabuno, S. Miki, H. Terai, T. Yamashita, A. Sakaguchi, K. Takase,

M. Endo, W. Asavanant, and A. Furusawa: "Broadband generation and tomography of non-Gaussian states for ultra-fast optical quantum processors," Nat. Commun., Vol.15, 9075, 2024.

- (5) S. Yokoyama, A. Sakaguchi, W. Asavanant, K. Takase, Y.-R. Chen, H. Nagayoshi, J. I. Yoshikawa, T. Kashiwazaki, A. Inoue, T. Umeki, T. Hashimoto, T. Hiraoka, A. Furusawa, and H. Yonezawa: "Full-stack analog optical quantum computer with a hundred inputs," arXiv:2506.16147, 2025.



(左から) 梅木 毅伺/ 柏崎 貴大/
井上 飛鳥/ 山嶋 大地

これまで使いやすいコヒーレント光源(レーザー)の誕生により爆発的に光産業が発展してきました。誰でも使える量子光源(スクイーズ)の実現は量子光産業を爆発的に発展させ、社会をより良くすると信じています。

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所
機能材料研究部
異種材料融合デバイス研究G



量子コンピュータの超高速化のためのリアルタイム高速量子信号検出技術

測定誘起型光量子コンピュータの高速化には、広帯域な量子信号検出技術が不可欠です。しかし、量子状態は光学損失に極めて弱く、高速光通信用ホモダイン検出器をそのまま適用することは困難でした。本稿では、光パラメトリック増幅により量子状態へ損失耐性を付与し、高速光通信用ホモダイン検出器を用いた高速量子信号検出技術を紹介します。43 GHzリアルタイム量子信号測定をはじめ、EPR量子もつれ状態やシュレーディンガー猫状態への応用、さらに100 GHz級への展望について述べます。

キーワード：#光量子コンピュータ、#高速量子信号検出、#光パラメトリック増幅

井上 飛鳥 / 柏崎 貴大
やましま たいち うめき たけし
山嶋 大地 / 梅木 毅伺

NTT先端集積デバイス研究所

はじめに

連続量光量子コンピュータは、測定誘起型量子計算^{*1} (MBQC: Measurement-Based Quantum Computing) により、大規模かつ高速な量子演算を実現できる有力な方式として期待されています⁽¹⁾。量子計算のさらなる高速化には、広帯域な量子光源と、それに対応した広帯域な量子信号検出技術の両方が不可欠です。

NTTではこれまでに、PPLN (Periodically Poled Lithium Niobate) 導波路^{*2}を用いた光パラメトリック増幅器 (OPA: Optical Parametric Amplifier) ^{*3}により、DC (Direct Current) から6 THzまでの超広帯域スクイズド光源^{*4}を実現しました⁽²⁾。この光源は、高クロック動作による高速な測定誘起型量子計算を可能にする重要な要素です。

しかし、量子状態はわずかな光学

損失でも容易に劣化するため、これまでは低損失なホモダイン検出器^{*5}を用いる必要があり、帯域は数GHz程度に制限されていました。一方、光通信用ホモダイン検出器は数10 GHz以上の広帯域動作が可能であるものの、量子状態を直接測定するには損失が大きく、これまで適用することが困難でした。このように、広帯域光源が実現した一方で、それを活用するための量子信号検出技術が高速化のボトルネックとなっていました。

本稿では、この課題を解決するために開発した高速量子信号検出技術について紹介します。本技術では、量子信号を光パラメトリック増幅により検出前に増幅することで、後段の検出系における光学損失の影響を受けにくい状態へ変換し、高速ではあるものの、損失の大きい光通信用ホモダイン検出器を量子状態の測定へ適用することを可能としました。さらに、本技術を用いた43 GHzリ

アルタイム量子信号測定、超高速量子もつれ状態の観測、および100 GHz級検出技術や波長分割多重^{*6}を組み合わせた大規模化への展望について述べます。

- * 1 測定誘起型量子計算：あらかじめ生成した大規模量子もつれ状態に対し、ホモダイン測定を逐次行い、その測定結果を利用して量子演算を実行する方式。演算速度はホモダイン検出速度に大きく依存します。
- * 2 PPLN導波路：周期分極反転したニオブ酸リチウム導波路。高効率な波長変換や光パラメトリック増幅を実現できる代表的な非線形光学デバイスです。
- * 3 光パラメトリック増幅器：非線形光学効果を利用し、入力された光信号を位相感応的に増幅する光増幅器。量子情報を保持したまま信号を増幅できることが特徴です。
- * 4 スクイズド光源：スクイズド光とは量子力学的な揺らぎ (量子雑音) の一方の成分を真空雑音以下まで低減した量子状態。連続量量子情報処理の基本資源として利用されます。スクイズド光を発生させる光源をスクイズド光源といいます。
- * 5 ホモダイン検出：信号光と局部発振光 (LO) を干渉させ、光の振幅・位相情報を高感度に測定する手法。連続量光量子情報処理では量子状態を読み出す基本技術です。
- * 6 波長分割多重：異なる波長の光信号を同一光ファイバで同時に伝送する多重化技術。光通信で広く利用されており、光量子情報処理への応用も期待されています。

高速量子信号検出における課題

測定誘起型量子計算では、あらかじめ生成した量子もつれ状態に対しホモダイン検出を繰り返し行い、その測定結果を後続の量子演算へ反映します。このため、ホモダイン検出器は単なる測定器ではなく、量子演算を実行するための重要な構成要素であり、その動作速度が光量子コンピュータの演算速度を左右します。そのため、光量子コンピュータの高速化には、広帯域な量子光源と、それに対応した高速な量子信号検出技術の両方が不可欠です。

NTTではこれまでに、PPLN導波路を用いたOPAにより、THz帯域に及ぶ広帯域スクイーズド光源を実現し、高速な量子信号を生成する基盤技術を確認してきました。これにより、高速動作に必要な量子光源は実現されましたが、その性能を十分に活用するためには、それに見合う高速な量子信号検出技術が必要となります。

しかし、量子状態の検出には古典光通信とは異なる特有の課題があります。量子状態の検出に用いられるホモダイン検出では、信号光と局部発振光（LO：Local Oscillator）^{*7}を干渉させ、その差動信号から量子状態を読み出します。この際、検出器や光学系で生じるわずかな光学損失であっても真空揺らぎが混入し、

スクイーズド光や量子もつれなどの量子状態は不可逆的に劣化してしまいます。一度失われた量子情報は後段の信号処理で補償することができないため、ホモダイン検出器には極めて高い検出効率と低損失性が求められます。そのため、従来の量子信号検出では低損失なホモダイン検出器が用いられてきましたが、その帯域は数GHz程度に限られ、高速化には限界がありました。

これに対し、光通信分野では数10GHz以上の広帯域ホモダイン検出器が実用化されています。ただし、これらは高速動作を実現するための設計が優先されており、量子状態の測定に必要な低損失性を満たさないため、そのまま量子信号検出へ適用することはできませんでした。すなわち、高速なホモダイン検出器は存在するものの、量子状態の測定には利用できず、検出器が光量子コンピュータ高速化のボトルネックとなっていました。

光パラメトリック増幅を用いた高速量子信号検出技術

前述の課題を解決するため、本研究では、OPAを用いた新たな量子信号検出方式を提案しました（図1）。本提案では、低雑音指数・高増幅率なOPAが必要不可欠です。OPAとして、NTTで長年研究開発を進めてきた、PPLN導波路型の

OPAを使用します（図2）。

従来のホモダイン検出では、量子信号を直接ホモダイン検出器へ入力するため、検出器やその周辺で生じる光学損失がそのまま量子状態の劣化につながります。そのため、量子信号検出には低損失なホモダイン検出器を用いる必要があり、高速な光通信用ホモダイン検出器を利用することは困難でした。

本方式では、このホモダイン検出器の前段にOPAを配置し、量子信号を光学的に位相感應増幅^{*8}します。OPAでは、ポンプ光との非線形光学相互作用を利用することで、一方の直交位相成分を増幅するとともに、他方の直交位相成分を減衰させることができます。この位相感應増幅では、測定対象となる量子状態だけを選択的に増幅できるため、量子情報を保持したまま信号レベルを高められることが大きな特徴です。

さらに、量子信号をホモダイン検出前に十分な光強度まで増幅することで、後段の検出系で生じる光学損失の影響を大幅に低減できます。すなわち、従来は量子状態を劣化させていた検出器や光学部品での損失に

^{*7} 局部発振光：ホモダイン検出で信号光と干渉させるために用いるコヒーレント光。LOの位相を制御することで、測定する量子状態の直交位相成分を選択できます。

^{*8} 位相感應増幅：入力光の直交位相成分の一方を増幅し、他方を減衰させる増幅方式。通常的光増幅器とは異なり、量子状態を保持したまま増幅できます。

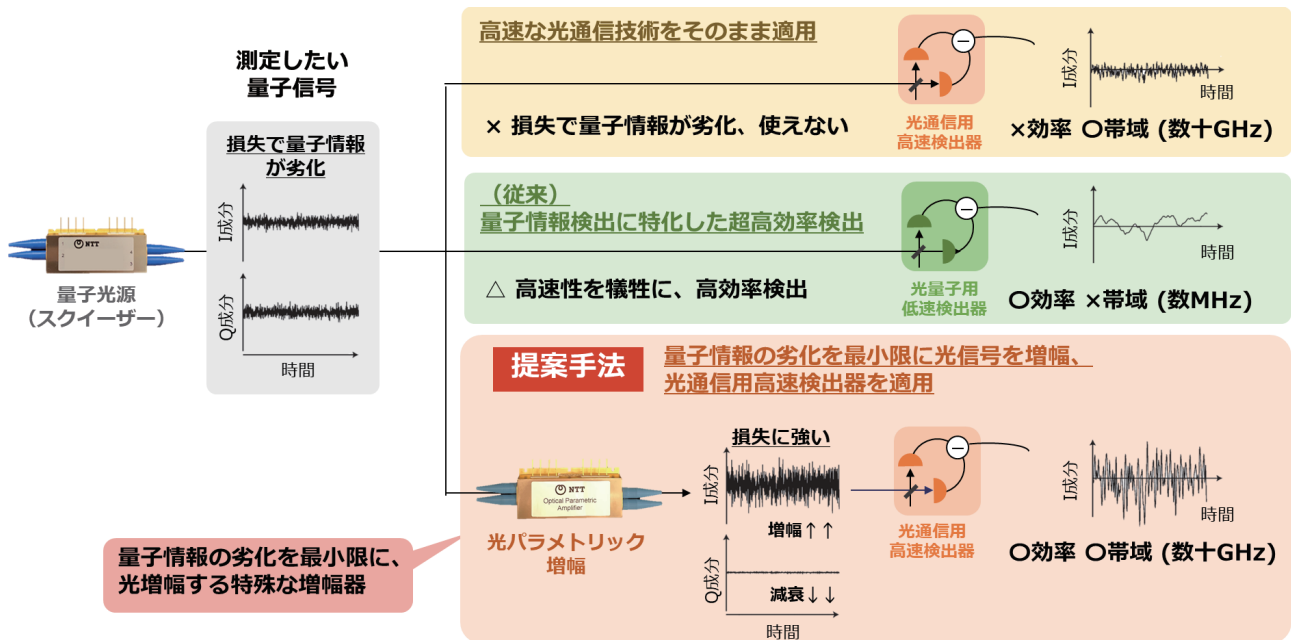


図1 従来の量子状態測定手法と、新提案の高速な量子状態測定手法

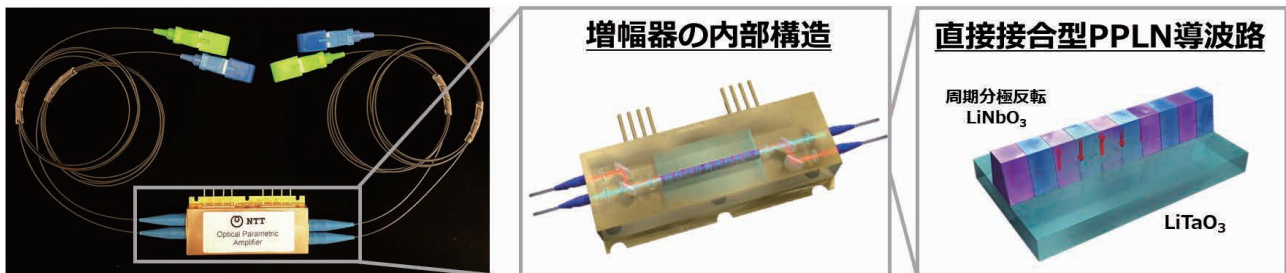


図2 PPLN導波路を用いたOPA

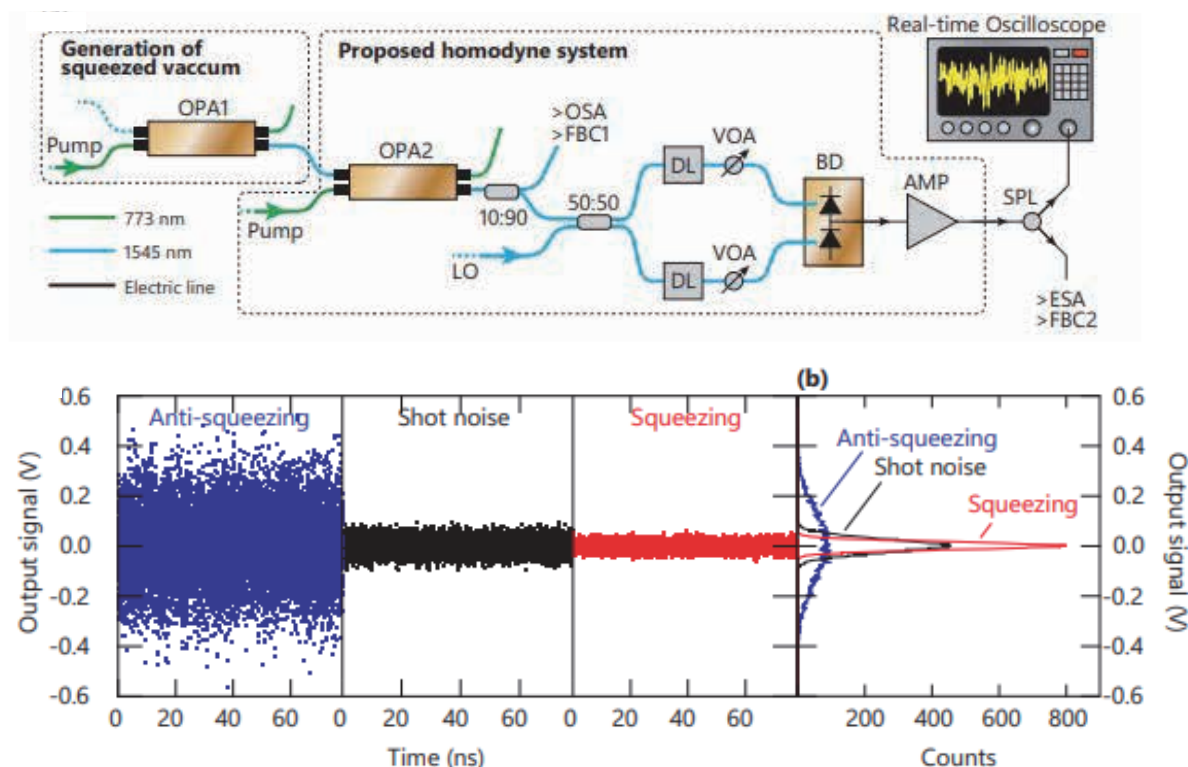
対して高い耐性を持たせることができます。その結果、これまで量子状態の測定には適用できなかった高速光通信用ホモダイン検出器を利用した量子信号検出を初めて実現しました。

本方式の特徴は、高速なホモダイン検出器そのものを新たに開発した点ではなく、OPAによって量子状態へ損失耐性を付与することで、既存の高速光通信技術を量子信号検出

へ展開した点にあります。従来は「高速であるが量子測定には利用できない」と考えられていた光通信技術を、「高速かつ量子測定に利用可能」な技術へ転換したことが、本方式の最大の特徴です。これにより、光通信分野で培われた高速ホモダイン検出技術を活用し、光量子コンピュータの高速化に向けた新たな検出基盤を実現しました。

高速量子信号検出技術の実証と応用

提案した量子信号検出方式の有効性を検証するため、高速光通信用ホモダイン検出器を用いたリアルタイム量子信号測定を行いました(図3)。量子信号をOPAにより位相感応増幅した後、市販の43 GHz帯域ホモダイン検出器で測定することで、約5 dBのスウィーズド光の



A. Inoue et al., APL 122, 104001 (2023)

図3 43 GHz帯域リアルタイム量子状態測定結果

リアルタイム測定に成功しました⁽³⁾。これにより、従来は数GHz程度に制限されていた量子信号検出帯域を43 GHzまで拡張し、高速光通信用ホモダイン検出器を量子状態の測定へ適用できることを初めて実証しました。本成果は、高速ホモダイン検出器を量子信号検出へ利用できることを示した原理実証であり、光量子コンピュータの演算速度向上に向けた重要なマイルストーンとなる成果です。

この成果を基盤として、高速量子信号検出技術は超高速量子状態の測定へと発展しています(図4)。まず、本検出技術を適用することで、時間

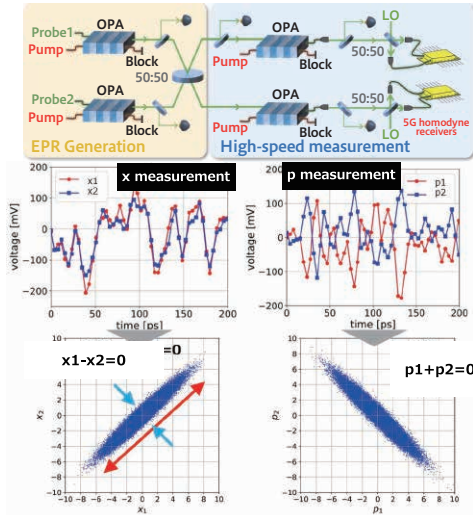
幅約40 psで生成されるEPR(Einstein-Podolsky-Rosen)量子もつれ状態^{*9}のリアルタイム測定に成功しました⁽⁴⁾。EPR量子もつれ状態は、量子テレポーテーションや測定誘起型量子計算などの連続量量子情報処理を支える基本的な量子資源です。従来の低速なホモダイン検出器では、このような高速で時間変化する量子状態を直接測定することは困難でしたが、本検出技術によりピコ秒スケールの量子状態をリアルタイムで評価できることを実証しました。これは、高クロック動作する測定誘起型光量子コンピュータの実現に向けた重要な成果です。

さらに、本検出技術は、連続量量子情報処理において重要な非ガウス量子状態であるシュレーディンガー猫状態^{*10}の高速測定にも応用されています。シュレーディンガー猫状態は、誤り耐性量子計算や量子誤り訂正への応用が期待される代表的な非ガウス量子状態であり、その生成・測定は連続量量子情報処理における

*9 EPR量子もつれ状態: Einstein, Podolsky, Rosenが提唱した思考実験に由来する量子もつれ状態。連続量量子テレポーテーションや測定型量子計算の基本資源となります。

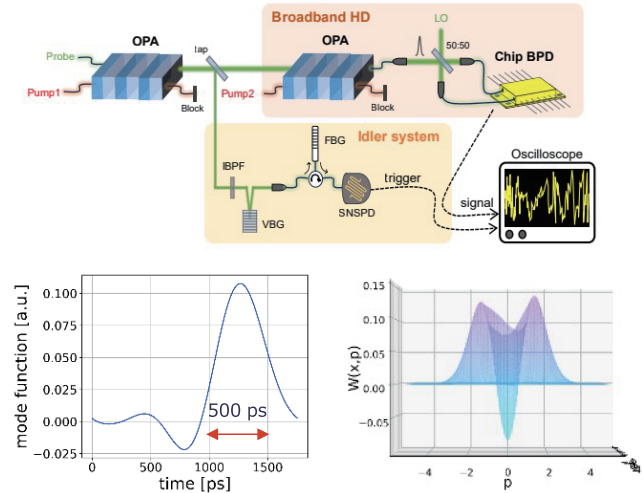
*10 シュレーディンガー猫状態: 複数のコヒーレント状態が量子的に重ね合わされた非ガウス量子状態。量子誤り訂正や誤り耐性量子計算への応用が期待されています。

60-GHz EPR generation



A. Kawasaki et al., Nature Photon. 19, 271(2025)

GHz-order NGS generation and detection



A. Kawasaki et al., Nature Comm. 15, 9075(2024)

図4 60 GHz超EPR生成とGHz級非ガウス状態生成

重要な研究課題です。本検出技術を適用することで、このような非ガウス量子状態についても高速測定が可能であることを示しました⁽⁵⁾。

以上のように、本技術はスクイーズド光の測定にとどまらず、EPR量子もつれ状態やシュレーディンガー猫状態など、多様な量子状態へ適用できる汎用的な高速量子信号検出技術へと発展しました。今後、より高速なホモダイン検出器と組み合わせることで、測定誘起型光量子コンピュータのさらなる高速化を支える基盤技術として発展していくことが期待されます。

今後の展望

本稿で紹介した高速量子信号検出技術により、高速光通信用ホモダイ

ン検出器を量子状態の測定へ適用できることを実証し、43 GHz帯域でのリアルタイム量子信号測定を実現しました。さらに、本技術を基盤として、EPR量子もつれ状態やシュレーディンガー猫状態といった多様な量子状態へ適用範囲を拡大してきました。

今後、測定誘起型光量子コンピュータをさらに高速化するためには、ホモダイン検出器の帯域を100 GHz級へ拡張することが重要となります。光通信分野では100 GHz級の高速受信デバイスの開発が進んでおり、本研究で提案した検出方式を適用することで、これらの高速デバイスを量子信号検出へ展開できる可能性があります。検出帯域が100 GHz級へ拡張されれば、測定誘起型光量子コンピュータの演算クロックをさ

らに向上させ、単位時間当りに処理できる量子情報量を大幅に増加できると期待されます。

さらに、光通信分野で広く利用されている波長分割多重（WDM：Wavelength Division Multiplexing）技術との融合も有望です。これまで本技術は時間領域での高速化を実現してきましたが、複数の波長チャネルを同時に利用することで、時間軸に加えて波長軸で並列化が可能となります（図5）。すなわち、時間多重と波長多重を組み合わせ、大規模化を図ることで、量子情報処理能力を飛躍的に向上できる可能性があります。高速ホモダイン検出技術は、このような広帯域・多チャンネル化された量子信号を測定するための基盤技術としても重要な役割を担うと考えられます。

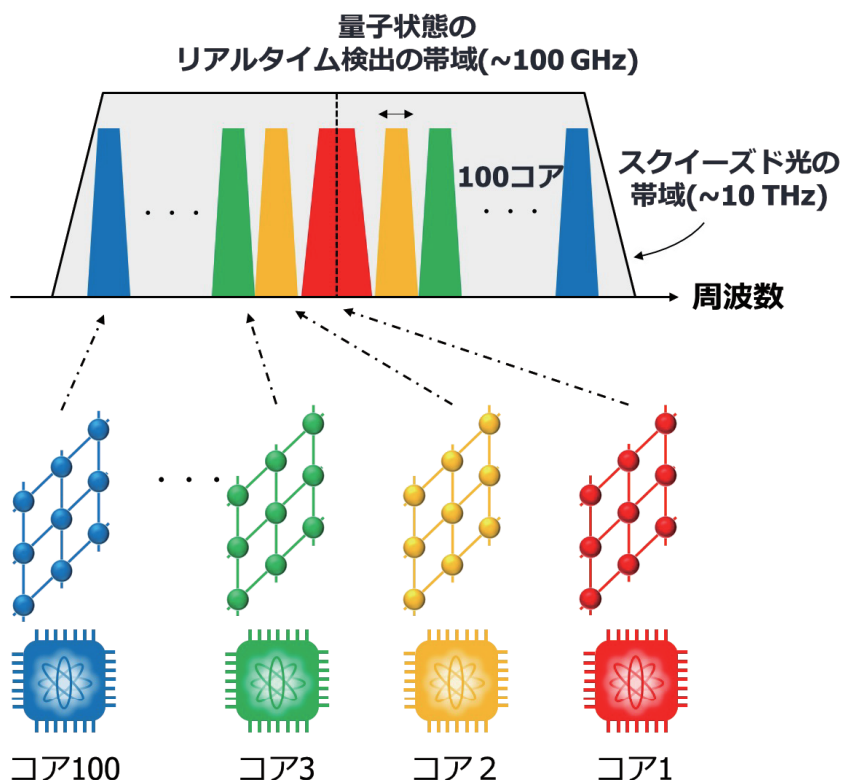


図5 波長多重方式による広帯域光量子コンピュータ

今後も、高速光通信技術と光量子技術の融合をさらに推進し、100 GHz級ホモダイン検出技術や波長多重技術との統合を進めることで、高速かつ大規模な測定誘起型光量子コンピュータの実現に貢献していきます。

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の支援を受けたものです。

参考文献

- (1) S. Takeda and A. Furusawa: "Toward large-scale fault-tolerant universal photonic quantum computing," APL Photonics, Vol. 4, No. 6, 060902, Jun. 2019.
- (2) 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," Applied Physics Letters, Vol. 119, No. 25, 251104, Dec. 2021.
- (3) A. Inoue, T. Kashiwazaki, T. Yamashima, N. Takanashi, T. Kazama, K. Enbutsu, K. Watanabe, T. Umeki, M. Endo, and A. Furusawa: "Toward a multi-core ultra-fast optical quantum processor: 43-GHz bandwidth real-time amplitude measurement of 5-dB squeezed light using modularized optical parametric amplifier with 5G technology," Applied Physics Letters,

Vol. 122, 104001, March 2023.

- (4) A. Kawasaki, R. Ide, H. Brunel, T. Suzuki, R. Nehra, K. Nakashima, T. Kashiwazaki, A. Inoue, T. Umeki, F. China, M. Yabuno, S. Miki, H. Terai, T. Yamashima, A. Sakaguchi, K. Takase, M. Endo, W. Asavanant, and A. Furusawa: "Real-time observation of picosecond Einstein-Podolsky-Rosen entanglement," Nature, 2025.
- (5) A. Kawasaki, R. Ide, H. Brunel, T. Suzuki, R. Nehra, K. Nakashima, T. Kashiwazaki, A. Inoue, T. Umeki, F. China, M. Yabuno, S. Miki, H. Terai, T. Yamashima, A. Sakaguchi, K. Takase, M. Endo, W. Asavanant, and A. Furusawa: "Broadband generation and tomography of non-Gaussian states for ultra-fast optical quantum processors," Nature Communications, Vol. 15, 9075, Nov. 2024.



(後列左から) 柏崎 貴大 / 梅木 毅伺
(前列左から) 井上 飛鳥 / 山嶋 大地

光通信技術には、長年培われてきた高速・低雑音・高集積化の知見があります。それらを光量子コンピュータへと融合させ、実験室の技術をより良い社会へと変革する技術に発展させたいと考えています。より豊かな社会の実現に貢献できるよう、今後も研究開発を続けていきます。

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所



光量子コンピュータを支えるソフトウェア技術

光量子コンピュータを実用的な計算基盤として活用するには、アプリケーションと光量子ハードウェアをつなぐソフトウェア技術が不可欠です。本稿では、光量子コンピュータ用ソフトウェアの全体像を示すとともに、量子の専門知識がなくても問題記述やパラメータ調整を行えるSDK (Software Development Kit) と、量子・古典計算資源を連携させ、量子誤り抑制によって効率的かつ高信頼な実行を支えるシステムソフトウェアの研究開発を紹介します。

キーワード：#光量子コンピュータ，#光量子SDK，#量子誤り抑制

やぎ さとし
八木 哲志
みやはら かずひろ
宮原 和大
かさえ ゆみこ
笠江 優美子

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所

光量子コンピュータ用ソフトウェアの全体像

光量子コンピュータを実際の問題解決に利用するためには、光量子ハードウェアの性能向上だけでなく、アプリケーションと光量子ハードウェアをつなぐソフトウェア技術が不可欠です。光量子コンピュータ用ソフトウェアは、ユーザが解きたい問題を量子計算として記述し、対象となる光量子ハードウェアで実行可能な形へ変換したうえで、計算資源を管理し、得られた結果をユーザへ返す役割を担います。

図1に、光量子コンピュータ用ソフトウェアの代表的な構成を示します。図中の箱は各階層の機能を、箱の間の矢印に付した項目は機能間のインタフェースとして受け渡される主なデータや表現を示しています。

最上位のアプリケーションでは、組合せ最適化、機械学習、物理・化学シミュレーションなど、光量子コンピュータを用いて解決させたい問題を定義します。次に、その問題を

量子計算として処理するための量子アルゴリズムを選択・設計します。量子アルゴリズムでは、量子計算と古典計算の役割分担や、計算を反復する方法などを定めます。

ユーザはSDK (Software Development Kit) が提供する量子プログラミングライブラリを用いて、量子アルゴリズムを量子回路として記述します。量子回路は、量子状態に対してどのような演算を、どの順序で適用するかを表すものです。連

続量光量子計算では、量子ビットの代わりに光の量子モードを扱い、位相回転、変位、圧搾、2モード演算、測定などを組み合わせて回路を構成します。SDKは、量子回路を記述するためのライブラリに加え、シミュレータや実機への接続機能、サンプルプログラム、ドキュメントなどを提供し、量子プログラムの開発と実行を支援します。図1では、その中でも処理の主経路となる回路記述と実行支援の機能を示しています。

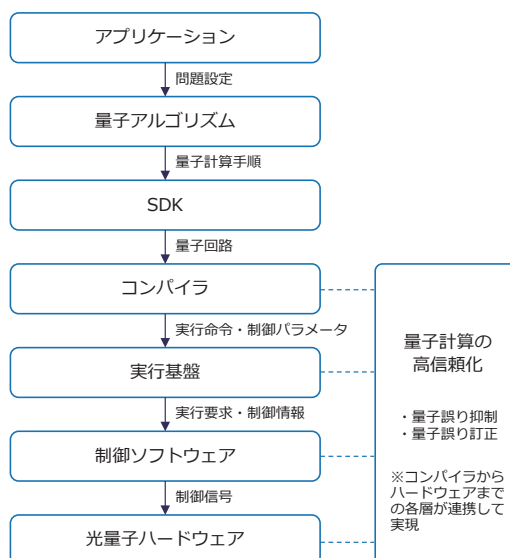


図1 光量子コンピュータ用ソフトウェア全体像

作成された量子回路は、コンパイラによって対象ハードウェアで実行可能なかたちへ変換されます。コンパイラは、量子回路を対象ハードウェアで実行可能な演算や表現へ変換し、必要に応じて回路の構成や実行方法を最適化します。内部では複数段階の中間表現を用いる場合がありますが、通常、ユーザがそれらを直接意識する必要はありません。

コンパイラから出力された実行命令や制御パラメータは、ランタイムやジョブ管理からなる実行基盤へ渡されます。実行基盤は、ジョブ受付、実行順序の決定、量子・古典計算資源の割当て、実行状態の監視などを担います。複数のユーザが光量子コンピュータを共用する場合には、計算資源を安全かつ公平に管理し、装置を効率的に利用することも重要です。

NTTが研究開発を進める光量子コンピュータでは、光の連続的な物理量を利用する連続量方式と、量子もつれ状態に対する測定によって演算を実現する測定型量子計算を用います。時間領域多重^{*1}された多数の光パルスから二次元クラスタ状態^{*2}を生成し、それぞれの光パルスを適切な測定基底^{*3}で測定することで計算を進めます。

このため、測定型の連続量光量子コンピュータ向けコンパイラには、連続量量子回路をクラスタ状態上の測定手順へ変換し、各光パルスの測定基底や測定結果に応じた後続の測定条件などを、実行命令や制御パラ

メータとして生成する機能が求められます。これらは、実行基盤を介して制御ソフトウェアへ渡され、装置を動作させるための制御情報へ変換されます。装置の動作には、各光パルスに対する測定基底の高速な切替え、測定データの収集、測定結果に基づくフィードフォワード^{*4}など、量子状態の時間スケールに合わせた高速制御が必要です。

また、量子コンピュータでは、方式によらず、外部環境の影響や装置の不完全性により、計算結果に誤りが含まれます。このため、量子計算の信頼性を高める量子誤り抑制と量子誤り訂正も、ソフトウェアスタックを横断する重要な技術です。

量子誤り抑制を実現するには、コンパイラや実行基盤を連携させ、回路変換、追加実行、結果の補正を行う必要があります。

一方、量子誤り訂正では、1つの論理的な量子情報を複数の物理的な量子状態に符号化し、計算途中で誤りを検出・訂正しながら処理を進めます。これを実現するには、コンパイラ、実行基盤、制御ソフトウェア、光量子ハードウェアを一体として設計する必要があります。光量子方式では、光損失、有限圧搾、測定誤差などへの対策に加え、将来的にはボソニック符号^{*5}や接続符号^{*6}を用いた誤り耐性型量子計算への発展が求められます。

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所では、量子アルゴリズムから実行基盤、高信頼化まで、ソ

フトウェアスタックの各層にわたる研究開発を進めています。本稿では、これらの取り組みの中から、ユーザによる問題記述と実行を支援するSDK、および量子プログラムの効率的かつ高信頼な実行を支えるシステムソフトウェアを紹介します。

ユーザによる問題記述と実行を支援するSDK

光量子方式を含めた量子コンピュータの実用化、特に実際の社会的問題を解く、もしくはビジネスに応用するといった用途を考えると解決すべき課題は大きく2つです。1つは量子コンピュータへ解きたい問題を入力するために「量子アルゴリズムに関する知識」が必要であること。もう1つは量子コンピュータの利点である古典コンピュータを上回

*1 時間領域多重：時間的に連続して生成される光パルスを、それぞれ独立した量子モードとして利用する方式。装置を大規模化することなく、多数の量子モードを扱える利点があります。

*2 クラスタ状態：多数の量子モードを量子もつれによって結び付けた状態。測定型量子計算では、各量子モードを順次測定することで量子演算を実行します。

*3 測定基底：量子状態をどの物理量・方向に沿って測定するかを定める条件。測定型量子計算では、測定基底の選び方によって実行する量子演算が決まります。

*4 フィードフォワード：先に得られた測定結果に応じて、後続の測定条件や制御内容を変更する処理。

*5 ボソニック符号：光や超伝導共振器などの連続的な量子状態を利用して、論理量子ビットを符号化する量子誤り訂正符号。

*6 接続符号：複数の量子誤り訂正符号を階層的に組み合わせることで、論理量子情報の信頼性を高める方式。

る性能を引き出すために「量子コンピュータ・アルゴリズムの性能に関する知識」が必要であることです。いずれの知識も量子に関する高度な専門知識であり修得にも時間を要するため、多くの人が多くの場面で気軽に量子コンピュータの恩恵を受けるための大きな課題です。

NTT コンピュータ & データサイエンス研究所ではこれらの課題を解決するため、量子に関する専門知識無しで扱える量子コンピュータ向け SDK の開発を進めています。これは前述した量子アルゴリズムを量子回路として記述する SDK を補完する、量子アルゴリズム領域に特化した SDK であり、量子を用いた機械学習や最適化問題といった領域をターゲットにしています。ここでは組合せ最適化問題を解くことができる量子アルゴリズムの 1 つ QAOA (Quantum Approximate Optimization Algorithm)⁽¹⁾ を例にこの SDK が解決する課題について具体的に説明します。QAOA は量子ビット向けのアルゴリズムですが、GKP 符号⁽²⁾といった符号化手法により量子モードによる量子回路上でも量子ビット向けアルゴリズムを実行可能です。QAOA はある程度ノイズを含む量子コンピュータ上でも効果的なアルゴリズムとされており、早期の実用化が期待できます。

QAOA が解く「組合せ最適化問題」とは、多数の答えの組合せの中から与えられた制約条件を満たすもののうち、もっとも良い答えを得る

問題です。例えば、巡回セールスマン問題⁽³⁾は、複数の都市を巡る移動ルートを「答えの組合せ」とし、すべての都市を 1 回ずつ訪問し出発地に戻るという「与えられた制約条件」の下で、移動距離や時間などのコストがもっとも小さいルートを「もっとも良い答え」として求める問題であり、物流の最適化などに応用されます。このように組合せ最適化問題は社会の多くの場面で現れる応用範囲の広い概念です。

QAOA を用いてこの組合せ最適化問題を解くには、量子アルゴリズムに合わせた問題入力と、性能を引き出すためのパラメータ調整が必要です。QAOA に問題入力をするには、各候補解を量子状態に対応付け、その評価値がエネルギーとして表されるハミルトニアンを構築する必要があります。答えの内容を量子ビットのそれぞれにどのように対応させるかを考え、制約条件を満たす良い答えの量子エネルギー状態がもっとも低くなるよう、実際の量子回路に効率的に組み込み可能な範囲のハミルトニアンを考える必要があります。また、ハミルトニアンは問題ごとに設計し直す必要があります。

また、QAOA の性能を引き出すためには量子エネルギー状態の変化をコントロールするパラメータを適切に設定する必要があります。解きたい問題が大きくなるほど、このパラメータの数は多くなり、問題によって内容も異なります。小規模な問題であればすべてのパラメータの組み

合わせを試すことも可能ですが、実用的には長時間かかってしまい現実的ではありません。したがって、問題ごとに適したパラメータの傾向を踏まえた効率的なパラメータ調整が求められます。

NTT 開発の SDK ではこれらの課題を解決し、専門知識がなくても量子コンピュータを使いこなせる機能を提供します。QAOA 向けにはハミルトニアン入力の方法はいくつかありますが、従来手法の 1 つである QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization)^{*7} 多項式と NTT 開発 SDK による入力を比べてみます。ここではシンプルな例として整数 a, b, c に対する $(a+b+2c=7) \wedge (a=0 \vee b=0 \vee c=0)$ という制約条件を記述した例で考えます。従来手法による入力 (図 2) は比較的煩雑であり、各量子ビットに対する式を考えなければなりません。NTT 開発 SDK による入力は図 3 で、制約条件の論理式をほぼそのまま直感的に記述され、量子ビットの詳細を考えずとも扱うことができます。パラメータ調整についても SDK には自動調整機能を実装しており、NTT 独自の知見を組み込んだ効率的なパラメータ調整を提供します。

このように NTT 開発の SDK では量子コンピュータの専門知識がなくても迅速に導入できるものを提供予

* 7 QUBO: 二値変数からなる二次式の最小化として組合せ最適化問題を表現する形式。

手作業による多項式記述

```
def generate_constraint(self):
    x = self.variable_generator()
    a = x[0] + 2*x[1] + 4*x[2]
    b = x[3] + 2*x[4] + 4*x[5]
    c = x[6] + 2*x[7] + 4*x[8]
    sum_const += (a + b + 2 * c - 7) ** 2
    a_is_nonzero = x[9]
    b_is_nonzero = x[10]
    c_is_nonzero = x[11]
    zero_const = 0
    zero_const += ¥
    (a - a_is_nonzero - x[12] - 2*x[13] - 3*x[14]) ** 2 + ¥
    ((1 - a_is_nonzero) * x[12]) + ¥
    ((1 - a_is_nonzero) * x[13]) + ¥
    ((1 - a_is_nonzero) * x[14])
    zero_const += ¥
    (b - b_is_nonzero - x[15] - 2*x[16] - 3*x[17]) ** 2 + ¥
    ((1 - b_is_nonzero) * x[15]) + ¥
    ((1 - b_is_nonzero) * x[16]) + ¥
    ((1 - b_is_nonzero) * x[17])
    zero_const += ¥
    (c - c_is_nonzero - x[18] - 2*x[19] - 3*x[20]) ** 2 + ¥
    ((1 - c_is_nonzero) * x[18]) + ¥
    ((1 - c_is_nonzero) * x[19]) + ¥
    ((1 - c_is_nonzero) * x[20])
    or_zero_const = ¥
    a_is_zero = b_is_zero + b_is_zero * c_is_zero + c_is_zero * a_is_zero - ¥
    (a_is_zero + b_is_zero + c_is_zero) - x[21] * (a_is_zero + b_is_zero + c_is_zero - 2)
    return sum_const + zero_const + or_zero_const
```

図2 従来方式（多項式表現）のプログラム化イメージ

```
def generate_constraint(self, a, b, c):
    a = self.cxt.integer("a")
    b = self.cxt.integer("b")
    c = self.cxt.integer("c")
    return (
        (a + b + 2 * c == 7).l_and(
            (a == 0).l_or(b == 0).l_or(c == 0)
        )
    )
```

数理モデルをそのまま記述

図3 NTT独自技術のプログラム化イメージ

定です。また、段階的に量子コンピュータの細部に対し指定できる機能も併せて提供し、量子コンピュータに興味を持っていた方からより深い研究・ビジネス用途まで幅広くご利用いただけるSDKとして、量子コンピュータの実用化に向け懸け橋となるものを実現していきます。

効率的かつ高信頼な実行を支えるシステムソフトウェア

ここでは、量子プログラムの効率

的な実行を支える実行基盤と、高信頼化のためのノイズ対策を紹介します。

量子コンピュータを複数のユーザーが共用する計算基盤として利用する場合、実行基盤にはジョブの受付、実行順序の決定、量子・古典計算資源の割当て、実行状態の監視などの機能が求められます。特に、量子計算では、古典コンピュータ上での前処理、量子コンピュータでの実行、測定結果の収集、古典コンピュータ上での後処理が連続して行われます。

そのため、量子コンピュータ単体の実験装置として扱うのではなく、古典コンピュータや制御ソフトウェアと連携する計算サービスとして扱うためのシステムアーキテクチャが重要になります。

また、VQE (Variational Quantum Eigensolver: 変分量子固有値ソルバ) や QAOA に代表される量子・古典ハイブリッド計算では、量子コンピュータで得られた結果を古典コンピュータで評価し、その結果を基に次に実行する量子計算の条件を更新する、という反復的な処理が行われます。このような計算では、量子コンピュータの性能だけでなく、古典コンピュータとの連携や実行制御、結果評価、再実行の効率化がシステム全体の性能を左右します。

さらに現在の量子コンピュータでは、実行結果に含まれるノイズへの対策が不可欠です。前述のように、量子誤り抑制は追加の実行や古典コンピュータによる後処理を用いてノイズの影響を低減する技術です。しかし、実際に誤り抑制を利用するには、単に後処理アルゴリズムを用意するだけでは不十分です。誤り抑制手法に応じた追加実行の生成、複数回の実行管理、測定結果の収集、補正結果の評価などを、実行基盤と連携して行う必要があります。

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所では、光量子コンピュータを多くのユーザーが利用できる計算基盤へ発展させるため、量子・古典コンピュータの連携、複数ユー

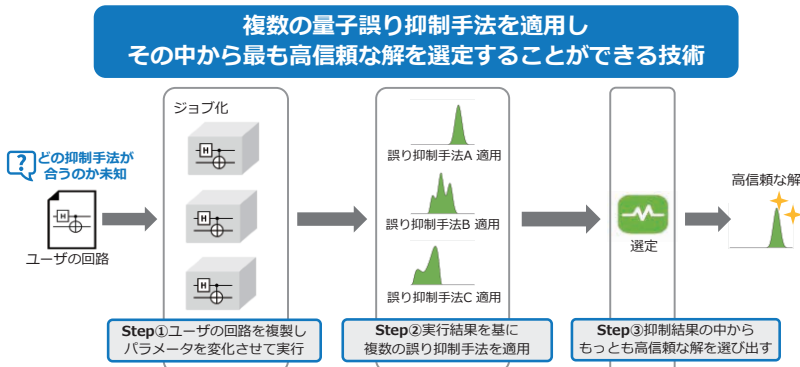


図4 データ駆動型量子誤り抑制手法

ザによる安全かつ効率的な共用、ノイズ対策などを支えるソフトウェア・システムアーキテクチャの研究開発を進めています。

本稿では、これらの研究開発の中でもノイズ対策に関する成果の1つとして、量子計算の高信頼化に向けた量子誤り抑制のアプローチを紹介합니다。量子誤り抑制にはさまざまな手法が考案されていますが、ユーザーが実行したい量子プログラムに対して、どの誤り抑制手法が有効かを事前に判断することは容易ではありません。そこで本アプローチでは、図4に示すように、ソフトウェア工学分野の複数の独立した実装を比較して信頼性を高めるN-version programmingという考え方を取り入れ、量子コンピュータから得られる確率分布を対象に、複数の誤り抑制結果の一貫性を評価します。これにより、実行結果そのものの特徴を利用して、信頼性が高いと考えられる結果を選定するデータ駆動型の手法を提案しています。量子ハードウェアを大きく変更するのではなく、得られた実行結果を古典コンピュー

タ上で解析・評価する後処理的な手法であるため、早期の量子コンピュータ利用に向けた実用的なノイズ対策として期待されます⁽⁴⁾。

本研究開発では、量子コンピュータを実用的な計算サービスとして発展させるため、古典コンピュータと連携するソフトウェア基盤や、出力結果の信頼性を高める技術の検討を進めています。今後も、量子コンピュータの早期活用と、多くのユーザーが安心して利用できる計算基盤の実現をめざし、ソフトウェア・システムアーキテクチャとノイズ対策の両面から研究開発を進めていきます。

今後の展望

本稿では、専門知識を持たないユーザーの利用を支援するSDKと、量子・古典計算資源の連携や高信頼化を担うシステムソフトウェアを紹介しました。

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所では、今後も対象とする問題領域や量子アルゴリズムを拡

充するとともに、光量子ハードウェアとの連携を一層強化し、実機を用いた評価やユースケースの検証を進めます。さらに、SDKから実行基盤、高信頼化技術までを一体として研究開発することで、多くのユーザーが光量子コンピュータを容易かつ安心して利用できる計算基盤の実現をめざします。これらの取り組みを通じて、光量子コンピュータの早期実用化と、新たな社会価値・事業価値の創出に貢献していきます。

参考文献

- (1) E. Farhi, J. Goldstone, and S. Gutmann: "A Quantum Approximate Optimization Algorithm," arXiv:1411.4028, 2014.
- (2) D. Gottesman, A. Kitaev, and J. Preskill: "Encoding a Qubit in an Oscillator," Physical Review A, Vol. 64, 012310, 2001.
- (3) G. Dantzig, R. Fulkerson, and S. Johnson: "Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem," Journal of the Operations Research Society of America, Vol. 2, No. 4, pp.393-410, 1954.
- (4) R. Shimazu, S. Endo, S. Hakkaku, and S. Saito: "Data-driven adaptive quantum error mitigation for probability distribution," arXiv:2511.13231, 2025.



(左から) 八木 哲志/ 宮原 和夫/
笠江 優美子

光量子コンピュータの実用化には、ユーザーによる問題記述と実行を支援するSDKと、効率かつ高信頼な実行を支えるシステムソフトウェアの両方が不可欠です。本稿を通じて、それぞれの役割と一体的な研究開発の重要性を感じていただければ幸いです。

◆問い合わせ先

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所



量子コンピュータの誤り訂正に向けた先端研究

大規模な量子コンピュータの実現には、壊れやすい量子情報を守る量子誤り訂正が欠かせません。本稿では、光などの調和振動子が持つ多数のエネルギー準位を利用するボソニック符号の考え方を概説します。さらに、スクイーズド猫符号の並進対称性に基づき、測定とフィードバックを必要としない自律的量子誤り訂正、論理演算、読み出しを一体的に構成するNTTの理論研究を紹介します。

キーワード：#量子誤り訂正、#ボソニック符号、#スクイーズド猫符号

えんどう すぐる
遠藤 傑
し たら ともひろ
設楽 智洋

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所

連続量誤り訂正

量子コンピュータは、化学計算、材料開発、機械学習など、さまざまな分野での応用が期待されている次世代のコンピュータです。その名前のとおり、量子コンピュータは重ね合わせや量子エンタングルメントといった、量子力学に特有の性質を利用して計算を行います。これにより、従来のコンピュータでは非常に長い時間がかかる問題を、劇的に短い時間で解ける可能性があると考えられています。しかし、このような量子的な性質は非常に壊れやすいという問題があります。量子計算に必要な重ね合わせやエンタングルメントのような繊細な量子状態は、外部環境からのわずかな影響によって乱され、計算エラーにつながってしまいます。そのため、実用的な量子コンピュータを実現するうえで、エラーをどのように抑えるかは最大の課題の1つです。

この課題を解決するために重要となるのが、量子誤り訂正です。量子

誤り訂正では、1つの論理量子ビットを複数の物理量子ビットを用いて符号化します。そして、その冗長性を利用して、どのようなエラーが発生したかを調べ、適切な操作を加えることでエラーを訂正します。例えば、3個の物理量子ビットを用いて、論理0を000、論理1を111として符号化する場合を考えます。このとき、論理0である000にエラーが起きて001になった場合、右端の量子ビットにエラーが起きたことが分かります。その情報を基に、001を元の000に戻すことができます。実際の量子誤り訂正では、計算資源である重ね合わせ状態を測定によって壊さないように、より巧妙な手続きが必要となりますが、基本的な考え方はこのような冗長化によるエラー検出と訂正です。

一方で、量子誤り訂正には大きなコストが伴います。1つの論理量子ビットを守るために、多数の物理量子ビットが必要になるからです。現在、量子ハードウェアの進展は著しいものの、利用可能な量子デバイス

の規模はまだ数百から千量子ビット程度に限られています。そのため、量子誤り訂正を行うと、実際に計算で使える論理量子ビットの数が大幅に少なくなってしまうです。

代表的な量子誤り訂正符号の1つである表面符号では、目標とするエラー率にもよりますが、1つの論理量子ビットを実現するために、少なくとも数十個、実用的な計算では数百個以上の物理量子ビットが必要になると考えられています。さらに、多数の物理量子ビットを制御し、それらの間に複雑な相互作用や配線を実装する必要があるため、ハードウェアへの負担も大きくなります。

そこで注目されているのが、調和振動子（ばねの振動をはじめ、光や電気回路など、さまざまな物理系の振動を表す基本的なモデル）と呼ばれる物理系の持つ豊かな自由度を活用して、よりハードウェアに親和的な量子誤り訂正を行うという考え方です。調和振動子は、ありふれた単純な物理系ですが、実は無数の等間隔なエネルギー準位を持っています。

この多数のエネルギー準位を巧みに利用することで、1つの物理系の中に論理量子ビットを符号化することができます。このような考え方は、ボソニック量子誤り訂正、あるいは連続量エラー訂正と呼ばれています。

例えば、論理0を4の倍数番目のエネルギー準位を用いて表し、論理1を4の倍数に2を足したエネルギー準位で表す符号化を考えます(図1)。この場合、論理量子ビットは偶数番目のエネルギー準位だけを用いて構成されます。調和振動子で典型的に発生するエラーの1つは、エネルギー量子を1つ失い、エネルギー準位が1つ下がるというエラーです。このエラーが起きると、偶数番目のエネルギー準位だけで構成されていた状態は、奇数番目のエネルギー準位を含む状態に移ります。したがって、エネルギー準位の偶奇を調べることで、エラーが起きたかどうかを検出できます。そして、その情報を基に適切な訂正操作を行うことで、論理量子ビットを守ることができます。

ここで、調和振動子の多数のエネルギー準位を用いて論理量子ビットを符号化する際には、対称性が重要

な設計原理になります。対称性とは、ある操作を行っても状態の特徴が変わらない性質です。符号状態を変えない操作を手掛かりにすることで、守るべき状態と、エラーによってそこから外れた状態を区別しやすくなります。次節では、この対称性を誤り訂正回路の設計に利用する方法を説明します。

さて、調和振動子を実現する物理系として、どのようなものがあるのでしょうか。代表的な例の1つが光です。光は情報の伝送に優れているだけでなく、1つの光モードが多数のエネルギー準位を持つ調和振動子として振る舞うため、連続量エラー訂正と非常に相性の良い物理系です。つまり、光は量子情報を遠くへ運ぶ媒体であると同時に、量子情報をエラーから守るための器にもなり得ます。NTTはこれまで長年にわたり、光通信や光デバイスの研究開発に取り組んできました。その強みを活かすことで、光を用いた量子コンピュータや、光の性質を最大限に活用した連続量エラー訂正の実現に向けた研究が期待されています。連続量エラー訂正は、量子コンピュータを大規模化するうえでハードウェアの負

担を軽減し、実用的な量子計算へ近づくための重要なアプローチの1つです。

スクイーズド猫符号の誤り訂正プロトコル

ボソニック符号の対称性を直感的にとらえるには、位相空間表示^{*1}が有効です。光の1つのモードの量子状態は、電場のcos成分とsin成分に相当する2つの量を軸とした平面上に描けます。通常の確率分布とは異なりますが、ウィグナー関数を用いると、状態の形や広がりを視覚的にとらえられます。

この表示では、ボソニック符号が持つ対称性を目で確認できます(図2)。猫符号では、位相空間上に離れて現れる複数の山が、原点の周りの回転によって互いに入れ替わります。この回転対称性は、エネルギー準位の偶奇など、エラーを見分ける規則と結び付いています⁽¹⁾。一方、GKP符号⁽²⁾では、山が格子状に並び、一定の距離だけ平行移動しても同じ配置に戻る並進対称性が現れます。並進対称性を利用したボソニック符号の研究も進められています⁽³⁾。このように、符号状態を変えない操作を見つけることは、守るべき状態を定め、そこから外れたエラーを訂正するための設計指針になり

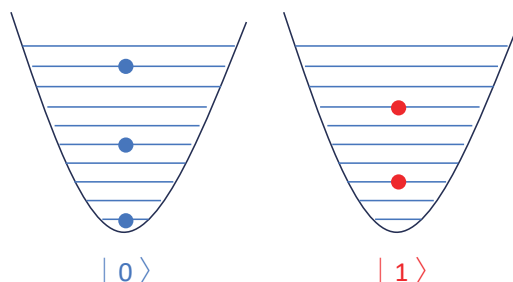


図1 等間隔なエネルギー準位を利用した符号化の例

*1 位相空間表示：位置と運動量、光の場合は電場と磁場に相当する2つの量を軸に、量子状態の形や広がりを図示する方法。

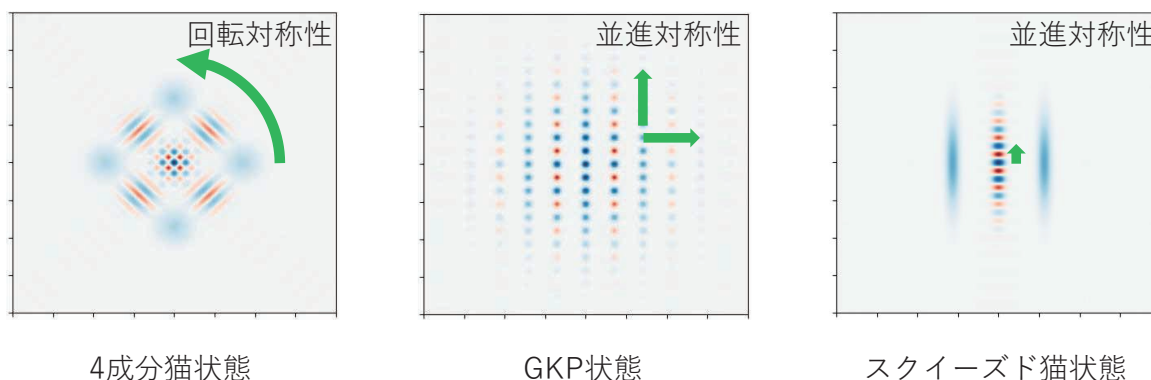


図2 種々のボソニック符号のウィグナー関数と対称性

ます。

一般的な量子誤り訂正では、補助量子ビットを測定してエラーの情報を読み取り、その結果に応じた訂正操作を行います。しかし、測定結果を高速に処理して制御へ戻す仕組みは、装置を複雑にし、訂正に要する時間も増やします。そこで研究されているのが、測定とフィードバックを必要としない「自律的量子誤り訂正」です。その基本的な考え方は、エラーによって符号空間の外へ出た状態を、周囲との相互作用を利用して自然に符号空間へ戻すことです。温かい物体が周囲へ熱を逃がして冷えていくように、不要な励起だけを環境へ捨てる散逸^{*2}を人工的に設計します。

対称性は、この散逸過程を設計する際にも役立ちます。まず、符号状態を変えない対称操作を特定します。これを基に、その符号状態に作用するとゼロになる演算子を導きます。この演算子を散逸として用いれば、符号状態はそのまま保たれる一方、そこから外れた成分は取り除かれます。近年では、環境との連続的な相

相互作用を直接つくる代わりに、ボソニックモードと補助量子ビットとの間の短時間の相互作用と、補助量子ビットの初期化を繰り返すことで、同じ散逸を離散的な量子回路として実現する方法も提案されています。またGKP符号では、この考え方に基づく自律的誤り訂正の理論提案が進んでいます⁽⁴⁾。

私たちは、この考え方を「スクイズド猫符号」に適用しました⁽⁵⁾。猫符号は、位相空間で離れた2つの状態を重ね合わせた符号です。スクイズド猫符号では、それぞれの状態の量子的な揺らぎを一方向に押し縮める「スクイーミング」を加えます。これにより、猫符号が持つ特定のエラーへの強さを保ちながら、光子損失による影響の一部を検出・訂正できる可能性があります。今回、有限のスクイーミングを持つスクイズド猫状態を厳密に特徴付ける、並進対称性に由来する演算子を明らかにしました。この対称性から、符号状態を保ちながら不要な励起を取り除く散逸を導き、対応する自律的誤り訂正回路を構成しました。回路

に必要なのは、ボソニックモードの状態を補助量子ビットの状態に応じて移動させる「条件付き変位操作」と、補助量子ビットの回転・初期化だけです。これらは超伝導量子回路やイオントラップで標準的に利用される操作であり、複数の補助系の間に複雑な非線形相互作用を導入する必要がある従来提案に比べ、ハードウェア負担を抑えられる構成です。一方、光学系で同じ条件付き操作を高精度に実現することは、今後の重要な課題です。

数値シミュレーションでは、光子が失われる光子損失の後にこの回路を繰り返し適用することで、量子情報の忠実度^{*3}が回復し、スクイーミングの度合いが大きいほど忠実度も回復することを確認しました(図3)。また、同じ誤り訂正を計算操作の途中に挟むことで、状態準備、1量子ビットおよび2量子ビットの論理演

*2 散逸：量子系が周囲の環境へエネルギーや情報を放出し、状態が不可逆に変化する過程。

*3 忠実度：実際の量子状態や操作が、目標とする状態や操作にどの程度近いかを表す指標。

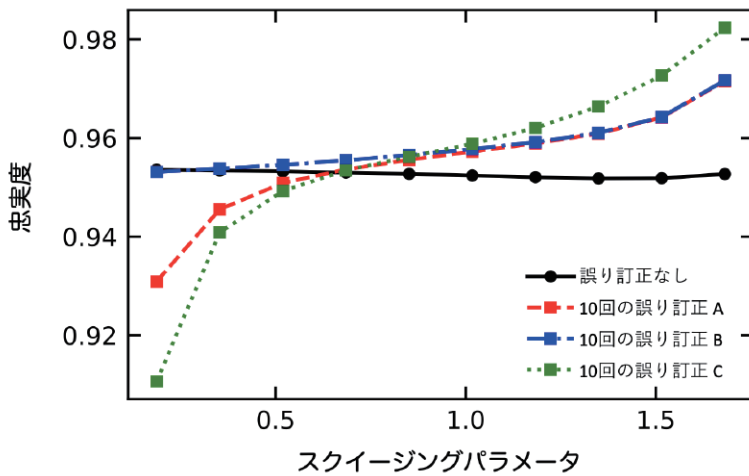


図3 誤り訂正プロトコルの性能評価

算、論理状態の読み出しを組み合わせ、汎用量子計算に必要な一連の操作を構成できることも示しました。特に読み出しについては、有限のスクイーミングによる誤差を考慮した回路を設計し、単純な方法よりも誤差の減少を大きく改善できることを示しました。

さらに、提案した誤り訂正がなぜ機能するのかを明らかにするため、「部分システム分解」と呼ばれる理論的な枠組みを用いました。ボソニックモードは無限のエネルギー準位を持つ大きな空間ですが、この空間を、量子情報そのものを担う「論理自由度」と、符号空間からのずれを表す「ゲージ自由度」に分けてとらえます。この見方を用いると、光子損失は、論理情報に誤りを与えると同時に、ゲージ自由度にも励起を残すことが分かります。私たちの回路は、このゲージ励起を1つ取り除く際に、それと関連した論理誤りも同時に戻します。つまり、ゲージ自由度がエラーの痕跡として働き、そ

れを散逸させることが訂正操作そのものになります。また、この解析から、1回の回路でどの程度の励起を除去できるかを定量化し、物理的なエラーが生じる速さに対して、どの程度の頻度で誤り訂正回路を動作する必要があるかを見積もることができます。

今後の展開

本研究は、ボソニック符号の対称性を、状態の分類だけでなく、誤り訂正回路、論理演算、読み出しを一体的に設計する原理として利用したものです。今後、実験装置における操作誤差や損失を含めた検証を進めることで、少ないハードウェア資源で量子情報を守るボソニック量子計算の実現につながることが期待されます。

参考文献

- (1) A.L. Grimsmo, J. Combes, and B.Q. Baragiola: "Quantum Computing with Rotation-Symmetric Bosonic Codes," Phys. Rev. X, Vol. 10, No. 1, 011058, 2020.

- (2) D. Gottesman, A. Kitaev, and J. Preskill: "Encoding a Qubit in an Oscillator," Phys. Rev. A, Vol. 64, No. 1, 012310, 2001.
- (3) S. Endo, K. Anai, Y. Matsuzaki, Y. Tokunaga, and Y. Suzuki: "Projective Squeezing for Translation-Symmetric Bosonic Codes," arXiv:2403.14218, 2024.
- (4) B. Royer, S. Singh, and S.M. Girvin: "Stabilization of Finite-Energy Gottesman-Kitaev-Preskill States," Phys. Rev. Lett., Vol. 125, No. 26, 260509, 2020.
- (5) T. Shitara, G. Mintzer, Y. Tokunaga, and S. Endo: "Exploiting Translational Symmetry for Quantum Computing with Squeezed Cat Qubits," arXiv:2510.00497, 2025.



(左から) 遠藤 傑 / 設楽 智洋

量子誤り訂正は、量子コンピュータの実用化を左右する中核技術です。ボソニック符号が持つ対称性を活用することで、少ないハードウェア資源で量子情報を守る新しい道を拓きたいと考えています。

◆問い合わせ先

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所
革新的コンピューティングアーキテクチャ
研究プロジェクト
コンピューティングデザイン研究グループ



量子コンピュータを「つなぐ」技術：量子通信がもたらす計算アーキテクチャの変革

量子コンピュータの研究では、量子ビット数やゲート忠実度といった単体性能に注目が集まりがちです。しかし、事業や社会で意味を持つ規模の計算に近づくほど、単一の装置内で量子ビットを増やすだけでは、配線、冷却、制御、製造歩留まりなどの制約が顕在化します。次の競争軸は、「1台を大きくする」だけでなく、「複数の量子プロセッサを量子もつれでつなぎ、全体を1つの計算機として動かす」アーキテクチャへ広がります。この構成を実現するには、量子もつれをつくり、届け、蓄え、使う一連の量子通信技術が不可欠です。本稿では、量子通信を量子コンピュータのスケールアウトを支える基盤技術としてとらえ、モジュール型量子計算機に必要な要素技術を概説します。

キーワード：#量子通信、#量子もつれ、#分散量子計算

とのむら よしひで かわかみ しゅん
外村 喜秀 / 川上 駿
たにぐち あつし さなり やすゆき
谷口 篤 / 佐成 晏之
みうら ももこ
三浦 桃子 / レイエス ラウスティン

NTT未来ねっと研究所

なぜ量子コンピュータを「つなぐ」のか

古典コンピュータの歴史を振り返ると、性能向上は1台の計算機の中だけで起きたわけではありません。計算機がネットワークで相互に接続され、クラウドやデータセンタとして使われるようになったことで、社会を支える大規模な情報基盤が生まれました。量子コンピュータでも、同じような転換が見込まれます。現在は1台当りの量子ビット数やゲート精度の向上が重要な研究課題ですが、将来的により大きな計算を実現するためには、複数の量子プロセッサをどのようにつなぐかが鍵になります。

量子コンピュータを大規模化すると聞くと、1台の装置の中で量子ビットを増やしていく姿を思い浮かべるかもしれません。しかし、1つのチップ、1つの装置、1つの制御

系の中で量子ビットや光モードを無限に増やすことはできません。素子の大きさ、配線、冷却、制御回路、そして製造歩留まりなど、さまざまな要因がどこかで限界に直面します。これは超伝導方式でも、イオントラップ方式でも、光量子方式でも共通する課題です。

そこで有力な選択肢となるのが、小規模な量子プロセッサを複数接続し、全体として1つの大きな計算機のように利用するモジュール型アーキテクチャです。これは分散量子計算とも呼ばれ、大規模な量子コンピュータを実現するための重要な設計方針として注目されています。

古典コンピュータでは、大きな問題を複数の部分問題に分割し、それぞれを別々の計算機で処理することで計算能力を拡張できます。量子コンピュータでも、複数の量子プロセッサを互いに独立した計算機として利用するだけであれば同様に並列化で

きます。しかし、それでは独立した量子計算を同時に実行できるようになるだけであり、1つの量子計算そのものを大規模化したことにはなりません。

量子コンピュータを「つなぐ」ことの要点は、離れた量子プロセッサ間で量子もつれ^{*1}を共有し、それを利用した量子演算を実現することにあります。量子の世界では、情報は個々の量子の状態だけでなく、量子どうしの関係そのものにも宿ります。量子もつれが生成されると、空間的に離れた量子どうしであっても、個々の状態の単なる集まりではなく、全体として分離できない1つの量子状態として記述されます。

この性質を利用することで、複数の量子プロセッサを1つの大きな量

^{*1} 量子もつれ：複数の量子が互いに強く相関し、全体として分離できない1つの量子状態をなす現象。離れた量子どうしでも一体として振る舞います。

子計算機として利用できると期待されています。例えば、3つのプロセッサがそれぞれ n 量子ビットを持っていたとしても、量子もつれが共有されていなければ3台の独立した量子コンピュータにすぎません。ここで、プロセッサ間で量子もつれを共有できれば、プロセッサをまたいだ非局所的な量子状態や量子演算を扱えるようになり、理想的には全体を1つの $3n$ 量子ビット量子コンピュータとして利用できると考えられます⁽¹⁾ (図1)。このとき、計算に利用できる量子状態の自由度は、単一のプロセッサの 2^n から全体で 2^{3n} へと、指数関数的に増大します。実際の性能は、量子もつれ生成の速度、忠実度、メモリ時間、制御の同期などに左右されますが、ここに量子コンピュータを「つなぐ」ことの価値があります。

同じ構図は、古典計算の世界にすでに現れています。AI（人工知能）向けの計算基盤では、性能を左右するのはプロセッサ単体の能力だけで

なく、多数のGPUを結ぶ高速なインターコネクトになっています。計算機の性能が「つなぐ」技術に規定される時代は、量子コンピュータにも訪れると考えられます。

量子通信は何を運ぶのか

では、量子通信とは、具体的に何を運び、何を共有する技術なのでしょうか。古典通信では、0と1で表された情報を信号として送り届けます。電話やインターネットでは、電気信号や光信号が伝送路を通過して相手へ届け、受信側はその信号を読み取ります。途中で信号が弱くなれば増幅器で再生でき、必要であれば複製して複数の場所へ配ることもできます。

一方、量子通信が扱うのは単なる信号ではありません。量子ビットの状態そのものや、離れた量子どうしの間に形成される量子もつれ、すなわち量子どうしの「関係」を扱います。例えば、量子コンピュータを1

つの大きな計算機として動作させるには、離れた量子プロセッサの間でこの量子もつれ資源を共有しなければなりません。量子通信とは、この量子もつれを生成し、届け、蓄え、必要なときに利用できるようにするための一連の技術です。

しかし、量子状態は古典情報のようには扱えません。未知の量子状態は完全にはコピーできないことが知られており、これはクローン禁止定理^{*2}と呼ばれます。また、通信路で失われた量子状態を、途中の中継器で単純に増幅して補うこともできません。光ファイバを伝搬する光子が失われれば、そこに載っていた量子情報も失われます。

そのため量子通信では、量子状態を量子状態のまま受け渡すための仕組みが欠かせません。その代表例が量子テレポーテーションです。量子テレポーテーションでは、あらかじめ

*2 クローン禁止定理：未知の量子状態を完全に複製することはできないという量子力学の基本原則。

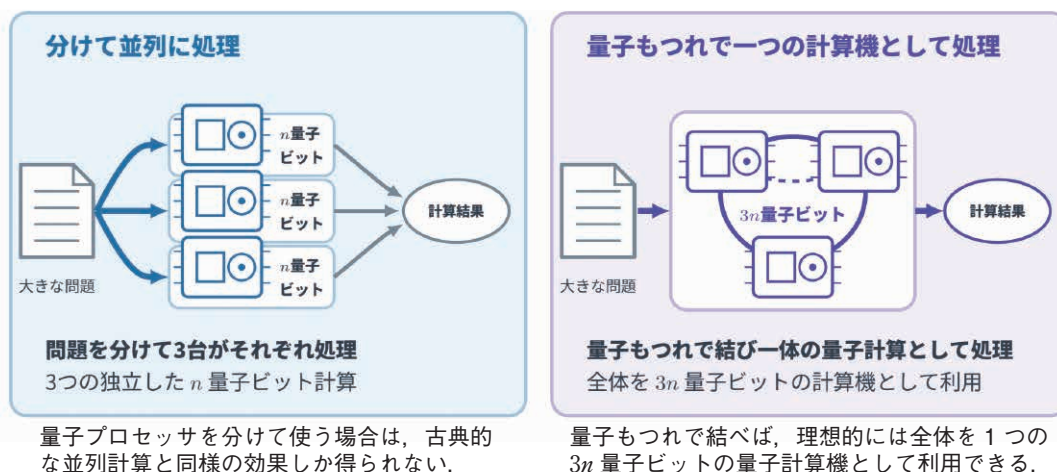


図1 分散量子計算

め共有された量子もつれと古典通信を組み合わせて、量子ビットの担体を物理的に送り届けることなく、未知の量子状態を受け手側の量子系に再現します⁽²⁾ (図2)。ここで、測定結果を伝える古典通信だけでは未知の量子状態を再現することはできず、共有された量子もつれが量子状態の転送を可能にする本質的な通信資源となります。

このとき重要な役割を果たすのが光です。光を量子として見たときの最小単位である光子は、偏光や時間ビン、位相などの自由度に量子情報を載せて伝搬します。さらに周囲との相互作用が比較的小さいため、量子状態を保ったまま運ぶのに適しています。この性質は長距離通信で重要であるだけでなく、短い距離で多数の接続を高速に扱ううえでも大きな意味を持ちます。そのため光子は、量子プロセッサどうしを結ぶ「飛び量子ビット」として有望視されています。

ただし、この「相互作用しにくい」

という長所は、裏を返せば弱点にもなります。光子どうしは互いに素通りするため、量子もつれをつくる、つなぎ替えるといった操作に必要な相互作用を意図的に起こすことは容易ではありません。量子通信の技術的な難しさの多くは、ここに由来します。では、量子もつれを安定して生成・共有するには、どのような技術が必要になるのでしょうか。

量子ネットワークを支える要素技術

モジュール型の量子コンピュータが1つの計算機として働くためには、離れた量子プロセッサの間で量子もつれを安定して共有できなければなりません。これには量子状態を生成し、必要な場所へ届け、必要なときまで保持し、計算や通信に利用するという一連の操作が必要です。

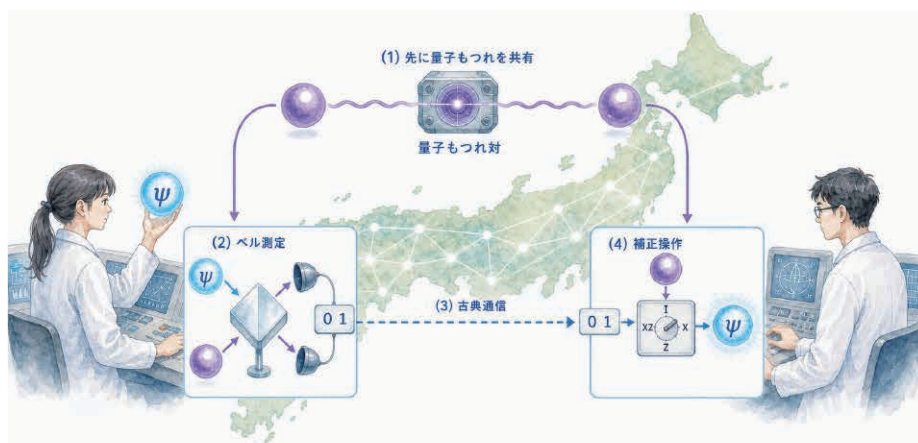
ここで見逃せないのは、これらの処理が直列に一度だけ実行されるわけではないという点です。実際の量

子ネットワークにおいては、あるリンクでは量子もつれの生成に成功し、別のリンクではまだ成功していないという状況が常に生じます。そのため、先に得られた量子もつれ状態を量子メモリに保持しながら、他のリンクで資源生成を繰り返し、必要なタイミングでネットワーク全体の状態へと接続していく必要があります。量子通信とは、このような非同期な量子資源をネットワーク全体で管理し、供給するシステム技術でもあります。

■量子もつれを「つくる」技術

量子通信の基本資源は、二者で共有される量子もつれです。これは、離れた2つの量子ノードの間に、量子力学的な相関をつくる操作に相当します。将来の大規模な分散量子計算では、この二者の共有状態を出発点として、複数のノードをまたぐ量子状態を段階的に組み上げていきます。

ただし、その生成は容易ではありません。単一光子レベルの繊細な操



あらかじめ共有した量子もつれと、ベル測定、および古典通信を用いて、未知の量子状態を受け手側に再現する量子通信の基本操作。

図2 量子テレポーテーション

作を要するため生成は確率的になりやすく、生成レートと忠実度の両立が課題になります。どのような量子もつれ資源を、どの品質と速度で供給できるかが、将来の量子ネットワークや分散量子計算の性能を左右します。

私たちは、二者量子もつれに加えて、より柔軟なネットワーク構成を実現するための多者量子もつれ (GHZ 状態) の生成にも取り組んでいます⁽³⁾ (図 3)。特に三者 GHZ 状態は、3 つの量子ビットを結ぶ基本構造を備えているため、測定型量子計算の土台となるグラフ状態の構成要素として扱いやすく、複数の GHZ 状態を接続することでより複雑なグラフ状態へと発展させることができます。この構造は誤り耐性の向上や処理の安定化にも利用される有用な量子資源です。

■量子もつれを「届ける」技術

量子コンピュータを多数のモジュールで構成する場合、すべてのプロセッサを専用線で結ぶことは現実的ではありません。全対全接続で

は必要な接続数がノード数の二乗に比例して増加するため、必要な量子ノードどうしを必要ときに結び、量子もつれ資源を柔軟に共有できる仕組みが求められます。

古典インターネットでは、交換機やルータが信号を読み取り、複製し、増幅しながら、通信経路を動的に選択して情報を目的地へ届けます。量子ネットワークでは、このいずれもできません。量子状態は途中で観測すると変化し、未知の量子状態は複製も増幅もできないためです。経路の切り替えは量子状態を「見ずに」行う必要があります。途中で失われた光子を補うこともできません。このため、生成・保持・変換・中継のあらゆる段階で量子状態を壊さずに扱う、量子特有のネットワーク技術が求められます。

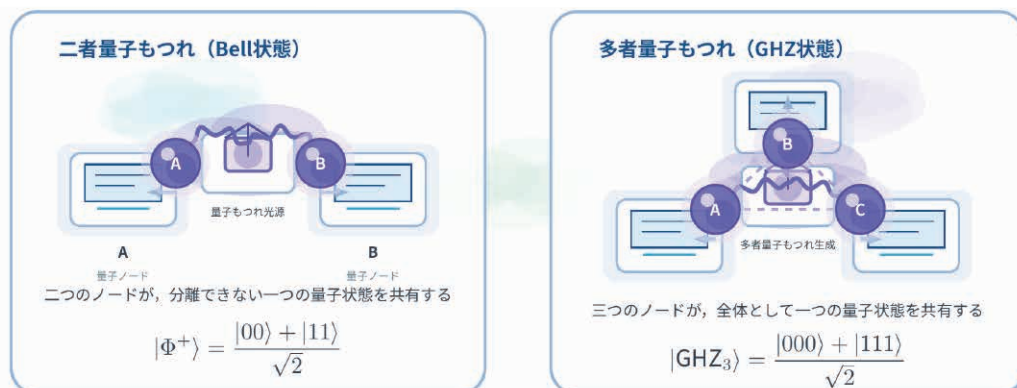
一方で、光スイッチや光ルーティングによって接続先を動的に切り替えられるようになれば、その意味は大きいと考えています。すべてのモジュール間に専用の光学系や配線を用意する必要がなくなり、量子コン

ピュータ全体の装置規模を抑えられます。また、限られた量子もつれ生成資源を、必要なモジュール間に必要なときだけ割り当てることができるようになります。

その第一歩となるのが、近距離ノード間で量子もつれを高速かつ高忠実度に共有する技術です。チップ間、ラック間、データセンタ内で量子もつれを高速に生成・共有できれば、モジュールをまたぐ量子演算を効率良く実行でき、計算機全体の規模拡大につながります。光量子コンピュータはもともと光を利用して計算を行うため、ネットワーク化しやすい方式とみることもできますが、大規模なクラスタ状態を効率よく構築するためには、量子プロセッサ間をどのような構成で接続するかが課題になります。

■量子もつれを「蓄える」技術

量子ネットワークでは、飛び量子ビットである光だけでなく、量子状態を必要な時刻まで保持する量子メモリが不可欠です。通信で用いられる単一光子の量子もつれ生成は確率



二者のベルペアは 2 つのノードを結ぶ最小単位。 GHZ 状態は 3 つ以上のノードを一度に結ぶ多者量子もつれ。

図 3 量子もつれの生成

的に成功する場合が多く、あるリンクで先に得られた量子もつれ状態を保存できなければ、他のリンクの成功を待ってネットワーク全体の状態へつなぐことができません。量子メモリは、非同期に生まれる量子資源を待ち合わせ、計算や中継に使えるタイミングまで保管するための要素技術です。

一方で、光は遠くまで量子状態を運ぶことに優れますが、そのまま長くとどめておくことは得意ではありません。そこで、光の量子状態をスピンや原子集団などの物質量子系へ写し、必要になったときに再び光へ戻す量子インターフェースが要になります。これは単なる変換器ではなく、異なる量子系を1つのネットワークとして扱うための接点です。

私たちは、ダイヤモンド中のNV中心^{*3}スピン集団を用いて量子系を接続する量子インターフェースの研究をしています(図4)。高い忠実度で書き込み・読み出しができ、物質側で十分なコヒーレンス^{*4}(量子状態が保たれる時間)を確保できれば、量子メモリとしてだけでなく、異なる

方式の量子コンピュータを接続する量子トランスデューサとしても機能します。NV中心スピン集団では、局所磁場や歪みによる周波数のばらつきを抑え、集団的な量子状態を保護することが、実用的なネットワーク部品へ近づく鍵になります。

■量子もつれを「使う」技術

量子もつれは、生成して配送しただけでは価値を生みません。この資源に対して適切な処理を施すことで、通信や計算が実現されます。その中心となるのが量子測定です。

古典的な直感では、測定は結果を読み出す操作です。しかし量子情報では、測定は単なる読み出しではなく、量子もつれを変換し、通信や計算を進める処理そのものになります。量子テレポーテーションではベル測定によって量子状態が転送され、測定型量子計算^{*5}では測定を繰り返すことで計算が進みます。

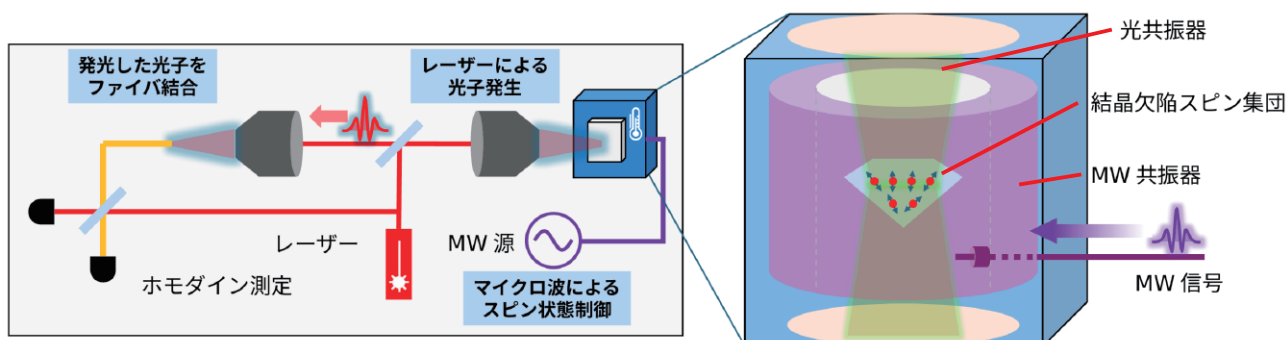
こうした処理を支えるためには、高効率な光子検出器や高精度な時間測定技術が欠かせません。特に、高速に量子もつれを共有するには、光子がいつ到来したかを精密にとらえ、

成功した事象を確実に識別する必要があります。私たちは、常温で高速に動作できるSPAD(単一光子アバランシェフォトダイオード)^{*6}素子による光子検出技術や、ピコ秒精度で毎秒1億回規模の検出に対応する時間測定技術にも取り組んでいます⁽⁴⁾(図5)。

量子通信が変えるコンピュータの姿

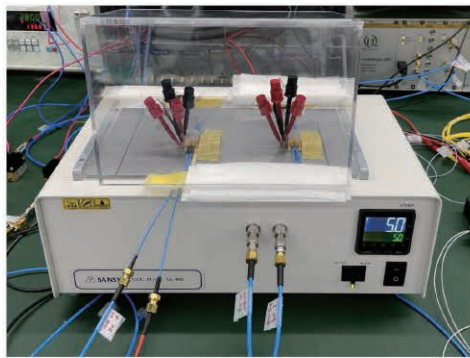
ここまで述べてきたように、量子通信はモジュール型量子コンピュータを1つの計算機として動かすための基盤技術です。とりわけチップ間、ラック間、データセンタ内といった近距離の接続は、量子コンピュータの大規模化に欠かせない技術であり、

- * 3 NV中心：ダイヤモンド中の窒素-空孔中心。スピンを用いて量子状態を保持・操作できる結晶欠陥。
- * 4 コヒーレンス：重ね合わせやもつれといった量子状態が保たれている度合い、またはその保持時間。
- * 5 測定型量子計算：あらかじめ用意したもつれ状態(グラフ状態)に測定を繰り返すことで計算を進める方式。
- * 6 SPAD：単一光子を高感度に検出する半導体素子。



光共振器とマイクロ波(MW)共振器に結晶欠陥スピン集団を結合させ、光の量子状態とスピンの間で量子状態を受け渡す。

図4 量子インターフェースの構成



(a) 常温で高速に動作する SPAD (単一光子アバランシェフォトダイオード) 素子による光子検出器



(b) 高速で高精度な時間間隔測定器 (TIA)

図 5 試作している測定装置

量子コンピュータの実現をめざす限り、その必要性は揺るがないと考えられます。将来の量子コンピュータは、量子もつれという資源をネットワーク全体で生成し、共有し、利用するアーキテクチャへと発展していくでしょう。

一方、都市間のような長距離で量子コンピュータどうしを結ぶことには、まだ確立した答えがありません。ただ、その片鱗は現れ始めています。例えば、量子通信を利用して、計算内容を秘匿したまま遠隔の量子コンピュータに処理を委託する秘匿量子計算^{*7}が提案されています。また、将来は、ネットワーク上で量子情報を交換する新しいかたちの量子AIが生まれる可能性もあります。こうした応用がどこまで育つかを見極めながら、長距離の量子ネットワークは、これから価値を開拓していく段階にあります。

^{*7} 秘匿量子計算：計算内容を秘匿したまま、遠隔の量子コンピュータに処理を委託する方式。

量子もつれをつくり、届け、蓄え、使うという一連の要素技術は、光通信、光ネットワーク、光計測で培われてきた知見と深く結び付いています。量子通信は全く新しい技術分野ではなく、これまでNTTで蓄積されてきた光技術の延長線上にある研究領域です。量子通信は、量子コンピュータの外側に置かれる通信路ではなく、将来の量子コンピュータの構造そのものを支えるアーキテクチャ技術です。その成熟は、計算機の大規模化を支えるだけでなく、将来の量子情報基盤の姿を決定付ける鍵となります。

■参考文献

- (1) C. Monroe, R. Raussendorf, A. Ruthven, K. R. Brown, P. Maunz, L.-M. Duan, and J. Kim: "Large-scale modular quantum-computer architecture with atomic memory and photonic interconnects," *Phys. Rev. A*, Vol. 89, 022317, 2014.
- (2) A. Furusawa, J. L. Sørensen, S. L. Braunstein, C. A. Fuchs, H. J. Kimble, and E. S. Polzik: "Unconditional Quantum Teleportation," *Science*, Vol. 282, No. 5389, pp. 706-709, 1998.
- (3) H.-P. Lo, T. Ikuta, K. Azuma, T. Honjo, W. J. Munro, and H. Takesue:

"Generation of a time-bin Greenberger-Horne-Zeilinger state with an optical switch," *Quantum Sci. Technol.*, Vol. 8, 035005, 2023.

- (4) 三浦・谷口・佐成・外村・高杉: "高速量子通信に向けた高カウントレートで低ジッタな TCSPC システムの実装," 電子情報通信学会 量子情報技術研究会 (QIT), ポスター講演 (50), 2026.5.



(上段左から) レイエス ラウスティン/
三浦 桃子/ 佐成 晏之
(下段左から) 谷口 篤/ 川上 駿/
外村 喜秀

量子コンピュータを「つなぐ」技術は、これから大きく発展していく研究分野です。パソコンの父として有名な Alan Kay は「未来を予測する最善の方法は、自ら発明することだ」と語りました。量子コンピュータのその先にある世界を、一緒に発明しましょう。

◆問い合わせ先

NTT 未来ねっと研究所
フロンティアコミュニケーション研究部

こころと知性を解き明かし、 新たな世界を切り拓く

本特集では、NTTコミュニケーション科学基礎研究所が取り組む

「人を深く理解し極める」人間科学の研究、

および「人の能力に迫り凌駕する」情報科学の研究などについて、

2026年5月20～22日に開催された「オープンハウス2026」の開催報告と併せて紹介する。

「NTTコミュニケーション科学基礎研究所オープンハウス 2026」 開催報告

42

2026年5月20～22日に大阪・京橋のNTT西日本i-CAMPUS内にあるQUINTBRIDGEとPRISMを会場に開催された「オープンハウス2026」の講演・展示の内容と、大学関係者への発信強化を含む開催模様を紹介する。

勝てる人の「脳と身体」を科学する

—— eスポーツの勝敗に関与する脳・生理メカニズムの解明 —— 46

プレッシャー下でも体動が少なく脳波などを高精度に測定できるeスポーツの実験環境に着目した。本稿では、eスポーツ対戦中の生理データから、勝敗にかかわる脳活動や、上級者と中級者の身体状態の違いについて紹介する。

情報科学

人間科学

eスポーツ

iPS細胞

タイミング予測

特集

デジタル・オルガノイドの可能性と未来

——生体組織のデジタル化が実現する未来の医療と健康—— 51

細胞分化や組織形成のメカニズムを内包した生体組織のデジタルモデル「デジタル・オルガノイド」の実現を支える要素技術と、個別化医療や健康予測への可能性について紹介する。

いつどこで何が起きるかを理解し、予測し、制御する

——点過程と機械学習を組み合わせたイベント時系列解析とその応用—— 56

イベントに関するデータを解析し発生タイミングを予測する枠組みは「イベント時系列解析」と呼ばれる。本稿では、機械学習に基づくイベント時系列解析を通じて、イベントの発生モデルの推定と将来予測に関する最新の取り組みについて紹介する。

主役登場 佐野 薫 NTTコミュニケーション科学基礎研究所 ————— 60

計算の反復の先に、数の秩序を探して



「NTTコミュニケーション科学基礎研究所 オープンハウス2026」開催報告

NTTコミュニケーション科学基礎研究所では、最新の研究成果を広く紹介するイベントとして、2026年5月20～22日の3日間、大阪・京橋のNTT西日本i-CAMPUS内にあるQUINTBRIDGEとPRISMを会場に「オープンハウス2026」を開催しました。講演4件（計7回）と研究展示22件を実施し、延べ1526名（前年比約4割増）の方々にご来場いただきました。本稿では、講演・展示の内容と、大学関係者への発信強化を含む開催模様を報告します。

キーワード：#情報科学，#人間科学，#AI

しらき	よしふみ	たわら	なおひろ
白木 善史	/ 俵 直弘		
あおやま	かずお	いろかわ	れいみ
青山 一生	/ 色川 怜未		
しのはら	あさみ	なかの	きみと
篠原 亜佐美	/ 中野 公人		
はやし	さだお	みやうち	みき
林 定雄	/ 宮内 美樹		
やまぎし	しんべい	いしはた	まさかず
山岸 慎平	/ 石畠 正和		

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

オープンハウスの概要

NTTコミュニケーション科学基礎研究所（CS研）は創立以来、人と人、あるいは人とコンピュータの間の「ここまで伝わる」コミュニケーションの実現をめざし、人間と情報の本質に迫る基礎研究に取り組んでいます。その最新成果を「見て、触れて、感じていただく」イベントとして、例年「NTTコミュニケーション科学基礎研究所 オープンハウス」を開催しています。2020年から2022年はオンラインで開催し、2023年にNTT西日本のオープンイノベーション施設「QUINTBRIDGE」（大阪市）で現地展示を再開しました。2024年以降は隣接する「PRISM」も利用し、講演と展示を現地で実施しています。2026年は「こころと知性を解き明かし まじわる世界をつむぎあう」をテーマに、5月20～22日の3日間、QUINTBRIDGEで招待講演1件と研究講演3件（計7

回）、PRISMで研究展示22件を実施しました。また、大学・学生の皆さまに研究職や共同研究をより身近に感じていただくため、学生を主な対象とするセミナーも開催しました。展示と講演は、昨年と同様にスロットごとの事前予約制とし、さらに予約変更・キャンセルに対応したシステムを導入しました。来場者数は延べ1526名となり、前年の1078名から約4割増加しました。講演の聴講者数はセミナーを含めて延べ796名で、1回当たりの平均は約100名でした。

招待講演

招待講演では、慶應義塾大学特任教授、IBMフェロー エメリタ、日本科学未来館館長の浅川智恵子先生に、「AIスーツケースの研究開発と社会実装への挑戦～未来の移動支援を目指して～」と題してご講演いただきました（写真1）。浅川先生は、視覚障がい者の情報アクセスを支援する点字デジタル化システムや音声ブラウザの研究開発を経て、現在は実世界での自由な移動を支えるAI（人工知能）スーツケースの研究開



写真1 招待講演（浅川智恵子先生）

発と社会実装に取り組んでいます。

AIスーツケースは、LiDARやカメラで周囲の障害物や歩行者を認識し、ハンドルを介して利用者を目的地まで案内するナビゲーションロボットです。情報へのアクセスを広げてきた技術を、街歩きや買い物など「移動のアクセシビリティ」へ展開することで、視覚に制約のある人が自ら行き先を選び、社会参加できる未来をめざしています。講演では、研究開発の経緯に加え、利用者との実証を通して見えてきた安全性、操作性、周囲の人との共存といった課題が紹介されました。

社会実装には、ロボットの性能向上だけでなく、交通ルールや法制度、バリアフリー情報の整備、自治体・企業・大学など多様な主体との連携が欠かせません。浅川先生は、AIスーツケースをオープンソースで開発し、実証の場と参加者を広げながら、1人ひとりに届けられる持続可能な移動支援をめざす姿勢を示され

ました。技術が人の可能性を広げるために、研究と社会がどのように協働すべきかを考える機会となり、会場からも多くの質問が寄せられました。

研究講演

研究講演では、CS研の最新成果から、人間の心身、未来の医療、社会で生じるイベントの予測に関する3テーマを取り上げ、各講演を2回ずつ実施しました。来場者アンケートでは、いずれの講演も高い満足度を得るとともに、難易度もおおむね適切と評価されました。研究講演の録画は、オープンハウス2026の特設ウェブサイトで公開されました⁽¹⁾。

① 「勝てる人の『脳と身体』を科学する～eスポーツの勝敗に関与する脳・生理メカニズムの解明～」と題した南宇人（人間情報研究部）の講演では、実戦中にも高精度な生体信号計測が

可能なeスポーツを対象に、勝敗に先行して現れる脳活動や、経験者とエリート選手を分ける生理状態を紹介しました（写真2）。競技力が拮抗する場面での「勝てる状態」をデータからとらえ、メンタル調整や能力発揮の支援につなげる研究です。

② 「デジタル・オルガノイドの可能性と未来～生体組織のデジタル化が実現する未来の医療と健康～」と題した小宮賢士（メディア情報研究部）の講演では、人工組織であるオルガノイドの実測データと情報処理技術を結び付け、細胞分化の構造や細胞間相互作用をデジタルモデルとして推定する研究を紹介しました（写真3）。個人に適した薬剤の選択や人工組織の設計など、新しい医療を支える基盤技術としての可能性を示しました。

③ 「いつどこで何が起きるかを理解し、予測し、制御する～点過程と機械学習を組み合わせたイベント時系列解析とその応用～」と題した金秀明（協創情報研究部）の講演では、故障、来店、疾病など不規則に発生する出来事のタイミングを、点過程と機械学習により解析する方法を紹介しました（写真4）。イベントの発生メカニズムを理解し、



写真2 研究講演（南宇人）



写真3 研究講演（小宮 賢士）



写真4 研究講演（金 秀明）

将来を予測することで、予防保全や効果的な施策の設計につなげる展望を示しました。

研究展示

今年の研究展示では、「データと学習の科学」「メディアの科学」「コミュニケーションと数理の科学」「人間の科学」の4カテゴリにわたり、最新成果22件を紹介しました。研究員がパネルやデモを用いて説明し、来場者との対話を通じて研究の可能性や社会への応用について議論しま

した（写真5）。展示02「組織を形作る細胞の相互作用を推定」と展示12「視覚で質感を伝えます」は報道発表も行い、多くのメディアに取り上げられました。以下に展示タイトルを示します。

■データと学習の科学（7件）

- ・細胞の成長の軌跡をとらえる～細胞分化構造仮説の対話的な創出と検定～
- ・組織を形作る細胞の相互作用を推定～細胞エージェントによる組織形成のデジタルモデリング～

- ・省電力なAIモデルの実現に向けて～デバイス実装に向けた疎性と量子化を統合するモデル圧縮～
- ・大量のベクトルから高速に似たものを見つけます～枝刈りによるベクトル量子化手法ScaNNの高速化～
- ・イベントの発生時刻を速く正確に予測します～点過程と機械学習を組み合わせたイベント時系列解析技術～
- ・その施策，どんな人に効果がある？それはなぜ？～高精度かつ解釈可能な統計的因果効果推定～
- ・確率予測の「ぶれ」を見積もります～確率推論結果の分散値計算～

■メディアの科学（5件）

- ・聴きたい音だけをリアルタイムで抜き出す！～深層学習に基づく任意の音の低遅延選択的聴取～
- ・多様な魅力をもつ声を提供します～音声生成AI研究用アイドル音声データセット～
- ・すみずみまできれいに消毒できましたか？～サーマルカメラを用いた清拭消毒評価手法～
- ・人間とAIがとらえる3D世界～大規模な評価データを用いた奥行き推定バイアスの比較～
- ・視覚で質感を伝えます～柔らか



写真 5 会場の様子

さと粘り気を伝える視覚提示手法～

■コミュニケーションと数理の科学 (5件)

- ・数論的力学系分野の未解決問題を解決！～Morton-Vivaldiの予想の部分的解決～
- ・その検索結果，信頼できる？～ハブに起因するクロスモーダル埋め込みの脆弱性特定～
- ・羨ましさは絵本でどのように描かれているか～感情教育ツールとしての絵本の有効性～
- ・そのおはなし，どうだった？～絵本の感想を話し合える対話AI「ぴたりえチャット」～
- ・分かる共感と伝染する共感を測る～認知的共感と情動的共感の測定用データセットの構築と解析～

■人間の科学 (5件)

- ・脚をぐるぐる回すと何がわかる？～スマートフォンによる下

肢運動の測定と姿勢安定性の評価～

- ・eスポーツが解き明かす勝負の本質～実戦時の生体信号計測による勝敗予測と熟達度の評価～
- ・勝敗を分ける一流選手の心身状態とは？！～競技成績に関与するホルモン状態の個人特性と適切な調整法～
- ・実世界を見る眼や脳からココロを理解する～マインドリーディングの日常環境への展開～
- ・非現実的な仮想世界をも理解する人のしくみ～人の中で「世界観」が成立する過程の検証～

オープンハウスを終えて

2026年のオープンハウスでは、前年から継承した現地開催と事前予約の仕組みを改善しつつ，講演・展示の充実，大学関係者への発信強化，SNSを含む多面的な広報に取り組み

ました。その結果，多くの方にご予約・ご来場いただくことができました。来場者の皆様からは，研究内容を分かりやすく丁寧に説明していることや，研究員と直接議論できることへの好意的な声が寄せられました。CS研の研究員にとっても，多様な分野・立場の皆様と研究の価値や将来像を語り合う貴重な機会となりました。本イベントの開催にご協力くださった皆様に，心より御礼申し上げます。

■参考文献

- (1) <https://www.kecl.ntt.co.jp/openhouse/2026/index.html>



(後列左から) 石畠 正和 / 青山 一生 / 中野 公人 / 宮内 美樹 / 山岸 慎平 / 白木 善史
(前列左から) 林 定雄 / 篠原 亜佐美 / 俵 直弘 / 色川 怜未

人と情報の本質に迫る基礎研究と，研究者との対話から生まれる新たな可能性に，今後ともご注目ください。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
企画担当



勝てる人の「脳と身体」を科学する —— eスポーツの勝敗に関与する脳・生理メカニズムの解明

実力が拮抗するトップレベルの対戦では、勝敗を分ける要因としてメンタルが重視されてきました。近年、脳の効率化が重要なメンタルスキルとされる一方、対人競争下で脳や身体がどう適応するかは未解明です。そこでプレッシャー下でも体動が少なく脳波などを高精度に測定できるeスポーツという実験環境に着目しました。本稿ではeスポーツ対戦中の生理データから、勝敗にかかわる脳活動や、上級者と中級者の身体状態の違いを探ります。

キーワード：#eスポーツ、#脳波、#勝敗予測

みなみ そらと
南 宇人

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

試合の勝敗を分ける「メンタル」と実験フィールドとしてのeスポーツ

実力が拮抗したトップレベルの対戦では競技スキルが飽和しやすく、最後に勝敗を分かち決定的な要因はメンタルであると古くからいわれてきました。しかし、具体的にメンタルが強い人物の脳や身体で何が起きているのかという問いに対しては、科学的知見が十分に示されていませんでした。

近年のスポーツ脳科学では、優れたパフォーマンスを発揮する際の「脳の省エネ化」という現象が注目されています⁽¹⁾。これは不要な処理への脳内リソース配分を減らし、特定の処理を効率化することで高いパフォーマンスを発揮する仕組みです。この知見を発展させれば、スポーツに限らず、プレッシャー下で人が最大限の力を発揮する仕組みを理解でき、将来的には個人の能力拡張やQOL（Quality of Life）の向上につ

ながる可能性があります。しかし、先行研究は厳密に条件を統制したシンプルな実験室課題が中心であり、実際の試合本番で生じるリアルな緊張感を完全に再現することが困難だったため、この脳の効率化システムが実戦環境下でどのように機能しているのかは未解明のままでした。

こうした実験室環境の限界を打破し、実戦環境下の生理状態をリアルタイムに理解するために実際の試合中の計測が試みられてきましたが、そこにはまた別の技術的な壁がありました。大型の機能的磁気共鳴画像法（fMRI）^{*1}は実戦環境に持ち込めず、持ち運びが容易なモバイル脳波計であっても、激しい全身運動に伴うノイズが微細な信号を覆い隠してしまうからです。そのため、従来はノイズの影響を受けにくい視線や心拍、筋電などの指標から脳の内部状態を間接的に推定する手法が主流でした。

しかし私たちは、実戦のプレッシャー下における脳活動そのものを

直接観察したいと考え、eスポーツに着目しました。eスポーツは体格や身体能力が勝敗を左右しにくいいため、高度な戦略的駆け引きや強靱な精神力などのいわゆるメンタルゲームとしての側面が強調されやすいといわれています。最大の利点は、激しい全身運動を伴わず、運動出力が手先の操作に集約されている点にあります。これにより、実際の試合形式における真剣勝負の最中であっても、運動ノイズを最小限に抑えながら高精度な脳波信号を直接計測することが可能となります。

生理計測のしやすさと勝負の緊張感が両立しているeスポーツは、身体運動のノイズに隠れがちだった勝負の本質を可視化するための理想的な実験環境となり得ます。私たちはこの特性を活かし、試合直前の脳状態と勝敗の関係、重要局面における運動出力の最適化、そして対戦相手

^{*1} 機能的磁気共鳴画像法：強い磁場を用いて脳内の血流変化を測定し、活動している脳領域を可視化する手法です。

との生理状態の同調という3つの研究テーマを展開してきました。

試合直前の脳状態と勝敗の関係

先行研究では、例えばバスケットボールのフリースローのように競技のワンプレーの成績と脳波の関連が報告されていましたが、不確定要素が多く長時間行われる実際の試合の勝敗に対して、脳波がどのような予測性を持つのかは謎でした。私たちは、脳波計測に適したeスポーツの格闘ゲーム^{*2}を対象とし、作戦を組み立て、メンタルを整える重要な時間帯である「ラウンドの直前期間」に着目しました⁽²⁾。

2ラウンド先取制の対戦形式でラウンド開始直前の脳波データを解析した結果(図1)、勝てるプレイヤーは試合の局面に応じて異なる脳状態を巧みに使い分けている事実が明らかになりました。具体的には、試合

序盤の第1ラウンド直前において、最終的に勝利を収めるプレイヤーは戦略的意思決定にかかわる左前頭領域のガンマ波^{*3}が有意に増大していました。アンケート調査の結果も踏まえると、事前の戦略の組み立てが主観的にうまくいっているプレイヤーほどガンマ波が顕著に増大しており、試合序盤は脳のリソースを意思決定に費やすことにメリットが大きいと考えられます。

一方、1勝1敗で迎えた最終ラウンド直前では、同領域のアルファ波^{*4}が勝つ方で有意に増大していました。左前頭のアルファ波の増大は不安などのネガティブな感情を抑制する感情制御と関連することが知られており、アンケートでも勝ち試合の終盤では不安のコントロールが成功しやすくなっていました。つまり勝てるプレイヤーは終盤のプレッシャー下で感情をうまく抑制でき、最終ラウンドで普段どおりの力を発揮しやすいのだと考えられます。

さらに私たちは、試合が始まる前の脳波データだけを使ってその後の勝敗を予測できるかという課題に挑戦しました⁽³⁾。1ラウンド先取制の短期決戦形式で、各ラウンド直前の脳波を入力データ、勝敗結果を教師データとして機械学習モデルを構築したところ、もっとも優れたモデルにおいて、ラウンド開始前の脳波から約80%という高い精度で勝敗を予測することに成功しました(図2)。

この予測器は、両者の実力が拮抗した対戦や番狂わせの試合において同程度の精度を発揮しました。過去

^{*2} 格闘ゲーム：プレイヤーどうしがキャラクターを操作して対戦するゲームで、相手の体力ゲージを減らしきることによってラウンドに勝利したことになります。試合は複数のラウンドで構成され、各ラウンドの合間に十秒程度のラウンドインターバルが存在します。

^{*3} ガンマ波：脳波の一種で、一般に30 Hz以上の高周波帯域を指します。高次意思決定、情報統合など、高度な認知機能との関連が示されています。

^{*4} アルファ波：脳波の一種で、一般に8～13 Hz程度の周波数帯域を指します。安静時やリラックス状態で強く現れやすく、注意や感情抑制とも関係します。

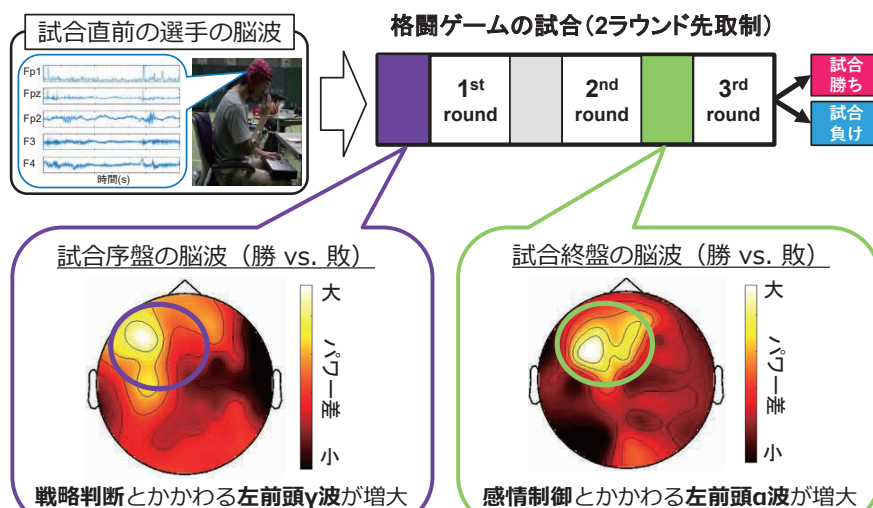


図1 格闘ゲームにおけるラウンド直前の脳活動と試合結果の関連

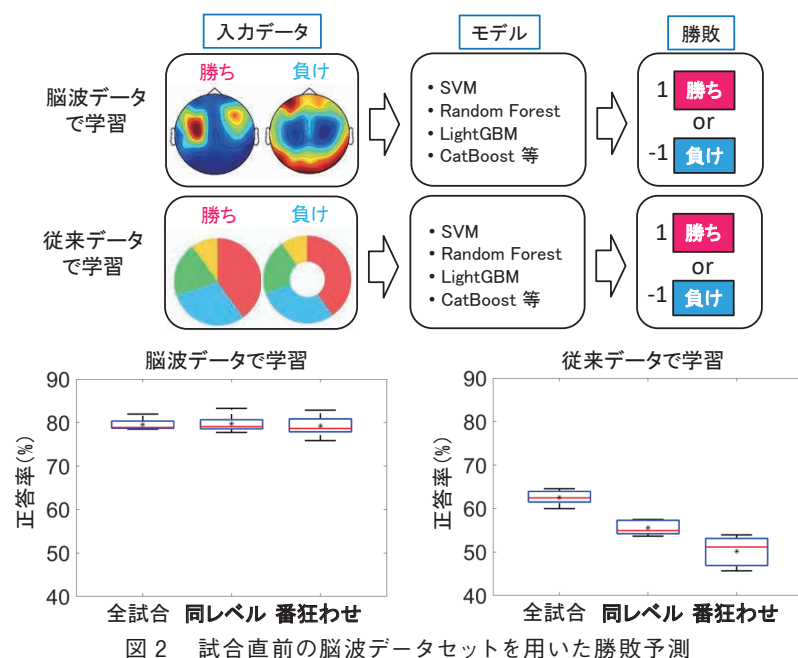


図2 試合直前の脳波データセットを用いた勝敗予測

の戦績やスタッツデータに頼る従来手法では、下馬評が崩れる不確定な試合において予測精度がチャンスレベル（約50%）付近に低下します。しかし、私たちの脳波モデルは高い精度を維持し続けました。これは過去の実績以上に、まさに今から試合に臨む瞬間の脳のコンディションが勝敗を左右しやすいという可能性を示唆しています。

重要局面における上級者の身体制御

従来の運動制御研究では、単調な反復動作や、単純な視覚刺激への反応を扱うものが多くみられました。しかし、対人競技のような実戦場面では、状況が刻々と変化する中で、運動制御の仕方をその場に応じて調整していく必要があります。そのため、従来の実験課題から得られた知

見だけでは、実戦で発揮されるアスリートの身体制御の仕組みを十分に説明することは困難でした。特に、競技の熟達度、得られる情報の制限、強い競争意識といった実戦特有の要因が、運動出力にどのような影響を及ぼすのかについては、まだ十分に整理されていません。

私たちは、この熟達度による身体制御能力の違いとタスク文脈が与える影響を解明するため、eスポーツにおける勝負所（試合終盤）の腕の筋活動に着目しました。具体的には、通常対戦、体力ゲージ非表示、スパーリングという3つの実験条件によって「戦況把握の容易さ」と「勝利への競争意識」に介入し、上級者と中級者で腕の筋活動とコントローラ操作のパフォーマンスを計測し、比較しました⁽⁴⁾（図3）。

通常対戦では、体力ゲージから戦況を容易に把握でき、通常ルールの

ため競争意識も高く維持されます。体力ゲージ非表示では、互いの有利不利を把握しづらく、戦況把握の難易度が上がります。さらにスパーリングでは、体力が減らず有利不利が発生しないうえに決着もつかないため、競争意識を維持しにくくなると想定されます。試合中の筋活動を解析した結果、通常対戦において、勝者はラウンド決着の約8秒前から腕の筋活動強度を徐々に増大させ、コントローラへのコマンド入力速度を物理的に高めていました。対照的に敗者は筋活動が減少しており、心理的な弱気が運動出力の低下として表れている可能性を示唆しました。

熟達度による筋活動の違いは、体力ゲージ非表示条件において顕著に現れました。中級者は、体力ゲージという視覚的な試合情報が失われると勝負所の確証が持たなくなるため、決着直前における筋活動の増大や入力速度の向上といった変化が完全に消失しました。しかし上級者は、体力ゲージが見えない状況下でも通常対戦時と変わらないタイミングで腕の筋活動を増大させ、コマンド入力速度を高めて勝利しやすい状態に遷移していました。なお、勝敗がつかないスパーリング条件では、このような筋活動の増加は熟達度によらず生じませんでした。

これらの結果は、中級者が外的な視覚情報に依存して受動的に運動制御しているのに対し、上級者は膨大な経験則に基づく内的モデルから脳内で未来の展開を高精度に予測し、

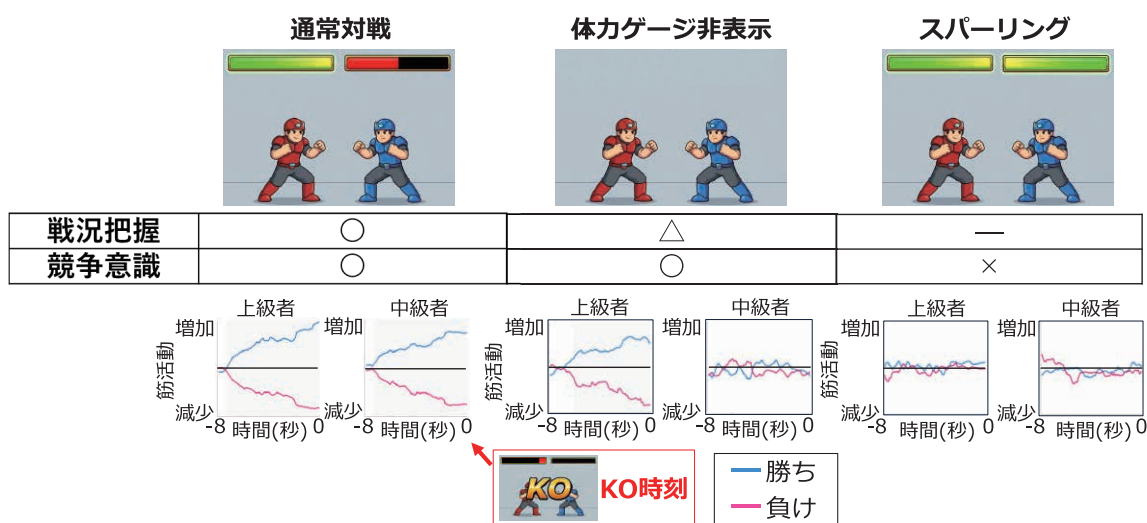


図3 3つの対戦条件と勝負どころの筋活動

勝負所の訪れを事前に察知して、次に必要な運動出力を準備する高度な身体制御能力を備えている可能性を示唆しています。

熟練者どうしの試合に現れる生理的同調

個人の内部で生じる状態変化に加えて、私たちは対戦している二者の間で生じる生理学的な相互作用の解明にも着目しました。これまで、心理的に親密な関係性や共同作業を行う二者の間では、心拍数などの生理状態ダイナミクスが自然と一致する生理的同期現象が生じることが広く知られていました。そのため従来、この現象は他者への共感や前向きな協調関係がある場面においてのみ特異的に発生すると考えられてきました。

しかし近年の私たちのグループによるeスポーツプレイヤーを対象とした研究報告により、対立し合う競

争場面においてさえも、対戦中のプレイヤー間で心拍同期が生じるという結果が明らかにされました⁽⁵⁾。対人競技において対戦相手と見えない生理的なレベルでつながる能力は、プレイヤーのメンタルスキルと深く関連している可能性があります。そこで私たちは、この競争下における心拍同期現象が、具体的にどのような条件下で強力に現れるのかを検証しました⁽⁶⁾。

前述の3つの対戦条件下で試合中の心電図を計測したところ、対戦者間の心拍同期は、通常対戦において二者が共に上級者どうしである場合に限って強力に現れることが判明しました(図4)。さらに上級者どうしであれば、体力ゲージが隠され戦況把握が困難な環境でも心拍同期は高いレベルで維持されましたが、勝敗がつかないスパーリング形式になると一転して大きく低下しました。これは、互いの実力が高く、試合に負けたくないという高い競争意識が

共有されて初めて、2人の心拍リズムが強く同期することを示しています。

このメカニズムの鍵は、両者が対戦において同じ勝負所の重みを、同じタイミングで感じ取っているかという認知の合致にあると考えられます。上級者はゲームシステムや戦術的定石、相手のねらいなどを深く理解し合っているため、緊張が一気に高まるタイミングや一瞬の仕掛けのチャンスに対する認識が一致しやすく、心拍数が同じダイナミクスで急上昇します。つまり、敵対する相手と生理レベルで深く同調できる能力そのものが、長年の修練によって培われた上級者だけが持つ強さの証なのかもしれません。

実戦環境から見える、パフォーマンス研究の新たな可能性

一連の研究成果を統合することで、

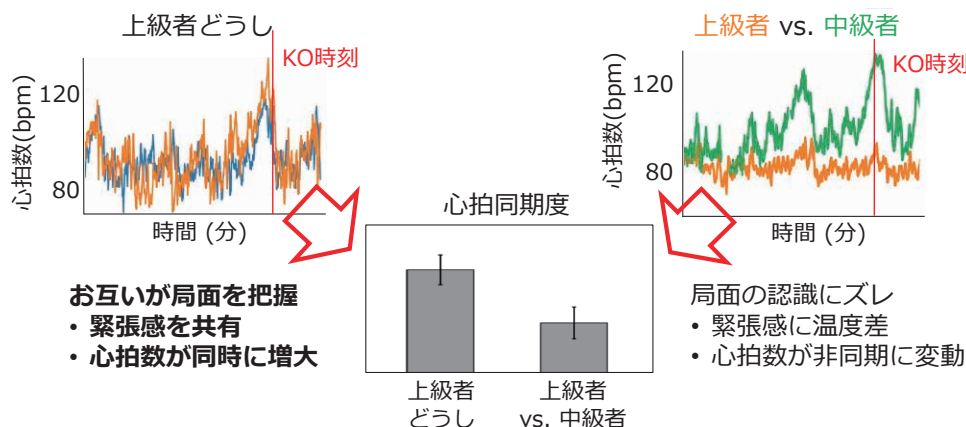


図4 上級者どうしの対戦で強まる心拍同期

伝統的なスポーツの指導現場においてメンタルという言葉で片付けられてきた曖昧な能力の正体が、客観的なデータとして可視化されてきました。私たちは、この知見を応用した具体的なメンタルトレーニング手法として、自身の脳波データをリアルタイムで本人にフィードバックし、勝ちやすい脳状態を自発的に作り出すシステムの開発を進めていく予定です。また、生体指標のモニタリングに基づく、選手の熟達度に応じた最適な科学的コーチングの提供も検討しています。

さらに、この心身制御の知見は現実社会のハイプレッシャーな環境へ応用できる可能性があります。一瞬の判断ミスが生命に直結する外科手術などの医療現場、高所での建設作業、重要なプレゼンテーションなど、強いストレスが発生する社会的タスクにおいて、自らの脳と身体を最適にコントロールし、持てる力を安定して発揮できる環境づくりやデバイス開発への社会実装をめざしていきます。

まとめ

これまで脳科学は統制の取れた実験室内の課題を通して発展してきましたが、現実社会で能力を発揮すべき場面は、強い緊張感や高いモチベーションを伴う社会的タスクの中に意外と多く存在しています。私たちは、実験室と実社会のギャップを埋める理想的な実証フィールドとして、eスポーツに大きな可能性を感じています。今後も研究を推し進め、人間がプレッシャー下で能力を最大化するための心身のメカニズムを明らかにしていきます。

参考文献

- (1) A. C. Neubauer and A. Fink: "Intelligence and neural efficiency," *Neurosci. Biobehav. Rev.*, Vol. 33, pp. 1004-1023, 2009.
- (2) S. Minami, K. Watanabe, N. Saijo, and M. Kashino: "Neural oscillation amplitude in the frontal cortex predicts esports results," *iScience*, Vol. 26, No. 6, 106845, 2023.
- (3) S. Minami, H. Koyama, K. Watanabe, N. Saijo, and M. Kashino: "Prediction of esports competition outcomes using EEG data from expert players," *Comput. Hum. Behav.*, Vol. 160, 108351, 2024.
- (4) S. Minami, K. Watanabe, N. Saijo, and M. Kashino: "Task context and player expertise modulate arm EMG linked to win-loss outcomes in esports," *Comput. Hum. Behav.*, Vol. 175, 108850, 2026.
- (5) K. Watanabe, N. Saijo, S. Minami, and M. Kashino: "The effects of competitive and interactive play on physiological state in professional esports players," *Heliyon*, Vol. 7, No. 4, e06844, 2021.
- (6) K. Watanabe, S. Minami, N. Saijo, and M. Kashino: "Physiological Synchrony in Elite Esports Matches Driven by Competitive Motivation," *Comput. Hum. Behav.*, Vol. 181, 109005, 2026.



南 宇人

競技中の生理指標を高精度に計測できるeスポーツの特性を活かし、実戦環境に適した心身状態を科学的に解明し、人々がプレッシャー下で能力を最大化する心身の仕組みを明らかにしていきます。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
人間情報研究部
身体知研究グループ



デジタル・オルガノイドの可能性と未来——生体組織のデジタル化が実現する未来の医療と健康

私たちの健康状態を予測し、将来生じるリスクに効果的に対処することは、誰もが望むことでしょう。しかし、現在の医療技術では、1人ひとりの健康状態が将来どのように変化するかを高い精度で予測することは容易ではありません。私たちはこの課題に対する新たな試みの1つとして、細胞分化や組織形成のメカニズムを内包した生体組織のデジタルモデル「デジタル・オルガノイド」の研究に取り組んでいます。本稿では、その実現を支える要素技術と、個別化医療や健康予測への可能性について紹介します。

キーワード：#iPS細胞、#オルガノイド、#バイオデジタルツイン

こみや けんじ

小宮 賢士

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

特集

はじめに

健康であるためには、私たちの体を構成する組織が適切に機能していることが必要です。さまざまな疾患の背後には、体の中の組織の状態があります。したがって、その時々々の組織の状態を把握し、その将来的な変化を予測できれば、1人ひとりの健康状態をより正確に予測でき、その変化にも適切に対処できるようになると考えられます。しかし、体内の組織の働きについて、膨大な研究の蓄積があるとはいえ、未知のことも多いのが実情です。例えば、難病と呼ばれるような病態に対して、私たちの体の深部に存在する組織の観察や詳細な解析、薬剤への応答などを個別に調べることは必ずしも簡単ではありません。

私たちはこの課題の解決に向けて、組織の特徴を再現した人工組織（オルガノイド^{*1}）を活用し、その情報を基に人それぞれの組織を計算機上

で再現する「デジタル・オルガノイド^{*2}」の研究に取り組んでいます。これにより、検査や観察だけではとらえることが難しい組織の状態やその変化を理解し、将来的には健康状態や疾患リスクの予測につなげることをめざしています。

本稿では、まずデジタル・オルガノイドの全体像を紹介した後、その実現を支える細胞分化および組織形成の分析・モデリング技術について説明します。さらに、それらを基盤とした組織機能および臓器機能のシミュレーションへの展開について紹介します。

デジタル・オルガノイドとは何か

近年、人それぞれの組織を人工的に作り出す試みとして注目されているのが、オルガノイドです。オルガノイドとは、幹細胞から作製される三次元の細胞組織であり、生体内

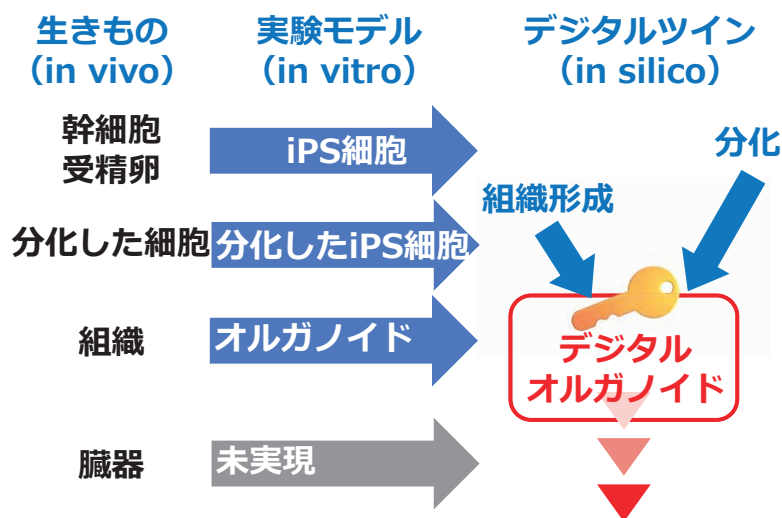
の組織の特徴を部分的に再現したものです。特に2006年に山中伸弥らによって開発されたiPS細胞（人工多能性幹細胞）^{*3}の登場により、血液などの身近な細胞からさまざまな種類の細胞を作製できるようになりました。これによって、さまざまな組織のオルガノイドをつくり出す研究が大きく加速しています。

私たちは、オルガノイドから得られる情報を活用して、人それぞれの組織の状態や機能をデジタル空間上で再現するデジタル・オルガノイドを提唱しています（図1）。デジタル・オルガノイドとは、オルガノイドの機能を計算機上でシミュレートする

*1 オルガノイド：幹細胞から作製される三次元の細胞組織。生体内の組織や臓器の構造や機能の一部を再現します。

*2 デジタル・オルガノイド：オルガノイドの形成過程や構造、機能に関する情報を統合し、デジタル空間上で再現した計算モデル。

*3 iPS細胞：体の細胞に特定の遺伝子を導入することで作製される幹細胞。さまざまな種類の細胞へ分化できる能力を持ちます。



オルガノイドから得られ情報を基にメカニズムから組織の機能をデジタルで再現する。

図1 デジタルオルガノイドと生きもの、実験モデル、デジタルツインの関係

デジタルモデルです。その際、私たちは、組織がどのように形成され、どのような構造を持ち、どのような機能を発揮するのかという仕組みを含めて表現することが重要と考えています。細胞分化や組織形成といった組織を構成する要素を統合的にモデル化することで、組織の振る舞いや機能を包括的に理解・予測できると考えられるからです。

オルガノイドは、生体組織の一部を物理的に再現したものにとらえることができます。オルガノイドのモデルであるデジタル・オルガノイドは、このオルガノイドを現実世界とデジタル空間をつなぐ基盤として活用するものです。オルガノイドを元に物理世界で臓器をつくることは、現実世界の物理的な制約などから今のところ困難ですが、デジタル・オルガノイドでは、組織の理解から臓器機能のシミュレーションへと発展させることで、より大きなスケール

での生体機能の理解や健康予測になげられる可能性もあると考えられます。

細胞分化の理解

細胞が集まって組織は形成されます。どのように組織が形成され機能を発揮するかは、組織の機能を理解するための基本的な情報です。組織の形成過程では、幹細胞が増殖しながらさまざまな種類の細胞へと分化していくことが知られています。この分化という現象は、細胞の中にある遺伝子によって制御されています。遺伝子は核酸という物質の配列から構成されており、その一部が利用されることでタンパク質などの生体分子が合成されます。細胞の種類や状態の違いは、どの遺伝子がどの程度利用されているかによって決まります。

どの遺伝子がどの程度利用された

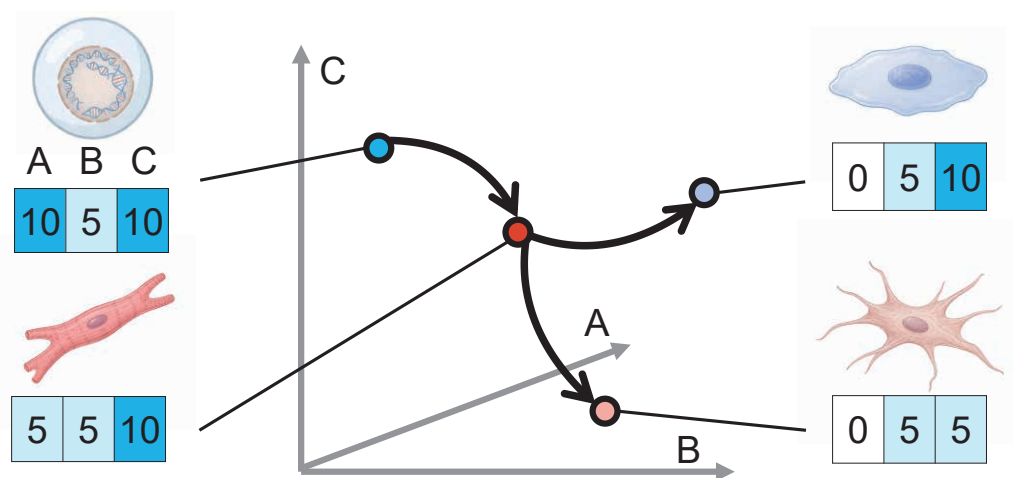
かを表す指標が「遺伝子発現量^{*4}」です。近年では、個々の細胞ごとに遺伝子発現量を計測できる技術が進展し、数万から数十万個の細胞に対して数万種類の遺伝子発現量を取得できるようになりました。このようなデータを解析することで、ある細胞が現在どのような状態にあるのか、さらにどのような経路をたどって別の細胞へ分化していくのかを推定することが可能になります。

こうした分化過程の理解は、生命科学や医療において極めて重要です。例えば、iPS細胞から心筋細胞や神経細胞などの目的の細胞を効率的に作製するためには、細胞がどのような過程を経て分化するのかを理解する必要があります。また、がんやさまざまな疾患では、細胞が本来とは異なる状態へ変化することが知られており、その過程を明らかにすることは病気の原因解明や新しい治療法の開発にもつながります。そのため、細胞の分化構造^{*5}を正確に推定することは、再生医療や創薬の基盤となる重要な課題です。

しかし、この問題は容易ではありません。細胞ごとに数万種類の遺伝子発現量が計測されるため、データは極めて高次元かつ複雑になります。そのため一般には、高次元の遺伝子

^{*4} 遺伝子発現量：細胞内で各遺伝子がどの程度利用され、タンパク質などの生体分子が作られたかを表す指標。

^{*5} 分化構造：幹細胞からさまざまな種類の細胞へ分化する過程を表した構造。木構造やネットワーク構造として表現されることが多々あります。



それぞれの細胞の遺伝子A, B, Cの発現量をここでは三次元でプロットすることにより可視化している。これにより、どの細胞の発現量が近いかを視覚的に判断して、どのような過程で分化するかについて仮説（図中の矢印）を立てることができる。

図2 発現量の可視化を単純化したイメージ

発現データからより扱いやすい低次元（例えば2次元）の表現を生成し、その空間上で細胞どうしの位置関係を解析することで、細胞分化の経路や構造に関する仮説を構築します（図2）。しかし、得られた分化構造は解析手法やパラメータの設定によって変化することもあり、その仮説がどの程度信頼できるのかを客観的に評価することは難しい課題でした。

私たちはこの課題に対し、統計的仮説検定に基づいて信頼性の高い分化構造を発見する技術である「分化チェルノフ限界検定法（CBDT: Chernoff Bound Differentiation Testing）^{*6]}」を開発しました⁽¹⁾。この技術により、データから得られた分化構造仮説の統計的な妥当性を評価することが可能になります。現在は、この技術を活用して、研究者が細胞分化構造の仮説を対話的に創出・編集・検証できるシステムの実

現をめざしています。

組織形成の再現

iPS細胞と分化制御技術の発展により、近年ではさまざまな種類の細胞を人工的に作製できるようになってきました。しかし、生体組織の機能を再現するためには、細胞をつくるだけでは十分ではありません。作製した細胞をどのように配置し、協調的に働かせるかが重要な課題となります。しかし、この課題については未解明な点も多いのが現状です。

生体組織の機能は、多様な種類の細胞が相互に作用しながら協調して働くことで実現されています。近年の研究により、個々の細胞とそれらがつくる構造、例えば空間的な配置が、機能を発揮するうえで極めて重要であることが分かってきました。例えば肝臓では、肝小葉と呼ばれる静脈を中心とした六角柱状の構造が

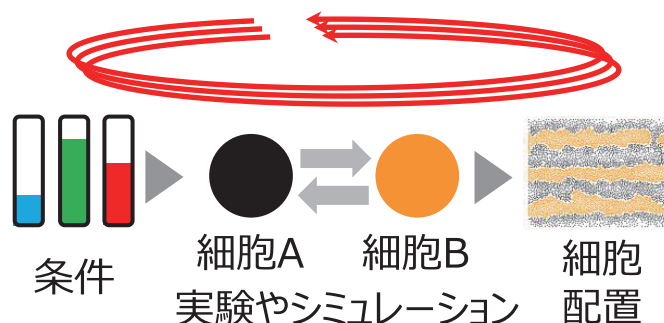
約50万個存在し、その内部では肝細胞をはじめとするさまざまな細胞が規則的に配置されています。この構造が乱れると、肝臓の重要な機能である解毒機能などが低下することが知られています。

このような事実は、生体組織やオルガノイドの機能を実現するためには、細胞の種類だけでなく、その配置も重要な役割を果たすことを示しています。驚くべきことに、生体内ではこのような複雑で大規模な構造が、細胞どうしの相互作用によって自発的に形成されます。近年では遺伝子操作技術の発達により、細胞どうしの接着性などを制御することで、多様な細胞配置を設計できることも分かってきました。

しかし、目的とする細胞配置を実

^{*6} 分化チェルノフ限界検定法：チェルノフ限界と呼ばれる統計理論に基づき、観測された細胞分化構造が偶然によるものではないことを評価する技術。

高コストな試行の膨大な繰り返し による条件探索が必要



条件をさまざまに変え、細胞を使った実験や計算機シミュレーションを繰り返す必要がある。

図3 従来の目標の細胞配置を実現するための繰り返しアプローチのイメージ

現する条件を見つけることは容易ではありません。通常は、細胞どうしの相互作用の条件を変えながら実験やシミュレーションを多数回繰り返し、その結果を比較検討する必要があります(図3)。この試行錯誤には多くの時間とコストを要し、オルガノイド研究を進めるうえで大きな障壁となっています。

私たちはこの課題に対し、観測された細胞配置から、その背後にある細胞間相互作用^{*7}の条件を逆推定する「細胞間作用逆推定法(TI²PS: Topology-Informed Inverse Parameter Surrogate)」を開発しました^{(2),(3)}。この方法では、細胞配置の情報を、データ間のつながりを表現する位相(トポロジー)^{*8}という数学的表現へ変換し、その特徴からシミュレーションモデルのパラメータを直接推定します。これにより、従来は多数の試行錯誤を必要としていた相互作用条件の探索を大幅に効率化することが可能になりました。

本技術は、組織やオルガノイドにおいて観測された細胞配置から、その形成メカニズムを理解するための新たな手段となることが期待されます。

デジタル・オルガノイドと 臓器のシミュレーション

近年、さまざまな組織を対象として、オルガノイドをはじめとする人工組織を作製する研究が大きく進展しています。現時点では、これらの人工組織は機能や構造の面で実際の生体組織を完全に再現できていないわけではありません。しかし、疾患の発症メカニズムの解明や新しい治療法の評価・検証に利用する試みが始まっており、生命科学や医療の発展に向けた重要な基盤技術として期待されています。

その1つとして、iPS細胞由来の人工心筋組織(EHT: Engineered Heart Tissue^{*9})が近年注目を集めています。私たちは、人工組織やそ

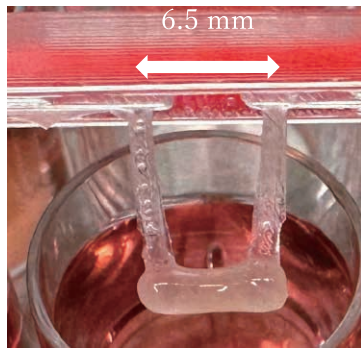
のデジタルモデルに関する世界最先端の研究機関である大阪大学ヒューマン・メタバース疾患研究拠点との共同研究において、EHTの精密計測に取り組んでいます。EHTは柱状の支持構造の間に心筋組織を形成したものであり、電気刺激を与えることで拍動・収縮します(図4)。その運動を高精度な画像計測技術によって観測することで、支持構造の変形量から収縮力を定量的に評価することができます⁽⁴⁾。これまでに、遺伝性心筋症の患者由来iPS細胞から作製したEHTの解析を通じて、疾患の発症メカニズムに関する新たな知見が得られています⁽⁵⁾。

さらに、上記の共同研究では、デ

*7 細胞間相互作用：細胞どうしが接着や反発、シグナル伝達などを通じて互いに影響を及ぼし合う働き。

*8 位相：図形やデータがどのようにつながり合っているかという構造的特徴を扱う数学の分野。

*9 EHT：iPS細胞などから作製される人工心筋組織。拍動や収縮など心筋組織の機能を再現し、疾患研究や創薬研究に利用されます。



電気刺激を与えることで収縮する
※画像提供：大阪大学ヒューマン・メタバース疾患研究拠点
三木健嗣 特任准教授

図4 柱状の梁をつなぐEHT

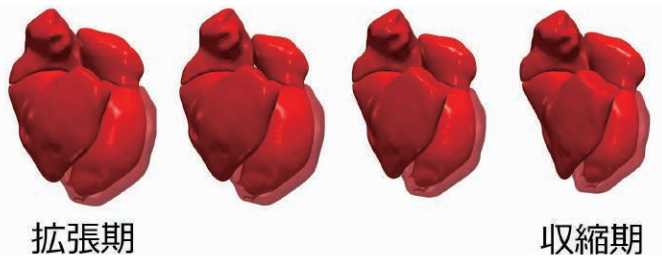


図5 EHTから計測した収縮力波形と医療画像から作成した心臓形状を基に、心臓の運動をシミュレーションした結果

デジタル・オルガノイドを基盤として、臓器レベルの機能をシミュレートする技術の開発にも取り組んでいます。具体的には、EHTの形成過程や構造、収縮特性に関する情報を用いて、実際の心臓がどのように変形し、血液を送り出すのかを予測するモデルの構築を進めています（図5）。これにより、人工組織から得られる知見を実際の臓器機能へと結び付け、人工組織と生体臓器との関係をより深く理解できるようになると期待しています。将来的には、患者自身の細胞から作製したオルガノイドとそのデジタルモデルを組み合わせることで、疾患の進行予測や治療効果予測、さらには1人ひとりに最適化された医療の実現につながることをめざし

ています。

以上のように、私たちは、デジタル・オルガノイドをリアルとデジタルとをつなぐ軸として活用することで、遺伝子、細胞、組織、臓器やその連関など、さまざまなスケールで生体の機能をモデル化しようとしています。これにより、日常の健康のケアや難病の克服にも貢献する「バイオデジタルツイン」の実現をめざします。

参考文献

- (1) M. Nakano, H. Sakuma, R. Nishikimi, K. Komiya, T. Iwata, and K. Kashino: "Hyperbolic PHATE: Visualizing Continuous Hierarchy of Latent Differentiation Structures," Proc. of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), 2025.
- (2) A. K. Jin, K. Komiya, R. Nishikimi, and

K. Kashino: "Topology Informed Surrogate Modeling for Parameter Optimization in Multicellular Models," Proc. of IEEE EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics (BHI), 2025.

- (3) K. Komiya, A. K. Jin, R. Nishikimi, and K. Kashino: "Learning Pairwise Potential via Differentiable Recurrent Dynamics," in NeurIPS Workshop on Machine Learning and Physical Science, 2025.
- (4) M. Tsuchida, M. Hasegawa, K. Miki, S. Miyagawa, and K. Kashino: "Mechanical Performance of Engineered Heart Tissue Can Be Measured with POC-Based Video Analysis," Proc. of The 46th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2024.
- (5) T. Nagashima, K. Miki, M. Tsuchida, J. Whitehouse, I. Takei-Sasozaki, Y. Higashiyama, H. Ishida, K. Kashino, and S. Miyagawa: "Pediatric dilated cardiomyopathy caused by TNNT2-R151W mutation: Modeling and rescue in patient-derived induced pluripotent stem cells and engineered heart tissue," Bioengineering & Translational Medicine, e70108, 2026.



小宮 賢士

近年のiPS細胞やAIの技術の発展が今までにない医療や未来の健康のかたちを今まさに変えようとしています。シミュレーションと機械学習を駆使し、デジタル・オルガノイドを未来の医療の基盤として活用するための技術研究を進めています。

◆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
生体情報処理研究グループ



いつどこで何が起きるかを理解し、予測し、制御する ——点過程と機械学習を組み合わせたイベント時系列解析とその応用

ある出来事（イベント）の発生タイミングを事前に予測することができれば、事前対策によってリスクを軽減、あるいはその機を最大限活用することができます。例えば、機器が故障する前に予防保全を実施する、顧客が来店する直前に割引クーポンを配布し購買を促進するなどが挙げられます。イベントに関するデータを解析し発生タイミングを予測する枠組みは「イベント時系列解析」と呼ばれます。本稿では、機械学習に基づくイベント時系列解析を通じて、イベントの発生モデルの推定と将来予測に関する最新の取り組みを紹介します。

キーワード：#イベント時系列解析、#タイミング予測、#点過程

きん ひであき
金 秀明

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

イベントの予測と その重要性

ある出来事、すなわちイベントが「いつ」発生するかを事前に予測できれば、その発生に先回りして対策を講じることができます。また、リスクを軽減するためだけでなく好機を逃さず活用するためにも重要です。例えば、機器が故障する前に予防保全を実施すれば、突発的な停止や修理費用を抑えることができますし、顧客が来店する直前や購買意欲が高まるタイミングを予測できれば、割引クーポンや推薦情報を適切に提示し購買を促進することができます。

イベントの発生時刻（タイミング）を予測する試みは、古くからさまざまな分野で行われてきました。前述の機器故障だけでなく、電話交換機における着信の到着時刻、保険数理における死亡や事故の発生時刻、地震学における余震の発生時刻の予測などはその代表例です。近年では、

イベント予測の応用範囲はさらに広がっており、製造業ではセンサデータに基づく予知保全、交通分野では事故や渋滞の予測、医療・公衆衛生分野では感染症の流行や患者の急変の早期検知、サイバーセキュリティでは不正アクセスや異常通信の検知、マーケティングではユーザの購買予測、などが重要になっています。このように、イベントの予測は工学、医療、情報通信、マーケティングに共通する基盤技術となりつつあります。

イベントに関するデータを解析し発生タイミングを予測する枠組みは「イベント時系列解析」と呼ばれます。今後、IoT（Internet of Things）機器やスマートフォン、オンラインサービスなどを介してイベントの詳細な発生時刻を伴うデータが大量に収集されるようになり、イベント時系列解析の重要性はますます高まると考えられます。本稿では、機械学習に基づくイベント時系列解析を通じて、

イベントの発生モデルの推定と将来予測に関する最新の取り組みを紹介します。

イベント時系列解析

イベントの発生タイミングを記録したデータはイベント時系列データと呼ばれ、地震、機器故障、消費者の購買、SNS投稿、さらには心拍（心臓の拍動）など多様な現象がこの形式で日々蓄積されています。具体的には、イベント時系列データはイベントの発生時刻とそれに付随する情報のペアを単位とするデータであり、SNS投稿を例に取れば、前者は投稿時刻、後者は投稿者・文面・位置情報などに該当します。当該データはイベントの発生メカニズムを特定し、発生タイミングを精度良く予測するための重要な手掛かりとなります。

イベントの発生タイミングは、時間軸上の点で表現されます。この「点」が確率的に発生する過程を記

述する枠組みが「点過程」であり、機械学習と組み合わせることで、イベント時系列データを解析するための標準的な手法となっています*1。点過程では、単位時間当りの発生確率である「強度関数」に従ってイベントが発生すると考えます。図1に、

*1 本稿では説明を分かりやすくするため、全体を通して時間軸上、すなわち1次元上で発生するイベントを対象としています。しかし、点過程は本来、時間に限らず任意の次元上で発生するイベントを扱うことができます。例えば、時間に加えて緯度・経度の情報を用いれば、「いつ」「どこで」イベントが発生するかを3次元上の問題として予測することも可能です。以降で紹介する技術も、基本的にはイベントデータの次元に依存せず活用できるものです。

点過程から生成されるイベント時系列の例を示します。まず基本的な性質として、強度関数が小さい時間帯ではイベントは低頻度に発生し、強度関数が高い時間帯では高頻度に発生します（図1 (a)）。ただし、イベントは確率的に生成されるため、強度関数が一定であっても、イベントの発生間隔にはばらつきが見られます（図1 (b)）。また、強度関数に履歴依存性、すなわち過去のイベントの影響を組み込むことで、群発的な挙動や規則的な挙動を表現することもできます（図1 (c), (d)）。

以上の例が示すように、イベント

の発生タイミングは強度関数によって確率的に決定されます。逆にいうと、イベント時系列データから強度関数を推定することができれば、その推定結果に基づいて将来のイベント発生時刻を予測できると考えられます。したがって、点過程に基づく強度関数の推定と、それを用いたイベント発生時刻の予測は、イベント時系列解析における主要なタスクとなります。

ここでは、強度関数を推定できたとして、代表的な3種類のイベント予測を紹介します（図2）。第1は、次回イベントが発生する時刻の予測

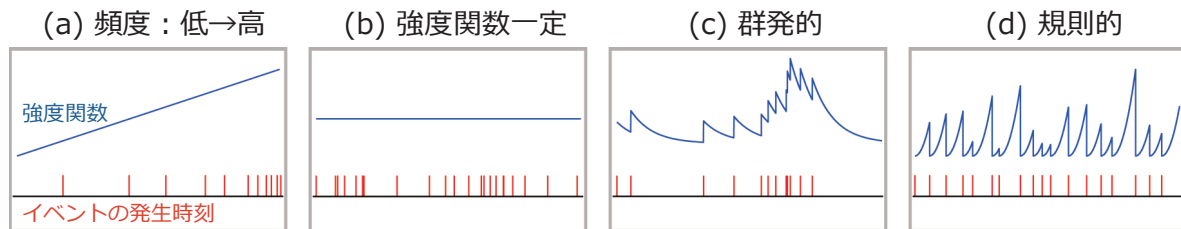
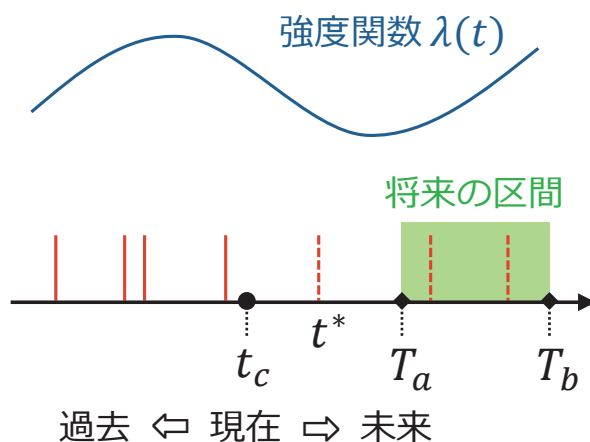


図1 イベントの発生パターンの例



(a) 次回イベントの発生時刻分布

$$p(t^*) = \lambda(t^*) e^{-\int_{t_c}^{t^*} \lambda(s) ds}$$

(b) 将来区間のイベント回数の期待値

$$\Lambda = \int_{T_a}^{T_b} \lambda(s) ds$$

(c) 将来区間のイベント発生リスク

$$p(n \geq 1) = 1 - e^{-\Lambda}$$

図2 代表的なイベント予測

です（図 2 (a)）。発生時刻の予測分布は強度関数を用いて評価されます。例えば、顧客が次に来店するタイミングの予測がこれに該当します。第 2 は、将来のある期間に発生するイベント回数の予測です（図 2 (b)）。イベント回数の期待値はその期間における強度関数の積分値として評価されます。例えば、一定期間内の来店数、故障件数などの予測に対応します。第 3 は、将来のある期間にイベントが 1 回以上発生する確率、すなわちイベント発生リスクの評価です（図 2 (c)）。機器故障を例にとれば、このイベント発生リスクがあらかじめ定めた値、例えば 60% 以上となったタイミングで予防保全を実施することにより、故障を未然に防ぎつつ過剰な保守を避け、費用対効果の高いメンテナンスが実現されます。

強度関数の学習

高精度なイベント予測の実現にもっとも重要なことは、イベント時系列データから強度関数を精度良く推定することです。そこで私たちは、機械学習を用いて強度関数モデルを学習^{*2}する技術の開発に取り組んで

います。機械学習に基づく関数モデルの学習には、関数モデルの構造を定めてモデルパラメータを学習する手法と、データに応じて関数モデルの構造自体を柔軟に学習する手法があります。前者は深層学習^{*3}、後者はカーネル法がその代表例です。私たちは現在、関数の形状に対する事前の仮定に依存しにくいという利点に着目し、カーネル法による強度関数の学習に取り組んでいます。

カーネル法では、データへの適合度を測る指標である損失関数の最小化を通じて関数を学習します。このとき、無限次元の自由度を持つ関数空間における最適化（最小化）問題となるため、直接的には解くことができません。しかし、損失関数が特定の条件を満たす場合、効率的な求解が可能な有限次元の最適化問題に帰着できることが知られています。これは表現定理（representer theorem）と呼ばれ、カーネル法の理論的基盤を成す概念です。ところが、この理論を強度関数の学習にそのまま適用することは困難であることが知られています。点過程の損失関数に強度関数の時間積分項が含まれており、これが従来の表現定理が前提とする条件を満たさないためです。近年、この前提とされていた条件が必ずしも本質的ではないことが指摘され、問題設定を適切に制限することで、点過程においても表現定理が成立する事例が報告されてい

ます⁽¹⁾。しかし、これらの手法はイベント発生 of 外部要因や履歴依存性を考慮できないなど適用範囲が限定的であり、なお多くの課題が残されています。

そこで私たちは、表現定理が成立する点過程モデルの開発に取り組んでいます。ここでは、3 種類の問題設定に応じた最近の成果を紹介します。第 1 に、時間とともに変化する強度関数をデータから学習する問題に対し、損失関数の工夫により、イベント予測の精度を維持しつつ学習の安定性と速度を大幅に改善する手法を構築しました⁽²⁾。本成果により、大規模データの解析やリアルタイムな予測への応用が可能になります。第 2 に、イベント発生 of 外部要因が強度関数に与える影響を学習可能な手法を構築しました^{(3), (4)}。例えば、患者急変イベントに対する入院日数や年齢などが外部要因に該当します。外部要因を考慮して将来の強度関数を評価することで、高精度なタイミング予測が可能となります。この問題設定は生存分析、あるいは生存時間解析と呼ばれ、特に医療分野で重視されています。第 3 に、複数のイベント時系列が互いの強度関数に影響を与え合う状況下で、その影響の強さをデータから高速に学習できる手法を構築しました⁽⁵⁾。この問題設定はホークス過程と呼ばれます。あるイベントの発生が別のイベントの発生を誘発するような連鎖的な現象

* 2 関数モデルの学習：推定対象の関数を表現した数理モデルに対し、データを使ってモデルのパラメータを決定すること。

* 3 深層学習：多数の層で構成されるニューラルネットワークを数理モデルとして採用し、データを使って学習すること。

を解析できるため、SNSにおける情報拡散、金融市場における取引の連鎖、地震の余震活動、ネットワーク障害の波及などの解析に役立ちます。

今後の展望

ITの発展により、企業や社会が収集できる時系列データは飛躍的に増加しました。スマートフォン、ウェアラブルデバイス、オンラインサービスなどから、いつ・どこで・どのような出来事が起きたのかを記録したデータが日々蓄積されています。これらのデータから機械学習によって複雑なパターンを抽出することで、より精緻な予測が可能になってきています。本稿で扱ったイベント時系列解析も、その重要な応用分野の1つです。

本稿では、カーネル法に基づくイベント時系列解析技術の取り組みについて紹介しました。カーネル法は無限次元の関数空間における最適化問題とかかわるため、数理的には扱いが難しい面があります。しかし、その構造を巧みに利用することで、柔軟でありながら効率的な解析手法を構築することができる点が大きな強みです。一方で、近年では深層学習を用いたイベント時系列解析技術も活発に提案されています⁽⁶⁾。深層学習は、文章、画像、センサデータ、行動履歴のような高次元で複雑なデータから、予測に有用な特徴を自

動的に抽出できる点に強みがあります。そのため、複雑な履歴依存性を持つ強度関数をデータから学習する際に、高い予測精度が期待できます。また、カーネル法のように無限次元の最適化問題を直接扱う必要がないため、実装上扱いやすいという利点もあります。ただし、学習には多くのデータ、計算資源、そして計算時間を要することが多く、得られたモデルの判断根拠を解釈しにくいという課題も残されています。

そこで今後は、深層学習とカーネル法の融合が重要な方向性の1つになると考えています。深層学習の高い表現力と、カーネル法が持つ柔軟で効率的な関数学習の性質を組み合わせることで、外部要因やイベント履歴が複雑に絡み合う状況でも、予測精度と計算効率を両立可能な手法が構築できると期待されます。私たちは、点過程と機械学習に関する数理的な深い理解を基盤として、実世界の複雑なイベントを予測し、その結果をリスク低減や機会創出に活用するためのイベント時系列解析技術を発展させていきます。

参考文献

- (1) S. Flaxman, Y. W. Teh, and D. Sejdinovic: "Poisson intensity estimation with reproducing kernels," Proc. of 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS), 2017.
- (2) H. Kim, T. Iwata, and A. Fujino: "K²IE: Kernel method-based kernel intensity estimators for inhomogeneous Poisson processes,"

Proc. of 42nd International Conference on Machine Learning (ICML), 2025.

- (3) H. Kim, T. Asami, and H. Toda: "Fast Bayesian estimation of point process intensity as function of covariates," in Advances on Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2022.
- (4) H. Kim: "Survival permanental processes for survival analysis with time-varying covariates," in Advances on Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2023.
- (5) H. Kim and T. Iwata: "A representer theorem for Hawkes processes via penalized least squares minimization," Proc. of 14th International Conference on Learning Representations (ICLR), 2026.
- (6) S. Zuo, H. Jiang, Z. Li, T. Zhao, and H. Zha: "Transformer Hawkes process," Proc. of 37th International Conference on Machine Learning (ICML), 2020.



金 秀明

「人のなすことにはすべて潮時がある」という有名な一節のとおり、タイミングを知り活用することの重要性は古今東西、広く共有されています。イベント時系列解析は、その実践を支える現代的なツールだと考えています。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
協創情報研究部



主役登場

計算の反復の先に、
数の秩序を探して

佐野 薫 Kaoru Sano

NTT コミュニケーション科学基礎研究所
NTT 基礎数学研究センタ
研究主任

方程式を数値的に解く方法の1つにNewton法があります。近似値から接線を用いて新たな近似値を求め、これを繰り返すことで厳密解へ近づけていく手法です。しかし見方を変えると、Newton法は同じ関数を反復する力学系でもあります。複素数の世界では、収束する解ごとに初期値を色分けすると、境界には非常に入り組んだかたちが現れます。単純な計算規則から、カオス的な振る舞いが生まれるのです。こうした反復のアイデアは最適化や機械学習、さらにはAI（人工知能）や量子計算の中にも現れます。

私が研究している数論的力学系も、このような規則の反復が生み出す現象を調べる分野です。多項式や有理関数への代入を反復したとき、有理数や代数的数はどのような軌道を描くのか。周期的に戻ってくる点はどれくらいあるのか。素朴にみえる問いが、周期点、代数曲線の有理点、ガロア群、高さ関数といった現代の整数論の対象へとつながる所に面白さがあります。

反復を象徴する存在が、Mandelbrot（マンデルブロ）集合です。二次多項式の反復を考えるだけで現れる図形ですが、その境界には無限に複雑な構造があり、拡大しても次々に似たかたちが現れます。このかたちを理解するうえで重要なのが、Mandelbrot集合の境界上にある、放物型パラメータと呼ばれる特別な点たちです。これを調べることは、Mandelbrot集合の部品のつながり方や全体の輪郭を理解することにつながります。さらにMandelbrot集合は、二次多項式だけの特殊な図形ではありません。力学系のさまざまな場面で、よく似た構造が現れます。Newton法のような方程式を解く計算手続きの中にも、その普遍的な姿が顔を出します。計算の収束を考えていたはずが、いつの間にかMandelbrot集合やカオスの問題に出会う。そこに反復の奥深さがあります。カオスは単なる無秩序ではありません。まだ十分に言語化されていない構造が多様に絡まり合っており、その一部だけがみえて

いるのだと思います。放物型パラメータを調べることで、有理数の軌道を調べることで、反復が生み出す代数的構造を調べることは、カオスの理解と、数の世界に潜む未知の秩序を探ることにつながっています。実際に、私の最近の研究では、放物型パラメータの数としての性質を調べることで、Mandelbrot集合に潜む整数論的な秩序の一部を明らかにしました。

NTT R&Dには「知の泉を汲んで研究し実用化により世に恵を具体的に提供しよう」という言葉があります。基礎数学の成果は、すぐに社会に還元できるとは限りません。しかし、純粋な好奇心から生まれた数学が、長い時間を経て通信・暗号・計算を支える言葉になってきました。Newton法のような身近な計算から、Mandelbrot集合の普遍的な姿へ。そして、そこから数論的力学系の未知の世界へ。単純な規則を繰り返したカオスにどのような秩序が現れるのか。その問いに向き合い、未知の数学と技術を支える「知の泉」を少しでも豊かにしていきたいと思っています。



NTT物性科学基礎研究所
上席特別研究員

谷保 芳孝 Yoshitaka Taniyasu

NTT発の次世代グリーン半導体 ——AIN半導体でカーボンニュートラルに貢献

半導体デバイスのさらなる高効率化は、カーボンニュートラルの実現に向けた重要な課題の1つです。その切り札となるのが、NTTが世界に先駆けて半導体化に成功した窒化アルミニウム（AIN）。従来のシリコンや窒化ガリウムを超える特性を持つ「ウルトラワイドバンドギャップ半導体」として、遠紫外LEDやレーザ、パワーデバイス、高周波トランジスタなど、幅広い応用が期待されています。NTT物性科学基礎研究所の谷保芳孝上席特別研究員に、その研究の歩みと将来展望について伺いました。



NTT発のAIN半導体が世界の注目を集める理由

ご研究の分野について教えてください。

私たちの研究グループでは、次世代の革新的な半導体を創出し、実社会への応用を念頭に原理実証まで手掛けています。特に着目しているのが窒化アルミニウム（AIN）という材料です。AINは1862年に初めて合成された古い材料で、長い間、絶縁体だと考えられてきました。熱伝導率が高く、優れた圧電性^{*1}を持つことから、半導体のパッケージやスマートフォンの高周波フィルタなどに活用されています。それを私たちが2002年に世界で初めて半導体として利用することに成功し、半導体デバイス応用への道を拓きました。いわば、AINは「NTT発の半導体」というわけです。

ここ数年、チームのメンバも増え、それぞれが主要学会で招待講演の機会をいただいたり、若手も奨励賞を受賞したりするなど、業界で注目される存在になってきています。

その背景には、私たちの研究が、半導体デバイスの効率を飛躍的に高め、カーボンニュートラルの実現に大きく貢献するだろうという期待があります。

ご承知のように、半導体は現代社会を支える「情報」と「エネルギー」の処理・変換・伝送を担う基盤技術です。PCやスマートフォンに搭載される集積回路は情報処理を担い、発光ダイオード（LED）やレーザは電気エネルギーを光に変換し、太陽電池は光エネルギーを電気に変換します。また、電源や電気自動車などに搭載されるパワー半導体は、交流（AC）を直流（DC）に変える重要な役割を担います。現在、生成AI（人工知能）の普及に伴いデータセンタの膨大な消費電力が課題となっていますが、その省エネにおいても半導体の効率化が鍵を握ります。

そうした中、半導体の「伸びしろ」として期待されているのが、AIN半導体に代表される「ウルトラワイドバンドギャップ半導体」です。バンドギャップとは、物質内で電子が絶対に存在できないエネルギー領域のこと（図1）。半導体はそれぞれ固有のバンドギャップエネルギーを持っていますが、これが大きくなるほど、電気が流れにくくなり、絶縁体に近づきます。また、LEDやレーザ、太陽電池では、

^{*1} 圧電性：力を加えると電圧が発生し、逆に電圧を加えると変形する性質のこと。

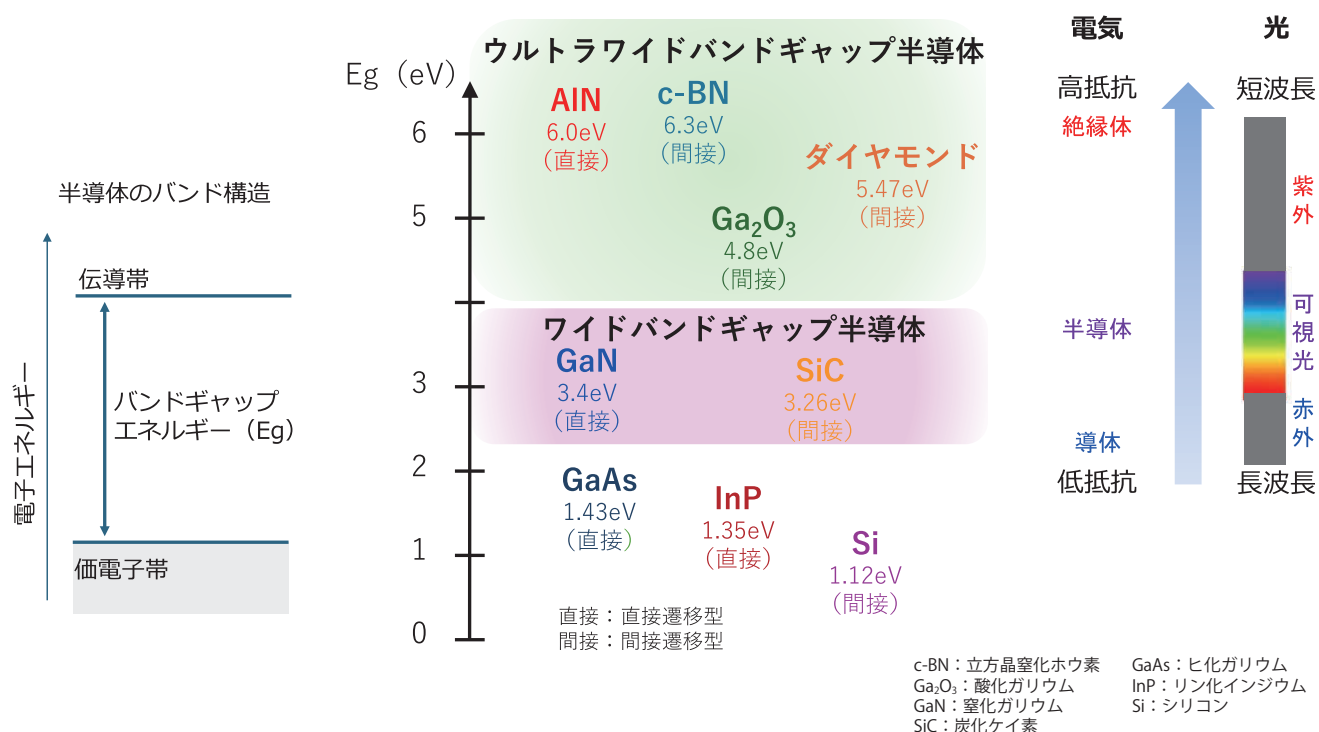


図1 バンドギャップ

バンドギャップエネルギーが大きいほど、発光・吸収する光の波長は短くなります。このように、バンドギャップは半導体の性質を決める基本量となります。

例えば、現在、半導体材料として広く使われているシリコン (Si) のバンドギャップは約1.12 eVであるのに対し、青色LEDを実現した窒化ガリウム (GaN) は約3.4 eVと、約3倍広いバンドギャップを持っています。GaNは、高耐圧・低損失といった特性を持つことから、パワー半導体として急速充電器や5G (第5世代移動通信システム) の通信基地局などで活用されています。

なお、私たちが手掛けるAlNはGaNと同じⅢ-V族化合物半導体^{*2}ですが、さらに倍近い6.0 eVのバンドギャップを持ちます。熱に強く2000℃以上でも分解しないことに加え、放射線にも強いことから、宇宙などの過酷な環境下での活用にも期待が寄せられています。

なぜ、NTTでAlN半導体をつくることができたのでしょうか。

半導体の作製には、原子が規則正しく並んでいる結晶をつくる技術が欠かせません。NTTは世界最高品質の薄膜結晶をつくる技術を有しており、これが重要な役割を担いました。この技術を用いて、私たちは2006年、世界に先駆けてAlNによるLEDの作製に成功し、半導体発光素子としては世界最短波長210 nmの遠紫外発光を観測しました。この成果は『Nature』に掲載されるなど、高く評価されました。このときにAlNのpn接合^{*3}を実現し、動作実証できたことが、AlN半導体デバイス研究の大きな第一歩になりました。

*2 Ⅲ-V族化合物半導体：周期表のⅢ族元素とⅤ族元素を組み合わせることでつくられる半導体。Siよりも高速な通信や高効率な発光が可能のため、無線通信や、LED、レーザーなどに使われています。

*3 pn接合：電子の多いN型半導体と正孔の多いP型半導体をつなぎ合わせた構造で、半導体デバイスの動作の中心となる部分。

しかし最初から「AlNが半導体になる」と確信があったわけではありません。GaNにAl（アルミニウム）を混ぜるとバンドギャップが大きくなることは分かっていたのですが、AlGaNのAlの含有量を増やしてAlNに近づけていくと半導体ではなくなってしまうのです。一方で、GaNのように、原子の抜けや不純物の混ざりが少ない、きれいな結晶をつくることができれば半導体になるかもしれない、という期待もありました。

市販の装置では温度が低すぎたため、メーカーとともに、1500℃という高温での結晶成長に耐える独自のMOCVD（Metal-Organic Chemical Vapor Deposition：有機金属気相成長法）技術を開発して挑みました。これにより、AlNの結晶欠陥と不純物密度を従来の100分の1程度に低減させ、世界最高品質の結晶成長技術を確立しました。今から振り返れば、高品質なAlNの結晶づくりこそがもっとも困難な挑戦であり、そのときの苦勞を語り出せばキリがありません。

世界初の遠紫外LEDから広がる AlN半導体デバイスの可能性

AlN半導体デバイスの開発にも取り組んでおられますね。

GaN半導体ができただけで青色LEDが実現し、LED照明が世の中に広く普及して省エネに大きく貢献したことから、2014年に赤崎勇先生らがノーベル物理学賞を受賞されました。AlN半導体を広めていくためには、GaNと同様に、実際にデバイスを開発して、原理実証することが欠かせないと考えています。

例えば、前述のAlN半導体による遠紫外線LEDは、ウイルスの不活性化や水処理での殺菌や消毒に活用できます。現状は水銀ランプやガスレーザーなどが光源として使われているため、これを置き換えることができれば、無害かつ高信頼・長寿命なデバイスが実現できるでしょう。

さらに最近、私たちはAlN系LED技術を高度化して、単

色性と直進性に優れた半導体レーザーの開発に成功しました（2025年）。これは微細加工や材料分析、細胞の選択的処理などの医療分野での活用が期待されます。残念ながら世界初ではなく、ノーベル賞を受賞された名古屋大学の天野浩教授らの研究グループなどに先を越されてしまい、大変悔しい思いをしました。

もう1つ私たちが注力しているのが、AlN半導体を用いたパワーデバイスの開発です。パワーデバイスはPCやスマホ、家電などの電源や、データセンタ、電気自動車などの電力制御に広く利用されています。ただ、現状はPC電源や充電器が熱を持つように、エネルギーの一部が熱となって失われている状態であり、さらなる高効率化が求められています。また現在、世界の電力需要が増加する中、低炭素社会の実現に向けて太陽光や風力などのクリーンエネルギーの増強が進められていますが、クリーン発電の電力変換、生産地と電力消費地を結ぶ大容量の送配電網といった大電力領域においても、電力損失を極力抑えたパワー半導体が期待されています。

このパワーデバイスにAlNを用いることができれば、省エネに大きく貢献できるでしょう。AlNの絶縁破壊電界^{*4}は半導体としては最大級であることから、素子のサイズを小さくしつつ、素子抵抗を低減できます。理論上の計算では、現状のSiの20分の1、GaNの半分ほどと、電力損失を大きく減らすことが可能になるのです（図2）。

これを検証すべく取り組みを進め、私たちは2022年に世界初となるAlNのトランジスタの動作に成功し、絶縁破壊電圧についても1.7 kVと高い値を実現しました。また、500℃という高温でも安定して動作することを確認し、その後さらに1000℃での動作も確認しました。理論上は1500℃でもデバイス動作が可能です。また、高温下において、半導体トランジスタの性能を示すON/OFF比も世界最高を達成。現状のSi半導体の限界は200℃であることを考えると、AlNは高温エレクトロニクス応用において実

^{*4} 絶縁破壊電界：絶縁性を失って、電流が流れ出し始める限界の電圧。高いほど高電圧動作に適した半導体といえます。

- ・窒化アルミニウム（AlN）は、絶縁破壊電界が半導体で最大級であることから、素子サイズを小さくでき、素子抵抗を低減することが可能。
- ・電力損失は従来のSiの5%未満、SiCの35%、GaNの50%にまで削減可能。

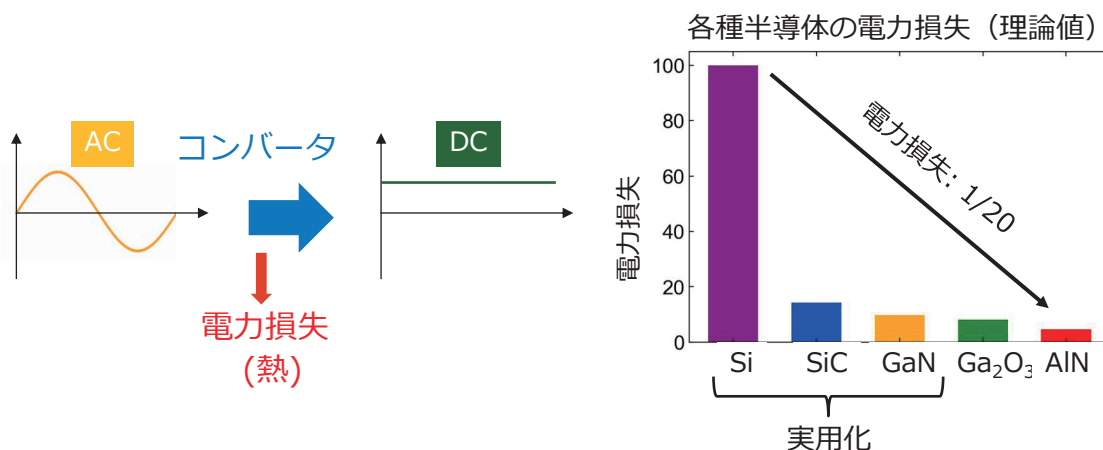


図2 低損失パワー半導体材料

に有望な半導体であることが分かります。

高温エレクトロニクスはどのような応用が考えられますか。

熱に強い電源をつくることができることから、現在問題となっているデータセンタの冷却エネルギー消費を、大きく低減できると考えられます。また、宇宙や地底など、500℃を超えるような過酷な高温環境での探査も可能になるでしょう。さらには、1000℃を超えるような高温プラントや、1500℃を超えるような航空機のジェットエンジンの制御など、応用の範囲は広がります。放射線にも強いことから、原子炉などで使う半導体デバイスとしても有望です。

さらに私たちは無線通信や衛星通信、レーダなどで使われる高周波トランジスタに、AlN半導体を活用すべく高出力化に向け取り組んでいます。現状はGaN半導体が使われていますが、私たちはAlNとGaNとの混晶であるAlGaInに着目して研究を進めています。前述のようにAlNは半導体の中で最大級の絶縁破壊電界を持つことから、高出力高周波デバイス性能指数（Johnson性能指数）はSi

とは桁違い、GaNと比較しても5倍高い性能が期待されます（図3）。

ただしこれまで、AlGaInのAlの割合（組成）が75%を超えると、高周波トランジスタの作製・動作は困難だと考えられてきました。これに対して「分極ドーピング」という従来とは異なる手法を用いることで、高Al組成のAlGaInによる高周波トランジスタの作製・動作に成功しました（2025年）。この成果は、IEDM（IEEE International Electron Devices Meeting）という、電子デバイス分野における世界最高峰の国際会議に採択され、高い評価を得ました。なお、今回紹介した研究については、本誌2026年3月号特集で詳細を掲載していますので、ぜひご覧ください。

「魔の川」を越えて社会実装へ

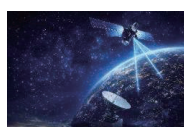
今後の展望と後進へのアドバイスをお願いします。

よく、基礎研究から応用研究、開発を経て、製品化されて市場に普及するまでには、「魔の川」「死の谷」「ダーウィ

- ・ 高周波トランジスタ材料としてGaNの社会実装が進んでいる
- ・ さらなる高出力化には高い絶縁破壊電界を持つAlN系半導体（高Al組成AlGaN）が有望



無線通信



衛星通信



レーダー

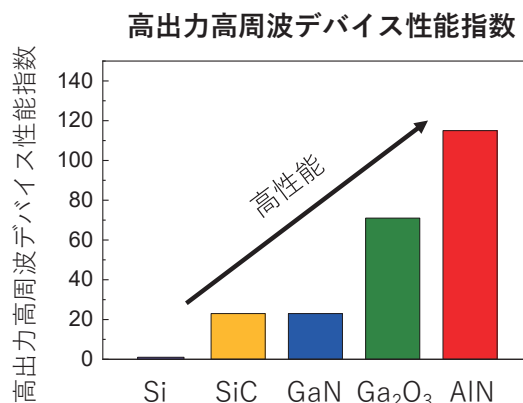


図3 高周波デバイスの高出力化に向けて

ンの海」と呼ばれる、いくつもの困難が待ち受けているといわれます。私たちの現在地は基礎研究ですが、まさにこれから「魔の川」を渡ろうというところです。AlNのポテンシャルをさらに引き出し、これまでの材料を凌駕する性能を達成するためには、デバイス物理、電極形成、酸化膜界面物性といった、基本特性の理解に基づくデバイス応用開発が不可欠です。そしてさらに応用研究、開発へとフェーズを進めていくためには、デバイスウエハの作製技術の確立や回路・システムの試作による検証などを、メーカーとともに取り組まなければなりません。そうしたことから、今後は大学との共同研究やメーカーとの共創にも注力しながら、基礎研究とデバイス開発の両輪で挑んでいきたいと考えています。

日本では今再び半導体産業が注目されており、GaNのような日本発の成果も開花しつつあります。一方で、ウルトラワイドギャップ半導体研究に関しては、米国で大きな予算がつくなど、今後、競争の激化も予想されます。AlNは非常にポテンシャルの高い材料であり、GaNで培った

基盤技術も応用できることから、この強みを活かせるよう、周知にも努めていきたいと思っています。

NTT物性科学基礎研究所は長期的な視点で夢を持って研究に取り組める、非常に恵まれた環境だと思います。しかし、ただ夢を語るだけでは説得力はありません。必ず、どういうアプローチで進めるのかという武器が必要であり、誰にも負けない自分なりの手法を身につけてほしいと思います。私の場合はひたすら手を動かしているうちに会得した強みが多く、特に実験科学においては、地道に量を重ねていくことも大切だと感じています。

それから、私は、昼休みに仲間とサッカーをしています。仕事を忘れて違う分野の人と交流するのは、とてもいい気分転換になり、発想を豊かにしてくれます。そのような時間を持つことをお勧めします。



NTTデータグループ 技術革新統括本部 Innovation技術部
シニアエキスパート

田端 佑介 Yusuke Tabata

フィジカルAIのプラットフォーム化で世界の企業現場を革新

AI（人工知能）がロボットなどの物理的な身体を持ち、実環境を認識・学習して自律的に行動する「フィジカルAI」。人の作業を代替するだけでなく、人がより高度な業務へ集中できるよう支援する技術として、世界中で期待が高まっています。こうした潮流のなか、NTTデータグループ 技術革新統括本部の田端佑氏は「感覚情報の統合」「ロボットの自律行動」「業務システムとの連動」を通貫で束ねるトータルプラットフォーム化に着目し、市場で差別化、あらゆる企業の現場で機能する「知能のかたち」を具現化し、注目されています。本取材では、国内外の有力企業との最新コラボレーション事例や社会実装に向けた今後の展開、さらに、「現場・顧客第一主義」をモットーに技術を社会へ還元し続ける、同氏のエンジニアとしての信念と心構えに迫りました。



フィジカルAIとともに社会課題の現場に向き合う

現在注力されている技術領域について教えてください。

私が現在取り組んでいるのは、いわゆるフィジカルAIと呼ばれる領域です。フィジカルAIはロボットやセンサが取得した現実世界の情報をAIが理解し、人やシステムと連携して行動につなげる技術です。一般的なAIの主流がデジタル空間中で分析や判断をするのに対して、NTTデータではこれを一歩深め、AIをロボットへ導入して現実の環境を理解させ、自律的に判断・行動、そして必要に応じて人へも指示を出すような、実世界の中で具体的に活かせるシステムを開発しています。私が所属している組織は、技術の調査や構想にとどまらず、ビジネスのインキュベーションから実証、お客さまへのサービス提供までを一気通貫で見定めた技術開発に取り組んでいます。そのため、机上で技術进行评估して終わりではなく、現場で使えるかどうかを常に問われる環境にあり、私はそこに大きなやりがいを感じて

います。

私たちの取り組みは、大きく分けると3つです。1つがフィジカルAIそのもので、環境を認識し、状況を判断し、行動につなげる技術で、ロボットやセンサを通じて最適な行動を選択するものです。私たちはこの技術を用い、さまざまなお客さまを通じて、現場の人手不足などの社会課題に取り組んでいます。次にロボット活用です。私たちはロボット本体をつくってはいませんが、既存のロボットに必要な機能を載せ、お客さまのニーズに合わせて仕上げる二次開発を担っています。例えば、従来の固定カメラでは難しかった、広範囲で能動的に監視・巡回し危険を検知する自律的なシステムを開発しています。最後に解析AIです。画像、音、センサデータなどを統合して人間の五感に匹敵するようなレベルで設備や環境の状態を把握し、異常の兆候を読み取ります。

また私たちは、この3つを一体の仕組みとして構築していくことが重要だと考えています。現場では、人手不足、長時間労働、危険作業、熟練者依存といった課題が重なっており、単にロボットが動くだけでお客さまの課題を解決

できるとは限らないからです。

国内企業との連携ソリューションの実例についてお聞かせください。

各企業とのコラボレーションについてお話しさせていただきます。まず三菱ケミカル社との工場自動点検についてです（図1）。化学工場は広大で、点検箇所も多く、しかも24時間体制で人が見回っているケースも少なくありません。一方で、すべての個所が無線化されているわけではなく、人が足を運ばざるを得ない領域も残っています。そこで私たちは、犬型ロボットを用いて、点検ルートを自律的に巡回し、これに搭載された機器・センサで配管やモータなどの状態を画像や音で取得し、異常兆候を検知する基盤システムをつくってしました。固定カメラでは届かない場所へ能動的に見に行けることが、この方式の利点です。

この案件では、NTTグループ各社とも連携し、IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）も踏まえながら、APNやWiGig^{*1}といった先進的な通信技術も含

め検証してきました。例えば、岡山事業所のロボット情報を東京オフィスで受信したり、逆にオフィスから遠隔でロボットへ指示を出して現場の応答を確認する、といった試みも行っています。もちろん、現時点では将来を見据えた実証の段階ではありますが、低遅延かつ大容量の通信を前提に、将来の遠隔監視や遠隔支援のあり方に変革をもたらすべく取り組んでいます。一方で、現実路線も重視しています。すぐに運用できる構成も必要とされ、既存のWi-Fiなどを用いた系も同時に構築し、今使える技術と将来技術の両面をにらみながら進めています。

点検業務では、人間の五感に近いレベルで設備状態を把握することが求められます。目視だけでなく、普段と違う音がしていないか、微細な振動が出ていないか。そうした情報を統合的に観察しなければ、本当の意味で人の代替や補完にはなりません。私たちは画像解析だけでなく、音やその他のセンサデータを扱う解析AIにも力を入れています。これが単なる巡回ロボットとの差別化要素だと思っています。ロボットを移動体として使いながら、その先にある判断の質を上げる。つまり、見に行くことと、理解・分析することの両方を設計しているわけです。

この三菱ケミカル社との取り組みは、私にとって特に印

* 1 WiGig：60 GHz帯などを用いる高速無線通信技術の総称。近距離で大容量通信に適しています。



Background

- 工場が屋外で広く、無線化ができない箇所もある。現状は24時間交代制で作業員が点検している。
- 作業員の五感を使う点検の一部でも、ロボットが代替してくれると有難い。

Solution

巡回ロボットと解析AIにより、屋外の設備の点検作業の自動化を実現

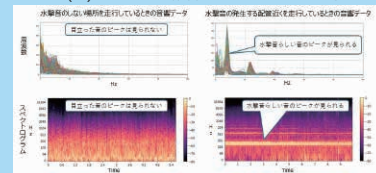
ロボットの自律走行/遠隔操作



- 600m以上の周回ルートをロボットが自律走行。
- ロボットからサーバ側に画像をオンデマンド配信し遠隔地のコントローラーで遠隔操作も可能。（IOWNのAPN回線との接続も検証済。）

AIが設備の正常/異常を判断

(例)ポンプ機周りの配管の異常検知（音響解析）



- 映像や音などマルチモーダルで設備の正常/異常を判断。
- 三菱ケミカル生産技術部との検証を踏まえて十分な精度（配管の0.1mm、60Hzの振動を検知可能）であることを確認。NTTの技術で音の発生源（有無・方向）も推定可能。

Point

NTTグループのIOWN技術（APN, Wigig）や解析AI、各社ロボットとも連携。

図1 三菱ケミカル社とのコラボレーション

象深いものです。技術的には、およそ150 m×150 m規模のエリアを、ロボットが人手を介さず自律的に巡回、情報を収集し解析までできたのは、大きな前進でした。しかし、そこからが本当のスタートでした。実証ではうまくいっても、現場からは「ロボットが動いたこと」より、「作業が本当に楽になるのか」「運用コストに見合うのか」「既存業務に組み込めるのか」といった本質的な問いが返ってきます。私は、この反応こそが大事で自身の糧になっていると感じます。技術が出来上がったから価値になるのではなく、使われて初めて価値になる。そのことをこの案件から何度も学ばせてもらいました。またフィジカルAIも同様であり、ロボットやAIの性能だけではなく、業務全体の変革につながる仕組みとして成立させることが重要だと学びました。

次に三井不動産社とは、ビルの機械室などを対象とした点検保守業務の自動化を進めています。建物内ではスマートメーターや遠隔監視が進む一方で、依然として人が現場へ行かなければならない作業は残ります。そこで、私たちはロボットによる巡回点検に加え、生成AIを用いた業務日誌やレポートの作成支援など業務システムとの連携までを視野に入れることをめざしています。ここで注力しているのはロボット単体の高度化ではありません。現場でのデータ取得から分析、報告、保守計画の立案までを一連の業務プロセスとしてとらえ、フィジカルAIと業務システムを連携させることです。私は、このような現実世界のデータと企業システムをつなぐ「社会実装」の部分こそが、NTTデータの強みであると考えています。

ビル設備管理の分野では、設備ごとに管理システムが分かれており、点検結果も人が確認しながら複数のシステムへ入力しているケースが少なくありません。私たちはロボットを単なる移動体として利用するのではなく、設備データの取得、AIによる分析、生成AIによるレポート生成、業務システムとの連携までを一体として設計しています。人、既存システム、ロボットの作業分担や効率の良い点検の姿を描き、現場で収集した情報を業務プロセスへ直接つなげ

ることで、人とシステムが協調して働く新しい点検保守の形を目指しています。

さらにデンソー社との取り組みでは、コンビニでの作業効率化支援を題材に、人とロボットが協働する運用を検討しています。店舗での飲料補充といった定型作業は一見自動化しやすそうですが、実際は店内の混雑状況、在庫状況、店員の手の空き具合などが絶えず変化します。そのため、私たちは店舗全体をデジタル化し、欠品、混雑、作業優先度を踏まえながら、人がレジへ向かうべきか、ロボットが補充を進めるべきかを判断する「モノ管理システム」を開発し、現在、現場トライアルを実施しているところです。そのように、ロボットと協働して人間の手を空け、効率良く作業することができるようになります。ここでも重要なのは、ロボットアーム単体の制御ではなく、人とロボットの役割分担を全体最適でとらえることです。多能工化や協働というテーマに対し、店舗全体の運用視点からアプローチしていることに独自性があります。

NTTデータグループのグローバルネットワークを活かし、海外企業とも連携されているそうですね。

海外でのソリューションとして、イタリアの電力やガス会社とインフラ点検の自動化に取り組んでいます。Areti社（電力会社）との例ですが、海外では地下トンネルや送変電設備の暑熱や空気的环境に課題があり、人が入る前に安全確認すべき現場があります（図2）。実際このような現場では、作業員が背中にローラー付きの板を背負い、それを転がしながら点検を行っています。こうした場所では、まずロボットが先行して状況を確認し、必要に応じて複数のロボットを使い分けながら点検する仕組みを構想しています。日本では必ずしも海外と同じ条件ではありませんが、危険箇所への先行投入の考え方は有効であると評価されています。

次に、Snam社（ガス会社）との取り組みを紹介します。海外では広大な土地の中を、長距離にわたりパイプライン



図2 イタリアAreti社（電力会社）とのコラボレーション

が敷設されています。日常、保守作業員はこの近傍を歩き目視点検しているのが実情で、大変な労力がかかっています。これに対して、私たちはドローンを高所で高速に飛行させ、作業者が立ち入れないエリアや広い範囲を短時間で撮影し、パイプラインや路面のひび割れの発生、不審物や建設機械の存在について、遠隔地でその状況を確認することが出来ます。

このように、海外ではインフラ設備の設置環境は日本と異なる面も多く、こういったソリューションニーズはむしろ海外に強くあり、NTTデータの自前の海外ネットワークを活かすことで先事例をつくれる領域だと思っています。

改めて、NTTデータならではの「フィジカルAI」のアプローチについて伺えますか。

こうしたフィジカルAIの一連の取り組みを通じて、私たちが明確に意識しているのは、ロボットを導入すること自体を目的にしないということです。ロボット、解析AI、業務システム、人への指示、レポート生成までを含め、初めて現場のDX（デジタルトランスフォーメーション）化が実現します。これらのさまざまな要素をつないで全体を設計し、仕組みをつくる、つまりプラットフォーム化してい

くのが私たちNTTデータの戦略です。また、私たちは現場に持ち込み、課題を洗い出し、改善を重ねることで、お客さまニーズへ徹底的に寄り添います。

フィジカルAIは黎明期にあり、ロボットの安定性も発展途上で、実証段階の色合いの濃い案件も少なくありませんが、この地道なアプローチが功を奏し、最近は少しずつ手ごたえを感じ始めています。先日、私たちの戦略や姿勢が外部からも高く評価され、Gartnerの『Emerging Market Quadrant for Physical AI Services - Established Vendors』で『Market Shapers』の1社として掲載されました。私たちにとってこのレポートは大きな励みになっています。

フィジカルAIの社会実装をさらに進め、同時に最先端の技術も貪欲に取り入れていく

今後の展望について教えてください。

私たちは、従来のITでは取り扱えなかった物理的な自動化を視野に入れ、フィジカルAIを現場で継続的に使われる

仕組みへと引き上げていきます。そのためには、まず価値の定義を明確にする必要があります。ロボットが動いた、AIが判定した、だけではなく、それによって人の負荷がどれだけ下がるのか、危険作業をどこまで減らせるのか、運用のどこが変わるのかを、お客さまの業務言語で示していきたいです。

技術面では、VLA (Vision-Language-Action)^{*2}やワールドモデル^{*3}といった新しい枠組みを積極的に取り入れていきます。生成AIの拡張として、ロボットが見たものを理解し、人の指示を踏まえて行動を計画し、環境変化に応じて動きを修正する流れは、今後さらに重要になります。ただし、現状の技術はまだ不安定で、そのままでは実運用に耐えない場面もあります。だからこそ、デジタルツインやシミュレーションと連携し、実世界の状態をデジタル側で再構成しながら、より安全で安定した行動につなげる補助技術が必要です。私たちは、最先端のモデルを試すだけで満足せず、それを現場で使える水準までもっていくことに力を入れていきます。

またこれまでに触れてきましたが、個々のロボットを賢く動かすだけでなく、複数ロボット、業務システム、人、計測設備、生成AIエージェントなどあらゆるものが連携して動くトータルなオペレーションを実現したいと思います。ロボットを賢くするだけではなく、企業業務そのものを再設計するためにフィジカルAIを使います。点検、報告、保守判断、作業指示までが通貫につながれば、物理空間の自動化は一段上のレベルへ進みます。NTTデータグループとしては、グローバルのイノベーションセンタどうしの連携も大きな強みです（図3）。国内外の現場で得た知見を共有しながら、共通課題で再利用可能な仕組みをつくり、先行的な実用化を進めていきたいと考えています。

ご自身が掲げる技術者のモットーと後進へのメッセージをお聞かせください。

私の研究開発の出発点は、大学時代に取り組んでいた画像認識やセンシングなどデータ処理系の技術にあります。入社後は、今のロボットとは違う、交通システムの領域でモバイルデータ解析などを通じて、人の移動需要や交通需要を推定するテーマに長く携わってきました。一時は医療に近い分野で、遺伝子解析にかかわっていたこともあります。分野としてかなり幅はありますが、自分の中では一本筋が通っています。それは、データをどう読み解き、現実の課題解決にどう結び付けるかという関心です。4、5年ほど前からロボットやフィジカルAIの領域に戻り、現在は、自律走行やシステム統合も含めたかたちで、実世界に出ていく知能をつくることに注力しています。

私は、研究して終わりというかたちではなく、現場で使える技術をつくることをモットーとしています。もちろん新しい技術を追うことは大切ですし、最先端を知らなければ戦えません。ただ、技術はあくまで手段であって、それが誰にどんな価値を届けるのかがより重要だと思っています。そのため、現場に持ち込み、実際に使ってみて、何が足りないのかを見つけ、改善のループを回すことを何より大切にしています。技術的には成功していても、運用に乗らない、費用対効果が合わない、手間が増える、フォローが足りない。そうした理由で使われないケースは珍しくありません。しかし、その「使われない理由」を直視することこそが、研究開発者にとっては辛いですが大きな学びになると思っています。私自身、そこで何度も悔しい思いをしてきましたが、その経験が今の姿勢の土台になっています。

最新の情報収集や最先端技術のキャッチアップについては、自分一人で全部を追うのではなく、仲間と手分けして進めることを意識しています。日々、目まぐるしいスピードで情報や技術が更新されていくため、チームには、画像

*2 VLA：視覚情報と言語指示を基に行動生成まで扱うロボット向けAIの枠組み。

*3 ワールドモデル：環境や物体の状態遷移を内部表現として学習し、将来の変化や行動結果を予測するためのモデル。

NTTデータグループ全体の事業拡大をサポートするためのグローバルなネットワークと先進技術のエコシステムを形成しています。



図3 NTTデータグループが擁する世界各国のイノベーションセンタ

解析に強い人、ロボット駆動に詳しい人、システム開発の経験豊かな人等があり、それぞれが得意分野の知見を持ち寄っています。私は比較的、ビジネスや実装の観点で現場と向き合うことが多いので、お客さまとの対話や展示会、海外イベントなどから学ぶことも多いです。NVIDIA GTCのような場にも足を運びますし、ロボット系の学会や競技会、社外との勉強会やコミュニティにもできるだけかわり、できれば運営側にも立っていきたくて考えています。

さらにNTTデータのイノベーションセンタでは、世界各地にある海外拠点のメンバとの意見交換がとても刺激になります。月1回の勉強会で、論文や事例、顧客の反応まで含め共有したり、各国の中で進んでいる技術を他国でも取り入れていくなど、こうしたNTTデータグループならではの国際的なネットワークは大きな財産になっています(図3)。

後進の方々に伝えたいのは、技術力を磨くことは大前提

として、それ以上に「誰に価値を届けるのか」を考えてほしいということです。論文や特許をめざすこと自体は大切ですが、それだけに閉じず、小さくてもいいのでモノを動かしてみる、現場を見る、ユーザと触れ合う、お客さまと会話する。この経験が、結果的にはもっとも大きな成長につながると感じています。技術をつくることと、使われることの間には大きな溝があります。それを埋めようとする姿勢こそが、実装力であり、研究開発者としての強さになるのではないのでしょうか。私自身もまだ道半ばですが、だからこそ、現場から逃げず、価値につながる技術をつくり続けていきたいと思っています。



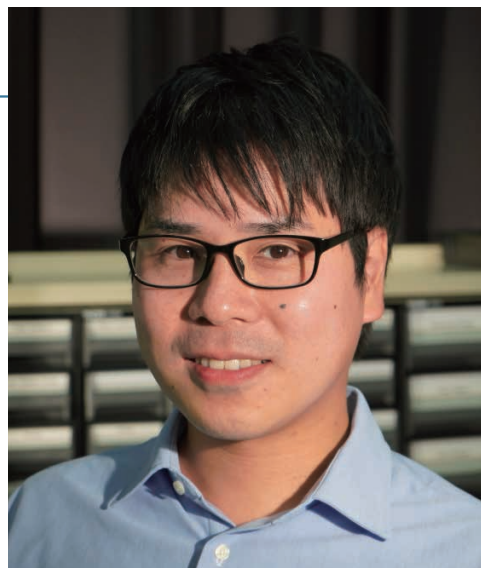
NTT先端集積デバイス研究所
特別研究員

宮田 将司 Masashi Miyata

世界を動かした「光メタサーフェス」、 ゼロから挑んだ平面光学の未来

「メタオプティクス」や「光メタサーフェス」という技術は現在、世界中で活発に研究されている分野です。これらは従来のレンズなどの光学部品を使うことなく、微細な表面構造によって、さまざまな光の特性を自由自在に操作できるという画期的な技術です。今回は、この「メタオプティクス」のトップランナー、宮田将司特別研究員に話を伺いました。

◆PROFILE：2016年大阪大学大学院工学研究科 精密科学・応用物理学専攻 博士課程修了博士（工学）。同年4月日本電信電話株式会社に入社。2023年4月NTT先端集積デバイス研究所、准特別研究員。2025年4月NTT先端集積デバイス研究所、特別研究員。光メタサーフェス・メタマテリアルとその応用に関する研究に従事。2013年応用物理学学会講演奨励賞、2022年光学論文賞、2023年画像電子技術賞などを受賞。



「メタオプティクス」が次世代にもたらす超 小型・超薄型の高機能デバイス

■最初に「メタオプティクス」という技術について教えてください。

「メタオプティクス」というのは、この10年ほどで注目され始めた技術で、一般の方々にはあまり知られていない言葉かもしれません。この技術は、「光メタサーフェス」と呼ばれる髪の毛よりもはるかに小さな微細構造を使い、光の進む方向や波長、偏光などを自由にあやつる新しい平面光学技術です。これまでのレンズや鏡では不可能だった、画期的な機能を実現できます。カメラやディスプレイ、センシング、バイオ計測などへの応用が急速に進んでいて、NTTでもIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想を支えるAPN（All-Photonics Network）向けの光通信デバイスの高機能化・高性能化に向けて、この技術の活用を進めています。

この技術の発端は、2000年代初頭に誕生した「メタマテリアル」です。当時は、映画『ハリー・ポッター』に登場するような透明マントを実現できるかもしれない革新技術として大きな話題となりました。その後、光を対象とした

研究へと発展しましたが、当初のメタマテリアルは「3次元の微細構造の作製が困難である」という課題を抱えていました。これを解決するために登場したのが、より作製が容易な2次元構造の「光メタサーフェス」です。さらに、それまで主流だった金属材料からシリコンなどの誘電体材料へと移行したことで光の損失が大幅に低減されました。その結果、「メタレンズ」をはじめとする高性能な光学素子が次々と実現され、現在ではこれらの技術を総称して「メタオプティクス」と呼んでいます（図1）。

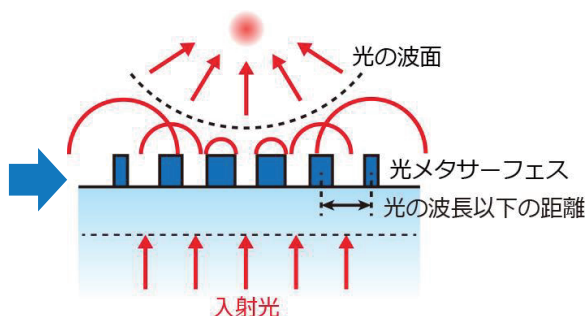
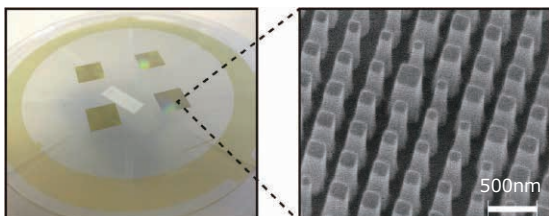
私がNTTに入社した2016年当時、この「光メタサーフェス」という技術は基礎研究のフェーズから徐々に応用研究のフェーズへと移り変わっている時期にありました。上司から「新しい研究テーマへの挑戦」という命題を受けたことを契機に、ゼロからこのテーマを立ち上げることになりました。

■具体的な「メタオプティクス」の成果を教えてください。

私たちが最初に取り組んだのは「光メタサーフェス」を利用した「イメージセンサ」の高感度化です。「光メタサーフェス」はナノメートルスケールの微細構造によって、光

光メタサーフェスの概念図

↓実際の光メタサーフェスの表面の様子



平面の微細構造によって、
光の位相や偏光、波長などを自在に制御可能

半導体の製造方法と
同様の手法で生産可能

大量生産が可能

図1 光メタサーフェスの構造

の位相や偏光、波長などを自在に制御できる技術です。これまででは複数の光学部品が必要だった高度な機能を、1枚の極めて薄い表面構造だけで実現できる点が最大の強みです。また、半導体プロセスとの親和性が高く、小型化や大量生産にも適しています。

その代表的な応用先の1つが、カメラに搭載されているイメージセンサです。従来のイメージセンサは、光の三原色である「RGB」を識別するため、各画素にカラーフィルタを備えています。例えば、「R」のフィルタは「G」と「B」の光を、「G」のフィルタは「R」と「B」の光を、「B」のフィルタは「R」と「G」の光をそれぞれ吸収（カット）することで、色を識別しています。つまり、RGBが混ざり合った白色の自然光のうち、実に3分の2に相当する光を廃棄して色を識別しているわけです。ここに「光メタサーフェス」の技術を導入すれば、これまで捨てられていたRGBすべての光を活用できるようになり、その結果、従来比で約3倍という劇的な感度向上が可能になるわけです（図2）。

私たちは2019年に、光メタサーフェスを用いてイメージセンサの感度を飛躍的に向上できることを世界に先駆けて実証しました。2021年にはさらに性能を向上させた技術を発表し、国際的な学術誌での表紙掲載やプレスリリースな

どを通じて、国内外から大きな注目を集めました。その後、世界中でこのコンセプトに基づく研究開発が加速し、2025年には関連する技術の商用化も始まりました。こうした技術が社会で実際に活用される段階へ進んだことは、研究者としてとても嬉しく、大きなやりがいを感じています。

「光メタサーフェス」技術の応用先は無量大

■この研究の具体的な応用先や展望などを教えてください。

光メタサーフェスは、カメラの小型化・高性能化をはじめ、医療、センシング、光通信など、さまざまな分野への応用が期待されている技術です。極めて薄い光学素子で光を自在に制御できるため、従来は複数の光学部品が必要だった機能を小型・高機能に実現できる可能性があります。そのため、今後もさまざまな分野で新しい応用が広がっていくと考えています。

その中で、私たちの研究グループが現在特に力を入れているのが「多次元イメージング」です。人間の目では直接認識できない波長や偏光などの光の情報を、光メタサーフェスとAI（人工知能）を組み合わせることで取得・解析することで、これまで見ることでできなかった情報を可視化しようという研究です。例えば、これを自動車に搭載すれば、自動運



光メタサーフェス技術で感度が約3倍に!!

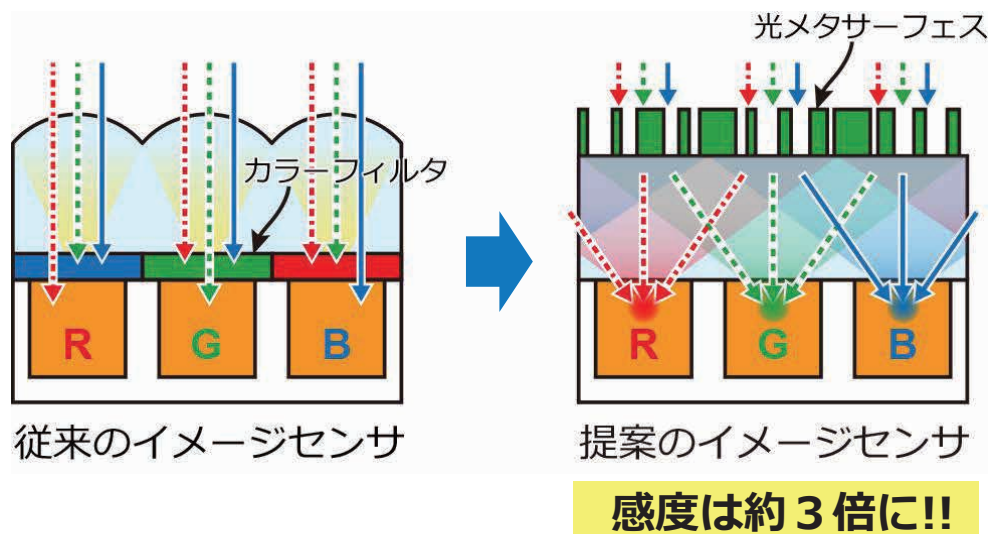


図2 高感度イメージセンサの概念図

転技術において人間の目では取得できない光の情報を新たに利用できるようになります。濃霧といった悪天候下でも前方の状況を正確に把握し、さまざまな物体をより高精度に認識できる可能性があります。また、スマートフォン程度の小型なデバイスでこうした高度なセンシングが実現できれば、自動運転だけでなく、インフラ点検や医療など、社会のさまざまな分野へ飛躍的な展開が期待できます。

このように「光メタサーフェス」は光を“面”で制御するため、画像情報との相性が非常によく、将来的にはカメラやセンサとAIによる情報処理を一体化した新しい画像情報処理技術の実現につながると期待しています。また、NTTが推進するIOWNでは、次世代の光通信システムの実現に向けて、高性能で小型な光通信デバイスが重要になります。私たちは、光メタサーフェスを活用した光通信デバイスの高機能化・高性能化にも取り組んでいます。

「光メタサーフェス」は、単体では光の特性を制御する薄い表面構造であり、その実体は極めてシンプルな光学素子です。しかし、ほかの技術と組み合わせることで、新しい価値を次々と生み出せる可能性を秘めています。その応用範囲はまだ広がり続けており、私自身も新しい応用先を考え続けています。これからも、世界中の研究者とともに、これまでにない「メタオプティクス」の可能性を切り拓い

ていきたいと思っています（図3）。

■所属されているNTT先端集積デバイス研究所について教えてください。

私はNTT先端集積デバイス研究所という神奈川県厚木市にある研究所にいますが、この研究所の特徴は、フォトニクス、エレクトロニクス、マテリアルサイエンス、バイオサイエンスなど、幅広い研究分野をカバーしながら、基礎研究から応用研究まで一貫して取り組める点にあると思います。基礎研究と応用研究との垣根があまりないような印象です。もちろん、NTTですから情報通信技術を中心としていますが、その周辺領域を含めた多様な研究者が集まっています。異なる専門性を持つ研究者どうしが日常的に議論できる環境があります。さらにNTT研究所全体でも、人間科学から、機械学習や宇宙環境といったさらに幅広い研究領域をもカバーしており、これらの各研究所とのシナジーを活用することで、自身のアイデア1つで新しい分野への参入や異分野融合を実践できる環境にあります。

私はこうした環境を活用して前述の「多次元イメージング」の研究も、横須賀市にある研究所の画像処理を専門としている方々と一緒に研究しています。専門が全く違う研究者たちとうまくシナジーをつくって、社内環境だけで研

メタオプティクスで広がるさまざまな可能性

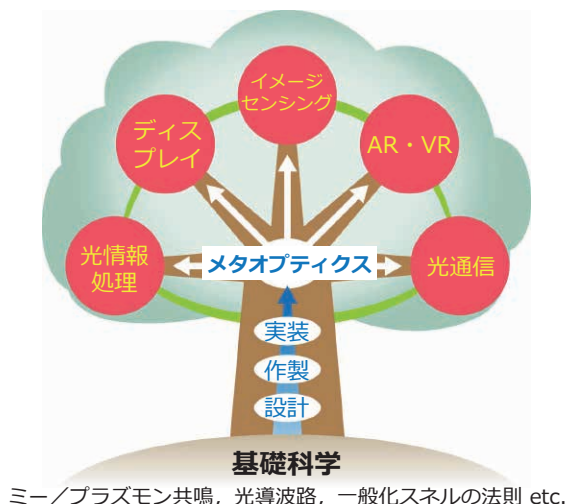


図3 「メタオプティクス」技術の応用先

究できることは非常に大きな利点だと思います。また、短期的な研究ばかりではなく、10年後、20年後といった将来の可能性を見据えた挑戦的な研究にも取り組むことができるという文化も非常に大きな魅力だと思います。

■最後に読者の方々へのメッセージをお願いします。

先ほど私は「メタオプティクス」の研究をゼロから立ち上げたとお話しました。もちろん1人で頑張った部分もあるのですが、今振り返れば1人だけではできなかったらうと感じています。私の研究に限らず、研究というのは1人の力だけで完結するものではありません。私自身も、学生時代の指導教員の先生方、留学先の先生、研究所の上司や同僚、そして共同研究先の方々といったさまざまな出会いによって、多くのことを学び、この研究を発展させることができました。これまでの出会いや経験が、現在の研究者としての私をかたちづくってきたと実感しています。研究者をめざす方々には、そうした一期一会の人との出会いを大事にしてほしいと思います。

そして、「巨人の肩の上に立つ」という言葉があるように、先人たちが積み重ねてきた知見を学ぶことはとても大切です。その一方で、まだ誰も答えを持っていない未知のテーマに挑戦することも、研究者ならではの大きな魅力だと思います。もちろん、最初から世界中の誰も取り組んでいな

いテーマを見つけることは難しいと思っています。まずは、自分の研究室や研究グループの中で、誰も取り組んでいない新しいテーマを自ら立ち上げる経験をすることでも十分だと思います。そうした経験を積み重ねながら、少しずつ視野を広げ、自身の研究機関、日本、そして世界へと挑戦の舞台を広げていけばよいのではないのでしょうか。私自身も、研究者として経験を重ねた今だからこそ、現状に満足することなく、新しいテーマを立ち上げる挑戦を続けていきたいと考えています。

研究者にはさまざまな考え方や研究スタイルがありますが、私は、先人から学ぶことと、自ら新しいテーマを切り拓くことの両方を大切にすることが、新しい研究や価値を生み出す原動力になると考えています。こうした考え方が、誰かの新しい挑戦のきっかけになれば嬉しく思います。



(今回はリモートにてインタビューを実施しました)



株式会社 LIVE BOARD

<https://liveboard.co.jp/>



Figure the Real World ——インプレッションベースのDOOHで広告の新たなスタンダードを切り拓く

街中や駅、電車内、タクシーなど、あらゆる場所でデジタルサイネージ広告を目にする機会が増えています。こうしたデジタルサイネージ広告の国内市場は2025年に1100億円超が見込まれる一方、これまでOOH（屋外・交通広告：Out of Home）は「実際に誰が、どれだけ見たか」を可視化できないという効果測定指標の不在が、業界全体の長年の課題でした。これを、NTTドコモのビッグデータを用いた高度な分析技術で解決し、日本初のインプレッションに基づくDOOH（Digital Out of Home）広告取引を実現したのがLIVE BOARDです。DOOHをTV、デジタルに次ぐ広告プランニングの第3の柱として組み込む「トータルスクリーン・プランニング」を推進する田中淳泰社長に、事業の成り立ちから最新の取り組み、今後の展望まで伺いました。



LIVE BOARD
田中淳泰社長

TV、デジタルに次ぐ「第3の柱」へ——トータルスクリーン・プランニングで広告の未来を描く

■会社の設立経緯と事業の概要について教えてください。

LIVE BOARDは、プログラマティックDOOHの推進を目的として、2019年にNTTドコモと株式会社電通グループの合併会社として設立されました。2024年からは株式会社博報堂も株主として参画しています。当社は日本で初めてインプレッション（広告の視認者数）に基づくDOOH広告取引を実現しました。また、自社の広告配信プラットフォームを通じて、他社が運用・管理するスクリーンも含め、全国6万スクリーン以上（2026年5月現在）への広告配信が可能な体制を整えています。

事業の柱は大きく3つです（図1）。まず、SSP（Supply Side Platform）およびDSP（Demand Side Platform）などの機能を含む広告配信プラットフォーム「LIVE BOARDマーケットプレイス」の運営。次に、自社で運用・管理する「LBオウンドメディア」の開発に加え、屋外・屋

内・駅・電車内・空港・タクシー・バス停などパートナーが運用・管理する「LBパートナーメディア」との連携・接続を通じてネットワークを拡大し、デジタルOOH広告媒体の開拓を行っています。そして、これらLBオウンドメディアとLBパートナーメディアを網羅した、DOOHネットワークセールスを行っています。

■事業を取り巻く社会環境と業界が抱える課題についてお聞かせください。

近年、街中をはじめ、駅、電車内、空港、タクシー、バス停などでデジタルサイネージを活用した広告を目にする機会が増えているかと思います。こうした広告媒体は国内市場規模が2025年に1100億円を超える見込みで、順調な拡大が続いています。

一方、業界全体が長年にわたって抱えてきた課題がTVにおける視聴率のような「効果測定指標の不在」です。ポスターや看板といったOOHでは、「実際にどのような人が、どの程度見たのか」を把握することが難しく、そのため、付近の通行量や駅の乗降客数といった大まかなデータと経験則に基づいて出稿先を判断することが主流で、出稿後の



図1 事業概要

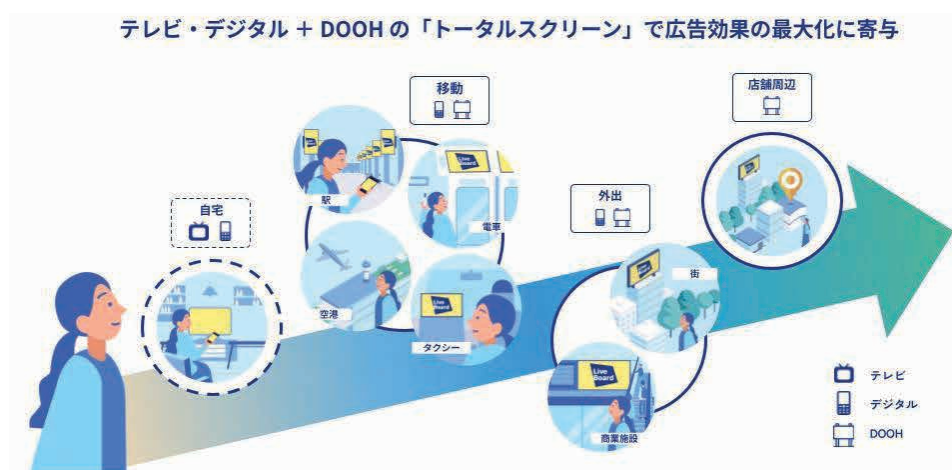


図2 トータルスクリーン・プランニング

効果測定も困難でした。

こうした課題に対し、LIVE BOARDはNTTドコモのビッグデータ等を用いた高度な分析によって解決の道を切り拓いてきました。具体的には、国際的な測定基準（OOHグローバルメジャメントガイドライン）の中でもっとも緻密にインプレッションを測定する指標である「VAC（Visibility Adjusted Contact：延べ広告視認者数）」を採用し、広告を実際に見た人数を可視化することで、インプレッション数に基づく広告取引を実現しています。加えて、性別・年代・趣味嗜好などのデータに基づき、ターゲット含有率の高いビジョンや時間帯などを指定した精度の高い広告配信も可能としています。また、2025年9月には業界横断の指標とデータ基盤の整備を目的に「一般社団法人日本OOHメジャメント協会」が設立され、LIVE BOARD

はこの設立時から参画しています。

■もっとも注力されている取り組みについて教えてください。

現在、私たちがもっとも力を入れているのが「トータルスクリーン・プランニング」の推進です（図2）。これは、広告出稿においてTV、デジタルだけでなく、DOOHにも出稿することで、広告効果を最大化するという取り組みです。LIVE BOARDは、DOOHが広告キャンペーン立案の初期段階からメディア配分されることが常態化する世界をめざしています。インターネット動画広告が急成長する一方、DOOHのシェアは動画（テレビ・デジタル・DOOH）市場全体のわずか4%にとどまっています。しかし、TVやスマホを「家の中や手元」で見る時間だけでなく、人々が「外を移動している」時間も重要な顧客接点です。これまでのTVとデジタルが主だった広告戦略にDOOHを第3

の柱として組み込むことで、生活者のあらゆる行動シーンを網羅し、広告効果を大きく高めることができるため、今この手法が注目されています。

具体的な取り組みとして推進しているのが「Campaign Accelerator」です。これは、TVやデジタルの広告に第3の柱としてDOOHをスムーズに組み込めるようにするための「統合プランニング環境（共通の広告計画システムやツール）」を整備・構築する取り組みです。これまでバラバラに管理されていた各メディアのデータをつなぎ、広告主やプランナーが「もっとも効果的な広告の配分」を横断的にシミュレーション・実践できる環境づくりをめざしています。現在、電通・博報堂やその他代理店へのリーチデータの提供を進めるとともに、独自のシミュレーションツールの開発にも取り組んでいます。

■今後の展望についてお聞かせください。

トータルスクリーン・プランニングを推し進め、LIVE BOARDが主要広告主のプランニングに常時組み込まれるスタンダードな存在になることをめざしています。そのためにクライアントサービス部・メディア部・インサイト部・テック部・ストラテジー部の5部門が強固に連携し、NTTドコモなどの株主や広告主、広告代理店、DSP事業社、媒体社といった全ステークホルダーを巻き込みながら取り組みを続けていきます。

担当者に聞く

共通指標を武器にリピートクライアントの仕組みをつくる

クライアントサービス部
ディレクター

西中村 洋巳 さん

■担当されている業務についてお聞かせください。

私が所属するクライアントサービス部は、営業案件の開拓・提案を担当しています。中でも現在、広告会社（代理店）やデジタル商流を起点とした「各予算（統合・OOH・デ

ジタル）の獲得最大化」に注力しています。

これまでOOHは、他メディアと横断的に比較できる共通指標がなかったため、広告主のOOH予算以外から予算を獲得するのが難しい状況にありましたが、業界団体により共通メジャメント「日本版OOHメジャメントデータ」の計測が開始され、インプレッションベースでの取引が可能になることで、DOOHはデジタル広告と同列の選択肢として再定義され始めています。このようなインプレッションでPDCAが回せるOOH広告であることを代理店や広告主に訴求し、既存の予算以外にも出稿を獲得できるように取り組んでいます。

一方、長期・定期で出稿していただける顧客をさらに増やしていくことが業務上の課題です。これに対しては、業種やブランドごとに最適な「価値証明（広告効果の可視化）」を行い、リピートクライアントを組織的に創出し、成功事例を横展開していくことを基本方針としています。また、主要代理店の組織や営業局との連携を深め、企画立案の上流フェーズからLIVE BOARDをプランニングに組み込んでいただくよう働きかけることも重視しています。

■今後の展開についてもお聞かせください。

今後は、弊社でも共通メジャメントを活用していきます。DOOHがTV・デジタルと横並びでプランニングできる環境が整いつつある今、トータルスクリーン・プランニングの有用性を啓蒙していく方針です。さらに、NTTドコモのデータを活用し、主要代理店とともにターゲット分析やログ分析を検証し、その結果を対外的に発信していきます。

また、クライアントのKPIに沿った配信手法を開発・商品化するなど、メディアの新たな価値や販売方法の創出にも取り組みます。さらに、さまざまなイベントと連動したセールスなど新しい商流の開拓にも挑戦していく予定です。加えて、国内外資・海外の販路においても新規拡大とリピート獲得をめざし、ステークホルダーとの連携強化や、海外イベント登壇・参加等を通じて当社のさらなる想起向上をめざします。



媒体開発とネットワーク拡大で「選ばれるプラットフォーム」へ

メディア部 マネージャー

佐藤 晃輝 さん

■担当されている業務についてお聞かせください。

私が所属するメディア部は、魅力的な媒体開発・連携と円滑な配信オペレーションの実施を担当しています。中でも現在、2つのテーマに注力しています。

まず、LBオウンドメディアにおけるアイコンックな媒体の開発です。広告主や代理店に「出稿したい」と思っただけで、選ばれるスクリーンの開発に力を入れています。現在、GINZA GATE BOARD や AKIHABARA UDX BOARDといった都内主要エリアでの媒体開発を強化しているほか、工事中の仮囲いを活用したデジタルサイネージであるOMOTESANDO WALL BOARDの開発など、ユニークな取り組みにも着手しています。



次に、LBパートナーメディアとの接続強化です。屋外・屋内・駅・電車内・空港・タクシー・バス停といったさまざまな媒体社のメディアと接続し、LIVE BOARDマーケットプレイスから一括で広告配信ができる体制を整えており、重要なエリア・ロケーションにおけるインベントリ（広告在庫）の安定供給に向け、さらに多くの主要媒体との接続拡大に取り組んでいます。

■今後の展開についてもお聞かせください。

今後は、LBオウンドメディアの開発とLBパートナーメディアとの接続をさらに広げることで、LIVE BOARDのネットワーク拡大を継続していきます。併せて、さまざまなコンテンツとの連携による媒体の価値向上にも取り組んでいきます。LIVE BOARDはこれまで、大型スポーツコンテンツ、IP、アート、VTuberといった多彩なコンテンツと連携し、通りかかった方が見て楽しいと思っていただける媒体づくりを進めてきました。今後も、こうしたコンテンツや時報などのユニークな機能を掛け合わせることで、媒体の視認率向上と魅力発信をねらいます。

LIVE BOARD ア・ラ・カ・ル・ト

■多彩なバックグラウンドを持つ社員が集う、バーカウンターという名の交流場

LIVE BOARDのオフィスには、社内にバーカウンターが設けられているようです。NTTドコモ・電通・博報堂からの出向者をはじめ、さまざまなバックグラウンドを持つ社員が集い、定期的な懇親会や新入社員の歓迎会が開かれる、大切な交流の場になっているとのことです（写真）。スタンディングスタイルで集まることが多く、それがかえって立場や年齢を気にせずラフに話しやすい雰囲気を生み出しているようです。

社内の交流にとどまらず、社外の方との交流会がこのバーカウンターで開催されることもあり、訪れた方からは「うちの会社にもほしい！羨ましい！」という声上がるほど好評で、会社を超えたつながりを生む場所にもなっているとのこと。また、有志によるUNO会やゲーム会などが企画されることもあり、社員どうし思い思いに趣味の時間を楽しむ雰囲気も根付いているようです。

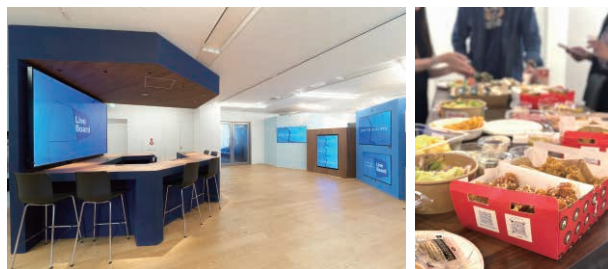


写真 バーカウンターと歓迎会の様子



IOWNを“見せる技術”から“使う技術”へ ——現場実装を通じて見えてきた価値

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) は単なる高速・低遅延通信基盤ではなく、AI (人工知能) やGPUと連携することでリアル空間とサイバー空間をつなぐ価値創出基盤へと進化しつつあります。本稿では、NTTドコモソリューションズが推進するイマーシブ体験や化学プラントにおけるスマートメンテナンスの取り組みを通じて、IOWNによる新たな体験価値・産業価値の創出と、その先に見据えるAI、3D処理技術、フィジカルAIを活用した将来像について紹介します。

はじめに

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) は、APN (All-Photonics Network) ^{*1}を中核とする次世代情報通信基盤として提唱されています。その特長として、大容量・低遅延・低消費電力という優れた通信性能が知られており、これまで数多くのデモンストレーションや実証実験が行われてきました。一方で、企業や社会を取り巻く環境は大きく変化しています。労働人口の減少に伴う人手不足、設備の経年化、デジタル技術を活用した新たな顧客体験など、さまざまな課題や期待が顕在化しています。こうした課題の解決に向けては、単に高速な通信環境を提供するだけでなく、ネットワークとコンピューティング、AI (人工知能) を組み合わせた新たな価値の創出が求められています。

NTTドコモソリューションズでは、IOWNを単なる通信技術ではなく、リアル空間とサイバー空間をリアルタイムにつなぐ価値創出基盤ととらえ、さまざまなユースケースの検討やPoC (Proof of Concept) を推進してきました。本稿では、イマーシブ体験^{*2}と化学プラントでのスマートメンテナンスという、エンタテインメントと産業の2分野の事例を取り上げます。これらのユースケースを通じて、当社が推進するIOWNがリアル空間とサイバー空間をリアルタイムに連携させ、従来の体験や業務をどのように変

革し、新たな価値創出へつなげていくのかを紹介するとともに、実装を通じて見えてきた課題や今後の可能性について述べていきます。

NTTドコモソリューションズのIOWNへの取り組み

当社では2021年よりAPNテストベッドの整備を進め、APNコントローラをはじめとするIOWNのオペレーション開発と、IOWNを活用したユースケース創出の双方に取り組んできました。IOWNの実現には、基盤技術の高度化と価値創出の両輪が不可欠ではありますが、本稿では後者のユースケース創出に焦点を当て、実証活動を通じて見えてきたIOWNの可能性を紹介します。

当社のユースケース創出について、当初は「IOWNの特徴を体感する」ことを目的としたデモが中心でした。例えば、APNを活用したXR (Extended Reality) 卓球や遠隔ロボット制御などは、従来の低遅延通信では実現が難しかった体験を可能とし、IOWNの性能を分かりやすく示すユースケースとして高い注目を集めました。しかし、活動を進める中で見えてきたのは、「高速であること」そのものではなく、その特長を活用することで実現される新たな体験価値や業務変革にこそ本質的な価値があるということでした。APNにより遠隔地にあるGPUやAI基盤をリアルタイムに利用できるようになりました。これにより、これまで現場内で行っていた処理を柔軟に配置できるだけでなく、現場で取得した情報を遠隔地で高度に解析し、その結果を即座に現場へフィードバックすることも可能になりま

^{*1} APN (All-Photonics Network) : ネットワークから端末まで、すべてにフォトニクス (光) ベースの技術を導入することで、圧倒的な低消費電力、高品質・大容量、低遅延の伝送を実現。

^{*2} イマーシブ体験 : 観客が物語や空間に完全に没入し、あたかもその世界に入り込んだような体験ができるエンタテインメント。

した。こうした仕組みはエンタテインメントだけでなく、製造業、インフラ、都市運営などさまざまな分野で活用できる可能性を持ちます。当社は、IOWNを「新たな体験や業務変革を実現する基盤」と位置付け、その実用化に向けた取り組みを進めています。

体験価値を創出するイマーシブ体験への挑戦

その代表例の1つが、イマーシブ体験の実現です(図1, 2)。スポーツ観戦や音楽ライブなどのエンタテインメント領域では、現地でしか味わえない臨場感や一体感が大きな価値です。一方で、地理的制約や収容数の制約により、すべての人が現地で体験することはできません。当社は、この課題に対して、IOWNとAIの活用で「どこでも、現地にいるかのような体験」を実現できないかと考えました。取り組みの中では、複数のカメラから取得した映像をAPNにより遠隔のデータセンタへ伝送し、GPUでリアルタイムに処理することで、3D映像や自由視点映像を生成します。また、AIによる映像解析とAR (Augmented Reality) 技術を組み合わせ、視聴者ごとに異なる情報や演出を提供することもできます。従来の映像配信では、「撮影された映像を見る」という受動的な体験が中心でしたが、イマーシブ体験では、利用者自身が視点を選択し、空間の中に入り込むような体験ができます。これは単に映像品質の向上ではなく、エンタテインメントの視聴体験そのものを再定義する取り組みです。さらに、このような仕組みはビジネスモデルにも変化をもたらします。物理的な収容数に依存しない新たな観戦体験や、自由視点映像を活用した

プレミアム視聴サービスなど、新しい収益機会の創出につながる可能性があります。

当社では、このイマーシブ体験を実現するため、映像伝送、GPU活用、AI処理、表示技術を組み合わせたユースケースの検討を進めています。特に、大容量・低遅延というAPNの特長を活用することで、スポーツの試合や音楽イベントなどの映像を撮影する会場と、その映像をAIにより解析等行う計算資源の配置場所を分離できる点に着目しています。従来であれば、映像処理に必要な高性能GPUをイベント会場ごとに設置する必要がありましたが、IOWNを活用することで遠隔地のデータセンタに設置したGPUをリアルタイムに利用できます。これにより、計算資源の集約による効率化と、より高度な映像処理の両立が期待できます。また、生成AIや映像解析AIを組み合わせることで、映像配信にとどまらない新たなサービスの可能性も見えてきました。例えば、観客が注目する選手や演者を自動追尾した映像生成、競技データや解説情報のリアルタイム重畳表示^{*3}、利用者ごとの嗜好に応じた映像演出など、従来の一方向型の映像提供では難しかった体験を創出できる可能性があります。これらは、AIによる高度な処理結果をリアルタイムに利用者へ届けることで初めて成立するものであり、IOWNが持つ伝送性能が重要な役割を果たしています。さらに、こうした取り組みを進める中で見えてきたのは、イマーシブ体験の価値が単なる映像の高精細化にあるのではなく、「その場にいる感覚」や「利用者ごとに最適化さ

^{*3} リアルタイム重畳表示：カメラなどの映像に、別のデータや情報をその場で遅延なく重ね合わせて表示すること。情報を視覚的に分かりやすく伝える際に効果的。

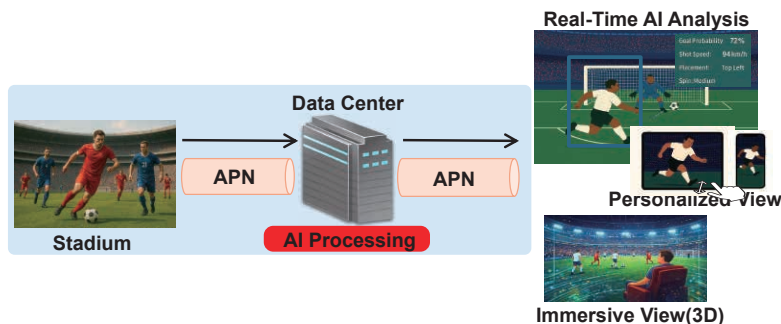


図1 イマーシブ体験構成イメージ



図2 MWC26 Barcelona デモ展示

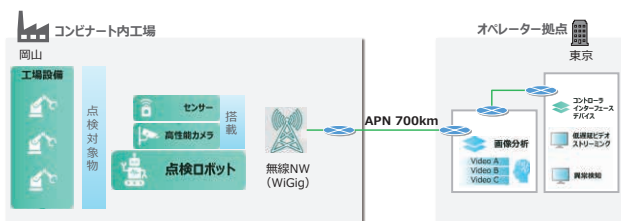


図3 スマートメンテナンス構成イメージ



図4 デジタルツインでの化学プラント点検画面

れた体験」の提供にあるという点です。リアル空間とサイバー空間をシームレスに連携させ、会場に来場できない人に対しても新たな参加機会を提供し、イベント主催者にとっても新しい顧客接点や収益機会の創出につながる可能性があります。

当社は、このような取り組みを通じて、IOWNがエンタテインメントの未来を支える基盤となる可能性を検証しています。さらに、その成果をエンタテインメント領域に限定せず、遠隔教育、観光、地域活性化など幅広い分野へ応用していくことで、より多くの人々が距離の制約を超えて価値ある体験を共有できる社会の実現をめざしています。

社会課題の解決に挑むスマートメンテナンス

一方、当社は、IOWNの価値はエンタテインメント領域だけではないと考えています。社会インフラや製造業の現場では、労働人口減少や設備の経年化に伴う課題が深刻化しています。特に化学プラントやコンビナートのような大規模設備では、広大な敷地内の設備を定期的に点検し、安全な運転を維持することが求められます。こうした背景のもと、当社はNTTグループ各社とともに三菱ケミカルグループをはじめとするさまざまな企業と連携し、化学プラントにおけるスマートメンテナンスのPoCを実施しました（図3、4）。本取り組みでは、IOWNを中核としながら、ロボット、AI、デジタルツインを組み合わせることで、従来の点検業務の高度化と効率化をめざしました。PoCでは、実際に稼働しているプラント設備を対象に、自律型ロボットが巡回しながら映像や音声、設備の状態に関するデータを取得します。取得したデータは、APNと無線ネットワークを組み合わせ遠隔地へ送信されます。遠隔側では、AIを

用いて設備の異常兆候を分析するとともに、その結果をデジタルツイン環境へ反映し、遠隔地から設備状況を把握できる仕組みを構築しました。

当社がこの取り組みで重視したのは、設備データを収集するだけでなく、現場で発生している事象をリアルタイムに遠隔地へ届け、即座に判断や対応につなげることです。例えば、ロボットが取得した映像を遠隔地でAI解析し、設備表面の異常や劣化の兆候を検知した場合、その結果をデジタルツイン上へ反映することで、設備管理者は現場へ移動することなく状況を把握できます。これは、従来の「点検結果を後から確認する」運用から、「リアルタイムに状況を把握し判断する」運用への転換を意味します。また、プラント設備の保全業務では、映像だけでなく、音や振動など複数の情報を組み合わせて設備状態を判断するケースも多く、今後はマルチモーダル（言語、画像、音声、系列データなど、異なる種類のデータを同時に理解する）AI技術との連携で、こうした多様なデータを統合的に分析し、異常の予兆検知や保全計画の高度化へ発展していくと期待されます。IOWNは、そのような大量かつリアルタイム性の高いデータ流通を支える基盤として重要な役割を担います。

本実証を通じて、遠隔AI解析やデジタルツインとの連携が実用的なレベルで実現可能ことが確認されました。また、人による点検業務の一部をロボットで代替できる可能性も示され、危険な場所への立ち入りを回避したり業務負担を軽減したりする効果が期待できます。これらは効率化だけではなく、安全性の向上、人手不足への対応、熟練技術者の知見の継承といった社会課題の解決にもつながる可能性があります。さらに、今回の取り組みは化学プラントに限らず、発電所や上下水道施設、物流拠点など、広域かつ高い安全性が求められるさまざまな産業分野へ展開でき

る可能性があります。当社では、このPoCを通じて、IOWNが単なる通信基盤ではなく、社会インフラや産業現場のDXを支える基盤となり得ることを確認しました。今後も実証で得られた知見を活かしながら、現場課題の解決と新たな価値創出に向けた取り組みを進めていきます。

NTTドコモソリューションズが考えるIOWNの価値

イマーシブ体験とスマートメンテナンスは一見、異なる分野に見えますが、その本質は共通しています。どちらも、現場で取得したデータをAPNによりリアルタイムで伝送し、遠隔のAIやGPUで処理し、その結果を即座に現場へ反映する構造を持っています。すなわち、IOWNの本質は高速通信そのものではなく、リアル空間で発生する情報をサイバー空間で即座に処理し、その結果を現実世界へ反映することで、新たな体験や業務変革を実現することにあります。これまで距離や帯域、遅延の制約によって実現できなかった仕組みが、IOWNによって実現可能になりつつあります。さらに近年では、AI技術の急速な進展により、IOWNの活用可能性は一層広がっています。映像や音声、各種センサデータなどの多様な情報をリアルタイムに収集・伝送し、AIによって解析・理解することで、現実世界の状況をサイバー空間上でより精緻に再現できつつあります。こうした技術は、データ活用にとどまらず、現実空間そのものをデジタル化し、新たな価値創出につなげる基盤となります。

当社では、特に空間認識や空間再構成などの3D処理技術に注目しています。人や設備、物体の位置や状態をリアルタイムに把握し、サイバー空間上へ再現することで、現場の状況をより直感的で高精度に理解できます。これにより、イマーシブ体験における高度な空間表現や自由視点体験だけでなく、産業分野での設備監視や遠隔作業支援、デジタルツインの高度化など、さまざまなユースケースへの展開が期待できます。さらに今後は、こうした空間認識技術とAIを組み合わせ、現実世界を認識・可視化するだけでなく、実空間へ働きかけるフィジカルAIの実現も期待されています。AIが空間や設備の状況を理解し、自律的に判

断を行い、その結果をロボットや機械設備へフィードバックすることで、より高度な自動化や自律運用が可能です。化学プラントにおける点検ロボットや設備監視だけでなく、物流、製造、建設、モビリティなどの分野においても、人が介在しないマシンどうしのリアルタイムな連携や協調制御が実現される可能性があります。その実現に向けては、現実世界の情報を高精度かつ低遅延で収集し、AIによる処理結果を即座にフィジカル空間へ反映することが求められます。IOWNは、そのために必要となるリアルタイムなデータ流通基盤として重要な役割を担うと考えています。当社は、この仕組みを特定業界向けの個別ソリューションではなく、さまざまな分野へ展開可能な共通基盤として発展させたいと考えています。そして、IOWNとAI、3D処理技術、さらにはフィジカルAIを組み合わせながら、新たなユースケースを創出し続けることで、リアル空間とサイバー空間が自然に融合した社会の実現をめざします。

おわりに

NTTドコモソリューションズでは、APNテストベッドの構築以来、多様なPoCやユースケース創出活動を通じて、IOWNの可能性を検証してきました。その結果、IOWNが単なる高速・低遅延ネットワークではなく、人・設備・システム・空間をリアルタイムにつなぎ、新たな体験価値や産業価値を生み出す基盤になり得るという手ごたえを得ています。今後も当社は、イマーシブ体験やスマートメンテナンスをはじめとするさまざまな分野で実践を積み重ねながら、IOWNを「見せる技術」から「使う技術」へと発展させ、お客さまや社会の課題解決、新たな価値創出に貢献していきます。

■参考文献

- (1) <https://www.nttcom.co.jp/news/pr26060101.html>
- (2) <https://www.nttcom.co.jp/news/pr26030201.html>

◆問い合わせ

NTTドコモソリューションズ
ネットワーククラウド事業本部IOWN推進部