

NTT 技術ジャーナル

ISSN 0915-2318 平成2年3月5日第三種郵便物認可
令和3年11月1日発行 毎月1回1日発行 第33巻第11号(通巻392号)

11

NOVEMBER
2021
Vol.33 No.11

特別企画

東京2020オリンピック・パラリンピックと NTT R&D

特集

NTT Research: Upgrade Realityをめざした3つのオープンコラボレーション IOWN時代のセキュリティR&D

トップインタビュー

小澤 英昭

NTT Research, Inc. COO/CTO

グループ企業探訪

NTT ArtTechnology



NTT 技術ジャーナル

11 NOVEMBER
2021
Vol. 33 No. 11

CONTENTS

4 トップインタビュー

めざすは率先垂範
立場や職種にかかわらず「真理を追究」する
小澤 英昭
NTT Research, Inc. COO/CTO



8 特別企画

東京2020オリンピック・ パラリンピックとNTT R&D

- 9 新しい聖火リレー応援体験に向けた取り組み
- 13 聖火リレートーチ記念撮影 × 超高臨場感通信技術 Kirari!
- 18 聖火ランナー応援演出 × Swarm通信制御技術
- 23 聖火リレーセレブレーションステージ演出 × 超高臨場感通信技術 Kirari!
- 28 聖火リレー地域イベント × 音声認識通信技術

32 特集

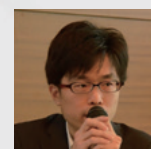
NTT Research: Upgrade Reality をめざした 3つの オープンコラボレーション

- 34 NTT Research, Inc. のオープンラボ戦略
- 38 ブロックチェーンエコシステムの安全性, 性能, 持続可能性を高める
- 41 最適化問題解決の未来: コヒーレントイジングマシン (CIM)
- 44 バイオデジタルツイン研究の最新状況

48 特集

IOWN時代のセキュリティR&D

- 50 未来の原動機となるセキュリティ
- 54 セキュア光トランスポートネットワーク
- 59 光論理ゲートで構成する暗号回路技術
- 64 データから価値を連鎖的に生み出すトラステッド・データ
スペース
- 68 主役登場 奥田 哲矢 NTT社会情報研究所



69 **from ★NTT DOCOMO**
テクニカル・ジャーナル

つまむアンテナ

—誘電体導波路のアンテナ応用—

75 **挑戦する研究者たち**

橋本 俊和

NTT先端集積デバイス研究所
上席特別研究員



まず、そのアイデアが好きかを検討しよう。

結果や周囲を気にせずに自分なりに考え抜こう

80 **挑戦する研究開発者たち**

杉村 義文

NTTファシリティーズ
主任研究員



自分の特徴を最大限に活かして
研究開発に臨もう。

先人たちのチャレンジを受け継いで
より有用な成果を生み出そう

85 **明日のトップランナー**

藤堂 洋介

NTT社会情報研究所
特別研究員



次世代基礎理論の構築と目的特化型暗号が
切り拓く「共通鍵暗号」の未来

88 **グループ企業探訪**

株式会社NTT ArtTechnology
デジタル化・ICTにより文化芸術に
関する地域の課題解決に貢献



Webサイト オリジナル記事の紹介 92

12月号予定

編集後記

NTT技術ジャーナルはWebで閲覧できます。

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



本誌掲載内容についての
ご意見、ご要望、お問い合わせ先

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

本誌ご購入のお申し込み、
お問い合わせ先

一般社団法人電気通信協会
ブックセンター
TEL (03)3288-0611
FAX (03)3288-0615
ホームページ <http://www.tta.or.jp/>

企画編集

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

発行

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

©日本電信電話株式会社2021

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます●

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

View from the Top

NTT Research, Inc.
COO/CTO

小澤 英昭

PROFILE :

1991年日本電信電話株式会社入社。2000年NTT西日本（ウォーカープラス出向）、2004年NTTレゾナント gooサービス、検索技術、モバイル検索ビジネス担当、2011年サーチ事業部長、2013年NTTレゾナントテクノロジー 社長（兼務）、2015年NTTメディアインテリジェンス研究所 所長、2018年NTTテクノクロス グローバルビジネス推進室長を経て、2019年6月より現職。



めざすは率先垂範

立場や職種にかかわらず

「真理を追究」する

量子コンピュータ、暗号、ブロックチェーン、医療情報処理分野で、世界のパートナーとともに最先端の基礎研究を推進するNTT Research, Inc.. 設立から2年を迎え、IACR Test of Time Award, SPIE MAIMAN Laser Award, IACR Crypto 2020 Best Paper Award と次々に権威あるアワードを獲得。プログラムの難読化に関する20年来の未解決問題を解決する等、大きな成果を上げています。NTT Research, Inc. 小澤英昭COO/CTOに研究成果の進捗やマネジメントの極意について伺いました。

全く新しい技術のタネをつくる

NTT Research, Inc. は設立から2年が経ちました。研究所の概要や研究の進捗を教えてくださいませんか。

NTT Research, Inc. は、NTTが掲げるIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想のさらに先の未来に必要な新規性の技術の根幹となる、光をベースとした量子コンピュータをはじめとする「量子物理学」が主な研究領域である量子計算科学研究所 (Physics & Informatics Laboratories : PHI)、個人情報を含むさまざまなデータの

安全な活用を促すのに必要な暗号をはじめとする「情報数学理論」が主な研究領域である暗号情報理論研究所 (Cryptography & Information Security Laboratories : CIS)、人間の基本データである「医療健康情報」を主な研究領域とする生体情報処理研究所 (Medical & Health Informatics Laboratories : MEI) を擁し、2019年7月に米国のシリコンバレーに設立されました。これら、3つの研究所はNTT R&Dが日本で長年培ってきた基礎技術分野に海外の英知を掛け合わせて、10~20年後の事業創造をめざした新たな技術の方向性をつくり出すことを目標にしており、2020年4月からの1年間で

68件の論文が採録、発表され、16件 (PHI : 4, CIS : 11, MEI : 1) の特許が出願されました。

PHIでは、量子コンピュータの並列的な計算と、古典的なデジタルコンピュータの計算の良いところを組み合わせる最適なシステムをめざしており、特に光が持つ量子現象を使うことにより常温で動作が可能であるCIM (Coherent Ising Machine) を中心に、Stanford大学やMIT, Cornell大学などの米国をはじめとした大学や、NASA等の米国の国立研究機関等14の研究機関と共同研究チームをつくり、世界最先端の量子コンピュータの開発を進めています。また、2020年より新しいテーマとし



て、「量子最適化アルゴリズム (Quantum Approximate Optimization Algorithm : QAOA)」を追加し、MIT、Chicago大学、Waterloo大学との共同研究を開始しました。

CISでは、既存の暗号の安全性を覆す量子コンピュータができたとしても安全性を保てるような、より強度の高い暗号の理論、暗号化された情報の安全性を確保して使いやすくする技術、安全性の高いブロックチェーンの研究を行っています。この2年間で、NTTは、世界最高峰の暗号の国際会議CryptoやEuroCryptでもっとも論文の採択数が多い組織となりました。NTTとして採択された論文のうち約70%をCISが占めています。さらに、「属性ベース暗号 (Attributed based encryption)」を発明したDr. Brent Watersは国際暗号学会 (International Association for Cryptologic Research : IACR)よりTest-of-Time Awardを、同じくDr. Brent WatersにはCrypto 2020でDr. Mark ZhandryにはEuroCrypt 2019でBest Paper Awardが贈られました。

MEIでは、デジタルツインコンピューティングを人体に適用した、“Bio Digital Twin”の構築と体内に埋め込み可能なマイクロ・ナノデバイスを通して、診断支援と健康維持サポートの実現をめざしています。現在、生体内の電気信号を外部に取り出せるような電極に関するミュン

ヘン工科大学との共同研究を開始し、実際に実験動物(昆虫など)を用いた埋め込み実験を行い、電極の有効性の検証を行うなどの成果を上げています。

短期間で多くの成果を上げられたのですね。

私はCOO/CTOとしてスタッフ全体を統括していますが、この2年は基礎研究開発力、グループ全体の技術力、そしてグループの企業価値の3点の向上に注力してきました。その中で急務であるのが、人材採用をはじめとして、多くの大学等との共同研究契約を締結するなどの体制の整備でした。PHI、CIS、MEIの各研究所長は、それぞれの分野で功績を残し世界的にも大変著名な方々であり、こうした研究所長が持つ人脈をはじめとしたネットワークを活用して、NTT研究所が蓄積してきた独自技術を支える研究領域に、海外を含む外部の優れた研究者を招へいし、米国内外と連携する研究チームを組成しています。設立当初は10数名だった研究者は38名となり、体制はかなり整ってきました。このうち35名が博士、医師の資格保有者も2名います。また、創設メンバーも日本人のみではありませんでしたが、この2年間でさらに外国人の採用も進み、12名が北米地域、2名がヨーロッパ、そしてアジアオセアニアが24名ですが、そのうちの半数はインド、シンガポール、オーストラリア、韓国の出身で、日本人はアジアオセアニア

出身の半数程度です。また研究拠点としても、ミュンヘン工科大学との共同研究のために、ドイツのミュンヘンにランチを設けました。

そして、①成果の源泉である基礎研究開発力向上については、1件/研究員/年の論文採択およびインパクト・ファクタが平均5.0以上、②グループ全体の技術力向上については年間10件以上の特許出願および1~3人/年の人材育成、③グループの企業価値向上については、論文発表後最低5年経過までを平均6.0以上の論文引用数をベースにした基礎研究開発力指標および1回/年のグローバルR&D Workshopの開催といったKPI (Key Performance Indicator)を設定して、全員で取り組んできました。その結果が前述の成果であり、その他指標的な結果としては、論文のインパクト・ファクタの平均値は6.3、米国内外の大学から25名以上のインターンを受け入れ、9月にはオンラインとオンサイトのハイブリッドによるグローバルR&Dワークショップに2日間で、オンラインで延べ約2000views、オンサイトで約130人と、KPIをすべてクリアしているかと思います。

こうした成果を上げられたのは、求心力のある世界的な研究者を核にして実力のある研究者が集まり、切磋琢磨していることが大きな要因の1つであると考えます。ただし、単に世界トップレベルの研究者集団であればよいかというそうでもなくて、研究分野によってはトップレベルの研究者を支える研究者も必要です。特に量子分野や医療分野では実験が必要ですから、実験的な研究を支えてくれる存在が必要であり、博士課程を修了したばかりのような若手の研究者の採用も進んでいます。これらをかながみても私たちは基礎研究を進めるうえでかなり理想的な環境が整いつつあると考えます。

その一方で、基礎研究の成果を社会に役立てるという観点では、一般的に応用研究が必要になります。NTT Research, Inc.は基礎研究に特化しているので、応用研究を行う部署へと成果の橋渡しを行うことに関する検討が次のステップに向けた課題だと考えています。

俯瞰的に眺めて過不足を見出す

ところで、コロナ禍にあって仕事をする場所が問われなくなったともいわれます。こうした中で、NTTが海外に研究拠点を持つ意義はどのようなところにあるのでしょうか。

この20年間でNTTのビジネスが大きく様変わりしています。現在、NTTグループの収益は約12兆円、このうちの約2兆円が海外で、ビジネスのグローバル展開が進んでいます。主としてM&Aによりビジネスをグローバルに拡大してきました。

このような状況の中で、以前私が事業会社にいたときの経験ですが、日本を拠点にしている私たちが海外の企業に、グローバルの事業会社とともにビジネスの話を持ち掛けると「あなたはどこで研究開発をしているのか、日本ですか米国ですか?」と、聞かれてしまうのです。日本の研究開発成果を海外へ持ち出すだけではなく、ビジネスを展開する場所や、その場所のスタイルで研究開発を行いビジネス化することの重要性を実感しました。その意味では、M&Aでグローバルでのビジネスを拡大するとともに、ビジネスに必要な技術をグローバルでつくり上げていくというのは、NTTのグローバルビジネスを実現するうえで適した手段だと思えます。一方で、リモートワークが普及し、現地に行かなくてもビジネスを行うことも可能となりました。ビジネスは基本的に人と人とのコミュニケーションの上に成り立つも

のであり、この観点でみれば、シームレスなコミュニケーションが実現していけば、通常のビジネスについては、対面であろうとリモートであろうと変わらなくなっていくのかもしれない。

ただし研究開発の場合は少し状況が異なると思います。最高の研究を行うためには、最高のリソース（人や設備）がそろう環境が重要な要素です。シリコンバレーはまさにその環境があり、NTT Research, Inc. がシリコンバレーに拠点を構えた理由の1つです。コロナ禍がきっかけでリモートワークが普及してきたと話題になっていますが、研究者の間ではそれ以前から電子メールはもちろん、リモート環境でのディスカッション等を行っています。しかし、研究活動には実験や検証が必要です。そのため、研究拠点は実験や検証のためのリソースのある場所に依存することになります。シリコンバレーには、PHI、CIS、MEIの各研究所の研究に必要な最高のリソースがそろっているのです。そもそも、海外に拠点を設ける必要性を語るとき、見極めるべきは、海外か国内かという場所ではなく、その研究活動の本質として何が重要か、どこで研究活動を行うのが重要かという点にあると私は思います。

シリコンバレーからの発信に期待が高まりますね。世界トップレベルの研究者を束ねる立場にご苦労はないのでしょうか。

私個人としても、米国の生活も性に合っていますしハッピーに仕事をしています。

私はNTTに入社して9年あまり研究者として活動した後、15年あまりを事業で仕事をし、その後は研究開発のマネジメントに携わるといった、NTTの研究所においては相当ユニークなキャリアを歩んできました。研究から事業、そして研究のマネジメントと変わるたびに、その前の業務で経験したことがすべて次の仕事に活かしていると感じますし、経験を重ねることによって物事の真理がだんだんと分かってきたように思います。さまざまな職種や人とのインタラクションを通じて、潮目を読むようになり、役立て方を理解する、こうした積み重ねが成功につながっていくように感じています。もちろん、積み重ねの中にはマイナスもありますが、プラスに目を向けて臨んでいます。

こうした経験を踏まえていうと、トップの仕事は、皆がいかにハッピーに働けるかをマネジメントすること、事業に関するコンセプトを定めてロードマップをつくり、人材を獲得してチームをつくることです。さらに、マネジメントの一番のポイントは全体を俯瞰して眺めて、過不足を見出すことだと思います。そして、組織やミッション、仕事の質によって組織統制の強弱をつけることも重要です。例えば、かつて私がKADOKAWAの子会社に出向していたときには、業務をいかに効率良く実施し、週間の雑誌の発売日とWebのリリース期日に間に合わせるかというようなサービス開発・運営がミッションでしたから、ある程度強めの組織統制は必要でしたが、NTTメディアインテリジェンス研究所（当時）の所長を務めていたときには、新しい付加価値を研究所の所員が自ら考えることが大事なので、強い組織統制は必要としませんでした。そして、ここNTT Research, Inc. も、サービス開発のような強い組織統制は必要ないと思っています。組織統制力を強めすぎると、研究者のオリジナリティや前進する力を削いでしまうことにもつながりかねないからです。研究の方向性に大きなズレが生じていなければ、その研究の良さのある程度見守っていくことも重要だと思います。



NTT Research, Inc.は、まだできて2年の会社なので、組織のマネジメントにおいて、細かいところを見るとまだ抜けや漏れがあると感じています。さらに包括的、俯瞰的な視点で全体像を把握して研究所を活性化させたいと思っています。

かかわる方すべてが自分に自信が持てるマネジメント

マネジメントは対象によって全く違うのですね。ビジネスにおいて、あるいはマネジメントをするうえで大切にしていることはありますか。

私が大切にしているのは人の役に立つことであり、いかなるときもこの根源的な部分は揺らぎません。仕事は「人間」がすることであり、人間が企画し、やりたいことを実現するのが仕事であると考えます。立場や役目は違って、仕事とは何らかの結果を出すことや、世の中にインパクトを与えることだと考えています。

これを踏まえて、私がめざしているのは率先垂範です。仕事を一緒にする仲間たち、すべてが自分に自信が持てるような仕事をしたいための、マネジメントを心掛けたいと思っています。現場型の私は、私自身が日々新しいことにチャレンジし続けること、仕事を通じて自分もチー

ムもお客さまもすべてがハッピーになることを大切にしています。これを実現するために、まず自分がチャレンジしてある程度できることを示してから、その先にすることにチャレンジしてもらいます。例えば、部下やチームが「こんなことはできない」と諦めかけているときに、まず私が取り組んでみて「やればできる」ことを示し、その先に取り組んでもらうようにしてきました。

社内外の研究者や技術者に向けてメッセージをいただけますか。

1番目は日々チャレンジすること。世界には非常に優秀な人がたくさんいますから、その方たちと一緒にチャレンジすることをめざしていただきたいです。例えばトヨタ自動車の前身であるトヨタ自動織機の創始者の豊田佐吉は海外進出に際して社内からかなり懸念の声があったと聞いています。そのときに豊田佐吉は「障子を開けよ。外は広いぞ」と言ったと聞いていますが、多くの日本の研究者や技術者の方々に広い世界を見ていただきたいと思います。

次に世界的な研究者に共通する資



質はやはり探求心の強さです。例えばアインシュタインは、相対性理論の研究を、今でいえばインパクト・ファクタが高そうだからと、研究を始めたとは思えませんし、また相対性理論の論文も最初のうちはあまり注目を集めていない論文誌に掲載されたと聞いています。研究者の皆さんにはインパクト・ファクタが高い論文誌があるから投稿しようではなく、本質を見抜いた研究活動をする、探求心はそこへ費やしていただきたいです。私はどんな仕事においても「真理の追究」が一番大切だと考えています。

(インタビュー：外川智恵)

※今回はリモートにてインタビューを実施しました。

インタビューを終えて

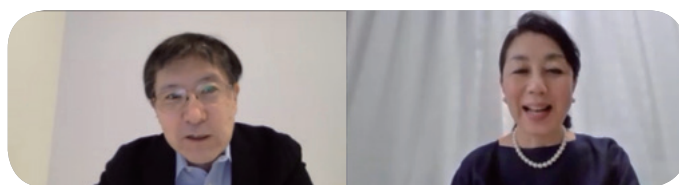
NTT Research, Inc. のオープニング・セレモニーに伺ったのは2019年の夏。日差しは強いものの爽やかな風の吹くシリコンバレーのオフィスには真新しい仕器が並び、これから始まるという高揚感に満ちていました。あれから2年、新型コロナウイルス感染症の世界的パンデミックにより小澤COO/CTOとの再会はオンラインの画面越しとなりました。

直接お目にかかれなかったことを残念に思いながらご挨拶をすると、小澤COO/CTOが明るく弾むような笑顔と声で迎えてくださいました。お話を伺う最中も笑顔で「非常に面白いポイント

ですね」と相槌を打ってください、積極的に会話を弾ませてくださいます。画面というフィルタも感じさせない温かな空

気が流れます。小澤COO/CTOの信条「かかわる人はすべてハッピー」はインタビューの私にも適用されておりました。

そんな小澤COO/CTOの最近のご趣味は料理。「パンデミックで世界がガラッと変わってしまっただけに家に籠るようになり、料理に目覚めていますよ」とおっしゃいます。料理の醍醐味は世の中にあふ



れるレシピの中から一番自分にマッチしているものを選び出し、さまざまな調理法を試しながら「自分の味」を生み出すことだそうです。

趣味でさえも「真理の追究」を大切にしていられるご様子に、小澤COO/CTOの一貫したご真情に感じるひと時でした。

東京2020オリンピック・パラリンピックとNTT R&D

カテゴリ2 東京2020を『彩った』NTT R&Dの技術

■ 新しい聖火リレー応援体験に向けた取り組み

東京2020オリンピック聖火リレーにおいて、NTTが支援した、さまざまな活動について概説する。

9

■ 聖火リレートーチ記念撮影 × 超高臨場感通信技術 Kirari!

超高臨場感通信技術 Kirari!を用いてバーチャルにトーチキスを体験できる「トーチ記念撮影コーナー Kirari!バージョン」等を紹介する。

13

■ 聖火ランナー応援演出 × Swarm通信制御技術

「NTT presents東京2020オリンピック 聖火リレーセレブレーション」における、ディスプレイ・ボットを用いた空間表現“Art of Swarms”を紹介する。

18

■ 聖火リレーセレブレーションステージ演出 × 超高臨場感通信技術 Kirari!

Kirari!を用いたコロナ禍でチャレンジした3つの新しいステージ演出、「リモートパフォーマンス」「リモートビューイング」「リモートファンコラボ」を紹介する。

23

■ 聖火リレー地域イベント × 音声認識通信技術

聖火リレー応援体験イベントの概要、および小学生とともに制作した応援演出システムについて紹介する。

28

※NTTは、東京2020ゴールドパートナー（通信サービス）です。

カテゴリ2 東京2020を『彩った』NTT R&Dの技術

新しい聖火リレー応援体験に向けた取り組み

きのした しんご

木下 真吾

NTT人間情報研究所 所長

東京2020オリンピック 聖火リレー

2021年3月25日に福島県をスタートした東京2020オリンピック聖火リレーは、全国47都道府県を121日間かけて、1万515人のランナーによってつながれました。聖火リレーの目的は、大会のシンボルである聖火を全国でつなげることで、平和、団結、友愛といった理想を体現し、開催国全体にきたる大会への機運醸成を図ることにあります。

NTTは、こうした聖火リレーの目的に共感し、1人ひとりの希望の光を日本中につなげるお手伝いをすべく、さまざまな支援活動を行ってきました。具体的には、①聖火ランナーの支援、②セレブレーションの支援、③拡大版セレブレーションの支援、④NTTが行う聖火リレーイベントの開催があります。①は、聖火ランナーの応募や推薦から始まり、選出されたランナーの各種サポート、走行中の盛り上げなどがあります。②は、毎日聖火ランナーがゴールする地域で行われるイベントにおいて、ステージ応援や、聖火リレートーチの記念撮影などの展示・演出があります。③は、②の拡大版で、ライブパフォーマンスや展示など大規模なイベントを実施します。具体的には、

4月13日の大阪と6月30日の横浜において、それぞれ観客数5000人規模のイベントを予定していました。④は、事業所などを、聖火リレールートに設定し、近隣住民や小学生、そこに勤める社員などが一緒に聖火リレーを体験できるイベントを開催します。研究所では、NTT横須賀研究開発センタでの聖火リレーイベントを主催し、近隣の小学生や高校生を招待したイベントを企画していました。

しかし、新型コロナウイルスの感染拡大により、1年延期となりましたが、開始した後もさまざまな影響がありました。開始当初は公道での走行が多かったものの、新型コロナウイルスの感染拡大により、公道での走行中止を決める自治体も増え、最終的には、11道府県では公道中止、9都県では一部中止となりました。それに合わせて、セレブレーションも、人数制限や中止を行うところがほとんどとなりました。大阪開催の拡大版セレブレーションは、一般のお客さまによる現地観覧を中止しオンライン配信に切り替えました。横浜開催の拡大版セレブレーションも一般観覧は中止とし、聖火ランナーとご家族・ご友人のみの現地観覧およびオンライン配信となりました。また、多くの聖火リレーイベントも中止となり、NTTが主催するイベント

も中止となりました。

このように、当初期待されていたような祝祭的な機運の醸成は、残念ながら十分には図られませんでした。NTTは、こういう状況だからこそ、通信のちからによって、人と人のコミュニケーションを守り、希望の光を日本中につなげていく必要性を感じ、支援活動を続けました。

NTT R&Dがめざす新しい 聖火リレー応援体験のかたち

NTT研究所は、通信によって、人々をつなぎ感動の増幅と共有をもたらす新しいエンタテインメントやアートのあり方を探るために、通信技術の研究開発とさまざまな分野への適用実験を行ってきました。具体的には、超高臨場感通信技術 Kirari! を用いた歌舞伎や音楽ライブ、ファッションショー、スポーツなどの超高臨場感ライブ中継やステージ演出、ロボット・映像通信制御技術を用いた動くディスプレイ・ロボットによる空間映像演出、その他、インスタレーション展示などを行ってきました。

今回の聖火リレーでは、こうした通信技術やノウハウ・知見を活かし、聖火リレーの盛り上げに協力しました。具体的には、Kirari! や Swarm 通信制御技術など最新の通信技術を活用し、前述の②聖

火リレートーチ記念撮影の展示出展、③拡大版セレブレーションにおけるステージ演出や聖火ランナー応援演出、④近隣小学校での地域イベントに技術協力しました。

聖火リレートーチ記念撮影

セレブレーションおよび拡大版セレブレーションにおいて、通信技術を活用した聖火リレートーチ記念撮影コーナーの出展を行いました。来場されるお客さまにとって、聖火リレートーチを実際に手に取り、その美しさや重みを感じ、聖火ランナーになった気分を味わうことが、最高のユーザ体験となります。その体験を通信技術によってさらに向上させました。1番目は、「バーチャルトーチキストーチ記念撮影コーナーKirari!バージョン」です。ホログラフィックに表示される錦織圭選手とバーチャルなトーチキスができる体験を提供しました(図1)。2番目は、「トーチ記念撮影コーナー錯覚バージョン」です。人の錯覚を誘発する光をプロジェクションすることにより、動くはずのないパネルの絵が動いているように感じる不思議なトリック空間です。3番目は、「トーチ記念撮影コーナー歌舞伎バージョン」です。NTTの通信技術を組み合わせたインタラクティブ体験展示で、体験者が限取(歌舞伎の化粧)の描かれたお面を顔の前に数秒かざすことにより、モニター上の自分の顔に歌舞伎俳優のような化粧が施され、その姿のままトーチを掲げて記念撮影をすることができます。

聖火ランナー応援演出

通信技術によって、無数の動くディス

プレイ(ディスプレイ・ボット)が群となって協調動作し、路面を映像で彩りながら、聖火ランナーを応援する空間演出



図1 超高臨場感通信技術 Kirari!を用いた錦織選手とのバーチャルなトーチキス体験

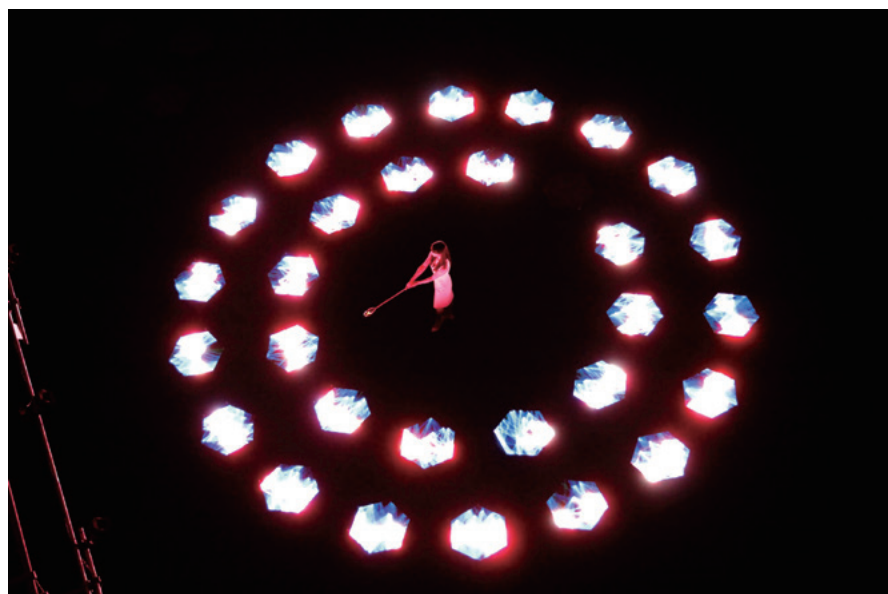


図2 ディスプレイ・ボットを用いた聖火ランナー応援演出

を行いました（図2）。多くのディスプレイ・ボットが互いに近付いたり、離れたり、また映像を個別に表示したり、集団として表示したりすることで、生み出される不思議な表現は、まるで生き物の群によるものであるかのような感覚を与えました。この空間演出は、世界的なメディアアート研究機関アルスエレクトロニカとNTTとの共同検討から生まれました。

聖火リレーセレブレーション ステージ演出

大阪と横浜の拡大版セレブレーションにおいて、Kirari!をGENERATIONS from EXILE TRIBEのステージ演出に活用しました。コロナ禍を踏まえ、人と人が集まりにくくなっている状況を、通信のちからによって、どのようにアップデートできるかチャレンジしました。1番目は、「リモートコラボレーション」です（図3）。アーティストどうしも、コロナ禍で集まるのが難しくなっています。ここでは、離れた場所にいるアーティストが「Choo Choo TRAIN」のロールダンスをつくり上げることにチャレンジしました。それぞれ別々にダンスしたアーティストの映像は、Kirari!によって瞬時に切り抜かれ、同じ場所で一緒にダンスをしているかのような合成映像が完成しました。

2番目は、「リモートライブビューイング」です（図4）。コロナ禍で、ライブ会場に行けない観客にも、あたかも目の前にアーティストがレポートしてき



図3 Kirari!を用いたステージ演出（リモートコラボレーション）



図4 Kirari!を用いたステージ演出（リモートライブビューイング）

たかのような体験を届けるチャレンジです。

3番目は、「リモートファン交流」で

す（図5）。コロナ禍で、アーティストとファンとの交流も難しくなっています。あたかも隣にいて同じ空間を共有してい



図5 Kirari!を用いたステージ演出（リモートファン交流）



図6 子どもたちがつくった紙コップ通信装置で聖火リレーを応援する様子

るかのような体験の創造にチャレンジしました。

聖火リレー地域イベント

当初、NTT横須賀研究開発センタに地域の小学生をお招きし、聖火リレーのイベントに参加していただく予定でした。コロナ禍における新しい応援方法の1つとして、声を出しても飛沫が飛びにくい紙コップ通信による応援を行うために、子どもたち1人ひとりが、その紙コップ通信の装置をつくってくれました（図6）。コロナ感染拡大により、本イベントは中止となりましたが、楽しみにしてくれていた子どもたちに聖火リレーの思い出をつくってもらうために、私たちが学校に出向き、紙コップによる応援イベントや子どもたちによるトーチ記念撮影、研究者による技術講演などを行い、子どもたちも大変喜んでくれました。



木下真吾

◆問い合わせ先

NTTサービスイノベーション総合研究所
E-mail svkoho-ml@hco.ntt.co.jp

カテゴリ2 東京2020を『彩った』NTT R&Dの技術

聖火リレートーチ記念撮影 × 超高臨場感通信技術 Kirari!

みはら よしゆき ながた まさみ はせ がわ けいすけ なかむら たいじ
 美原 義行 / 長田 雅美 / 長谷川 馨亮 / 中村 泰治
 わたなべ じゅんじ まつ い たつや いわもと ひであき きのした しんご
 渡邊 淳司 / 松井 龍也 / 岩本 秀明 / 木下 真吾

NTT人間情報研究所

概要

東京2020オリンピックの機運を醸成させるため、私たちは、東京2020オリンピック聖火リレーを多くの人に体験してもらいたいと考えました。その中で、聖火リレーを身近な体験として感じることができるよう、トーチと記念撮影ができる3つの体験を用意しました。体験の1番目は、実際にトーチを持ていただき、超高臨場感通信技術 Kirari! を用いてバーチャルにトーチキスを体験できる「バーチャルトーチキストーチ記念撮影コーナーKirari!バージョン」です。実験室や大掛かりな装置が必要だったKirari!の装置をトラック1台にパッケージ化して、全国どこへでも出展できるよ

うにしました。2番目は「トーチ記念撮影コーナー錯覚バージョン」です。人の錯覚を誘発する特別な光を静止画にプロジェクションすることによって、動くはずのない炎の写真が動いたように感じる不思議な演出を提供しました。通常のパネルの前での撮影とは異なり、静止画でありながらより動きのある体験を提供できます。3番目は、「トーチ記念撮影コーナー歌舞伎バージョン」です。長い歴史の伝統をつないできた歌舞伎と、地域をつないでいく聖火リレーに掛け合わせて、体験者が歌舞伎の隈取をバーチャルにした状態で、トーチ記念撮影ができる体験です。

トーチ記念撮影コーナー Kirari!バージョン

Kirari!によってホログラフィックに浮かび上がった錦織圭選手と、車内に入った体験者がバーチャルにトーチキスができるトラックを用意しました（図1）。ホログラフィック表示は、2D空中像表示⁽¹⁾の仕組みを利用しています。具体的には、床面にディスプレイを設置し、それに対して斜め45度に透明スクリーンを設置します。ディスプレイ上に表示される錦織選手の映像は、透明スクリーンに反射・透過されステージ上に浮かび上がったように見えます。

従来、このようなステージの設営は、トラス部材を設置し、透明スクリーンを



図1 Kirari!トラック外観

斜めに張る作業などに時間を要していました。今回のセレブレーションでは、毎日、移動・設置を行う必要があったため、トラックに透明スクリーンを簡単に収納・設置できる仕組みを実装しました。結果として、従来は1日程度かかっていたステージの設営を、2時間程度で完了させることができました。また、121日間全国を移動するため、開催場所や時期によっては、日中の明るい中での展示が必要となります。そのため、プロジェクタ投影ではなく、LEDパネルを使用することで、元映像の輝度が向上し、屋外での視認性が向上しました。私たちは、これら機構を10tトラックの荷台部分に構築しました。

■体験の流れ

体験者はまず、車両後部の出入り口からトラック荷台部のステージに登り、スタッフからトーチを受け取ります。出入り口には階段状のステップだけではなく、リフトも搭載し、車いすの方も体験でき

るようにしました。

トーチを持った体験者が所定の位置に立つと、錦織選手がホログラフィックに浮かび上がり、バーチャルな錦織選手と、リアルな体験者があたかも2人並んだように見えます(図2)。錦織選手が立ち上がって登場するパターンと、跪いて登場するパターンの2通り用意しました。身長の高さを問わず、自然なトーチキスを体験できるようにしました。

体験者からは、透明スクリーン上の錦織選手を直接見ることはできません。そのため体験者は、別に用意したモニタを見ながら錦織選手のトーチの動きを確認し、トーチどうしを近づけ、バーチャルトーチキスをを行います。体験者が持っているトーチには、赤外線センサが搭載されており、トーチの位置を検出します。体験者のトーチと錦織選手のトーチとが接近すると、トーチの先端に聖火をモチーフにした光が点灯します。

この体験の様子は、ステージ外に設置

したカメラで撮影し、動画はインターネット上のサーバに即座にアップされます。体験が終わった体験者には、動画のURLが組み込まれた二次元コードが発行され、撮影された動画を自身のスマホなどですぐに見える仕組みも提供しました。錦織選手とのトーチキスの動画を自身のスマホにダウンロードしたり、SNSに投稿したりすることができます。

■結果

聖火リレー期間中に新型コロナウイルス感染が拡大し、セレブレーションを中止にする市町村も増えたため、当初計画よりは出展回数が少なくなりました。結果として、25都県34会場でKirari!トラックによるトーチ記念撮影コーナーを実施でき、延べ4498名の方に体験いただきました。ホログラフィックに浮かび上がった等身大の錦織選手のリアリティに驚く姿を多く見ることができ、体験者からも「聖火ランナーになったような体験を味わうことができた」という声を多くいただきました。

聖火リレートーチのリアリティをより高めるために、火が灯っているかのような触覚を再現する仕組みを付加しました。これにより、視覚障がいを持つ方にも、トーチキス体験を楽しんでもらうことができました(図3)。ホログラフィックに浮かび上がる錦織選手とのトーチキスは、視覚的な体験であるため、視覚障がい者にとっては、それが、いつ、どのように行われるのか知ることができませんでした。そこで、トーチキスに合わせ持っているトーチが振動する機能を付けることで、錦織選手のトーチから自分のトーチに炎が移るという体験を、触覚的に感じてもらうことを可能にしました。



図2 トーチ記念撮影コーナーKirari!バージョン体験の様子

この仕組みは、トーチ内部に小型の振動素子を装着し、外部からの赤外線信号によってオン・オフするもので、視覚障がい者が体験する際には、スタッフがタイミングに合わせて振動のオン・オフを行いました。また、振動は、視覚障がい者が炎だと分かりやすいような工夫がなされました。この体験は、全国で1カ所（2021年6月30日横浜会場）のみの提供となりましたが、視覚障がいの方に実際に体験いただき、「点火した直後はジワジワという弱い振動だったのに、トーチを真上に掲げると強い振動になったので『火の強弱まで感じられるよう工夫されているんだなぁ』と感激しました」という言葉もいただくことができました。

トーチ記念撮影コーナー 錯覚バージョン

この展示では、トーチを持った錦織選手のパネルに、特別な光をプロジェクションすることで、パネル上の炎や背景の桜吹雪が動いているような錯覚を誘発します（図4）。パネル上の特徴点に照射するため、位置合わせが重要となります。各会場での位置合わせを正確に実施するため、プロジェクタをカメラと連携させて、パネル上の特定の位置に正確にプロジェクションする仕組みを採用しました。この仕組みにより、簡易に準備をすることができ、運営を行う現地のスタッフでも設置することが可能となりました。

この展示は、3373組5616人に体験いただきました。動くはずのない静止画が動くことに、体験者全員が驚きの声を上げていました。

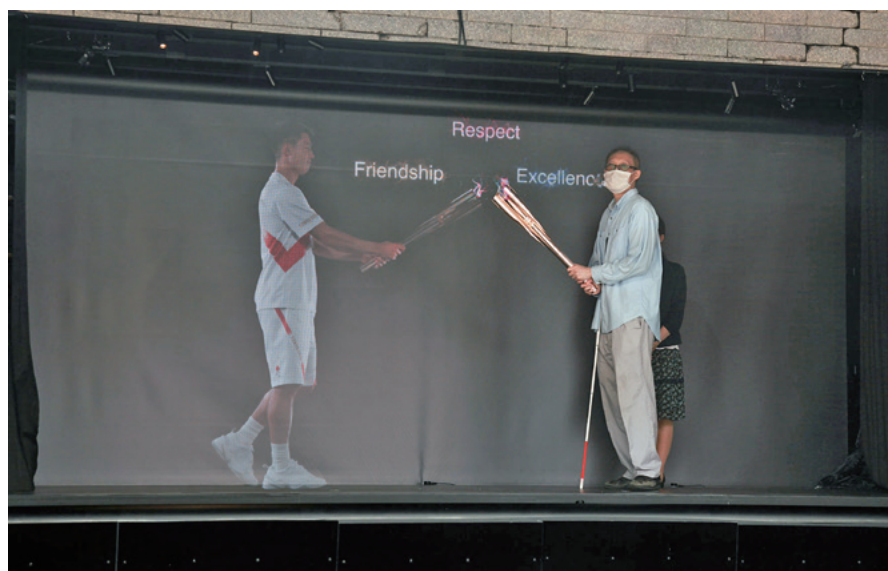


図3 視覚障がいの方が体験している様子



図4 トーチ記念撮影コーナー錯覚バージョン体験の様子

トーチ記念撮影コーナー 歌舞伎バージョン

NTTは、伝統文化とICTとの組み合わせによって新しい体験を生み出す取り組みを2016年から始めています。その中で、歌舞伎の特徴的な化粧法である「隈

取」に着目し、ICTを活用して選んだ隈取お面が顔に張り付く不思議な体験を提供してきました。この体験をコンテナにパッケージングし、福島県や熊本県を回って、ICTによる楽しい体験を提供してきました。今回、地域をつないできた聖火リレーの「つなぐ」をテーマにした

体験として、「トーチ記念撮影コーナー歌舞伎バージョン」を提供しました（図5）。

■体験の流れ

体験者は、まず隈取の描かれた多くのお面の中から好みのお面を選びます（図6）。このとき、錯覚バージョンと同じ特別な光をプロジェクションしており、壁に掛けられた隈取のお面がふとした瞬間に表情を変えているように見える演出も行いました。お面を手に取りモニタの前に立ってお面を顔に重ねると、隈取を自動認識し、それが体験者の顔に化粧されます。この隈取はAR的なもので、モニタの中では顔の表情や前後左右の移動にリアルタイム追従して体験者の顔に隈取が張り付いたままとなります。モニタ内の背景には、選んだ隈取に応じた演出が行われます。今回は、特別に聖火リレーをイメージした背景も用意しました（図7）。この状態で、トーチを持ち、体験者は思い思いのポーズで写真を撮ることができます。次に、隣の部屋では、高さ1.2 mの巨大な立体顔面オブジェクトに、自分の隈取り顔がプロジェクションマッピングされ、体験者に驚きを与えました（図8）。体験写真は、後日SNSに公開され、ダウンロードできるようにしました。

■結果

この体験は、大阪万博記念公園と横浜赤レンガ倉庫広場の2カ所の聖火リレー拡大版セレブレーションのみで提供する予定でした。しかし、新型コロナウイルス感染拡大の影響で、横浜赤レンガ倉庫広場のみでの実施となりました。そこで、聖火ランナーとその関係者、合計82人に体験いただきました。選んだ隈取お面を



図5 トーチ記念撮影コーナー歌舞伎バージョンブース



図6 お面を選ぶ様子

手にとってかざすと、選んだ隈取が自分の顔に張り付くと笑いが起き、多くの方が歌舞伎役者になりきり、トーチを構えて記念写真を撮る光景を見ることができました。

まとめ

新型コロナウイルス感染拡大の影響で、体験人数は計画より少なくなりましたが、体験を提供できた会場では、体験者に驚きと笑顔を提供す

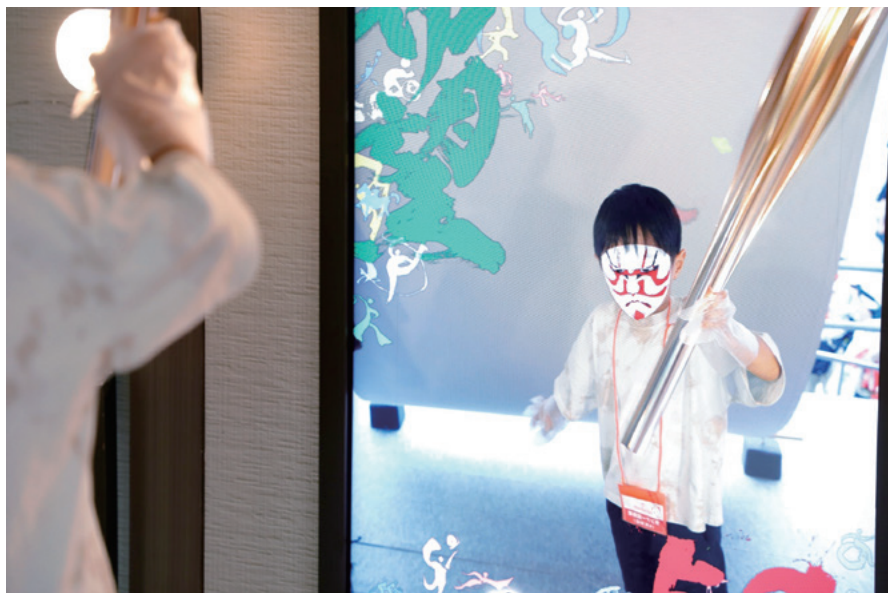


図7 トーチ記念撮影コーナー歌舞伎バージョン体験の様子

ン会場にて、Kirari!トラックを運営してくださった、メンバの皆様へ感謝申し上げます。

■参考文献

- (1) 内田・足利・井元・我妻・日高：“イマーシブプレゼンス技術“Kirari!”のコンセプト,” 2015年度 画像電子学会第43回年次大会 予稿集, p.39, 2015.



図8 高さ1.2 mの巨大な立体顔面オブジェクト

ることができました。普段直接触れることのない、研究所の先端技術と接することで、NTTの先進性のイメージにつなげることができたと考えています。

NTT研究所は、これからもICTを活用した新しい体験の創造に取り組み、人

と人をつないでいきます。

謝 辞

運営に携わっていただいた、東京2020組織委員会の皆様、各自治体の皆様に感謝申し上げます。また、セレブレーション



(上段左から) 美原 義行/ 長田 雅美/
長谷川馨亮/ 中村 泰治
(下段左から) 渡邊 淳司/ 松井 龍也/
岩本 秀明

◆問い合わせ先

NTTサービスイノベーション総合研究所
E-mail svkoho-ml@hco.ntt.co.jp

カテゴリ2 東京2020を『彩った』NTT R&Dの技術

聖火ランナー応援演出 × Swarm通信制御技術

NTTは、東京2020オリンピック聖火リレー、大阪・横浜で「NTT presents東京2020オリンピック 聖火リレーセレブレーション」を開催し、聖火ランナーやトーチキスをロボットの映像表現による空間演出で迎え入れる、聖火ランナー応援プログラムを実施しました。本稿では、聖火ランナー応援プログラムを実現したディスプレイ・ボットの制御技術について紹介します。

すずき まさふみ ちぎら ひろし
鈴木 督史 / 千明 裕
やまぐち ひとし いんどう たくや
山口 仁 / 犬童 拓也
きのした しんご
木下 真吾

NTT人間情報研究所

概要

NTTはアートとテクノロジーの融合による新たな体験創出に取り組んでおり、その研究成果の1つがディスプレイ・ボットを用いた空間表現“Art of Swarms”です。この空間表現は、多数のディスプレイを搭載したロボット群が地上を協調的に動き、有機的に形を変えながら映像空間を生成していくものです。床面全体をプロジェクションする表現とは異なり、物理的な質量を持ったディスプレイ・ボットが“群れ”として動きながら映像空間をつくりあげることにより、従来にないタンジブルな映像体験を行うことができます。

NTTでは、この空間表現のコンセプトを2018年のNTT R&Dフォーラムで初めて紹介しました。これを皮切りに、2018年にはオーストリア・リンツで行われた世界最大のアートフェスティバルでのデモンストレーション、2019年7月の「スポーツ観戦の再創造展」での展示など、規模を拡大しながらディスプレイ・ボットの演出効果を検証してきました。特に、「スポーツ観戦の再創造展」では30台を超えるディスプレイ・ボットの群れと、中山晃子氏⁽¹⁾、和田永氏⁽²⁾といった著名アーティストとのコラボレーショ

ンを行いました。ディスプレイ・ボットの群れを用いたスポーツの表現も行い、鑑賞された多くの方から高い評価を得ることができました。

これら実証実験の知見を活かし、この空間表現“Art of Swarms”を東京2020オリンピック聖火リレーに適用し、聖火ランナーの瞬間をより感動的に体験してもらい、多くの人にNTTの通信テクノロジーとアートの融合の可能性を感じてもらうことにチャレンジしました。具体的には、「NTT presents東京2020オリンピック 聖火リレーセレブレーション」において、会場に到着する聖火ランナーを迎え入れる祝祭を演出しました（図1、

2）。

■NTT presents東京2020オリンピック 聖火リレーセレブレーション

大阪：2021年4月13日 万博記念公園・太陽の広場前

横浜：2021年6月30日 赤レンガ倉庫・イベント広場

当初この2つのイベントでは、現地で多くの方々に見ていただく予定でしたが、新型コロナウイルス感染拡大の影響で一般応募による現地観覧は中止となり、オンラインで楽しんでもいただきました。

演出においては、世界的なメディアアート研究機関であるアルスエレクトロニカと連携し、感動的なシーンの創出をめざ



図1 大阪のトーチキスシーン

してきました。当初は、アルスエレクトロニカのメンバーも来日して、NTTのメンバーと現地でオペレーションなどに携わる予定でした。しかし、新型コロナウイルス感染拡大の影響で来日できず、オンラインでオーストリアからのサポートとなりました。

システム構成および利用技術

ディスプレイ・ボットは、六角形のディスプレイを搭載した地上走行型のロボットです(図3)。上部のディスプレイ部と、下部の走行機能部からなり、それぞれ独立に動作します。この機構により、ディスプレイ面を一定の方向に保ちながら、任意の方向に移動することが可能となり、空間映像表現の幅を広げます。上部は、ディスプレイのほかに、通信、測位、ディスプレイ・ボットの動作制御のための装置が配置されています。下部には、走行機構とバッテリーが配置されています。

ディスプレイ・ボットを含むシステム全体の概要図を図4に示します。編集システムとは、最終的に表現したい空間全体の映像表現を基に、複数のディスプレ

イ・ボットの動かし方、割り当てる映像コンテンツがプログラムされているシナリオを生成するためのシステムです。次に、制御システムから、そのシナリオや映像コンテンツをディスプレイ・ボットに配信し実行します。このようにして、ディスプレイ・ボットによる群れとしての有機的な動きを実現しています。

ディスプレイ・ボットどうしが10数センチのレベルで近接しながら動作をする

ために、各ディスプレイ・ボットの位置を正確に計測する必要があります。従来の実証実験は屋内で行われたため、測位には赤外線搭載カメラと反射マーカを用いたモーションキャプチャを用いましたが、今回の聖火リレーイベントは、屋外となるため、適用が困難となりました。屋外では、GPSの利用が一般的ですが、通常のGPSの測位精度は数メートル以上になり、そのまま適用することはでき



図2 横浜のトーチキスシーン

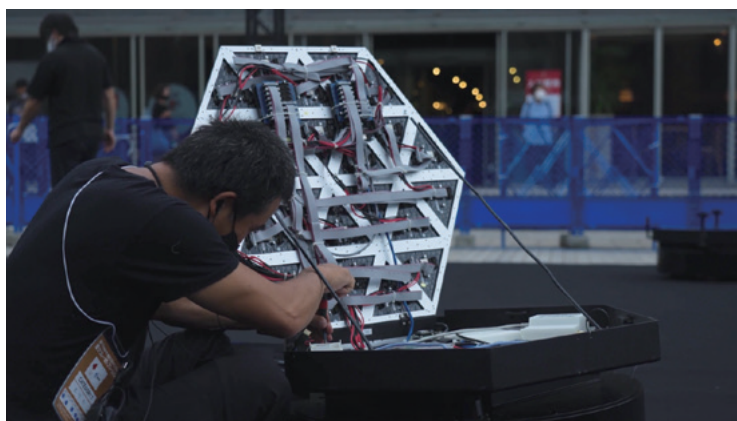
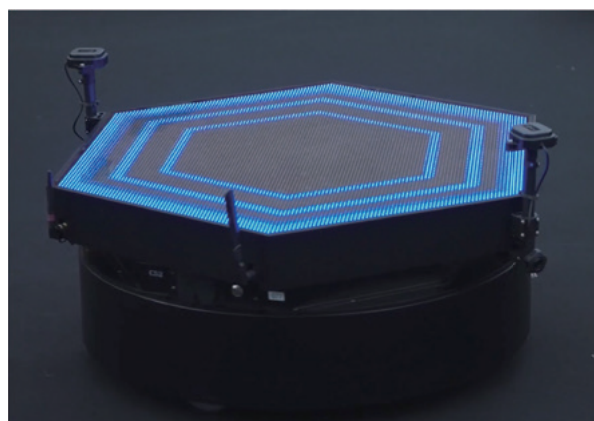


図3 ディスプレイ・ボット

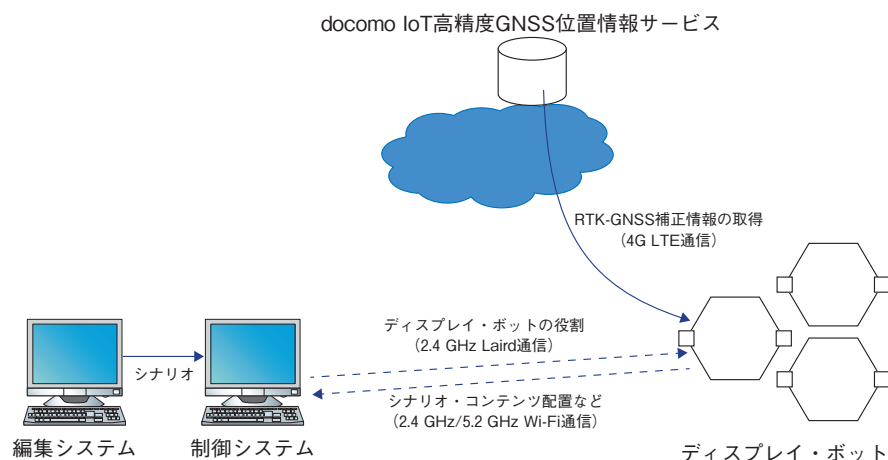


図4 システム全体の構成概要

ません。そこで今回は、RTK-GNSSという高精度測位システムを採用しました。しかし、RTK-GNSSは、まだ利用実績も少なく、しかも、今回のように60台規模の同時制御は、世界初のチャレンジとなります。RTK-GNSSは、通常のGPSアンテナから取得される測位情報に加えて、基準局と呼ばれる別の位置での観測データを基にリアルタイムで作成される補正情報を用いることで、屋外においても高精度（数センチの誤差）な測位を可能にします。今回は、RTK-GNSSに、NTTドコモのサービスである「docomo IoT高精度GNSS位置情報サービス⁽³⁾」を適用しました。RTK-GNSSを用いれば正確な位置情報を取得することが可能となりますが、正確な方向を計測することはできません。正確な方向が把握できない場合、各ブランドボットのディスプレイの方向がバラバラとなり全体の映像が乱れてしまいます。今回、ディスプレイ・ボットに、対角上に2本のアンテナを搭載し、その差分情報を用いて方向取得を行いました。

ディスプレイ・ボットは、制御システ

ムとの通信用に独自規格であるLaird通信（2.4 GHz）とWi-Fi通信（2.4 GHz/5.2 GHz）を、docomo IoT高精度GNSS位置情報サービスとの通信用にモバイルルータでの4G LTE通信を使用しています。

走行開始時には、オペレータの操作を契機に制御システム側からシナリオが各ディスプレイ・ボットに無線通信で一斉に伝達され、各ディスプレイ・ボットがシナリオに沿って走行を開始します。ディスプレイ・ボットは、シナリオに沿った動作をしますが、制御システムとも常に協調して動作することで、万一の場合の一斉停止や減速などのオペレータ指示によるリアルタイムでの制御も可能になっています。

テスト

100台のディスプレイ・ボットを用いたテストには、それを保管、充電、走行が行えるほど十分に広く、RTK-GNSS用の衛星電波が受信できるほど見通しの良い空間が必要となります。今回は、そ

の条件を満たすNTT筑波研究開発センタ（茨城県つくば市）でテストを行いました。東京2020大会の開催延期決定後、テストを再開した時点では、アルスエレクトロニカのメンバーと共同でイベント本番に臨む予定でした。しかし、新型コロナウイルス感染は、私たちの期待どおりに収束することではなく、本番に来日できない可能性が日増しに高まってきました。その結果、早い時期に以下の方針転換を行いました（図5、6）。

- ・本番および筑波での制御や準備は、NTTを中心とする日本側のメンバーのみで実施
- ・アルスエレクトロニカのメンバーは来日せず、オンラインでオペレーション等をサポート

この結果、本来、アルスエレクトロニカのメンバーが担当する予定であったハードウェアのトラブル対応、問題発生時の状況把握や分析など、NTTの担当者では不慣れな作業も多く、オーストリアへの問合せ対応を遠隔で行う稼働が多くなりました。オーストリアとの時差の問題もあり、時間的にも制約が多い中、テストや問題分析・対処を効率的に進める必要がありました。

本番

2021年4月13日、万博記念公園の太陽の広場前で第1回目のイベント本番を迎えました。万博記念公園を象徴する太陽の塔が正面に見える場所において、その日の最終聖火ランナーによるトーチキスの瞬間をディスプレイ・ボット群による空間表現で迎えます。

準備のため大阪入りした4月7日ご

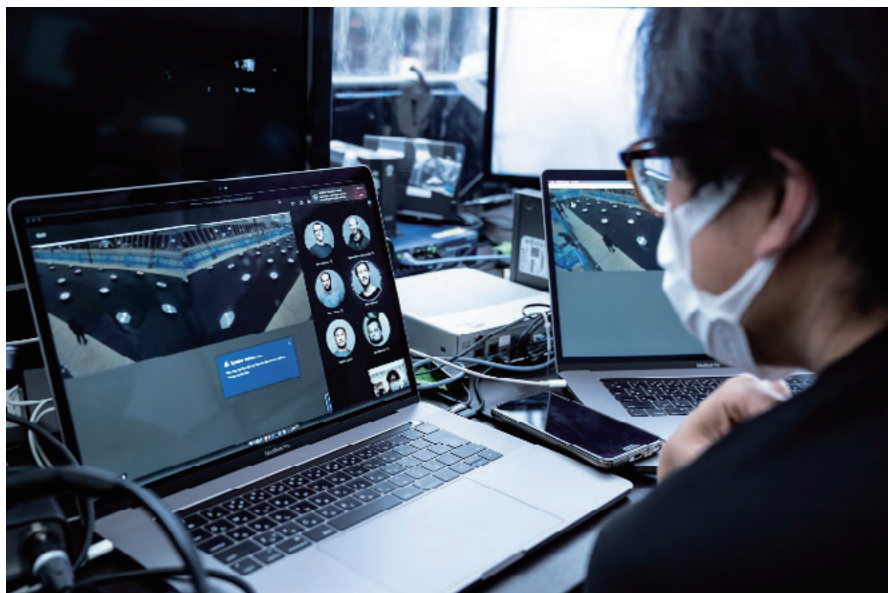


図5 アルスエレクトロニカのメンバーとのリモート連携



図6 NTT筑波研究開発センタでの検証

ろ、大阪府内の新型コロナの新規感染者数が急増しはじめ、3回目の緊急事態宣言発令が懸念されるようになりました。結局、4月7日に、公道での聖火リレー

の中止と、代替となる万博記念公園内での聖火リレー実施が発表されました。これに伴い、4月13日のイベント本番の中止は避けられましたが、無観客での開催

となりました。また、緊急事態宣言中につき日没後に赤くライトアップされた太陽の塔前での演出を避けるようにとの大阪府からの要請がありました。それにこたえるため、本番開始時間を日没前に早める必要がありましたが、ディスプレイ・ボットは暗闇の中で映像群が動くことによって、不思議な空間表現をつくり上げるため、日没前の実施は、その魅力を大きく損わせてしまう可能性がありました。また、大阪に到着してからディスプレイ・ボットのハードウェア故障が多数発生したことや、現地でのGPS受信状況が悪く事前リハーサルで測位に失敗したことなどを踏まえ、大阪での本番は安全を考慮しディスプレイ・ボット48台を静止した状態で行うことにしました。本番は、雨天の厳しい中、静止したディスプレイ・ボットが聖火ランナーを迎え入れ、トーチキスに合わせてディスプレイ・ボット上に光が連動して広がっていく表現となりました。

大阪イベント終了後、6月30日に行われる横浜イベントに向けて、大きく2つの課題を解決する必要がありました。1番目は、故障したディスプレイ・ボットの修繕です。全体の半数以上に何らかのトラブルがあり、本番に向けてはトラブルの解析や修理などを迅速に行い、なるべく多くの動作可能なディスプレイ・ボットを確保する必要がありました。ディスプレイ・ボットの修繕に関しては、オーストリアに返送して修理を行う必要があるもの、日本で対応できるものなどを、切り分けたあと、全体の演出に必要な台数、修理にかかる日数、テストに必要な日数など、あらゆる状況を考慮し、修繕計画をつくり上げ、日々の状況によって、

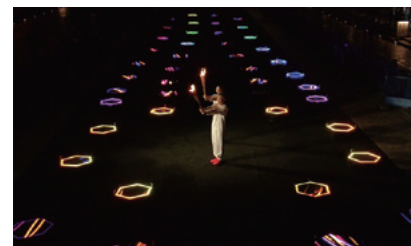
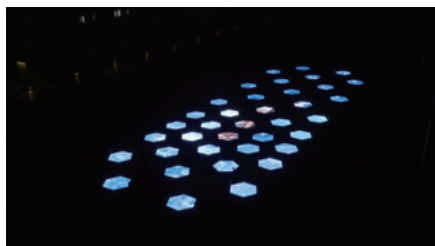
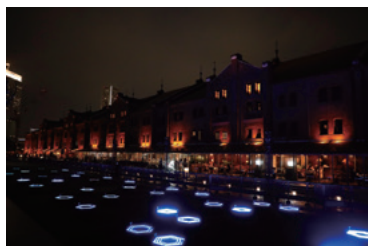


図7 横浜での聖火リレー応援演出

計画をダイナミックに変更していきまし
た。その結果、本番までに48台の正常な
ディスプレイ・ボットを確保することが
できました。

2番目は、不安定となる測位の改善で
す。測位は、本番当日のGPS衛星の配
置や周辺環境による影響が大きく、同じ
場所で事前テストを行い、良い結果が得
られたとしても、本番でも同様の結果が
得られるとは限りません。そこで、2つ
の方法で、測位の確実性を高めました。

1番目は、アンテナ設置方法の改善で
す。大阪の経験から、アンテナの位置を
高めることが、測位の安定化につながり
やすいことが分かっていた。しかし、
あまり高すぎるアンテナの設置は、アン
テナ固定を難しくしたり、見た目を悪く
したりするなど課題も多かったため、バラ
ンスの良い高さを見つける必要がありま
す。さまざまなテストを行った結果、ディ
スプレイ面から15 cm程度の高さが最適
となりました。2番目は、フェイルセー
フな測位の実現です。もしRTK-GNSS
による測位が失敗した場合でも、測位を
続けられるようにします。そのために、
私たちは、ディスプレイ・ボットの車輪
の回転量等を用いて位置と方向を推定す
るオドメトリ手法を利用しました。

2021年6月30日、横浜赤レンガ倉庫で
第2回目のイベント本番を迎えました。

新型コロナの状況を踏まえ、大阪同様、
一般応募による現地観覧は中止となり、
オンライン配信のみでの実施となりました。
ディスプレイ・ボットは、リハーサル
から本番までの間、故障することはない
く、また、測位も、安定しておりほとん
ど失敗することがありませんでした。ディ
スプレイ・ボットのプログラムは、赤レ
ンガ倉庫1号館・2号館に挟まれたエリ
アで、その日の最後のトーチキスを48台
のディスプレイ・ボットが動きながら映
像とともに幻想的な空間を演出し、最終
ランナーを聖火皿への点火へと送り出す
ことができました(図7)。

まとめ

今回、大阪・横浜ともに一般応募によ
る現地観覧は中止となったことで、一般
の方々には現地でディスプレイ・ボット
の演出を体験いただくことができません
でした。しかしながら、オンラインの配
信を通じて、聖火ランナーの周囲を彩る
ディスプレイ・ボットの群れの光と動き
による演出を楽しんでいただくとともに、
東京2020オリンピック聖火リレーの象徴
的なシーンとして開会式など多くのメ
ディアで取り上げられたことは大きな成
果でした。

今後も、アートとテクノロジーの融合の
さらなる可能性について検討を進める予

定です。

謝辞

今回のディスプレイ・ボットによる聖
火ランナー応援プログラムの実施にあ
たっては、イベントの実施に理解をいた
だいた大阪府や神奈川県の皆様、本番
だけでなく事前のリハーサルや検証でもご
協力いただいた電通・電通ライブの皆様、
アルスエレクトロニカのメンバー、その
他多くの皆様にご協力いただきましたこ
とを深く感謝いたします。

参考文献

- (1) <http://akiko.co.jp/akikoweb/>
- (2) <https://eiwada.com>
- (3) https://www.nttdocomo.co.jp/biz/service/highprecision_gnss_positioning/



(左から) 鈴木 智史/ 千明 裕/
山口 仁/ 犬童 拓也

◆問い合わせ先

NTTサービスイノベーション総合研究所
E-mail svkoho-ml@hco.ntt.co.jp

カテゴリ2 東京2020を『彩った』NTT R&Dの技術

聖火リレーセレブレーションステージ演出 × 超高臨場感通信技術 Kirari!

なかむら たいじ は せ が わ けいすけ み は ら よしゆき みやたけ たかし
中村 泰治 / 長谷川 馨亮 / 美原 義行 / 宮武 隆
きのした しんご
木下 真吾

NTT人間情報研究所

概 要

2021年3月25日に福島県をスタートした東京2020オリンピック聖火リレーは、全国47都道府県を121日間かけて、1万515人のランナーによってつながれました。聖火リレーは、主に、聖火ランナーの公道走行とその日の最終地点でのセレブレーションからなります。セレブレーションでは、その日の最終ランナーによる聖火皿への点火、地元住民やスポンサーによる歌やダンスのステージ、聖火リレートーチ記念撮影コーナーなどの展示出展が行われ、聖火リレーを盛り上げます。

NTTは、セレブレーションの拡大版として、4月13日の大阪と6月30日の横浜において「NTT Presents 東京2020オリンピック聖火リレーセレブレーション ～CONNECTING WITH HOPE ひとりひとりの、希望の光をつなぐ～」を開催しました。この拡大版セレブレーションでは、聖火ランナーによって聖火が届けられるほか、GENERATIONS from EXILE TRIBEのライブパフォーマンス、中学生とEXILE ÜSA, EXILE TETSUYAによる『Rising Sun -2020-』のパフォーマンス、書道家の武田双雲による「書」を使ったパフォーマンスなど

が行われました。当初は、5000人規模の一般観客を招待する予定でしたが、新型コロナウイルス感染拡大のため、両会場とも一般観覧は中止としオンライン配信としました。

NTT研究所は、通信によって、人々をつなぎ感動の増幅と共有をもたらす新しいエンタテインメントやアートのあり方を探るために、超高臨場感通信技術 Kirari! を用いて歌舞伎や音楽ライブ、ファッションショー、スポーツなどの超高臨場感ライブ中継やステージ演出の実証実験を行ってきました（図1）。

今回は、こうした実証実験の結果をベースに、拡大セレブレーションの

GENERATIONS from EXILE TRIBEのライブパフォーマンスにおいて、Kirari! を用いたコロナ禍ならではの3つの新しいステージ演出、①リモートパフォーマンス、②リモートビューイング、③リモートファンコラボにチャレンジしました。

ステージ演出の詳細

■ リモートパフォーマンス

コロナ禍においては、アーティストどうしでさえ集まることが難しくなっています。特に海外など遠く離れている場合はなおさらです。こうした環境でも通信のちからを使って、あたかも同じ場所で



図1 Kirari! を用いた実証実験

パフォーマンスをしているかのような体験をつくるのがこのリモートパフォーマンスの目的です。

今回のステージでは、離れた場所にいるアーティストたちによって『Choo Choo TRAIN』のロールダンスをつく

り上げることにチャレンジしました。本来であれば、遠く離れた会場にいるアーティストどうしをコラボレーションさせるのですが、今回は、模擬体験いただくために、ステージの2カ所を遠隔地として、ステージ上部の透明スクリーンをバー

チャルな共有空間として見立てました。具体的には、図2のステージ上の①と②が遠隔地で、③の透明スクリーンが共有空間です。①もしくは②で踊ったアーティストの映像が③に伝送されます。このときKirari!!によって背景映像は切り取られ、アーティストのみの映像が伝送されます。③の透明スクリーンに映し出された映像は、立体的に見えるため、あたかも本人がそこで踊っているかのような体験をつくり出します。5人のアーティストが順番に踊っていき、その都度、③の透明スクリーンにアーティストが増えていき（図3(a)）、最後、全員が踊り終わると5人の映像が1つに重なり合っ



図2 ステージ構成



(a) リモートパフォーマンス（右下のアーティストがリアル、上部がバーチャルな映像）



(b) リモートパフォーマンス（完成時）

図3 Kirari!!による『Choo Choo TRAIN』のロールダンス

を面白くするために、このような時間差をおいた演出にしましたが、技術的には、一斉に踊るアーティスト全員の映像をリアルタイムに抽出し、伝送することも可能です。

■リモートビューイング

コロナ禍においては、ファンも本会場に行くことが難しくなっています。特に、大都市で開催される音楽ライブへ地方のファンが行く場合はなおさらです。こうした環境でも通信のちからを使って、あたかも目の前でアーティストがパフォーマンスをしているかのような体験をつくるのがこのリモートビューイングの目的です。

今回は、メインステージにいるアーティストの映像を、ファンがいる別の遠隔ステージに転送することにチャレンジしました。本来であれば、遠く離れた遠隔会場に届けるべきですが、今回は、模擬体験いただくために、横浜会場内の離れた場所に設置したKirari!トラックに転送しました(図4)。Kirari!トラックには、メインステージと同様の透明スクリーンが設置されており、Kirari!によって転送されたアーティストがホログラフィックに表示されることにより、まるで目の前に本人がきてパフォーマンスをしているかのような体験をつくり上げました(図5)。

■リモートファンコラボ

コロナ禍においては、ファンとアーティストとの交流も難しくなっています。たとえば、ファンが会場に行けた場合でも、これまでのような握手会などの体験は難しくなりました。こうした環境でも通信のちからを使って、あたかも自分の隣に

アーティストが来て一緒にパフォーマンスをしてくれるかのような体験をつくるのがこのリモートファンコラボの目的です。

今回は、メインステージにいるアーティストを、会場にいるファンの隣に転送する2つのチャレンジを行いました。1つ

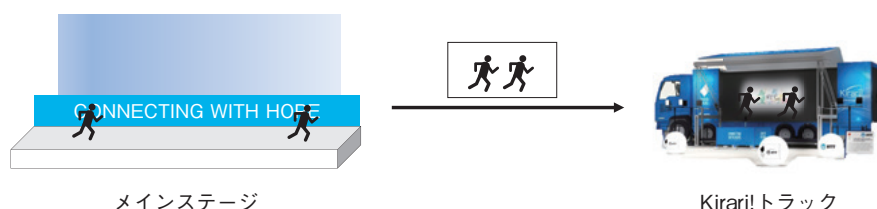


図4 リモートビューイングの構成



図5 リモートビューイングの様子

は、ステージ上のアーティスト映像をKirari!によって抽出し、ステージ上のモニターに表示されているファンの映像に重ね合わせることで、アーティストと観客席のファンとの仮想的な「隣にいる感」を実現しました（図6）。もう1つは、同様にKirari!によって抽出したアーティストの映像を遠隔に設置したKirari!トラックに転送し、その中にいるファンの隣にアーティストが転送されてきたような感覚をつくり上げました。

技術

ここでは、Kirari!を構成する技術の1つである、任意背景リアルタイム被写体抽出技術について説明します。任意背景リアルタイム被写体抽出技術⁽¹⁾とは、グリーンバック等を使わなくても、映像

の中から特定の被写体を抽出できる技術です。NTTは、この技術を用いて被写体抽出をシステム化した「KIRIE」⁽²⁾を2018年に開発しており、今回のステージ演出にも活用しました。

KIRIEでは、背景差分のみを用いた方式と、背景差分と機械学習を組み合わせた方式の、2つの方式を切り替えて被写体抽出を行います。

背景差分を用いる方式では、事前に被写体がない状態の画像を背景として取得しておき、その背景と撮影している映像の差分をとることで、被写体が映っている領域を特定します。

一方、機械学習を用いる方式では、前述の背景となる画像に加えて、被写体と背景が同時に映った画像を複数枚撮影しておきます。そして、背景となる色と抽

出したい被写体の色の組み合わせを教師データとして学習させておくことで、どの領域が被写体に相当するかを判定します。

背景差分のみを用いる方式では、事前の学習作業がいらないというメリットがある一方で、背景に近い色の被写体は抽出しづらいというデメリットがあります。さらに、背景が少しでも変化すると抽出精度が低下してしまう、というデメリットもあります。他方、背景差分と機械学習を組み合わせる方式では、背景と被写体の色が近い場合でも抽出できる、背景の変化にも対応できる、などのメリットがある一方、事前の学習作業が必要な点はデメリットとなります。

今回のステージ演出では、出演者の方が前日のリハーサルに参加可能であり、



(a) アーティストが客席のファンの隣に転送され一緒にダンス



(b) アーティストがKirari!トラックの中のファンと交流

図6 リモートファンコラボの様子

出演者の方が当日着用する衣装の色が決まっていた場合には、背景差分と機械学習を組み合わせた方式を用いることで、より高精度な被写体抽出をめざしました。一方、出演者の方が前日のリハーサルに参加できない場合などは、背景差分のみを用いた方式で被写体抽出を行いました。

結 果

オンライン配信となった拡大版セレブレーションですが、YouTubeLiveでは10万回再生、最大同時接続数が1.2万接続、となるなど、多くの方にご覧いただくことができました。また、SNSでも多くの方からご好評をいただき、9割以上がポジティブな反応となりました。

被写体抽出については、リモートパフォーマンス、リモートビューイング、リモートファンコラボのいずれにおいても高い精度で被写体抽出が行えました。前日のリハーサルでは雨が降っていたが当日のリハーサルでは晴れた、といったように背景の色が変化しがちな条件においても、背景差分と機械学習を組み合わせた被写体抽出により、視聴に問題ない精度での抽出が行えました。また、当日急遽演出が変更され、前日のリハーサルと異なる方が抽出対象となったケースもありましたが、背景差分のみを用いた方

式でもおおむね良好な抽出結果が得られました。また、KIRIEの処理遅延は平均166 msとなり、低遅延かつ高精度なリアルタイム被写体抽出が実施できました。

ま と め

聖火リレーの拡大セレブレーションにおいて、Kirari!を用いた3つのステージ演出、リモートパフォーマンス、リモートビューイング、リモートファンコラボを行いました。新型コロナウイルス感染拡大に伴い、一般観覧は中止となりましたが、オンライン配信を通じて、数万人の視聴者に、コロナ禍における新しいリモートエンタテインメントの可能性を示し、好意的な評価をいただきました。NTT研究所は、今回のチャレンジを第一歩として、ニューノーマル時代にふさわしい新しいライブエンタテインメントのかたちの創造に向け、さらに研究開発を推進していきます。

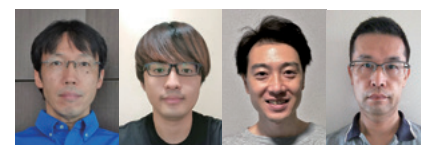
謝 辞

今回のプロジェクト推進にあたり、一緒に検討を進めていただいた、東京オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会、大阪府、吹田市、神奈川県、横浜市、パートナー会社の皆様に感謝いたします。また、拡大版セレブレーションのステージを飾っていただいたGENERATIONS

from EXILE TRIBE、出演者の皆様に感謝いたします。

参考文献

- (1) 柿沼・長尾・宮下・外村・長田・日高：“機械学習を用いた任意背景リアルタイム被写体抽出技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.30, No.10, pp.16-20, 2018.
- (2) 長尾・宮下・佐野・長谷川・井阪：“Kirari! for Arena：奥行感のある4方向イベント観覧体験の創造,” 日本画像学会誌, Vol.58, No.3, pp.306-315, 2019.



(左から) 中村 泰治/ 長谷川 馨亮/
美原 義行/ 宮武 隆

◆問い合わせ先

NTTサービスイノベーション総合研究所
E-mail svkoho-ml@hco.ntt.co.jp

カテゴリ2 東京2020を『彩った』NTT R&Dの技術

聖火リレー地域イベント × 音声認識通信技術

NTTは、聖火リレー地域イベントとして、地域の小学校にて聖火リレー応援体験イベントを実施しました。本イベントでは、音声認識通信技術を活用し、応援する小学生の声援を文字として可視化してランナーに送り届ける演出に加え、応援演出システムを小学生と一緒に作り上げることで一体感を醸成する、新たな応援体験を提案しました。本稿では、実施したイベントの概要と、小学生とともに制作した応援演出システムについて紹介します。

いちかわ ゆうすけ いなば ともひろ おおたに はなえ
市川 裕介 / 稲葉 智宏 / 大谷 花絵
おおわだ ひでなり かねまる しょう かみやま ほさな
大和田 英成 / 金丸 翔 / 神山 歩相名
かわい さきこ こうの あきひろ こやさこ ゆうし
河井 彩公子 / 鴻野 晃洋 / 小屋迫 優士
さかもと かずみつ つばき たくま ひろせ けんた
坂元 一光 / 鰐木 拓磨 / 広瀬 健太
もり ともり よしだ ゆき わい しゅうき
森 友則 / 吉田 由紀 / 和井 秀樹
わたなべ まゆこ みはら よしゆき うすい そういちろう
渡邊 真由子 / 美原 義行 / 薄井 宗一郎

NTT人間情報研究所、ほか

概要

全国を回る聖火リレーのルートに、NTT横須賀研究開発センタ（横須賀通研）も選ばれていました。研究所内で聖火を迎え入れるイベントの運営は、NTT側で行う予定でした。NTT研究所では、このイベントの企画運営に向けて、研究所横断で広くメンバーを募集し、9研究所から集まった18名のメンバーで検討を重ねました。そのメンバーで、NTT研究所では、横須賀通研という場所に聖火を迎え入れるにあたり、今まで交流を重ねてきた近隣住民の方々とともに迎え入れることを決めました。

イベントを企画するにあたり、最初にテーマの設定に取り掛かりました。東京2020オリンピック聖火リレーのコンセプトは、「Hope Lights Our Way/希望の道を、つなごう」です。横須賀通研は、横須賀に1972年に設立され、長きにわたって地域の住民たちと、技術を通じて交流を重ねてきました。この背景と聖火リレーのコンセプトを掛け合わせて、「時代をつなぐ、地域をつなぐ、技術をつなぐ」というテーマを設定しました。聖火

ランナーは、このテーマを基に、ベテラン研究者から、若手研究者、地域学生へとバトンをつなぐ構成となりました。また、応援する観客には近隣小学校（横須賀市立栗田小学校、岩戸小学校）の小学生を招待し、観客を含めて聖火リレー全体で時代と地域をつなぐ構成としました。地域学生ランナーとして、スーパーサイエンスハイスクール等で横須賀通研と交流がある、神奈川県立横須賀高校の生徒に走っていただくことになりました。

このイベントでは、地域と技術をつなぐテーマのもと、応援を通じて小学生たちに研究所の通信技術に触れてもらう機会をめざしました。その中で、新たな聖火リレーの応援体験を提供することを目指して検討した企画が、音声認識通信技術を活用した応援演出システムを用意し、小学生の声援が可視化されてランナーに届けられる体験です。小学生に技術に触れてほしいという思いから、応援演出システムの入力装置として、市販の紙コップと磁石、コイルを用いて自分たちでつくれる「紙コップマイク」を取り入れました。小学生たちには、イベント前に紙コップマイクを制作してもらいま

した。紙コップマイクを自作することで、磁石とコイルで音が伝わる通信の原理を学ぶ機会にもつながったと考えています。

このような準備をしていた中、新型コロナウイルス感染拡大の影響で、2020年3月に聖火リレーとオリンピックが1年延期することが決まりました。1年延期になりましたが、検討メンバーとして変わらず、横須賀通研に聖火を迎え入れる準備を重ねてきました。2021年3月には、予定どおり聖火リレーがスタートしましたが、イベント本番2週間前に、新型コロナウイルス感染拡大を受け、神奈川県が県内公道での聖火リレーの中止を決めました。この影響で、横須賀通研での聖火リレーイベントも中止となりました。中止の決定を受けましたが、検討メンバー全員が持っていた思いは、すでに紙コップマイクの制作に参加協力してくれていた小学生に思い出をつくって欲しいという想いでした。その想いから検討メンバー一丸となって、代替イベントの企画にすぐに取り掛かりました。横須賀通研での集合型のイベントはできないため、応援演出システムを栗田小学校、岩戸小学校の校舎に持ち込み、同様の聖火

リレー応援体験イベントを実施する方針を立てました。検討メンバーで企画してきた、紙コップマイクは、飛沫拡散防止の利点があるだけでなく、マイクなので

大声を出さなくても声が増幅されて応援ができる利点があります。この観点から、コロナ禍の中でも企画を安全に実施できると確信しました。



図1 岩戸小学校での応援体験イベントの様子

私たちの企画を小学校に相談したところ、企画を快諾くださり、栗田小学校は体育館での実施が、岩戸小学校は視聴覚室での実施が決まりました。参加対象は、それぞれ小学6年生となりました。本来聖火リレーを実施する予定であった6月29日に両校同時に実施しました(図1)。参加者数は、栗田小学校61人、岩戸小学校46人、合計107名となりました。

応援演出システム

応援演出システムは、紙コップマイクを通じて発せられた小学生の声を、音声認識通信技術を用いて可視化するものです。全体のシステム構成は図2となります。声の音声を取得するため、紙コップマイクとスマートフォンを1台ずつ接続

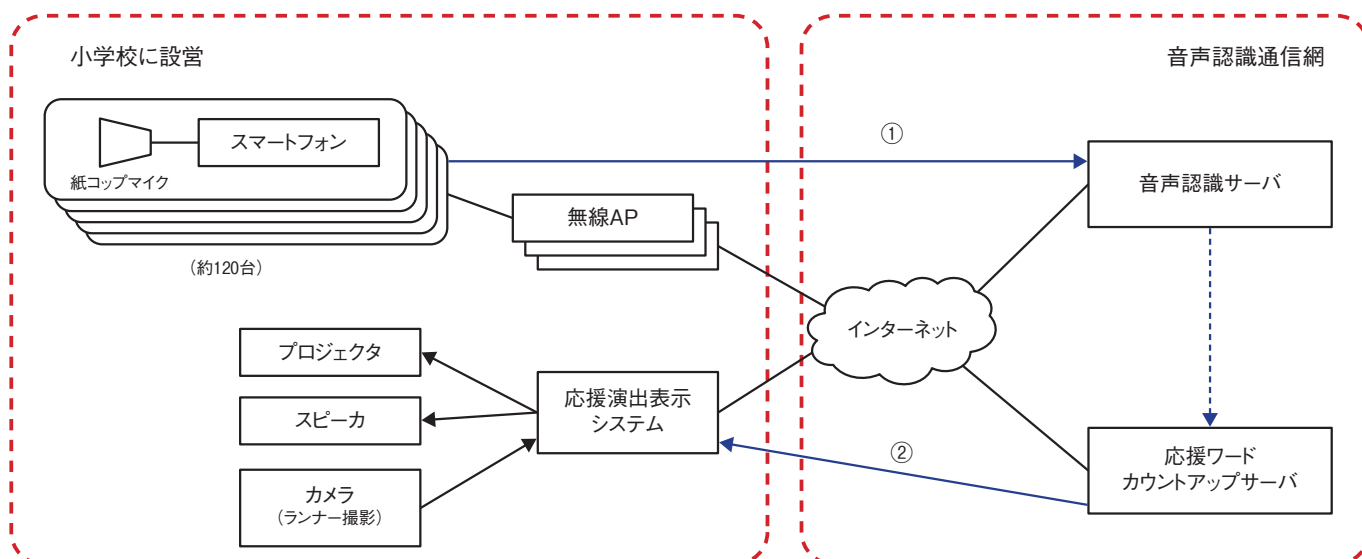


図2 システム構成概要

します。紙コップマイクで集音した音声はスマートフォンを通じて、音声認識通信網に送られます（図2①）。音声認識通信網では、通信の間に音声の内容を文字化して出力します。音声認識通信網を通じて出力された音声の内容は、会場内のプロジェクトにて表示され、ランナーに見えるようになります（図2②）。今回、特定の「がんばれ」「ファイト」という応援ワードに限定することで認識精度を高めました。応援ワードの発生回数もカウントし、応援ワードの集計結果に応じた演出を会場のプロジェクトで投影する画像、およびスピーカに出力し、紙コップマイクで集めた声援を可視化してランナーに届けます（図3）。

技術

■音声認識通信技術

紙コップマイクで集音した音声は、S/N比が低く、音声に必要な帯域の周波数が落ちてしまう問題がありました。結果として、音素（/a/、/i/、/u/、/e/、

/o/などの音の種類）認識に失敗することが、本システムを実現するうえでの課題となりました。このため、紙コップマイクの特性に合わせた学習モデルを新規に構築、チューニングを実施しました。本イベントに対しては、指定した応援ワードを漏れなく認識することが重要です。したがって、認識するワードを限定したうえで、適合率（精度）より再現率（感度）を優先したチューニングを行うことで、応援の体験価値を向上できました。

また、音声認識通信技術に声援を送るため、小学生に紙コップマイクを制作してもらいました。紙コップマイク制作は2012年に開催の「NTT横須賀研究開発センター 一般公開」の子ども科学教室にて実施した実績がある技術教育コンテンツです。今回のイベントにおいては、学校側から割り当てられた時間（2時間120分）以内に全員が制作完了する必要があるため、検討会メンバーにて試行を繰り返し、作業に手間取るポイントを特定、ハサミを使用した作業個所の省略な

ど工夫し、制作キット化したものを用意することで、全員が同じ時間内の完成を実現しました。制作当日の様子を図4に示します。

当日は、紙コップマイクが完成した生徒から順に、スマートフォンへ接続、音声を録音、録音した音声をスピーカから再生し、動作確認を行う手順としました。実際にスピーカから音声再生されると、生徒からは「おー！」と感嘆の声が出るなど、楽しみながら音声を通信する仕組みを学んでもらうことができました。

結果

応援体験イベントでは、学校の先生たちが教室や体育館の中でトーチを持って走り、次のランナーの先生のところまで行くと、トーチの先端を重ねるトーチキスを擬似的に実施しました。この疑似リレーは約15分間にわたって行い、その間、小学生たちは必死に大声をこらえながら、応援を続けました。大声での声援ではないものの、紙コップマイクで声が増幅されて大きな声援になっただけでなく、ランナー走行の間に約9000もの応援ワードがカウント表示され、大いに盛り上がり終了しました。イベント終了後、参加した小学生全員からもらった感想文（完全自由記述形式）において、「紙コップマイクで音がでた時すごうれしかった」「普通の声で話してみたけど本当にマイ



図3 表示される応援演出の例（画面中央は実際のランナーの映像を合成表示）

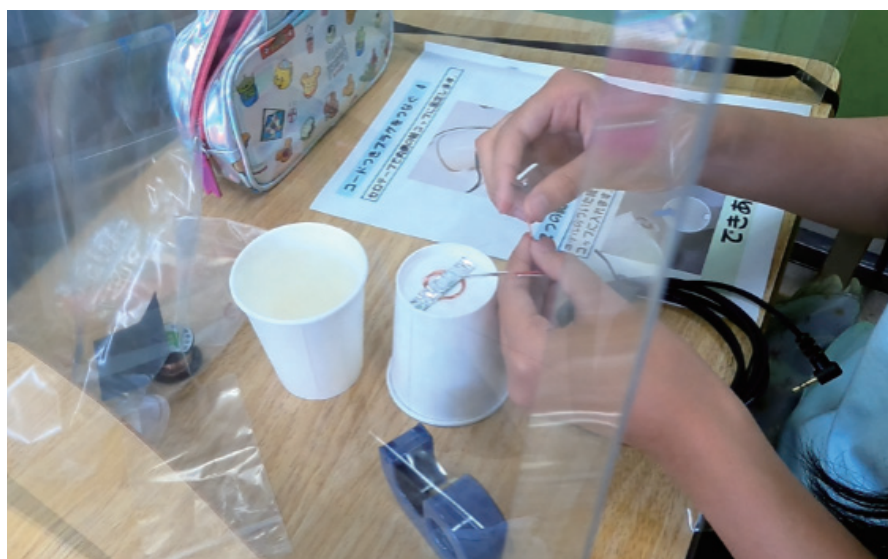


図4 紙コップマイク制作の様子

クだった」「紙コップマイクで応援をしてほんもののマイクのようになっていてすごい」と、ただ単に楽しいというだけでなく、今回の応援体験が技術への興味につながったことが分かりました。「なんであんなふうになるのかを知りたい」等、技術のさらなる根幹に興味を持った感想もみられました。

また、両校の校長から、「さまざまな通信の技術が身近な施設で研究されていることを知れたことは、地域を学ぶうえでも良かったと思っています」（栗田小学校 金子校長）、「NTTの研究されていることや、その技術に触れさせていただくことは、キャリア教育のうえでもとても意義のあることでした」（岩戸小学校 原口校長）と、本イベントが地域交流に

加えて、教育として価値があったとの評価をいただきました。

まとめ

今回、計画していた横須賀通研での小学生を招いたかたちでの聖火リレーは、実現できませんでした。しかしながら、紙コップマイクの制作から、実際の応援まで、小学生が積極的に疑似リレーを体験したことで、当初のテーマであった「時代をつなぐ、地域をつなぐ、技術をつなぐ」を実現できたと考えています。聖火リレーに触れたことで、オリンピックへの機運も醸成できたと考えています。今後も、地域との技術を通じた交流を重ねていき、地域とともに発展を続ける研究所をめざしていきたいと考えています。

謝 辞

本イベントの趣旨をご理解いただき、ご参加いただいた横須賀市立栗田小学校、横須賀市立岩戸小学校の教員、生徒の皆様にご感謝いたします。また、聖火リレーの準備にご協力いただいた神奈川県スポーツ局、横須賀市政策推進部、神奈川県警警備部、神奈川県立横須賀高校の皆様にも感謝いたします。



横須賀スポンサーストップ検討会
メンバー同

◆問い合わせ先

NTTサービスイノベーション総合研究所
E-mail svkoho-ml@hco.ntt.co.jp

特集

NTT Research: Upgrade Realityをめざした 3つのオープンコラボレーション

NTTは、日本の既存の研究所に加えて、「Upgrade Reality」という変革目標とともに、2019年に米国にNTT Research, Inc. を設立した。

本特集では、新たな知識、成果、発見を、論文や共同研究者との共同特許として社会に公開している、3つのオープンコラボレーションについて紹介する。

オープンラボ

研究戦略

ブロックチェーン
エコシステム

バイオインフォマティクス

最適化問題

Upgrade Reality

NTT Research, Inc. のオープンラボ戦略 ————— 34

NTT Research, Inc. が学术界に近い、オープンラボモデルを採用した理由を明らかにし、このモデルがどのように今までの研究体制構築に効果を発揮しているかについて紹介する。

ブロックチェーンエコシステムの安全性、性能、持続可能性を高める ————— 38

安全性を保つ新たなタイプの信頼を提供する技術として注目を浴びている、ブロックチェーンエコシステムの可能性と課題について紹介する。

最適化問題解決の未来：コヒーレントイジングマシン（CIM） ————— 41

最適化問題の新しいソルバーとして注目されているコヒーレントイジングマシン（CIM）の動作原理、およびその性能評価について紹介する。

バイオデジタルツイン研究の最新状況 ————— 44

Medical and Informatics Labにおけるバイオデジタルツイン研究の研究体制の進展、および国立循環器病研究センターを中心としたコラボレーションについて紹介する。

NTT Research, Inc.のオープンラボ戦略

科学研究を進める方法はいくつかあります。企業は、それぞれ独自個別の体制で研究に取り組む傾向にあり、それに対して学術界は、よりオープンな共同体制で研究を進める傾向にあります。本稿では、この2つのアプローチを基礎研究と応用研究という観点から比較します。さらにNTT Research, Inc. が学術界に近い、オープンラボモデルを採用した理由を明らかにし、このモデルが実際にどのように今までの研究体制構築に効果を発揮しているか解説します。

おざわ ひであき
小澤 英昭

NTT Research, Inc. COO/CTO

研究体制における独自モデルとオープンモデル

数10年前まで、企業は社内リソースのみで研究を進めるのが一般的でした。その典型的な例の1つがBell Telephone Labsです。American Telephone & Telegraph (AT&T) 社とWestern Electric社のエンジニアリング部門を母体とし、現在はNokia Bell Labsとして知られるこの有名な研究機関は、電子トランジスタをはじめとする多くの画期的な技術を生み出してきました。数1000件の特許を含む、こうした成果は、Bell Labsの従業員による基礎物理学と応用物理学の研究が実を結んだものです。一方で小規模な1つの例として、Bell Labsの元エンジニア、Chester Carlson氏の研究成果があります。彼は自分の個人的な研究所で、後に「ゼログラフィ (Xerography)」と呼ばれるドライコピー技術を開発し、特許を取得しました。トランジスタとゼログラフィの技術は、20世紀に非常に大

きな事業へと成長しました。

しかし、現在の米国企業の多くは、自動運転や、深層ニューラルネットワークに基づくAI (人工知能) など、基礎研究ではなく製品やサービスの応用研究に重点を置いています。基礎研究は企業ではなく大学の領域とみなされており、今日もその傾向は変わっていません。基礎研究は将来的にさまざまな製品やサービスとしてかたちになる可能性があります。有益な結果を達成するには非常に長い時間がかかり、また研究開発の過程では多くのリスクを想定する必要があります。必ずしも短期的なROI (Return of Investment) に寄与できるとは限りません。

NTTは、日本の既存の研究所に加えて、「Upgrade Reality」*1という変革目標とともに、米国にNTT Research, Inc. を設立しました。NTTは、基礎研究に取り組むことで、将来的に全く新しいビジネス価値を生み出すことができると考えています。研究所を運営するうえでは、NTT Research, Inc. が適当と思われる研

究者をすべて直接採用して基礎研究を進めるとすれば、理屈のうえでは研究で得られる新たな知識と発明権を独占することも可能です。しかし、私たちは別の道を選びました。今後の世代が直面する多くの課題が極めて複雑で密接に関係していると考えています。例えば、医療がめざす目標の1つは、患者を病気から回復させ、健康を容易に維持できるようにすることです。患者1人ひとりの体質はそれぞれ異なるため、将来は各人に適した正確な医療を提供することが望まれると考えられます。各患者に適した精密な医療をめざすのであれば、医学的知識だけでなく、生物学的な知識等も必要になり、また、創薬、センシング、ビッグデータ分析、治療材料などに関する知識も必要です。精密な医療を提供するには、こうした技術の精度を高める必要があります。

このため、できるだけ多くの知見、

*1 Upgrade Reality : 現状を打破して、飛躍的な技術や価値を生み出そうというNTT Research, Inc. のスローガン。

経験、英知を獲得し、精密な医療や、量子コンピュータなどの研究におけるリスクを管理するために、私たちはオープンラボ戦略が最適な手法だと判断しました。このオープンラボ戦略のアプローチは、短期的な製品開発を目標とする企業の研究よりも、学術研究や政府支援の研究に近いと考えられます。研究を進める大学は、オープンに科学的発見をめざし、その発見を研究者どうしで共有して互いに評することで、研究の進展を進めています。大学における研究の共通の目標は、新しい根本的な知識を見出していくことです。政府主導の研究には、より具体的な目標が設定されることがありますが、社会的な利益のための集団的な取り組みでもあります。複数の大学と協力してイ

ンターネットの開発を進めた米国国防省高等研究計画局（DARPA）は、その代表的な例です。

私たちは、「Upgrade Reality」のビジョンを示し、「心血管バイオデジタルツイン（CV BioDT）」^{*2}や「光学技術に立脚した量子コンピューティングシステム（コヒーレントイジングマシン：CIM）」などの目標を設定してきました。私たちのビジョンと目標では、人間のレプリカをサイバー空間上に実現するバイオデジタルツインにより、個々の患者に即した精密な医療や新たな量子コンピューティングにより、より個別化できる創薬など、未来の社会問題の一部を解決することにつながる技術開発を実現したいと考えています。こうした高い目標を実現する

ためには、一企業の中の研究にとどまるのではなく、社外に目を向けて、世界中の他の研究機関との共同研究プロジェクトを主軸とするオープンラボ戦略を導入することが不可欠であると考えています。私たちは、新たな知識、成果、発見を、論文や共同研究者との共同特許として社会に公開しています。また、オープンラボのメンバに対して議論の場を提供することで、さまざまな視点を取り入れて、個々の研究者のアイデアをさらに広げる役割も担おうとしています。

オープンソースのコミュニティと NTT Research, Inc. の オープンラボ

ある意味、私たちの研究の仕方は、オープンソースのソフトウェア開発手法に似ているようにも思えます。このオープンソースの開発では、まず個人や小さなコミュニティがビジョンと目標を持って、コーディングを行い世の中に提供をしていきます。この取り組みの価値に気付く開発者やユーザの数が増えれば、コミュニティは拡大し、コアソフトウェアの開発者だけでなく、アプリケーションの開発者等もチームに参加するようになります。コミュニティメンバが提案する知識やアイデア

^{*2} 心血管バイオデジタルツイン：心血管を対象にしたサイバー空間上の、個々の人のレプリカ。



により、コードは改善され、その価値もより高まります。

Physics and Informatics (PHI) Labのコヒーレントイジングマシン (CIM) 研究グループは、似たような取り組みを進めてきました。2019年にわずか数名の社員からスタートしたCIMグループは、1年目に6つの大学や1つの国立研究機関、1つのスタートアップからなる共同研究パートナーを獲得し、光学ベースの量子コンピュータの理論およびハードウェア研究を進めました。2年目には、このコミュニティは12の大学、1つの国立研究機関、1つのスタートアップの14の組織との提携に拡大し、共同研究者を含む60人以上のメンバに成長しました。現在では、圧縮センシング、創薬、

人工・生物学的脳科学など、CIMアプリケーションを研究している科学者も含めて、NTT Research, Inc. の社員の研究者や共同研究者を獲得し、新たなブレイクスルーを達成しようとしています。

PHI Labと同様に、Medical and Informatics (MEI) Labでも、明確なビジョンを基にした研究開発を進めています。MEI Labのビジョンは前述の、サイバー空間で構築されたヒトの仮想レプリカであるバイオデジタルツインの実現です。現在、最初の取り組みとして、心血管系を中心にした、CV Bio Digital Twinの開発を進めています。また、MEI Labは、実際の人体から多くの生体情報を取り込むことができる埋め込み型の電極とリモー

トセンシングに関する研究にも取り組んでいます。PHI Labと同じく、MEI Labも研究をいくつかの要素に分解し、パートナーとともにコミュニティを形成して研究開発を進めています。主なパートナーとして、日本の国立循環器病研究センターやミュンヘン工科大学が参加しています。

暗号に関する主要な国際会議での論文の発表件数からみて、Cryptography and Information Security (CIS) Labは、暗号分野の世界的リーダーになったと考えられます。CIS Labは、多くの論文を発表していく過程で、PHI LabやMEI Labとは少し異なるアプローチをしています。CIS Labも複数の大学と共同研究契約を正式に締結していますが、契約を行ったパートナーだけでなく、他の大学や場合によっては企業の研究者たちとも、小さな研究のコミュニティをつくり共同研究を進めています。CIS Labの暗号研究チームの研究は学術的かつ理論的な要素が濃く、一方でブロックチェーンチームは応用研究の領域である。法律、プライバシー、現実的な問題への対処も求められる場合があります。暗号の理論研究は、対象のトピックに同じ関心を持つ研究者どうしが議論することで、議論が深まります。これは、オープンソースプロジェクトの起点となる小規模なコミュニティに似ているようにも思えます。オープン



ソースコミュニティのメンバはコードとドキュメントの作成を行います。CIS Labの研究者は学術論文を執筆します。

研究対象のトピックが基礎研究から製品開発のような応用的な研究に移行する過程では、3つのLabの現在の戦略は変更する必要があるかもしれません。しかし、基礎研究の場合、その成果は一種の公共資産としての性質も重要だと考えます。私たちのオープンラボ戦略では、特許などのかたちとして必要な知的財産はパートナーと確保するとともに、得られた知見は論文として発表していくことにより公共的な資産として提供することで、社会に対して貢献できる健全な手法だと考えています。

オープンラボの要件

オープンラボ戦略で成功を達成するには、いくつかの要件を満たす必要があります。資金調達はもちろん重要で、研究活動を加速できる要素の1つです。しかし、明確なビジョン、強力なリーダーシップ、効果的なチームがなければ、困難で未知な課題に立ち向かう基礎研究においては、資金を効率良く配分できない可能性が多々あります。私たちは基礎研究を進めるうえでは、ビジョンがもっとも重要ではないかと考えています。

「Upgrade Reality」のビジョンを

実現するために、過去2年間で約40人の優秀な研究者が社員として集まりました。私たちは、現時点の「Reality」を改善し、現在と今後の世代が直面する社会問題や業界問題を解決したいと考えています。明確なビジョンがあれば、研究を正しい方向に導くことができると信じています。ただし、この道のりには回り道がないとは限りません。その多くは試行錯誤に類するものです。特に複数の研究機関が参加するような大規模な基礎研究では、思わぬ発見、思わぬ失敗を含むサプライズがつきものですから、研究を進めていくうえでは、ある程度の柔軟性も必要だと考えています。基礎研究では、未知の事実や全く新しい技術にチャレンジするためにリスクも伴います。大きなビジョンと目標に向けて、研究を分割して、さまざまなパートナーたちと部分部分で協力していくオープンラボ戦略は、こうしたリスクを管理し、成功の可能性を高めることができる1つの方法ではないかと考えています。



小澤 英昭

NTT Research, Inc. は、2019年の発足以来世界中の優れた知恵を活用して、最先端の基礎研究を行うために尽力しています。世界中の優れた知恵を活用する方法として、私たちが進めているパートナー戦略の考え方について理解いただければと思います。

◆問い合わせ先

NTT Research, Inc.

E-mail info@ntt-research.com

ブロックチェーンエコシステムの 安全性、性能、持続可能性を高める

ブロックチェーン技術は、インターネット上に、一定数の計算機が故障したり、悪意を持った行動をしても安全性を保つ新たなタイプの信頼を提供する技術として、大きな注目を浴びています。その理論は革新的である一方で、現在のブロックチェーン技術を支える数学的根拠や実装が、本当に持続的に有効で、私たちがすぐにこの技術を活用できるかという点、未成熟な点が数多くあります。本稿では、ブロックチェーン技術の安全性、持続性への研究課題について紹介します。

まつお しんいちろう
松尾 真一郎

NTT Research, Inc. Cryptography and Informatics Lab



ネットを介したエコシステムの現在の問題は、影響力のある大手テクノロジー企業がまさにSPOFになっている点です。そのため、こうしたリスクのない、拡張可能な信頼の基盤をインターネット上に構築することが求められています。ブロックチェーンは、インターネットの現在のアーキテクチャ上で、障害に耐性のあるシステムや自動的に運営されるシステムの実装に使用されます。障害への耐性を持つメカニズムをプロトコルの設計の一部に組み込むことで、システム全体を良好な状態を保つことをねらっています。

ブロックチェーンには現在のインターネットエコシステム関連の問題を解決できる可能性があるものの、ブロックチェーンエコシステム自体にも対処すべき問題がいくつかあります。例えば、セキュリティ、性能向上と分散化のトレードオフ、持続可能性などです。

セキュリティと暗号化

既存のブロックチェーンのセキュリ

ブロックチェーンの可能性と課題

ブロックチェーンに関心があるかどうかにかかわらず、ブロックチェーンに関与する理由はいくつかあります。暗号通貨、スマートコントラクト、非代替性トークン (NFT) は、このブロックチェーン (分散型台帳) をベースと

した技術に依存しており、グローバルなネットワーキングやIT企業、インターネット全体に革命的な影響をもたらす可能性があります。

例えば、初期のインターネットは、単一障害点 (SPOF) なしでグローバルなネットワーク構造を実現するために設計されました。しかし、インター

ティ要件と安全性を明らかにする研究のほとんどは、技術全体とシステム全体を考慮していません。これは必ずしもセキュリティの不在を示唆する事実ではありませんが、ブロックチェーンに脆弱性がないことを明言することはできません。

リスクは、ブロックチェーンの仕様だけでなく、その実装にも存在します。分散型自律組織（DAO）に対する2016年の攻撃では、Ethereumブロックチェーンコードの脆弱性が悪用されました。ブロックチェーンは社会的インフラを構成するための基盤技術として幅広い役割を担うことが期待されているため、セキュリティインシデントの影響は大幅に拡大する可能性があります。そのため、コードの品質を確保し、攻撃が発生したときに確実に対処できるように、脆弱性に対する処理手順を導入する必要があります。

同時に、暗号化の使用に関連する標準的な運用モデルも必要です。2004年に暗号学的ハッシュアルゴリズム（SHA）-1の不正アクセスが報じられたことを受けて、IT業界が数年前にSHA-1からSHA-2に移行を完了しましたが、ビットコインをはじめとするほとんどの暗号資産およびブロックチェーンエンジニアリングコミュニティには、そのような移行の経験がなく、また、現在のブロックチェーンのソフトウェアには、移行のためのメカニズムがなく、暗号技術の脆弱性に関連す

る運用実績もありません。

量子計算機による暗号解読の可能性が、長期的な視点では脅威としてのしにかかる中、ブロックチェーン技術で利用されるデジタル署名スキームも、遠い将来安全ではなくなる可能性があります。一方で、量子計算機が登場したとして、安全性を保つ暗号化技術についても開発が進んでいます。例えば、米国国立標準技術研究所（NIST）は、公開鍵の暗号化とデジタル署名を扱う耐量子計算機暗号の最終候補を選出しています。ブロックチェーンアプリケーションは長期的な運用を想定しているため、同様に長期的で安全な暗号化テクニックに移行することが重要です。暗号技術に脆弱性が見つかった際に、より安全な暗号に置き換えられる性質は、基盤となる暗号化の侵害が発生した場合の継続的な安全性に影響します。そのため、この性質をブロックチェーン技術、運用、ガバナンスメカニズムに組み込む必要があります。

性能向上と分散化

ブロックチェーンの台帳は、指定された処理速度のルールに従って処理されます（ビットコインの場合、10分ごとに1 MBのデータブロックが追加されます）。この上限値は、単位時間当りの最大トランザクション数を実質的に決めるため、性能向上の壁となります。ブロックチェーンの場合、この壁は単純に計算機の処理能力を高めて乗

り越えることができる、という種類の問題ではありません。

この場合、ブロックの仕様を変更してブロックサイズを大きくするという解決策もあります。一方で、この解決方法では、すべてのユーザノードに保存されるデータ量が増加することになります。その結果、リソースに余裕のある裕福な個人やグループしかノードを運用できなくなり、ノード数は逆に減ります。ノード数が減少するこの解決策は、許可が不要な当初の「分散型」ブロックチェーンの理念とは矛盾するため、ブロックチェーンのセキュリティは低下します。

性能向上と分散化のトレードオフは、元々のブロックチェーン技術の設計理念に関連しています。性能を向上させるために、同じクラウドコンピュータでノード数を減らしたり、複数のノードを設定したりすると、パブリックブロックチェーンの主なメリットの1つである、単一障害点の除去という効果が失われます。そのため、アプリケーションによっては、分散型ブロックチェーンの導入によるコストメリットのバランスを考慮することが重要になります。

持続可能性

環境的な観点では、ビットコインで使用されているプルーフ・オブ・ワーク（POW）ブロックチェーンコンセンサスメカニズムが、こうしたデジタ



障害に強い新たなパブリックインターネットインフラに関心がある場合は、ブロックチェーン自体のアップグレードが必要になるかもしれません。

ル資産のマイニング（採掘）に投じられる膨大な量のエネルギーに対して持続可能なのかという懸念があります。代替となるブルーフ・オブ・ステーク（POS）メカニズムは、はるかにエネルギー効率に優れていますが、POSは確認遅延など、実装上の課題に直面しています。また、運用条件によっては、POSのメカニズムでは真に分散化したガバナンスと認められないため、規制上有価証券として取り扱われ、より厳しい規制の下での運用を強いられることになります。

ビジネスの観点では、ビットコインなどのパブリックブロックチェーンシステムは障害に対する耐性があるとみなされています。なぜなら、自らが発行する暗号資産を通じて運用手数料を生み出し、ブロックチェーンネットワークを安全に維持するインセンティブを

与えるからです。資本成長理論分析では、ブロックチェーンシステムは通常は持続可能ですが、特定の標準ビジネスルール（税金、エネルギーコスト、破産のリスクなど）に制約されない利害関係者がいる場合、チェーンの持続性が損なわれる可能性があります。同様に、POWメカニズムに対するいわゆるセルフィッシュマイニング攻撃は、ブロックチェーンの支え手であるマイナーのインセンティブに影響を与える可能性があり、持続可能性のもう1つの制約になります。また、NFTや自動発効契約などでブロックチェーンを単独で使用しても、公平とみなされる成果は保証されません。公平な成果を得るには、設計を適切に考慮する必要があります。

この分野に何らかの規制が必要になることも考えられます。前述のとおり、



松尾 真一郎

ブロックチェーン技術は、まだ技術が成熟していない段階で大きな注目を浴びていますが、一方で、その安全性、持続性については、基礎理論においても未解明なところが数多く残されています。NTT Research, Inc. では、誰もがブロックチェーンを安全に使うための理論の研究を進めています。

◆問い合わせ先

NTT Research, Inc.

E-mail info@ntt-research.com

最適化問題解決の未来： コヒーレントイジングマシン (CIM)

本稿では、最適化問題の新しいソルバーとして注目されているコヒーレントイジングマシン (CIM) の動作原理とその性能評価について紹介します。レーザではなく光パラメトリック発振器を用いた CIM では、単一光子対 (2 個の光子が対を成した状態) が全光パルスに同時に存在し、単一光子対レベルの微弱光で干渉計を構成します。このマシンは、誤り訂正機能を持たせることにより、既存のアルゴリズムに競合できる性能を獲得できます。

やまもと よしひさ
山本 喜久

NTT Research, Inc. Physics and Informatics Lab 所長

はじめに

既存のコンピューティングの限界を克服するために、さまざまな新しいアプローチが模索されています。その 1 つに、アナログ、デジタル、あるいは古典、量子を組み合わせたハイブリッド型計算機が代替モデルとして研究されています。対象としている課題は一般に NP 困難問題、NP 完全問題に分類され、その 1 つに組合せ最適化問題があります。組合せ最適化問題を解くために、いくつかの新しいコンピューティングモデルが登場しています。例えば、量子断熱計算 (または量子アニーリング) やコヒーレントイジングマシン (CIM) などです。これらの物理モデルに発想を得た新しいデジタルアルゴリズムも提案されています。NTT 物性科学基礎研究所は大規模な CIM プロトタイプを開発しており、NTT Research, Inc. Physics and Informatics (PHI) Lab は、この CIM の基本原理の解明に取り組んでいます。本稿では、PHI Lab におけ

る、これまでの成果、今後の課題について解説します。

用語の定義

CIM アプローチを理解するために、いくつかの用語を定義しましょう。まずは「イジング」という用語、次に「コヒーレント」という用語を定義します。「エルンスト・イジング (Ernst Ising)」は、ドイツの物理学者で、1920 年代に磁性体を説明するために 1 つの数学モデルを提案した人物です。

イジングモデルは、 N 個の原子スピンの磁気モーメントを表す離散変数の 1 次元ベクトルで構成されており、それぞれ 2 つの状態 (+1 または -1) を取ります。エネルギーがもっとも低い状態である基底状態を明らかにすることと組合せ最適化問題の解を見つけることは等価です。スピン-スピン結合構成が単純ではない非ブレーナグラフの場合、イジングモデルの基底状態を明らかにする作業は、計算量理論でいうところの NP 困難問題に分類されます。

CIM の動作でもっとも重要な構成要素は、光パラメトリック発振器 (OPO) です。インコヒーレント光 (位相がランダムな雑音光) を種とするレーザの発明から 5 年後、1965 年に初めて実現された OPO は位相のそろったコヒーレント光を種とする発振器です。発振しきい値以下でスクイズド状態と呼ばれる最小不確定状態を発するため、発振しきい値以下で熱雑音光を発生するレーザとは区別されます。CIM は、 $N \times N$ の結合マトリクスを通じて実世界の組合せ最適化問題にマッピングできます。その解は、エネルギーを最小化する基底状態に対応します。

このシステムは二重にコヒーレントです。つまり、 2ω の周波数を持つポンプ光から 1 つの光子が消去されると、周波数 ω の信号光で 2 つの光子からなる光子対が生成されます。CIM が 2 つの OPO で構成される場合は、1 つの光子対が 2 つの OPO に線形重ね合わせ状態として同時に存在します。CIM が N 個の OPO で構成される

場合、1つの光子対がN個のOPOに線形重ね合わせ状態として同時に存在します。つまり、CIMの基本励起（単一光子対）は、N個のOPOで構成されるマシン全体にコヒーレントに広がっています。

また、それぞれのOPOパルスは、ゼロ光子（真空状態）と2光子の2つの状態にまたがって同時に存在します。このコヒーレントな重ね合わせの性質により、それぞれのOPOパルスはゼロ相（ダウンスピン）と π 相（アップスピン）の状態を同時に表現します。このように、 2^N 個の直交状態の線形重ね合わせが、CIMでは自然に生成されます⁽¹⁾（図1）。

2つのCIMタイプ

実際には、2つのCIMタイプがあります。1つはエラー訂正機能を持つタイプ（closed-loop CIM）、もう1つはエラー訂正機能を持たないタイプ（open-loop CIM）です。前述したように、OPOはポンプ光から1つの光子を吸収し、2つの光子を同時にN個のパルスに放出します。それぞれのパルスで、ゼロ光子状態と2光子状態の間で干渉が起こり、量子ゆらぎが延

伸されたスクイズド真空状態になります。これがアップスピンとダウンスピンの線形重ね合わせ状態に相当します。ポンプ光がさらに大きくなると、延伸された量子ゆらぎが正の振幅と負の振幅を持ついずれかの状態に遷移します。

この分岐点が、量子系から古典系への転移点になります。しきい値未満の量子領域では、アップスピンとダウンスピンの線形重ね合わせ状態により量子並列探索が行われ、しきい値以上の古典領域では、アップスピンもしくはダウンスピンのいずれかが選択されます。この分岐点が、CIMを量子から古典へと変えるポイントであり、CIMの計算リソースの大半は、この量子 - 古典遷移に伴って出現します⁽²⁾。

closed-loop CIMの場合は、各OPOの振幅を一定に保つためのエラー訂正機能が付与されており、これによりマシンは局所最適解にトラップされることなく、イジングモデルの最適解を探索し続けます。マシンは1つの最適解に到達しても、そこで安定になるのではなく、別の最適解を求めて再び探索を始めます⁽³⁾。

Open-loop CIMでは、そのような

エラー訂正機能はなく、マシンは局所最適解にトラップされ、そこで安定になります。このため、短い時間で計算を切り上げ、何回も同じ問題をマシンに解かせる必要があります。

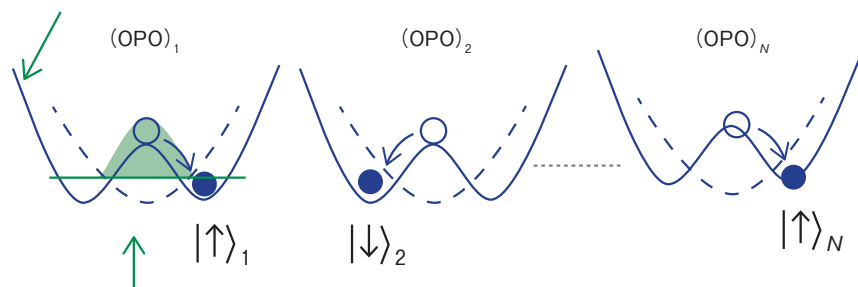
2つのマシンには、歴史やトレードオフによる違いがあります。CIMは、当初はopen-loop方式が一般的でしたが、最近はclosed-loop方式が主体になっています。closed-loopのほうの実装は困難ですが、既存のアルゴリズムを“凌駕”する性能が得られます。

CIMのパフォーマンス

CIMはこれまでどのようなパフォーマンスを発揮してきたのでしょうか。代表的な数値シミュレーションの結果を紹介します。

理想的な量子コンピュータ（QC）との比較では、closed-loop CIMはQCよりも優れた性能を発揮しています。このベンチマークでは、理想的なQCは、デコヒーレンス、エネルギー散逸、ゲートエラーは一切なく、全量子ビット間に1nsのゲート時間で遠隔結合が実現されていると仮定しています。これは現実にはあり得ない仮定ですが、それでも、（離散）断熱量子コンピューティング（dAQC）アルゴリズムやグローバール検索アルゴリズムを用いたQCの計算時間（Time to Solution: TTS）は、現実的なCIMのTTSに比べて何桁も大きな値になります。現時点でのシミュレーション結果によると、グローバールおよびdAQCアルゴリズムを用いたQCのTTSは、問題サイズnの指数に応じて増加しますが、CIMのTTSは、 $n^{1/2}$ から $n^{1/3}$ の指数に応じて増加します。

しきい値以上（ゼロ相または π 相のいずれかの状態）



しきい値以下（ゼロ相と π 相の線形重ね合わせ状態）

図1 N個のOPOパルスで 2^N 個の直交状態を表現する（しきい値以下）。
N個のOPOパルスで1つの状態を表現する（しきい値以上）

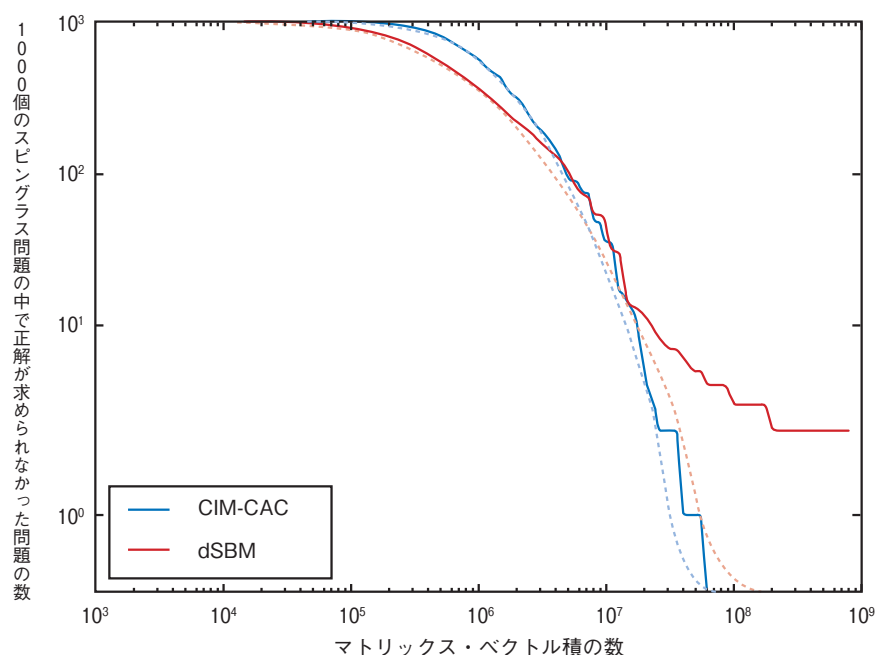


図2 ランダムに生成された1000個のスピングラス問題の中で正解が求められなかった問題の数対計算時間（マトリクス・ベクトル積の計算量で示している）

CIM は discrete Simulated Bifurcation Machine (dSBM) というデジタルアルゴリズムとの比較においてもある計算条件において優れた性能を示しました（図2）。dSBMは易しい問題に関しては、CIMよりも高速に解を求めることができますが、難しい問題に対しては、TTSが非常に長くなるという欠点を持ちます⁽⁴⁾。CIMは、またBreakout Local Search (BLS) という既存のアルゴリズムに対しても同様の優位性を持つことが分かっています⁽³⁾。

今後の研究計画

CIMの研究では、実験や数値シミュレーションによる性能評価が先行し、理論的な観点からそのパフォーマンスを理解するにはまだ多くの課題が残っています。この状況は、実験やシミュレーションによる評価が理論に対して

大きく遅れているQC分野の一般的なシナリオとは対照的です。

この理論研究の遅れを解消するために、NTT Research, Inc. は、スタンフォード大学、カリフォルニア工科大学、シカゴ大学、コーネル大学、ハーバード大学、ミシガン大学、マサチューセッツ工科大学、NASA Ames研究センター、ノートルダム大学、スインバーン大学、東京工業大学、東京大学、ウォータールー大学、1QBitという14の機関との長期にわたるコラボレーションを開始しました。26人の代表研究者（Principal Investigator: PI）とともに推進するこの共同研究プロジェクトでは、量子光学および量子情報、ニューラルネットワークと脳科学、非線形フォトニクス、機械学習など、さまざまなトピックが対象になります。

スケジューリング、創薬、ワイヤレ

ス通信、金融、回路設計、圧縮センシング、機械学習などの分野で、CIMが解決できると期待される差し迫った現実的な問題があります。さらに、この研究から派生する学際的な視点は、新たな研究分野に発展する可能性があります。物理学と神経科学の接点は、こうした知識の中でもっとも重要な分野の1つになるでしょう。

参考文献

- (1) Y. Yamamoto, T. Leleu, S. Ganguli, and H. Mabuchi: "Coherent Ising machines—Quantum optics and neural network Perspectives," Appl. Phys. Lett., Vol. 117, No.16, 160501, Oct. 2020.
- (2) Y. Inui and Y. Yamamoto: "Entanglement and quantum discord in optically coupled coherent Ising machines," Phys. Rev. A, Vol. 102, No. 6, 062419, Dec. 2020.
- (3) S. Kako, T. Leleu, Y. Inui, F. Khoyratee, S. Reifenstein, and Y. Yamamoto: "Coherent Ising Machines with Error Correction Feedback," Adv. Quant. Technol., Vol. 3, No.11, 2000045, Nov. 2020.
- (4) S. Reifenstein, S. Kako, F. Khoyratee, T. Leleu, and Y. Yamamoto: "Coherent Ising Machines with Optical Error Correction Circuits," Adv. Quant. Technol., Vol. 4, No. 9, 2100077, Sept. 2021.



山本 喜久

CIMには、幸いなことに強力なライバルがハード技術にもアルゴリズムにもたくさんいます。これらの競合技術とのオープンな競争の中で、理解を深め、技術を磨き、結果として新しいコンピュータ技術を実現していけるものと期待しています。

◆問い合わせ先

NTT Research, Inc.

E-mail info@ntt-research.com

バイオデジタルツイン研究の最新状況

バイオインフォマティクスとデータサイエンスの医療応用をめざすNTT Research, Inc. Medical and Informatics (MEI) Labは、サイバー空間上に患者さん1人ひとりのデジタルレプリカを構築するバイオデジタルツインの研究に取り組んでいます。本稿では、特にこの1年間のMEI Labにおけるバイオデジタルツイン研究の研究体制の進展と、国立循環器病研究センターを中心としたコラボレーションの状況について解説します。

Joe Alexander

NTT Research, Inc. Medical and Informatics Lab 所長

MEI Labのミッションと研究体制の構築状況

NTT Research, Inc. Medical and Informatics (MEI) Labの使命は、バイオインフォマティクスとデータサイエンスを医療研究に応用することです。私たちのバイオデジタルツイン構想では、医師がさまざまな治療をシミュレーションできる人体のデジタルレプリカの作成をめざしています。この研究の目標は、患者1人ひとりに

合わせた最適な治療を実現することです。このプロジェクトの最初の取り組みとして、MEI Labでは心血管バイオデジタルツイン (CV BioDT) の開発に取り組んでいます。私たちが心血管系をターゲットとしているのは、心血管系の病気が世界の死亡率に大きく寄与していることと、モデリングに必要なデータを比較的容易に得られるからです。

この1年にわたり、MEI Labは、研究体制構築の面で大きな進展をみせ

ています。2020年12月には、日本の国立循環器病研究センター (NCVC) との共同研究契約を締結しました。このプロジェクトでは、心血管疾患関連の計算モデルの開発、バイオデジタルツインプラットフォームへのその計算モデルの実装、さらに医師や患者が活用できるアプリケーションの開発を進めます。2021年前半には、シニアサイエンティストJon Peterson博士と、サイエンティストShelly Irisの、2名の重要な研究者の採用を行いました。

NCVCとの共同研究プロジェクト

2020年12月からのNCVCとの2年半にわたるプロジェクトは、「The Development of Human Hemodynamics Mapping and Autonomous Multimodal Therapeutics Systems (臨床的血行動態マッピングと自動マルチモーダル治療システムの開発)」と題されています。このプロジェクトでは双方の組織が主体的に研究に参加します。NCVC側の共同研究契約の主任研究



員 (PI) は、NCVCの循環動態制御部 制御治療機器研究室長である朔啓太博士が務め、NTT Research, Inc. 側のPIは私が担当します。

今回の共同研究により、NCVCは、急性心筋梗塞 (AMI) と急性心不全 (Acute HF) に対するマルチモーダルクローズドループ治療介入をサポートする統合計算モデルの開発を進めます。これと並行して、MEI Labはこれらのモデルのバイオデジタルツインプラットフォームへの実装とともに、医師の臨床判断と患者のセルフケアを支援する医師・患者向けのアプリケーション開発も進めます。

NCVCは国立研究開発法人です。政府所轄は日本の厚生労働省であり、これは米国の保健福祉省 (HHS) に相当します。NCVCは、心臓血管と脳の臨床的な治療と専門的な心血管研究に重点を置いています。米国国立衛生研究所の一組織である国立心臓・肺・血液研究所 (NHLBI) に似ています。とはいえNCVCはNHLBIとは異なり、心血管研究の資金提供機関ではなく、治療と研究を自ら行う機関です。

共同プロジェクトの短期的な目標として、特にAMIとAcute HFに関連する心臓および血管の循環動態を示すモデルの開発と検証を進めます。血液循環の神経制御や心臓のエネルギー論を含む心臓および血管モデルは、心臓の状態に合わせて最適な治療を決定す



るための計算プラットフォームの基盤となります。朔博士がCV BioDTをサポートするために開発している新しいモデルは、薬物、医療機器、神経調節など、複数の治療法からAMIおよびAcute HFに最適な治療介入を決定するのに役立ちます。長期的な目標は、患者固有のCV BioDTを実現し、患者1人ひとりに合わせた治療を可能にすることです。

私たちが朔博士とNCVCとのパートナーシップを締結したのは、国際的に認められた心血管調節 (心血管循環動態または循環動態制御) の専門知識とともに、心不全などの症状に対するクローズドループ自動治療介入や機械的循環補助などに関する高度な技術を有していることが理由でした。このエキサイティングなプロジェクトは、九州大学循環器内科の名誉教授であり、NCVC研究所の循環動態制御部の創設者である砂川賢二博士からの支援も得ています。砂川博士は朔博士と私の

恩師であり (私の場合は、ジョーンズ・ホプキンス大学、九州大学、NCVCで師事)、この共同研究の仲立ちをしていただきました。今後はMEI Labのために、砂川博士にはこのプロジェクトでリーダー役として手腕を発揮していただきます。

MEI Labでは、2021年2月までに2つのPoC (Proof of Concept) レベルの研究をすでに実施し、初期のバイオデジタルツインプラットフォームアーキテクチャの要求条件と枠組みを確立しています。この共同研究で開発するCV BioDTモデルは、臨床試験での検証に進む前に、さらなる試験研究を経て検証する必要があります。こうした試験は国立循環器病研究センター病院で実施されます。CV BioDTの検証と導入の後半の段階では、バイオデジタルツイン全体の目標に向けてさらに臓器系を追加する予定です。現在注目すべき開発成果として、腎臓、呼吸器、肺、一部神経系とのインタ

フェースが予定より早く進んでいます。

新たなスタッフサイエンティスト

2021年2月に、Jon Nels Peterson 博士がMEI Labにシニアサイエンティストとして入社しました。Peterson 博士は、アカデミアと医療機器業界の経験を有する生物医学エンジニアです。直近では、Micro Systems Engineering, Inc.で主席臨床システムエンジニアを務め、埋め込み型心臓モニタ製品の開発をリードするシステムエンジニアでした。それ以前は、Boston Scientific CRM and Create, Inc.で研究職とエンジニアリング職を歴任し、パーモント大学医学部では研究助教授を務めていました。Peterson 博士のバックグラウンドは研究者と臨床システムエンジニアの双方であり、ハードウェア、ファームウェア、ソフトウェアサブシステムの経験があります。数学的モデリングとシミュレーションで才能を発揮し、生理学制御系や病態生理学（心不全など）への造詣も深く、すべてMEI Labで必要とされる専門分野に直接合致しています。

2021年6月には、Iris ShellyがMEI Labにサイエンティストとして入社しました。Shellyは、生物医学信号処理と低電力デバイスの専門知識を備えた応用研究エンジニアです。直近では、Micro Systems Engineering, Inc.でシニア応用研究エンジニアを務

め、心臓の不整脈検出アルゴリズムの設計、開発、検証を担当しました。MEI Labでは、まずCV BioDTのモデルのアーキテクチャとインタフェースに取り組みます。彼女のアルゴリズム設計の経験と細部への配慮は、医療機器研究とソフトウェア検証の長年の経験に基づいており、CV BioDTのモデル開発をサポートするために不可欠なスキルです。

MEI Labの所長の交代

ここまで述べてきたように、NCVCとのパートナーシップと新たなスタッフの採用は、2020年にNTT Research, Inc.に入社した私が率いてきたMEI Labのバイオデジタルツイン構想の大きな進展ととらえることができます。最後に、もう1つの変化として、私は2021年7月に友池仁暢博士の後任としてMEI Labの所長に任命されました。友池博士はNTT 物性科学基礎研究所のリサーチプロフェッサに就任しました。

この新しい役職で、私は引き続きCV BioDTグループを率いることとなります。一方で、私はNTT Research, Inc. やNTTグループ全体と足並みをそろえた包括的な戦略の中で、埋め込み型電極やリモートセンシングなど、他のMEI Labプロジェクトについても、研究開発が円滑に進むように努めていきます。友池博士の志を継ぎ、MEI Labの意欲的な「ムー

ンショット」目標をさらに前進させていくことを光栄に思います。



Joe Alexander

CV BioDTは、個別化された治療（Precision Medicine）の実現を支援するために必要ないくつかの技術のうちの最初のもので位置付けています。CV BioDT技術と並行して、Heart-on-a-Chip技術なども研究しており、個別化された治療のための「精密心臓病学」を目的とした患者専用のデジタルツインをつくり、疾患の根底にある原因と健康を維持または回復する経路の両方を確実かつ正確に予測したいと考えています。私たちの研究は、疾患および健康の早期発見に向けて、急性心血管系ケアから慢性心血管系ケアへと進化していきます。

◆問い合わせ先

NTT Research, Inc.

E-mail info@ntt-research.com

特集

IOWN時代の セキュリティR&D

豊かな社会をつくるIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 時代へ向け、
人やアイデアを動かす「未来の原動機」となるセキュリティR&Dの考え方を披露する。
最新の取り組みから、通信(セキュア光トランスポート)、暗号(光暗号回路)、
データ流通(トラステッド・データスペース)の各技術を紹介する。

セ キ ュ リ テ ィ

I O W N

セ キ ュ ア
光トランスポート

光 暗 号 回 路

ト ラ ス テ ッ ド ・
デ ー タ ス ペ ー ス

Research and development

未来の原動機となるセキュリティ 50

人やアイデアを動かす未来の原動機となるセキュリティR&Dが、課題を広く、効率良く、継続して解決していく考えを述べ、それに向け私たちが取り組む研究開発の3つの柱を紹介する。

セキュア光トランスポートネットワーク 54

量子コンピュータによる暗号危殆化に対して安全な鍵交換の研究開発、およびそれら鍵交換を光トランスポートネットワークへ適用するためのアーキテクチャ設計について紹介する。

光論理ゲートで構成する暗号回路技術 59

光情報通信および光コンピューティング上でのデータの暗号化・認証などに用いる、光論理ゲートで構成する暗号回路の研究について紹介する。

データから価値を連鎖的に生み出すトラステッド・データスペース 64

「トラステッド・データスペース」というデータ流通の新しい仕組み、およびこれを実現するための要素技術について紹介する。

主役登場 奥田 哲矢（NTT社会情報研究所） 68

エンジニアリングから研究所へ

of security for IOWN

未来の原動機となるセキュリティ

豊かな社会をつくるIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 時代のセキュリティR&Dを説明します。私たちはセキュリティを「人やアイデアを動かす」存在へ変えていきます。新しいセキュリティは人・組織・社会で多様なセキュリティモチベーションを解決し、アイデアや計算資源をダイレクトに仕事に変え、永く途切れなく保ちます。私たちはこれを、理論、データドリブン、コミュニケーションの3つを柱にした研究開発で実現します。

ひらた しんいち たかはし かつみ
平田 真一^{†1} 高橋 克巳^{†2}
NTT社会情報研究所 所長^{†1}
NTT社会情報研究所^{†2}

未来の原動機

私たちは30年以上にわたって通信と情報のセキュリティを考え続けてきました。暗号によってどこでも安全に通信ができるようになり、インターネットができました。セキュリティ対策によってどこにでも安全に情報を置くことができるようになり、Webやクラウドができました。ただし、セキュリティ対策によって私たちは日常を守るようになりましたが、それでもセキュリティ脅威に不安を抱え、対策に腐心せざるを得ないことは見過ごせない問題です。

「IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 時代」では、従来の限界を超えた情報通信技術により、さらなる豊かで満たされた生活が実現されます。私たちは、セキュリティをその原動機にしたいと考えています。

セキュリティの必要性は論を待ちません。セキュリティ・バイ・デザインの考え方が浸透しつつありますが、これはセキュリティが人や社会の健全な

活動にそもそも必要だったことを示しています。他方、セキュリティコストやセキュリティ疲れという言葉も存在しています。健全な活動に必要なものが義務や苦勞であってよいのでしょうか。私たちは、そうであってはならないと考えます。シンプルにセキュリティは明るい未来をもたらすべきです。

私たちは、セキュリティ技術が「必要だが難しい」現状を、以下のような考え方の研究開発で変えていきます。

- ・あらゆる業務や生活に幅広く役立つ (広範囲)
- ・アイデアや計算資源をダイレクトに仕事に変える (効率)
- ・途切れなく保つ (継続)

本稿はIOWN時代のセキュリティR&Dの考え方を、広範囲、効率、継続の観点から説明し、私たちが注力するセキュリティ技術を概説します (図1)。なお本稿で論じるセキュリティは、いわゆる情報セキュリティで、保安全般や治安は意図しないものの、プライバシーや倫理といった周辺領域まで含めます。

セキュリティを広範囲に

これまでセキュリティは、ともすると「特定のシステムのセキュリティが破られない」ことと信じられてきました。私たちはセキュリティをあらゆる業務や生活に役立てられるものとするため、セキュリティ研究開発を対象とモチベーションの2点から広範囲なものに進化させます。

■広範囲1：セキュリティ対象

私たちは、セキュリティが守る対象を「特定のシステム」(情報資産)だけに限定せず、「企業・組織」「人」「社会」も含めたいと考えています。

- ・情報資産

セキュリティの対象は情報資産と呼ばれてきました。企業の顧客情報、販売情報、技術情報などがそれにあたります。情報資産の保護は、その記録・保存形態に依存するので、情報資産を収める形態も保護対象となります。代表的な形態には、ファイル、紙・ストレージ・伝送路等媒体、スマートフォン・コンピュータ等ハードウェアシス

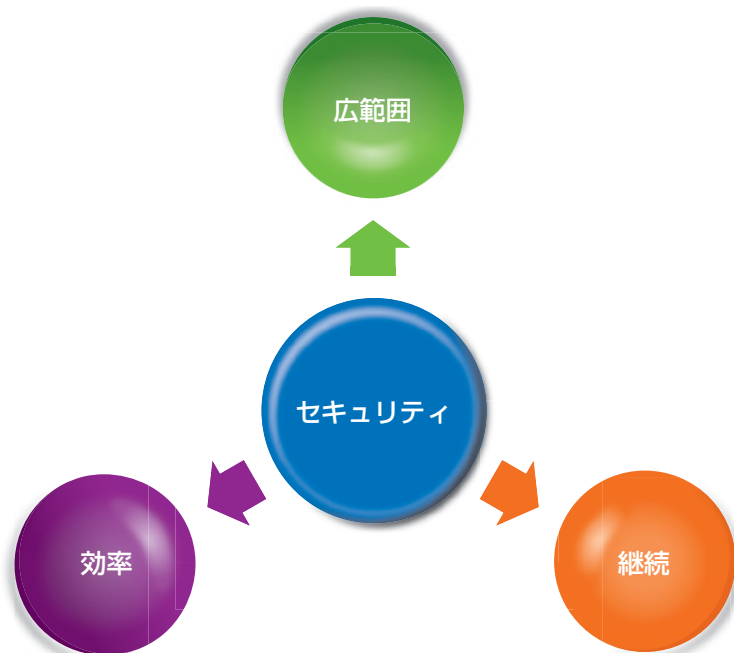


図1 IOWN時代のセキュリティR&Dの考え方

テム、電子メール・データベース・AI（人工知能）等ソフトウェアシステム、などがあり、そこにドローン・産業用ロボット等IoT（Internet of Things）機器らが加わっています。

・企業・組織への拡張

セキュリティの対象は、企業・組織の活動の変化に応じて大きく変化することが予想されます。例えば、情報資産の形態の確定が困難になります。情報資産は社外ストレージに置かれ、企業間取引によって別組織の管理下に置かれ、さらに調達や生産のサプライチェーンでは、ある意味他人が将来自社の情報資産をつくっているとみなせるでしょう。IoT機器の導入により、情報資産形態はさらに流動的になります。

・人への拡張

人を仮に情報資産の媒体とみなすと、かなり機密性の高い媒体といえます。気持ちが表情に出るという言葉がありますが、表情から顧客情報が漏れることはありません。他方、人は簡単に騙され、場合によっては裏切る存在

でもあります。これに対して企業は研修や規則による対応を行っています。また、企業に限定されない人の活動の媒体にSNS投稿があります。SNSを介した情報事故は、漏洩、著作権侵害、さらに炎上などがあります。これに対しては、現在ほぼ個人の責任として放置されているのが実状です。人を対象とするセキュリティは、人をシステムとしてとらえた安全管理策では限界があります。

・社会への拡張

社会をセキュリティの対象にできるのかどうかは、確立した見解がないのが現状です。自動走行やモニタリングカメラのシステムは、社会レベルでシステム化が推進されているものです。これら「スマートシティ」には基本的なセキュリティの「約束事」（ポリシー）があるので、規模の問題はありますが、従来のセキュリティ対象の延長線上で考え得る問題です。他方、パンデミック対応はどうでしょう。接触確認アプリ等一部のものは明確なポリシー下で運用されましたが、多くのものの運用

の「作法」は基本的に、自発的・自然発生的な情報のやり取りで合意され、社会全体が動いていると考えられます。この作法は倫理や慣習などと呼ばれるもので、その取り扱いには新しいアプローチが必要と考えています。

■広範囲2：セキュリティモチベーション

私たちはセキュリティが必要な理由（モチベーション）には、単なる情報漏洩だけにとどまらない幅広いインシデントの存在や、システム品質、法、倫理、慣習、社会目標などがあると考えました。

・インシデント

「情報漏洩を起こしてはならない」が、もっとも知られたモチベーションです。このモチベーションを核に、不正なアクセス、不正なソフトウェア、あるいは不正な入室などのさまざまな脅威をふさぐ対応が行われるのは周知の事実です。しかし、私たちはこのインシデントを、「機密性・完全性・可用性の侵害」という考えにとらわれないことが重要だと考えています。例えば、プライバシーがらみのインシデント（炎上）も注意すべきものです。これは情報漏洩ではなく、取得や利用目的の説明不足やルール違反によって生じるもので、セキュリティの周辺問題と考えられていました。では、AIの異常動作はどうでしょうか。AIの動作結果の内容は従来セキュリティの問題と考えられていませんでした。私たちは、対応すべき問題を、従来のセキュリティの枠で考えるのではなく、コンピュータがもたらす困りごと、プライバシーやAIの問題にも拡張することが必要であると考えています。

・システム品質

システム開発におけるセキュリティは、重要インフラのような分野では高いレベルがあらかじめ要求され、セキュ

リティがモチベーションの一部になります。他方、セキュリティが暗黙の要求にとどまるシステムもあります。この場合ではセキュリティのレベルも暗黙のものとなり、対応は開発のコストとみなされてしまうこともあります。これは看過できない問題です。元来システムのセキュリティは必要なものなので、それがモチベーションから乖離するようであれば、その原因から根本的な解決が必要だと考えています。

・法律

法令遵守もセキュリティのモチベーションになります。日本では、サイバーセキュリティ基本法が国民にセキュリティの努力を求めています。企業にとっては、個人情報保護法の義務や不正競争防止法の前提としてセキュリティが求められます。私たちは、セキュリティ関連法制度を注視し研究開発に活かすだけでなく、制度のあり方の議論に関しても能動的であるべきだと考えています。

・倫理・慣習・社会目標

インシデントのおそれがなく、品質が一定に保たれ、さらに法に適合していても、セキュリティが必要だと感じる場合があります。それは、人々の中にある何らかの価値観やおそれに基づくもので、倫理や慣習や社会の目標などといった言葉で形容されます。私たちは、これらの存在をセキュリティのモチベーションの一部として取り扱うことを考えています。

原動機としてのセキュリティの効率

残念ながら業務のコストと考えられてきた可能性のあるセキュリティですが、私たちは新しくセキュリティの効率の概念を導入して、この状態を変えたいと考えています。効率とは、アイデアに関するものと、コンピュータ資源に関するものがあります。これらを

最大限に活かすときに、セキュリティの効率は最大となります。

■効率1：アイデアをダイレクトに仕事に変えられる

アイデアの実現を邪魔しない、チャレンジの背中を押すセキュリティに取り組めます。アイデア実装時、セキュリティのための要件と実現方法の決定が必要になります。このプロセスの最小化が効率につながります。理想のイメージは、システムを開発したら、必要なセキュリティが意識せずビルトインされている状態です。要件の決定は通常、モチベーションで記載した要素すべて、インシデントの想定から法対応などの分析を経て行われます。実現方法の決定は、現実的にはセキュリティを一から構築することは少なく、用いる部品（ライブラリ）を調査して、そのセキュリティ機能を使うことで行われています。両プロセスの最小化、自動化に取り組めます。セキュリティの自動化は極めて困難なテーマですが、後述する理論アプローチ、データドリブンアプローチにより解決します。なお、セキュリティ要件と方法のベストカップリングを開発環境やユーザインタフェースとして提供できれば、この問題解決のショートカットになると考えられます。

■効率2：コンピュータ資源をダイレクトに仕事に変えられる

例えば現在のWebアプリケーションにおいて、セキュリティ処理がオーバーヘッドとなり、通信や画面表示が遅れるといったことはあまり考えられませんが、しかし、都市、交通等、社会インフラにかかわる大量のさまざまな機器がネットワークに接続されたIOWN時代では、それが無視できなくなると考えています。また、カーボンニュートラルの文脈においては、コンピュータや通信の資源を活かしきるセキュリ

ティ処理が望まれます。私たちはIOWNオールフォトニクス・ネットワークに代表される最先端のハードウェアの特質を活かし、情報通信の体験を最大化するセキュリティに取り組めます。

セキュリティをより継続して

セキュリティは継続して保たれるべきです。セキュリティの攻撃と防御は連続的な情報処理技術の進展の上に乗っているため、継続的な研究開発を覚悟のうえ取り組んでいます。加えてセキュリティR&Dにおいて継続性が必要な理由があります。セキュリティ技術のコアは理論とデータです。前者の例に暗号が、後者の例にホワイトリスト・ブラックリストがありますが、それぞれに継続的な理論の積み上げ、データの積み上げが必要だからです。なおセキュリティ技術の連続性の一方、量子コンピュータという不連続な変化の到来も予測されています。私たちは継続を基本に、大きな変化にも耐える技術開発に取り組めます。

セキュリティ研究開発の新しい3つの柱

広範囲・効率・継続のセキュリティを実現していくために、私たちは次の3つの柱で研究開発を進めます(図2)。

■理論でセキュリティを保証する機構

暗号は適用したデータの機密性を理論的に保証します。理論的に安全が保証されたソフトウェアモジュールがあれば、そのモジュールにおけるセキュリティを心配する必要がなく、さらに理論的に安全なモジュールのみから、それらを正しく接続してシステムが構築できれば、そのシステム全体がセキュアと評価することができます。理論的に安全なモジュールを増やすことは、明らかにシステムのセキュリティ実現

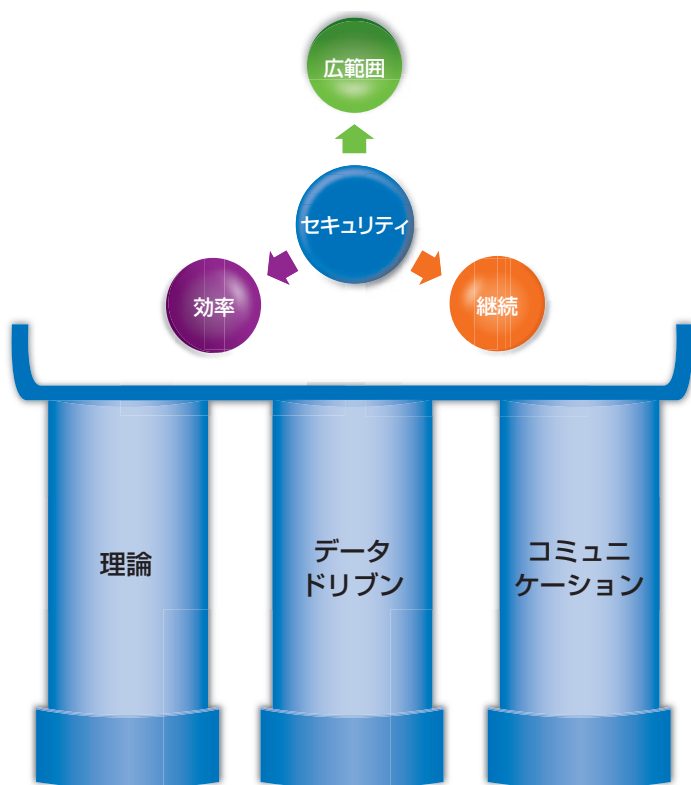


図2 セキュリティR&Dの3つの柱

に貢献します。セキュリティを保証する理論の代表は暗号ですが、暗号や暗号プロトコル、あるいはフォーマルメソッドなどを含む数学が基礎を成します。また、物理学にも着目しています。量子情報処理が実現されれば、新しい盗聴や偽造の防止が通信だけでなくデータ処理にも期待できます。

■データドリブンでセキュリティを保証する機構

すべての対象を理論的にセキュリティ保証することは難しく、あるものはデータドリブンに保証する必要があります。例えば複数の機器から構成されるインフラシステムであれば、構成するすべての機器に対して状態を記録し、リスクを評価するという考え方があります。この作業はそのサプライチェーンおよび運用の全体を通じて行います。この状態の記録がデータであり、その評価がデータドリブンと呼ばれるものです。評価結果の中で他の時

間や環境でも利用できるものは、それを整形して再利用します。データドリブンは、インフラシステムだけでなく、任意のセキュリティ対象に関して適用可能な方法です。この再評価のためのデータを私たちはトラストデータと呼んでいます。トラストデータには、安全性に関してポジティブな評価もネガティブな評価も含まれます。これらを使って、データドリブンなセキュリティ保証が可能になります。なおこのトラストデータは、全体的で絶対のものではなく、局所的かつ公平なものを志向しています。

■セキュリティの前提の合意を形成するコミュニケーション

理論とデータドリブンという継続的アプローチに加えて、私たちが新たに強く必要性を認識しているのが合意形成に関するコミュニケーションアプローチです。セキュリティ実施の前提となるポリシー等「決めごと」の決め

方から検討する必要があると考えました。何をすれば安全なのか。何をすれば人々が不安なく生き活きと活動できるのか。「セキュリティモチベーション」を確定させる決めごとは、狭義セキュリティを、倫理・慣習・社会目標へ広げれば広げるほど、当事者間のコミュニケーションで合意形成することが重要と考えました。セキュリティの決めごとを当事者間で合意できる機構、および合意した決めごとどおりに運用が行われているかの評価ができる機構についての検討を進めていきます。

おわりに

IOWN時代のセキュリティR&Dの方向性を広範囲、効率、継続の考えから再整理し、取り組む技術を理論、データドリブン、コミュニケーションの3軸で示しました。セキュリティに不安がない社会を、高い倫理観とテクノロジーで実現していきます。



(左から) 平田 真一/ 高橋 克巳

世の中のあらゆる情報を安全・公平に活用することにより多様な社会価値を創出し、誰もがその人らしく暮らせる豊かな社会を実現することをめざして研究開発を進めています。未来の原動機となるさまざまな技術にご期待ください。

◆問い合わせ先

NTT社会情報研究所
企画担当
E-mail solab@hco.ntt.co.jp

セキュア光トランスポートネットワーク

近年、データセンタ間通信を中心に、光トランスポートネットワークの実用が進んでいます。光トランスポートネットワークの通信は、インターネットと同様に、公開鍵暗号と共通鍵暗号で保護されますが、特に公開鍵暗号・鍵交換については、量子コンピュータの研究開発の進展により、一部危殆化するリスクが懸念されています。そこで、NTT社会情報研究所とNTT未来ねっと研究所では、量子コンピュータによる暗号危殆化に対して安全な鍵交換の研究開発と、それら鍵交換を光トランスポートネットワークへ適用するためのアーキテクチャ設計や実機検証を進めています。

おくだ 奥田	てつや 哲矢 ^{†1}	ちだ 千田	こうじ 浩司 ^{†1}
しらい 白井	だいすけ 大介 ^{†2}	ちから 知加良	さかえ 盛 ^{†1}
さいとう 齋藤	つねかず 恒和 ^{†1}	なかばやし 中林	みさと 美郷 ^{†1}
やまむら 山村	かずき 和輝 ^{†1}	たなか 田中	ゆり 友里 ^{†1}
なつかわ 夏川	かつゆき 勝行 ^{†1}	たかすぎ 高杉	こういち 耕一 ^{†2}

NTT社会情報研究所^{†1}

NTT未来ねっと研究所^{†2}

背景

■トランスポートとは何か

まず、トランスポートとは何か、辞書的には「(物流の) 運送」や「(通信の) 伝送」を指します。一般的には、法人向けの物流・運送サービスや通信・伝送サービスを指すことが多いと思います。トランスポートと名前の付いた技術であるセキュア光トランスポートネットワークについて、その特徴をイメージしやすいように、物流・運送サービスの例えで話を始めようと思います(図1)。

トラックによる物流・運送サービスの場合、こういった特徴が求められるのでしょうか。一度にたくさんの荷物を運べること、注文後にすぐに荷物が届くこと、等々が思いつきます。ここでは、表に示す5つの観点を取り上げてみます。

物流・運送サービスにおいて、大容量であること、低遅延であることは顧客にとってもっとも重要な特徴、サービスの価値であると思います。大容量

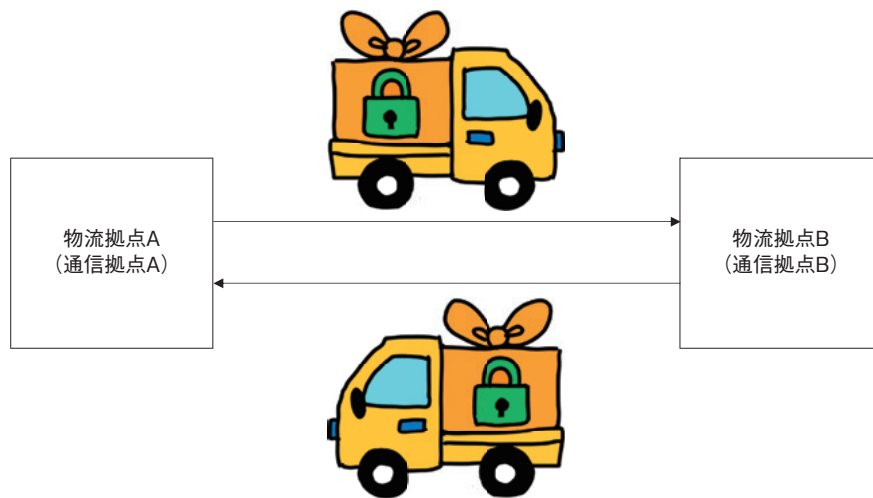


図1 トランスポートとは何か

表 物流・運送サービスと通信・伝送サービスの比較

サービスの特徴	物流・運送サービス	通信・伝送サービス
大容量	トラック台数	スループット
低遅延	トラック待ち時間	レイテンシ
経済性	物流最適化	通信ネットワーク最適化
環境負荷	排ガス/CO ₂	消費電力
安全性	荷物が正しく届くこと 交通事故が少ないこと	通信の故障が少ないこと セキュリティが高いこと

＝トラック台数が多いこと、低遅延＝
トラック待ち時間が少ないことと表現

できます。また、事業として物流・運
送サービスを営むうえでは、経済性も

欠かせない特徴です。経済性は、物流が最適化されて経済的に運営されていることと表現できます。また、近年はサービスの社会的影響が問われることも多く、環境負荷や安全性も考慮すべき特徴です。環境負荷＝排ガス/CO₂が少ないこと、安全性＝荷物が正しく届くことや交通事故が少ないことと表現できます。

通信・伝送サービスではどうでしょうか。やはり、大容量であること、低遅延であることは顧客にとってのもっとも重要な特徴、サービスの価値であると思います。通信分野の用語では、大容量＝スループットが高いこと、低遅延＝レイテンシが小さいことと表現できます。また、事業として通信・伝送サービスを営むうえでは、経済性も欠かせない特徴です。経済性は、通信・伝送サービスを提供するネットワークの効率性と表現できます。また、通信の業界においても、近年はサービスの社会的影響が重視されており、環境負荷や安全性も考慮すべき特徴です。通信分野では、環境負荷＝低消費電力であること、安全性＝ネットワークの故障が少ないこと、セキュリティが高いことと表現できるでしょうか。

NTTが研究開発を進めるIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) /APN (All-Photonics Network) は、表に示した5つの観

点のうち、大容量、低遅延、環境負荷の3点を顧客に訴求するサービスをめざしています⁽¹⁾。そして、IOWN/APNに安全性＝セキュリティの観点プラスする取り組みの1つが、本稿で提唱するセキュア光トランスポートネットワークです。

■光トランスポートネットワークの必要性

携帯電話・スマートフォンの普及、さらに大容量・低遅延の5G（第5世代移動通信システム）の普及で、世の中が便利になることに多くの方が賛同されると思います。法人向けの通信・伝送サービスにおいても、大容量・低遅延は顧客にとって望ましい特徴といえます。特に近年の顧客ニーズとしては、データセンタの災害対策 (Disaster Recovery) を想定したデータセンタ間通信 (Data Center Inter-connect) や、映像制作の現場における撮影拠点と編集拠点の間で同時並行に作業するリモートプロダクション (Remote Production) 向けの非圧縮映像伝送が、注目されているように見受けられます。これら大容量のデータを、なるべくリアルタイムに低遅延で、伝送するためには、光トランスポートが適しています⁽²⁾。この光トランスポートにセキュリティを付加する取り組みを、本稿で紹介します。

既存技術

■インターネット標準

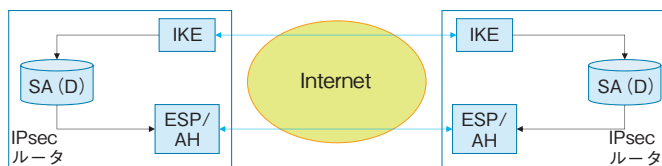
通信・伝送サービスにセキュリティを付加するために、インターネットで利用されている既存技術を活用することは有効で、それら技術が長く使われているほどに、安全性評価の面で成熟していることが期待されます。

インターネットにおいて安全な通信路（セキュアチャネル）を構成するプロトコルの代表例として、SSL/TLSとIPsecが存在します。SSL/TLSは、Webサーバとクライアントの間のセキュアチャネルを構成する標準プロトコルです。IPsecは、企業の本社と支社など拠点間のセキュアチャネルを構成する標準プロトコルで、VPN (Virtual Private Network) サービスに使われる技術として知られています。本稿で紹介するセキュア光トランスポートネットワークは、拠点間の通信・伝送サービスです。

■IPsec

IPsecは、インターネットの事実上標準を定めるIETF (Internet Engineering Task Force) で仕様化されている拠点間のセキュアチャネルを構成するプロトコルで、仕様書の構成としては、アーキテクチャ、暗号化、認証、鍵交換、で構成されています^{(3)~(6)}。

全体像を表すアーキテクチャの中に、鍵交換を行うIKE (Internet Key Exchange)、暗号化と認証を行うESP (Encapsulated Security Payload)、認証を行うAH (Authentication Header)、IKEで合意された鍵をESPまたはAHに伝えるSAD (Security Association Database) が存在します (図2)。なお、「認証」には、メッ



通常のIPsecの機器構成

図2 IPsecのアーキテクチャ

セージ認証とエンティティ認証が含まれます。それぞれ、通信先から届いたメッセージが正しいか検証すること、通信先が正しいか検証することに相当します。

次に、IPsecの構成がセキュア光トランスポートネットワークではどう変更されるか紹介します。

課題および提案 (I) : 量子コンピュータの進展の可能性

■量子コンピュータの進展の可能性

現在、インターネット等の通信では公開鍵暗号に基づく鍵交換が使われています。公開鍵暗号は数学的に解くことが困難な問題を安全性の根拠として構築されており、例えばRSA暗号は大きな2つの素数の積を素因数分解するには非常に多くの時間がかかることを安全性の根拠としています。しかし、誤り耐性を有する本格的な量子コンピュータが実現すると、2つの素数の積を短い時間で素因数分解できてしま

い、RSA暗号が安全とはいえないことが知られています。そこで、対策として、量子コンピュータでも破ることのできない鍵交換の研究開発を進めています。

■量子鍵配送 (QKD)

量子鍵配送 (QKD: Quantum Key Distribution) は、量子物理による鍵配送の仕組みです。量子状態を伝送することができる量子通信路で、秘密鍵の情報を量子状態に載せて共有します。QKDの最大の特徴は、秘密鍵の共有時、第三者による盗聴を検知できることです。これは「量子状態は測定すると状態が変化する」という量子特有の性質に由来します。二者間で量子状態を送受信している途中で第三者が盗聴、すなわち測定をしたとすると、送信した量子状態と受信した量子状態が異なる場合があります。二者間で、それぞれ送受信した量子状態を公開された通信路で「答え合わせ」し、それが異なっている場合、第三者による盗

聴を検知することが可能になります。これらの量子状態の送受信と、盗聴の検知を、繰り返して精度を高めることで、最終的に二者間で秘密鍵を共有することが可能になります。

■耐量子計算機暗号による鍵配送 (PQCまたはPQKD)

耐量子計算機暗号 (PQC: Post-Quantum Cryptography) は、数学的に解くことが困難な問題を安全性の根拠とする公開鍵暗号・鍵配送の仕組みで、特に、量子計算機でも難しいと予想される問題を安全性の根拠とします。例えば、格子暗号は、格子点の集合が与えられたときに、原点からもっとも近い格子点を求めることが量子計算機を用いても難しいと予想されていることを安全性の根拠としています。

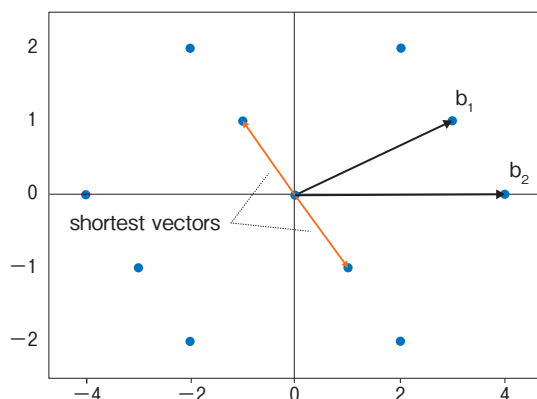
NTTは、耐量子計算機暗号である格子暗号の1つである、NTTを含むチームの技術が組み込まれたNTRU暗号を中心に研究開発を進めています (図3)。

以降では、QKDとPQKD (Post-Quantum cryptography-based Key Distribution) を総称してxKDと呼ぶこととします。

課題および提案 (II) : アーキテクチャ設計における 新たな攻撃者への対策

■ゼロトラストネットワークにおける攻撃者への対策

近年は、閉域ネットワークに絶対の信頼を置かない、ゼロトラストネットワークの攻撃者を想定した設計が普及しており⁽⁷⁾、今回のアーキテクチャ設計においては、通信キャリア網、拠点内ネットワークを含めて、あらゆるネットワーク上の攻撃者を想定する必要が



青い点が基底 $\{b_1, b_2\} = \{(3, 1), (4, 0)\}$ で生成される2次元格子のベクトル。
この格子の最短ベクトルは $(1, -1)$ と $(-1, 1)$ 。
主な格子問題である最短ベクトル問題 (Shortest Vector Problem, SVP) は基底 $\{b_1, b_2\}$ が与えられたときに最短ベクトルを見つけるという問題。

図3 量子計算機でも難しい格子問題の例

あります。通信キャリア網については、光ファイバに物理的に接続して通信内容を傍受する攻撃者を、拠点内ネットワークについては、拠点内ネットワークに権限を有して通信内容を傍受する攻撃者を想定します。

通信キャリア網において、光ファイバに物理的に接続して通信内容を傍受する攻撃者については、レイヤ1（物理層）を保護するプロトコルである OTNsec およびレイヤ2（データリンク層）を保護するプロトコルである MACsec などの、“ホップバイホップ”の暗号化による対策が可能であり、より低レイヤで暗号化の機能を実装することで、IOWN/APNの低遅延性を阻害することなくセキュリティを付加できることが期待されます。

拠点内ネットワークに権限を有して通信内容を傍受する攻撃者については、IPsecに代表される拠点間通信のアーキテクチャ設計は一から見直す必要があります。セキュア光トランスポートネットワークでは、前述したIPsec/IKEに相当する鍵交換の部分がQKD装置あるいはPQKD装置に、IPsecのESP/AHに相当する暗号化の部分が光トランスポンダ・ホワイト

ボックススイッチに、それぞれ対応します。後述する「ディスアグリゲーション構成」の方向性で、鍵交換と伝送が別機器となることが想定され、IPsecでは一体であった鍵交換と暗号化の機能が分離した構成を想定する必要があります（図4）。その結果、IPsecのSA(D)に相当する鍵情報が機器外部のネットワークを流通し、ゼロトラストネットワークの仮定では、あらゆるネットワーク上の通信は保護が必要なため、IKEとESP/AHの間の通信を保護する対策を新たに検討する必要があります。具体的には、xKD装置から光トランスポンダへの安全な鍵配送方法、xKD装置と光トランスポンダの間の機器認証方法、を安全に設計する必要があります。これら検討詳細は公開予定論文⁽⁸⁾をご参照いただければと思います。

■外部から検証可能なアーキテクチャおよび機器の必要性

ゼロトラストネットワークでは、アーキテクチャ、プロトコル、機器等の信頼性を外部から検証可能であることが要求されます。さらに、セキュリティ対策の原則として、何らかの危殆化を見据えて、アーキテクチャ、プロトコ

ル、機器等が個別に更新可能であることを要求します。本稿のアーキテクチャ設計、プロトコル設計、機器選定においては、信頼性を外部から検証可能かつ個別に更新可能とするための技術として、形式検証とホワイトボックススイッチを採用しました。

■形式検証

暗号技術を含むプロトコルの設計時には、プロトコル内の秘密情報の機密性やメッセージの完全性などの安全性を数学的に保証する安全性検証が必要です。特に、トランスポートを担うレイヤであるSSL/TLSやIPsec、ほかには携帯通信の規格である5G認証プロトコルの安全性検証に、形式検証技術が用いられています。形式検証とは、システムとシステムが満たすべき性質を形式言語で記述し、論理的な推論に基づきシステムが性質を満たしているか・いないかを検証する技術です。形式検証ではコンピュータによって自動化されている部分が多いため、再現性確認を含めて結果を外部から検証可能であること、プロトコルの更新に対して適応的に再検証可能であることが優れています。今回のセキュア光トランスポートネットワークにおいて

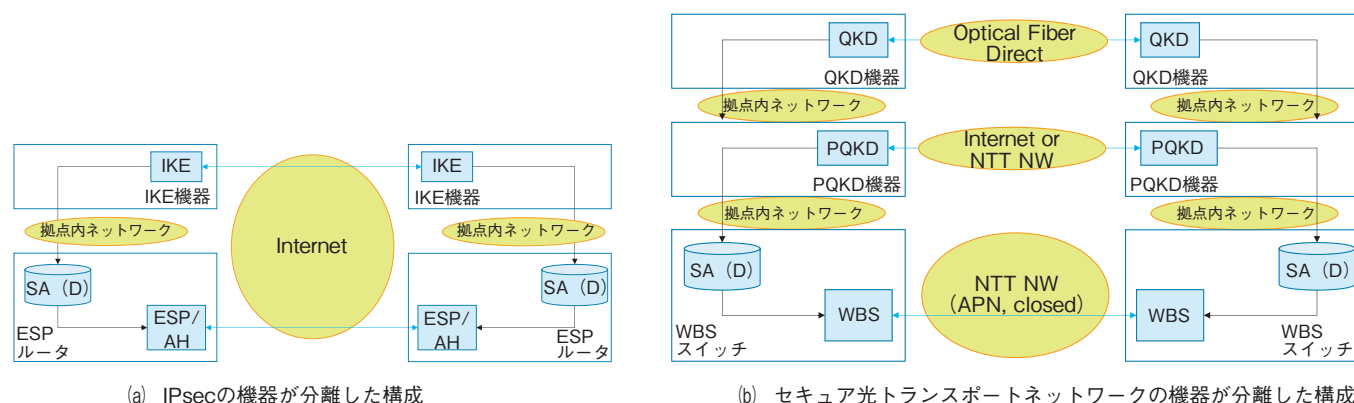


図4 IPsecとセキュア光トランスポートネットワークの構成の差異

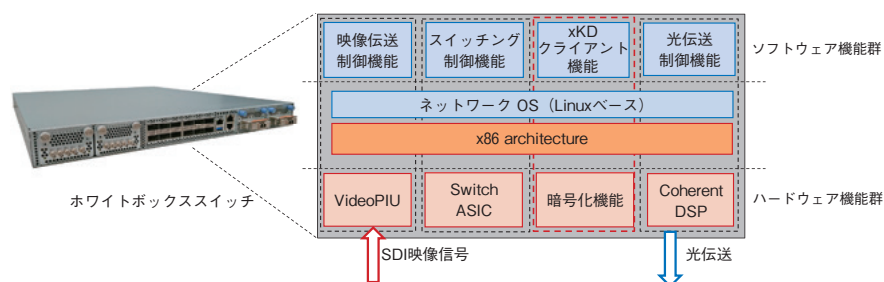


図5 ホワイトボックススイッチのディスアグリゲーション構成

は、xKD装置を光トランスポンダと組み合わせたIPsecベースのプロトコルを設計するに際して、安全性検証を形式検証ツールであるProVerifを用いて行いました⁽⁹⁾。

■ホワイトボックススイッチ

従来、光トランスポートを担う伝送装置は、光モジュールや各種機能などが一体型で提供されていました。これに対し、ディスアグリゲーション構成と呼ばれる、伝送装置の各種機能を分離し、標準化されたインターフェースで制御することで、柔軟な構成変更、付加機能の実現、コストの低減等が可能になる技術を採用した装置を、ホワイトボックススイッチまたはホワイトボックストランスポンダと呼びます。今回、ホワイトボックススイッチ装置のハードウェア機能群における、光伝送データの暗号化機能に対し、xKD装置から暗号鍵を取得して、設定・利用するxKDクライアント機能を新たにソフトウェア実装しました(図5)。さらに追加実装したSDI信号(映像信号)の直取機能を用い、40 Gbit/sを超える8K60Pの非圧縮映像を、超低遅延でセキュアに伝送できることを実証しました。これにより、xKD装置と光トランスポンダを連携した、セキュア光トランスポートの実現可能性について一定の検証ができたといえます。

今後に向けて

本稿では、NTTが研究開発を進めるIOWN/APNにセキュリティ機能を付加するための取り組みとしてセキュア光トランスポートネットワークについて紹介しました。また、本取り組みに際してフォーカスした課題と提案について紹介しました。本取り組みをステップに、NTTグループとして、安心・安全な技術およびサービスを提供することに引き続き貢献していきたいと思います。

■参考文献

- (1) <https://www.rd.ntt/iown/0002.html>
- (2) 富澤・金子・木村: “Beyond 100G 光トランスポートネットワークに向けたデバイス技術開発,” NTT技術ジャーナル, Vol.28, No.7, 2016.
- (3) Security Architecture for the Internet Protocol https://datatracker.ietf.org/doc/rfc4301/
- (4) Internet Key Exchange Protocol Version 2 (IKEv2) https://datatracker.ietf.org/doc/rfc7296/
- (5) IP Encapsulating Security Payload (ESP) https://datatracker.ietf.org/doc/rfc4303/
- (6) IP Security (IPsec) and Internet Key Exchange (IKE) Document Roadmap https://datatracker.ietf.org/doc/rfc6071/
- (7) S. Rose, O. Borchert, S. Mitchell, and S. Connelly: “Zero Trust Architecture,” NIST SP 800-207, August 2020.
- (8) 前田・中林・奥田: “セキュア光トランスポートNWの実現に向けたアーキテクチャ設計および形式検証による安全性評価,” 第95回CSEC研究会, 2021.
- (9) B. Blanchet: “Automatic Verification of Security Protocols in the Symbolic Model: The Verifier ProVerif,” Foundations of security analysis and design VII, Springer, pp. 54 -87, 2013.



(1段目左から) 奥田 哲矢/ 中林 美郷/
齋藤 恒和

(2段目左から) 千田 浩司/ 山村 和輝/
田中 友里

(3段目左から) 白井 大介/ 知加良 盛/
夏川 勝行

(4 段 目) 高杉 耕一

大手IT事業者や通信キャリアが、増大するデータセンタ間通信に対応するため、光トランスポートネットワークに注目しています。NTT研究所では、量子コンピュータ時代に適応可能で安心・安全な光トランスポートネットワークの実現に向けて、研究開発を進めています。

◆問い合わせ先

NTT社会情報研究所
企画担当
E-mail solab@hco.ntt.co.jp

光論理ゲートで構成する暗号回路技術

近年、ナノフォトニクス技術の進展により小型の光素子の実現が可能になり、光論理ゲートの研究開発がさかんに行われています。私たちは、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) の構成要素であるオールフォトリクス・ネットワークにおける光情報通信および光コンピューティング上でのデータの暗号化・認証などに用いるため、光論理ゲートで構成する暗号回路の研究を行っています。本稿では、標準暗号の1つであるAESの暗号回路を光論理ゲートで構成する方法を紹介します。

たかはし
高橋じゅんこ
順子^{†1}ちだ
千田こうじ
浩司^{†1}やまこし
山越きみひろ
公洋^{†1}きた
北しょうた
翔太^{†2}しんや
新家あきひこ
昭彦^{†2}NTT 社会情報研究所^{†1}NTT 物性科学基礎研究所^{†2}

オールフォトリクス・ネットワーク 情報処理基盤における光演算

オールフォトリクス・ネットワーク (APN) の情報処理基盤では、通信ネットワーク・通信基盤から端末デバイスに至るまで光技術を導入することにより、低消費電力、高品質・大容量および低遅延の情報処理の実現をめざしています。従来のネットワーク機器でのデータ処理および端末デバイスでの演算は電子回路で行われていますが、APN情報処理基盤ではそれらに光技術を用いることにより、処理や演算の性能を向上させることを想定しています。光技術の1つに、光論理ゲートで構成され、論理演算等が可能な光回路があります。光回路は、例えば、深層学習の分野における学習アルゴリズムの演算に利用されており、低遅延・低消費電力な演算が可能と示されています⁽¹⁾。

光暗号回路技術

APN情報処理基盤では、コンピュー

ティングの性能向上のためにさまざまな専用ハードウェアが光回路で実現されます。そのため、APN情報処理基盤の安全性を担保するために必要な暗号専用ハードウェアも光回路で実装し、暗号演算が全体の性能のボトルネックとならないように遅延や消費電力を抑えた回路にすることが望ましいと考えます。そこで私たちは、光信号により暗号・認証の演算が可能な光暗号回路を研究しています。本章では、標準暗号の1つであるAdvanced Encryption Standard (AES) を光回路で実現する方法を紹介します。

■ AESの暗号方式

AESは、128ビットブロック長のブロック暗号であり、鍵長は128、192、256ビットから選択することができます⁽²⁾。状態と呼ばれる中間値の128ビットを8ビットずつ区切って4×4行列で表現し、暗号化の基本構造であるラウンド関数を繰り返し演算して暗号文を出力します。ラウンド関数は、非線形演算であるSubBytes、線形演算であるShiftRows、MixColumns、

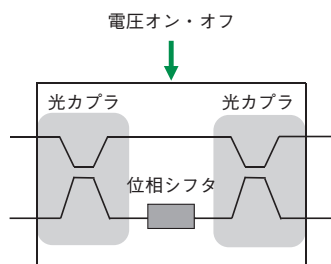
およびステートと鍵との加算であるAddRoundKeyから構成されます。本章では、AESの主要な演算であるSubBytesとMixColumnsに着目し、それらを光回路で実現する方法を紹介します。

■ 光論理ゲートで実装するSubBytes

SubBytesは、8ビットごとに仕様で定められたS-boxテーブルに基づいた変換を行います。S-boxテーブルは、8ビット入出力の非線形変換です。ある8ビットの入力値に対して、テーブルを参照することにより、8ビットの出力値が得られます。例えば、入力値0xf0に対するS-boxの出力は0x8cとなります（入出力の値は16進数で表しています）。

このようなテーブルに基づいた変換は、光論理ゲートの一種であるマツハ・ツェンダー干渉型光スイッチ (MZIスイッチ) を用いて実装することができます。MZIスイッチは、図1(a)に示すように、光カプラと位相シフタから構成され、位相シフタが埋め込まれ

(a) マッハ・ツェンダー干渉型光スイッチ



(b) スイッチの動作

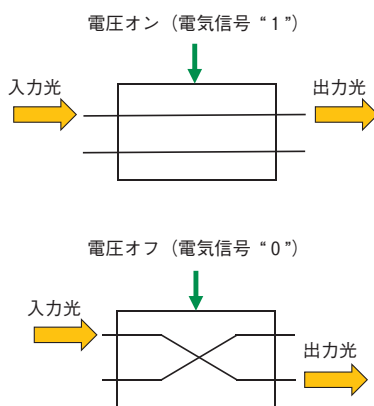


図1 マッハ・ツェンダー干渉型光スイッチ (MZIスイッチ) とその動作

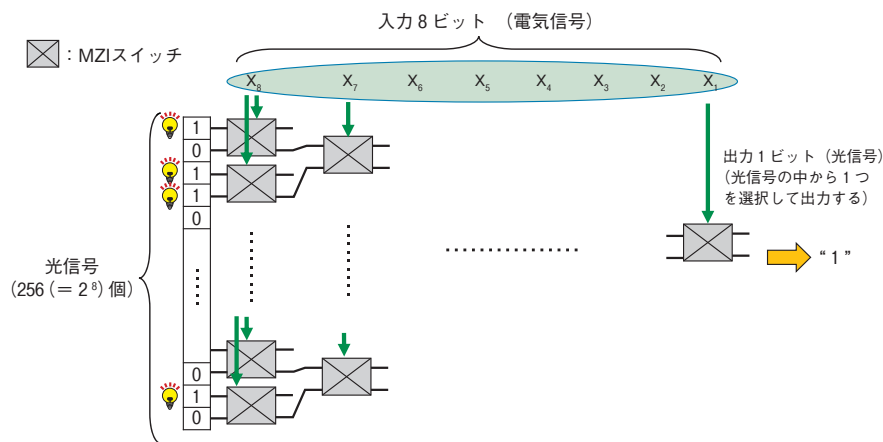


図2 MZIスイッチによるテーブル変換の実装方法

た経路に電圧を加えるか否かによって光導波路の屈折率の変化を起こすことにより、2つの経路の位相差を変更します。このことにより、MZIは光の経路を切り替えるスイッチとして動作します。例えば図1(b)では、上側の経路に光が入力され、位相シフタが埋め込まれた経路に電圧を加える場合は(電気信号のビット“1”に相当)光信号は直進した経路(上側)から出力され、電圧を加えない場合は(電気信号のビット“0”に相当)光信号はクロスした経路(下側)から出力されます。

私たちは、テーブル変換の入力ビット数に応じた数のMZIスイッチを接続して経路を切り替えることにより(図2)、入力8ビットに対して1ビットの光信号を出力するテーブル変換の実装方法を考案しました。図2において、単一の光源を分岐した256個(= 2^8 個)の光を用意し、点灯(光信号のビット“1”に相当)または消灯(光信号のビット“0”に相当)と設定します。このとき、8ビットの入力($x_1, x_2, \dots, x_8$)に応じて経路を選択しながら光がMZIを通過し、最終的

に1つの光信号が選択され、出力されます。このように、MZIを用いて8ビットの入力に対して1ビットの光信号を出力するテーブル変換を実現することが可能です。

前述のように複数のMZIスイッチを接続し、256個の光信号を適切に設定することで、S-boxテーブルを構成することができます。MZIの入力(電気信号)にS-boxテーブルの入力を設定し、光信号にS-boxテーブルの出力を設定します。例えば、S-boxテーブルの各256個の値の最下位ビットを光信号に設定しておけば、入力8ビット($x_1, x_2, \dots, x_8$)に対してS-boxテーブルの出力の最下位1ビットを得ることができます。同様に、S-boxテーブルの出力の各々 n ビット目($n=1, \dots, 7$)を光信号に設定しておけば、8ビットの入力に対するS-boxテーブルの出力の n ビット目を得ることができます。

8ビット分のS-boxテーブルの出力を得るためには、上記演算処理を時系列的に8回繰り返す方法や図2の回路を8個並列に実装する方法もありますが、光の場合は波長を8波長に多重化し、波長ごとにS-boxテーブルの n ビット目を導出することにより、図2の1つの回路で8ビット分を演算することも可能です。

■光論理ゲートで実装する MixColumns

MixColumnsは、図3(a)に示すように、定数行列とステートの乗算で定義されています(X, Y は8ビット)。行列式を計算すると、出力の各8ビットは図3(b)の式①のように表すことができます(図3(b)では Y_1 のみを示

(a)

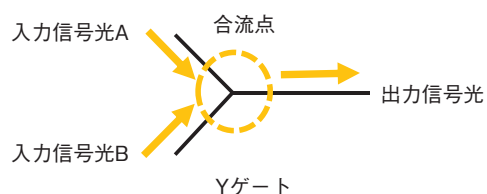
$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 02 & 03 & 01 & 01 \\ 01 & 02 & 03 & 01 \\ 01 & 01 & 02 & 03 \\ 03 & 01 & 01 & 02 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{pmatrix}$$

(b)

$$Y_1 = \{02\} \cdot X_1 \oplus \{03\} \cdot X_2 \oplus X_3 \oplus X_4 \quad \cdots \textcircled{1}$$

(※) $\oplus$: 排他的論理和 (XOR)
 $\cdot$: 乗算

図3 AESのMixColumns構成



信号光 ケース	入力信号光A	入力信号光B	出力信号光	出力 ビット値
①	—	—	—	0
②	—			1
③		—		1
④			—	0

図4 Yゲートを用いたXOR演算

しています)。さらに、乗算を計算すると、式①は5ビットのXOR演算（入力5ビット・出力1ビットのXOR演算）5つと、7ビットのXOR演算（入力7ビット・出力1ビットのXOR演算）3つを用いて表すことができます⁽²⁾。ここでは、例として、7ビットのXOR演算を光論理ゲートで構成する

方法を紹介しします。同様に、5ビットのXOR演算も構成可能です。

XOR演算が可能な光演算素子としてYゲートがあります⁽³⁾。Yゲートは、2つの入力信号光が合流する点で信号を重ね合わせます。光信号が振幅と位相を持つ「波」である性質を利用することでXOR演算やOR演算を実現で

き、電気による論理ゲートに比べて約300倍の高速な演算が可能です⁽³⁾。

YゲートによるXOR演算の原理を図4に示します。図4のように、位相差が180°で振幅の大きさが同等の2つの信号光（入力信号光Aと入力信号光B）を入力とします。図4の「—」は入力信号光の振幅が0の状態、つまり信号光がない状態を示します。この2つの信号光をYゲートへ入力し、出力光の振幅の大きさを判定します。例えば、図4のケース④の場合、2つの入力信号光の振幅が同等で位相差が180°であるため、信号が打ち消し合い、振幅が0となります。このようにして、振幅が0の状態をビット“0”、振幅の大きさが入力信号光と同程度である状態をビット“1”に対応付けると、図4の出力信号光のビット値に示すようにXORの論理演算を行うことが可能となります。このように2つの入力信号光の位相差を180°にするといった入力光に対する制約をつけることで、Yゲートを用いてXOR演算が可能なが示されています。

ここで、7ビットのXOR演算を行う際には複数のYゲートをつなげて演算しますが、XOR演算の演算結果を次のXOR演算の入力とする場合は、各Yゲートの2つの入力信号光の位相差は演算結果に依存し、必ずしも180°になるとは限りません〔例えば、4ビットのXOR演算（ $a \oplus b \oplus c \oplus d$ ）を行う際に、a、bとのXOR演算結果とc、dとのXOR演算結果とが共にケース②の出力となり、その結果をXOR演算する場合など〕。よって、各Yゲートの2入力信号光の位相差を演算結果に応じて変更するといった操作が必要

であり、この操作による遅延や消費電力が増加してしまいます。

そこで私たちは、演算途中の位相の変換を不要とするために、Yゲートの入力の光信号を同位相として演算し、演算の最後にしきい値処理により出力結果を補正する方法を考案しました。

図5にその概要を示します。本手法は、Yゲートの重ね合わせと光検出器内でのしきい値処理により構成されます。Yゲートの重ね合わせでは、合計7つのYゲートを利用して、光の振幅を足し合わせていきます〔入力数が7であるため、8番目は振幅“0”の光（消灯）とします〕。しきい値処理では、入力光（ $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$ ）の中で光の振幅が0でない信号の数が多いほど、出力光の振幅が大きくなるため、それを検出し、出力のビットを

判定します。具体的には、出力光の検出なし（消灯）、または入力光の振幅の偶数倍（2倍、4倍、6倍）の振幅を検出した場合は出力結果をビット“0”、入力光の振幅の奇数倍（1倍、3倍、5倍、7倍）を検出した場合は出力結果をビット“1”と判定します。前述の実装方法により、Yゲートの演算度に入力光の位相を変換する必要なく、XOR演算を行うことが可能になります。本演算方法により、Yゲートの出力の処理を7回（Yゲートの出力の数）から1回（しきい値処理時のみ）に削減することが可能です。

図3(b)の式①から計算される7ビットのXOR演算および5ビットのXOR演算を図5に示す演算方法に対応させると、 Y_1 の1ビット分を計算することができます。 Y_1 （8ビット分）を

計算するには、SubBytesの演算と同様に、時系列的に演算する、複数の演算回路を用いる、または、1つの演算回路で波長の多重化により演算を行うという実装方法が可能です。

今後の展開

私たちは、光論理ゲートを利用するAES暗号回路の構成方法を考案しました。今後、APN情報処理基盤の安全性を確保するために、さまざまな暗号方式による演算や認証などのセキュリティ技術を光回路で実装する光セキュリティアクセラレータが必要になってきます。このアクセラレータは、図6に示すAPN情報処理基盤を支えるアーキテクチャである光ディスアグリゲートドコンピューティング⁽⁴⁾の構成要素の1つになると考えていま

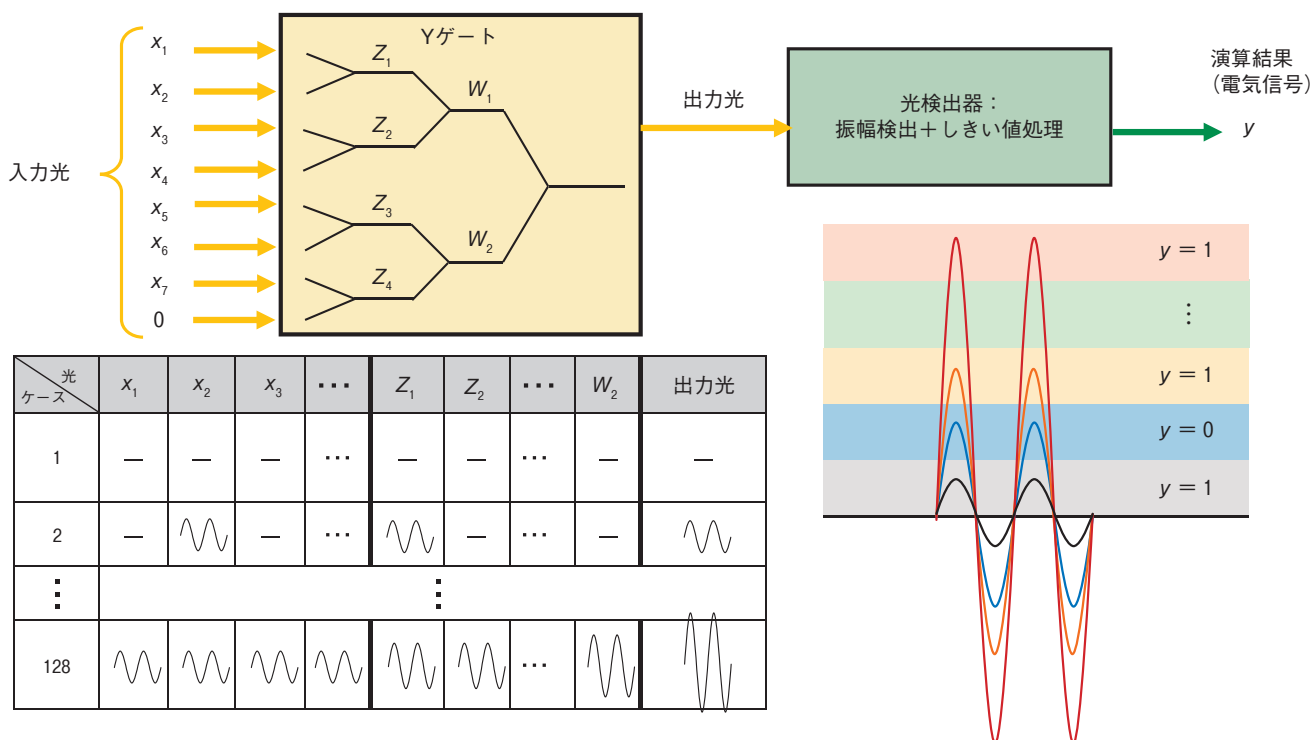
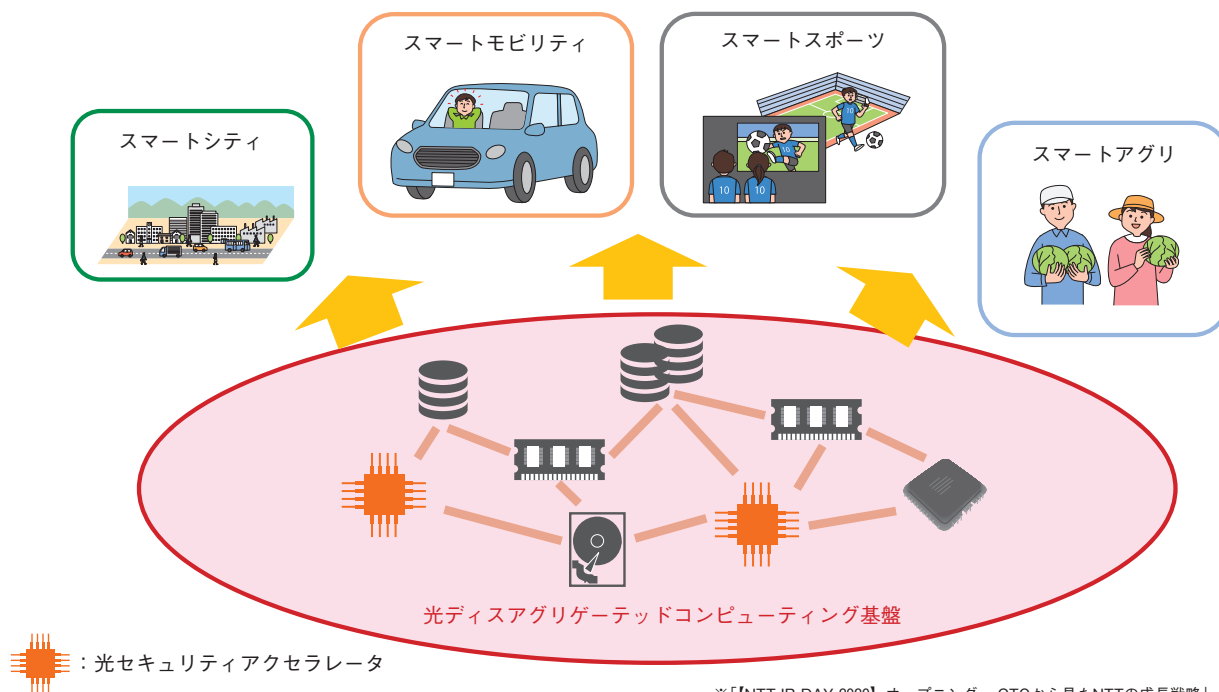


図5 7ビット入力・1ビット出力のXOR演算の実装方法



※「[NTT IR DAY 2020] オープニング～CTOから見たNTTの成長戦略」を基に図を作成。

図6 光セキュリティアクセラレータを搭載したAPN情報処理基盤

す。従来、CPU・メモリ等の各種デバイスは各サーバ内に閉じていましたが、光ディスクアグリゲータッドコンピューティングは、それらを高速光ネットワークで接続し、分散させることにより、ラック・データセンタスケールのコンピュータとして扱うという新しいアーキテクチャです。光セキュリティアクセラレータは、安全な光ディスクアグリゲータッドコンピューティング基盤およびそれによる安全なスマートサービスの提供につながると考えています。今後も、低遅延・低消費電力の光セキュリティアクセラレータの実現のために、私たちは光の特性を活かした新たな暗号・認証の実装方式の研究を引き続き行っていきます。このことにより、安全なIOWNの実現に貢献していきます。

参考文献

- (1) J. Peng, Y. Alkabani, S. Sun, V. J. Sorger, and T. El-Ghazawi: "DNNARA: A Deep Neural Network Accelerator using Residue," ICPP 2020, No. 61, pp. 1-11, Edmonton, Canada, August 2020.
- (2) NIST: "Announcing the ADVANCED ENCRYPTION STANDARD (AES)," Federal Information Processing Standards Publication 197, 2001.
- (3) S. Kita, K. Nozaki, K. Takata, A. Shinya, and M. Notomi: "Ultrashort low-loss Ψ gates for linear optical logic on Si photonics platform," Communications Physics, Vol. 3, No. 33, pp.1-8, 2020.
- (4) 岡田・木原・岡崎: "IOWNを支えるディスクアグリゲータッドコンピューティング," NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 5, pp. 40-44, 2021.



(上段左から) 高橋 順子/ 千田 浩司/
山越 公洋

(下段左から) 北 翔太/ 新家 昭彦

光技術で暗号回路を実現するというチャレンジングな研究テーマに取り組んでいます。今後も、安全な新しい光コンピューティング基盤の実現をめざして、研究を進めていきます。

◆問い合わせ先

NTT 社会情報研究所
企画担当
E-mail solab@hco.ntt.co.jp

データから価値を連鎖的に生み出す トラステッド・データスペース

「スマートな世界」では、さまざまな組織が企業や業種の壁を超えてデータを相互に持ち寄って分析し、新たな目的を持つデータを連鎖的に生み出すことで、社会全体でデータの価値を最大化できる可能性を持っています。現実には、組織間のデータ利活用は「限定した相手」に対して「限定的なデータ」を提供するにとどまり、価値の連鎖には至っていません。本稿では、この問題の解決に向けた取り組みとして、「トラステッド・データスペース」というデータ流通の新しい仕組みと、これを実現する要素技術を紹介します。

わしお 鷲尾	ともあき 知曉 ^{†1}	いとう 伊藤	ひろき 宏樹 ^{†1}
みたに 神谷	こうき 弘樹 ^{†1}	もろはし 諸橋	げんぶ 玄武 ^{†1}
うまこし 馬越	けんじ 健治 ^{†1}	おくた 奥田	てつや 哲矢 ^{†1}
たかや 高屋	かずゆき 和幸 ^{†2}	おおむら 大村	けい 圭 ^{†2}
たかはし 高橋	げん 元 ^{†1}		

NTT 社会情報研究所^{†1}

NTT ソフトウェアイノベーションセンタ^{†2}

業種横断のデータ流通が実現するスマートな世界

近年、製造ラインや化学プラントといった実世界のシステムをサイバー空間上で再現し、システムの動作を分析、予測するのみならず、組織や業種・業界を超えたデータ共有、データ分析を実現する技術の研究開発がさかんに行われています。

例えば、スマートシティでは、フィジカル空間（物理空間）に設置された膨大な数のセンサや動画像等をデータ化し、サイバー空間で分野横断的にヒト、モノの動きの分析を行い、得られた分析結果を基にフィジカル空間である都市におけるヒト、モノの行動を制御します。このようなフィジカル空間とサイバー空間とが高度に融合した「スマートな世界」が到来します。

スマートな世界ではさまざまな個人や企業から、世界規模でこれまでにない質と量を持つデータが生成され続けるため、これらのデータを有効に活用する仕組みが求められます。私たちは、誰もが企業や業種の壁を超えてデータを相互に持ち寄って分析し、新たな目的を持つデータを連鎖的に生み出すことで、互いの持つデータの価値を互いに見出し、社会全体で価値を最大化していくデータの市場（いちば）が必要だと考えています。この仕組みを「トラステッド・データスペース（データスペース）」と呼んでいます。

データスペースには提供者と利用者の両方が参加します。データスペース上のデータは、提供者の管理下に置かれながらも、仮想的に1つの巨大なデータレイクのように利用でき、自由にデータを検索することができます。

提供者はデータの利用条件（利用期間、実行可能な処理、二次利用条件等）を提示し、利用者はその条件に合意することで許された範囲でデータを使用することができます。このような仕組みを提供することで、ある目的で収集したデータが新たな目的にも利用可能となり、データから新たな価値を持つデータが連鎖的に生まれることが期待できます。例えば、娯楽施設、交通事業者、飲食店等が協力してユーザの1日の行動をレコメンドする目的で集めたマーケティングデータを、自治体が防災や防犯、住民の健康増進施策や街づくりに活用するといった、特定の事業体のみでは達成できないことも可能となります（図1）。

■組織横断的なデータ利活用の課題

しかし、こうした社会の期待の高ま

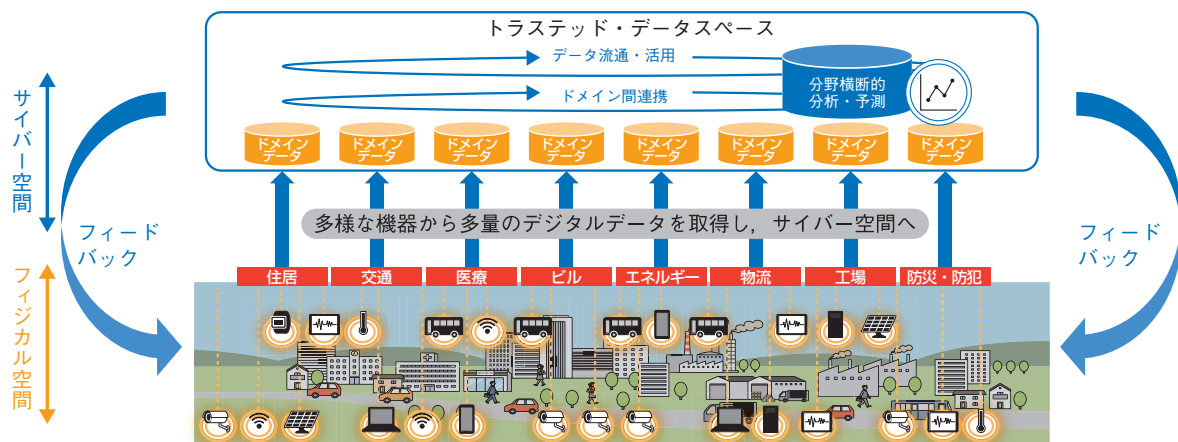


図1 スマートな世界とトラステッド・データスペース

りにもかかわらず、現時点のデータ共有・分析技術の社会実装は、局所的な価値発見にとどまっています。組織が収集したデータはそのほとんどが「集めた企業」が「そのデータを集めた目的」でしか活用されておらず、組織間のデータ利活用は「限定した相手」に対して「限定的なデータ」を提供するにとどまり、価値の連鎖には至っていません。私たちは、これを「データ流通の壁」と呼んでいます。

「データ流通の壁」を克服するには、適切なデータ提供先や最適なデータの発見に関する課題、データ利用の合意を形成する際の課題、合意形成に基づいてデータ共有・利用する際の課題があり（表）、これらの課題を解決する技術が必要になります。

私たちは、これらの課題を解決する技術を提供することで、新たな価値が連鎖的に生み出されるデータ流通を実現し、ひいては社会全体でデータの価値を最大化できると考えています。

世界のデータ流通動向

欧州では、製造業を中心にデータ流通が活性化しつつあります。代表的なプロジェクトとして、欧州のデータ流通基盤をめざす Gaia-X⁽¹⁾ というプロ

表 組織横断的なデータ流通の課題

適切なデータ提供先、およびデータの発見に関する課題	・望まない相手どうしてデータの授受が行われない ・データ利用者が、自らが求める条件に適するデータを発見できる
合意を形成する際の課題	・データ提供者とデータ利用者との間で、データ処理条件の合意形成を行い、条件に基づくデータ処理を行う
合意形成に基づきデータ共有・利用する際の課題	・提供者が保有するデータが、そのデータの中身や加工方式が相手に開示されることなくデータ処理され、データ利用者に提供される

ジェクトがあります。Gaia-Xはドイツ政府とフランス政府が2019年10月29日に発表した欧州規模でのデータの共有や利活用を支援する構想で、その実現に向け2021年1月に Gaia-X AISBL という非営利団体が発足しました。法規制や契約に基づいてデータへのアクセスを制御し、データ主権*を保護しつつ、さまざまなクラウドサービスとの相互運用性を確保する技術的な仕組みを提供する基盤を構築していく予定です。また、この動きに追従して、日本では分野を超えたデータ連携をめざすプラットフォーム「DATA-EX」⁽²⁾の構築を担うデータ社会推進協議会が2021年4月1日に発足しています。欧州の Gaia-X を用いたデータ流通の取り組みとして、サプライチェーン等の信頼関係にある企業どうして構成されたデータ流通基盤を構築するプロジェクトが複数発足しています。例えばド

イツでは、Mobility as a Service (MaaS) を実現するための「Mobility Data Space」や、自動車製造サプライチェーンのための「Catena-X」、オランダでは製造業の中小企業のための「Smart Connected Supplier Network (SCSN)」等があります。2022年に、Catena-Xは1000社規模、SCSNは3000社規模のデータ流通基盤を構築する計画です。

このように、業種を超えたデータ流通基盤の構築はすでに始まっています。しかし、現時点では Gaia-X を中心としたルール整備の途上であり、データ流通の相手は信頼関係のある企業間に限られています。また、サイバー攻撃からデータを守るためのセキュリティや、データ提供者の権利を守りな

* データ主権：データの開示範囲や利用用途などをデータ提供者の意思で決めることができる権利です。

がらデータの共有を可能とするデータ主権の保護について、どのような技術を取り入れて実装し、社会インフラとして構築していくかが今後の大きな課題となってくると考えられます(図2)。

トラステッド・データスペースの構成技術

「業種横断のデータ流通が実現するスマートな世界」で説明した課題を解決するには、以下の3つの機構を考える必要があります。

- ① 信頼できるデータやアプリ、取引相手の発見機構：データやアプリ、取引相手をカタログ化し、加えてこれらが妥当であるかの信用情報を可視化します。可視化された情報を基に、信頼できる取引相手とマッチングを行います。
- ② データ処理条件の合意形成機構：データ提供者とデータ利用者との間で、カタログ化された情報を基にデータ処理条件や開示条件、加工方式の合意形成を行います。合意した内容に従いデータ処理の実行可否を判断します。
- ③ 合意に基づくデータ処理機構：データ提供者がデータを自ら管理し、必要な場合のみ仮想的に共有、統合します。データのみならずデータの処理・加工方法までも秘匿したまま、データ利用者が必要とするさまざまな分析・加工等の処理を実行します。

現状のデータ処理は、NDA（秘密保持契約）等の契約や運用管理策でリスクマネジメントを行っていますが、③のように技術による裏付けが必要です。さらに、取引関係のない未知の相手との取引を行い、価値を連鎖的に生み出すためには、②のデータ処理条件の合意形成機構や、最終的には①の信頼できる相手・データ・アプリの発見

機構が必須となります。今回は、データスペースの中心となる合意に基づいたデータ処理機構について紹介します。合意に基づいたデータ処理機構では、仮想データレイクにより組織や個人に散らばるデータを暗号化したまま集めて仮想的に統合し、データサンドボックスもしくは秘密計算という二通りの方法で、暗号化したままデータ処理します。さらに、データ処理条件の合意形成機構の先行的な取り組みについて紹介します。

■仮想データレイク

自らが持つデータを他者に共有する場合、あらかじめ定めたデータ利用条件に従い、最低限必要なデータを提供し、情報の保護・管理が行えることが求められます。仮想データレイクでは、広域に分散する管理主体の異なるデータを、管理主体のガバナンスを維持して仮想的に統合するとともに、データ利用者の要求に基づき最低限のデータのみを転送する技術を実現します。そのうえで、データが生成開始されたことを速やかにデータ利用者に伝え、データ生成が完了する前からデータ利用者が一部のデータを利用開始できる仕組みを実現します。これにより、大容量データであっても早期かつタイムリーに利用でき、データ流通を促進できます。例えば、企業でデータが生成されると同時に、データ管理情報（データカタログや制御ポリシー等のメタデータ）も生成・更新されてプラットフォー

ムに通知されます。プラットフォームはそのデータ管理情報に基づき、許可された利用者に対してデータの存在を知らせ必要分のデータを送信し、当該データの流通を適切に制御します。利用者は、仮想統合されたデータ一覧を参照することで所望のデータに効率良く辿り着くことができ、かつ早期にデータを利用開始できます。これらの仕組みにより、組織を超えた安全・便利なデータの活用を可能にします。

■データサンドボックス技術

データサンドボックス技術は、データを持っているが分析技術を持っておらずデータを他社には共有したくない組織と、分析技術を持っているが他社には共有したくない組織を結び付け、データおよび分析技術を相互に共有することなく分析結果を得るための技術です。

データ所有者と分析技術所有者がそれぞれデータサンドボックスの利用に合意すると、合意した内容に基づくデータと分析技術を含む専用のデータサンドボックスが作成されます。データサンドボックスは外部との通信が断絶されており、また、内部の通信・ストレージ・メモリはデータサンドボックス提供者も復号できないように暗号化されています。これにより、データ所有者、分析技術所有者、データサンドボックス提供者の誰もが、復号されたデータ・分析技術にアクセスすることなくデータを分析可能です。

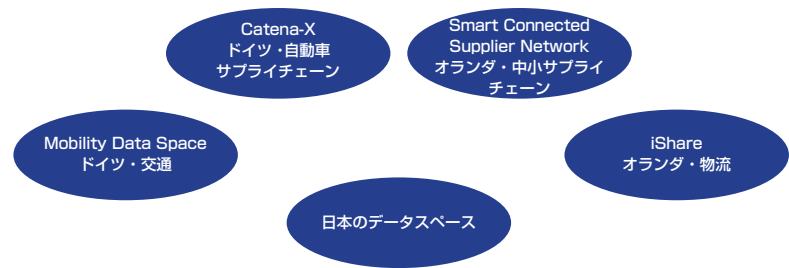


図2 業種を超えたデータ流通基盤

分析結果はデータ所有者と分析技術所有者の合意に基づいて、データ所有者および・または分析技術所有者が閲覧可能な場所に保存されます。分析結果をデータ所有者が閲覧可能な場合、データサンドボックスの利用によってデータ所有者は「データを他社に共有することなく」解析結果を入手可能となり、また分析技術所有者は「アルゴリズムを他社に共有することなく」他社に自社のデータ分析技術を利用してもらうことによる対価を得られます。分析結果を分析技術所有者が閲覧可能な場合、データサンドボックスの利用によってデータ所有者は「データを他社に共有することなく」他社の解析に自社のデータを利用してもらうことによる対価を得られ、また分析技術所有者は「分析技術を他社に共有することなく」自社が持たない他社のデータを利用した分析結果を入手可能となります。

■秘密計算

秘密計算技術は「データを暗号化したまま一度も元データに戻さずに処理を行う」ことを可能にする高度な暗号技術です。2019年には、AI（人工知能）で利用されるデータに対するセキュリティ・プライバシーへの対策として、秘密計算ディープラーニング、つまりデータを暗号化したまま一度も元データに戻さずにディープラーニングの学習や予測をする技術を開発しました。従来の方法では性能面が課題となるため、（暗号化しない）通常のディープラーニングの学習・予測手法よりも単純な処理で代替していました。NTTの秘密計算ディープラーニングでは、世界トップクラスの秘密計算処理性能を活かし、ディープラーニングで行われる標準的な最適化処理を利用した学習処理を、世界で初めて秘密計算処理によって完全に再現しています。

つまり、ディープラーニングでのデータ活用に必要な、①データ提供、②データの保管、③学習処理、④予測処理、のすべてのステップが暗号化した状態で実施可能となるわけです。常にデータは暗号化されたままであり一度も元データに戻すことがないため、従来よりもユーザや組織が安心してデータを提供でき、学習に利用できるデータ量や種類が増えることにつながります。このデータの拡充こそが、より精度が高く高度な分析を可能とするAIを実現します。

■合意形成機構

データ利用においては、提供者がデータ利用を認める条件と利用者がデータに求める要求のそれぞれが存在し、提供者、利用者によって条件や要求の内容は異なります。提供者は、利用を許可する相手、利用目的、利用範囲、利用期限等を条件として指定することが考えられます。一方、利用者は、対象のデータ、利用目的、行いたい処理等を要求として指定することが考えられます。

双方が納得するかたちでデータ利用を行うためには、提供者と利用者の間でデータ利用に対する条件と要求とを突き合わせ、合意を形成する仕組みが必要になります。

通常は提供者、利用者がそれぞれ提供条件、利用条件をポリシーというかたちで表現し、それらの申請内容を人手で確認し、合意を形成しますが、将来的には利用者から利用要求が行われたタイミングで要求内容とポリシーを突き合わせて合意の可否を自動的に判断するやり方も考えられます。さらに、要求と条件との間に差異がある場合に、提供者と利用者の間で要求および条件を動的に調整することができれば、より柔軟な合意形成が可能になります。企業や組織間でのデータ利活用

を促進するためにもこのようなアプローチについても今後検討が必要と考えています。

今後に向けて

トラステッド・データスペースによりこれまで困難だった企業や業種の壁を超えたデータの共有が加速され、新たな価値が連鎖的に生み出されるデータ流通が可能になると考えています。その実現に向け、私たちは、要素技術の研究開発だけではなく、パートナーの皆様との技術検証を加速していきます。

■参考文献

- (1) <https://www.gaia-x.eu/>
- (2) <https://data-society-alliance.org/about/vision-mission/>



（上段左から）鷲尾 知暁／伊藤 宏樹／神谷 弘樹

（中段左から）諸橋 玄武／馬越 健治／奥田 哲矢

（下段左から）高屋 和幸／大村 圭／高橋 元

私たちは、本稿で紹介したトラステッド・データスペースの研究開発を通じてデータから価値を連鎖的に生み出すスマートな世界の実現に貢献していきます。

◆問い合わせ先

NTT 社会情報研究所
企画担当
E-mail solab@hco.ntt.co.jp



主役登場

エンジニアリングから研究所へ

奥田 哲矢

NTT社会情報研究所
研究主任

大学生のころからエンジニアリングが好きで、研究よりWebアプリ開発に熱意がありました。入社後はWebサービス開発を行い、現在の専門はセキュリティプロトコルの設計です。

前職のエンジニア時代に、常時SSL/TLS化、完全HTTPS化、というWebサービス業界のトレンドを経験しました。その後、研究所に戻ってからはSSL/TLS等の暗号利用に関する事業相談窓口を担当していました。その過程で、暗号を利用するセキュリティプロトコルの奥深さに夢中になりました。Webサービスで一般的に利用されるプロトコルの多くのデファクトスタンダードを定めるIETF(Internet Engineering Task Force)の会合に時々参加しており、IETFが発行する標準仕様書のRFC(Request For Comment)を読むのが日課であり趣味となっています。以前は、事業会社の問合せが多いSSL/TLSを中心に読むことが多かったのですが、セキュア光トランスポートにかかわり始めてからIPsecも読むようになりました。その知見がセキュア光トランスポートのアーキテクチャ設計に活かされていると信じています。

本特集記事『セキュア光トランスポートネットワーク』は、光・量子といった物理学に基づく装置と、耐量子暗号という代数に基づく仕組みを、形式検証という論理的なツールに基づいて検証した、Integrateの大変なプロジェクトです。アーキテクチャ設計という観点では、多少は貢献できていると信じたいのですが、実際は、それぞれの分野の研究者やエンジニアに頼りに頼ってプロジェクトが進行中です。

これからのICT産業についても、理論と実装・実践の

双方が求められることは明らかで、NTTも優秀な研究開発エンジニアを育てられるように、各自が研鑽と発信を行っていくことが大事だと考えています。

なお、本特集記事『データから価値を連鎖的に生み出すトラステッド・データスペース』にもかかわっていることもあり、現在の私のマイブームは、TEE(Trusted Execution Environment)を中心とするTrustedな技術群と、TEEを含む機器認証に利用するRemote Attestationです。Trustedと呼ばれる技術群は、多くの場合、外部から信頼性や正当性を検証可能であることが要求されます。TEEはRemote Attestationというプロトコルによって、遠隔からハードウェア&ソフトウェアの信頼性を検証できます。検証可能なハードウェア&ソフトウェアの属性情報としては、IETFの議論にのっとれば、ハードウェアID/製造者/モデル/バージョン、ソフトウェアID/作成者/パッケージ/バージョン/コードハッシュ値などがあります。

Remote Attestationプロトコルで保証する属性情報を、より人間社会や産業に近い分野に拡張すれば、遠隔のコンピュータを、自分の代理(デジタルツイン)として働かせる未来に貢献できると考えています。さらに、デジタルツインは、周囲のヒト・モノ・環境と相互作用しながら、その信頼性や正当性をRemote Attestationして、Trustedな世界を広げていくことでしょう。

これら技術群を自ら開発して、NTTグループの幅広い産業領域に適用・応用していくことが、現在の私の主要なミッションであり、日々ロマンを感じながら研究開発業務を推進しています。

挑戦する 研究者たち CHALLENGERS



橋本俊和

NTT先端集積デバイス研究所
上席特別研究員



まず、そのアイデア
が好きかを検討しよう。
結果や周囲を気にせ
ずに自分なりに考え
抜こう

あらゆるものがデジタル化されている現代。創造的な営みにおいてはデジタル的な思考だけでなく、事象をそのままのかたちでとらえるアナログ的思考も重要視されています。直面する状況に応じてデジタルとアナログの特徴を融合し、光回路技術を新しい価値にトランスフォームすることをめざすNTT先端集積デバイス研究所。橋本俊和上席特別研究員に、次世代を見据えた研究活動の進捗と研究者としての姿勢を伺いました。



光の波の操作による新たな情報処理 を実現する光回路

現在、手掛けている研究について教えてください。

私が手掛けているのは、光を波として操作することにより新たな情報処理を実現する光回路の研究です。「光を波として操作する」の意味は光のアナログ的な性質を使うという意味です。デジタルの場合、例えば2つの値（ビット）の列を使って010110...と表さなくてはならないところ、アナログなら、例えば0.10110...という数を1つだけ使って表すことができます。これを上手く使ってやれば、高速に

計算できる・手数を少なく計算を省力化できる可能性があるわけです。しかし、容易に想像できるように、細かい数値（小数点の下の方の桁）になると、例えば光の波の振幅でそれを表した場合、ノイズがあると簡単にその情報が失われてしまうことになります。ノイズの影響を受けやすいアナログの情報処理は大規模化が難しく、コンピューティングへの適用が進んできませんでした。しかし、人工知能（AI）に代表されるような細かな違いによらない性質を取り出すような計算や、量子コンピュータで求められるような、多くの量子状態の重なりを使って量子状態のノイズを抑制しながら計算を進める場合は、精度よりも多くの計算



を一度に進められたり、量子状態を壊さずにそのまま操作する技術が重要になるためアナログ計算が意味を持ってきます。つまり、デジタル処理能力の限界をアナログ計算で超える、というよりも、情報処理すべき対象が広がって、今までと違う量や質を持った情報に対しては、アナログ計算で今までとは違う処理を行う、それが私のめざしている光の波を使った新たな情報処理です。

このような情報処理を実現するために、次の2点について研究開発を進めています。

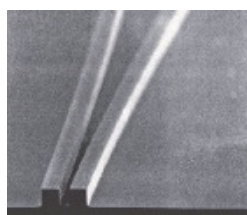
まず1番目は、超低損失・新設計光素子技術です（図1）。先ほどの話と矛盾するようですが、ノイズが少なければ少ないほどより性能の良い計算が可能となるので、まずは、ノイズとなる光回路の損失をできる限り抑えることが重要です。そのため、抜本的な低損失化や、損失を与える光回路の散乱そのものを取り込んで信号処理を可能にする新たな設計技術に取り組んでいます。私の取り組んでいる光回路技術は光ファイバ通信向けの光回路技術で、光信号を弱めないように低損失な特性を追求してきましたが、

それよりも損失を一桁下げ、大規模回路や高性能な光回路を実現する技術をめざしています。

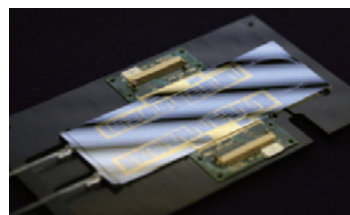
そしてもう1つは、光の波を使いこなした光波演算技術です（図2）。光のメリットを活かした計算方式を創出して物理的な光として実現することが課題となります。光の波を制御する光デバイス技術により光波制御情報処理技術を提案し、世界初・世界最高性能の光の波を使った演算技術の実現をめざして、現在のデバイス内の光の通り道（光導波路）をベースとした技術で光情報処理の基本動作の実証に取り組んでいます。

もちろん、光回路の低損失化にも限界もありますし、光の波を使いこなすためには電子的な制御が必須となるので、冒頭にあるようにデジタルとも上手く組み合わせることで両者の特徴を融合して新しい光回路技術を生み出していくことが大切だと考えています。

光の波を使った新たな情報処理技術の応用としては、例えば、2050年ごろに実現されると予想されている大規模誤り耐性型汎用量子コンピュータがあります。大規模で汎

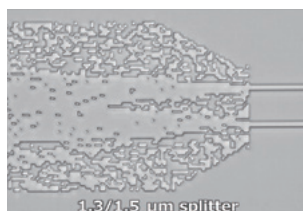


光導波路回路

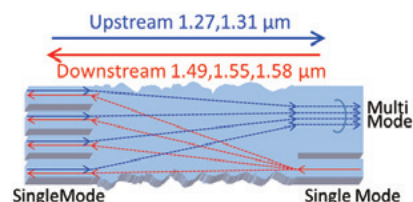


応用例) 高性能ユニバーサル光量子回路

(a) 微細加工による光の通り道



複雑なパターンによる光回路



応用例) ロスレスマルチモード合波分波回路

(b) 光の波を制御する光回路素子の例（散乱光も利用）

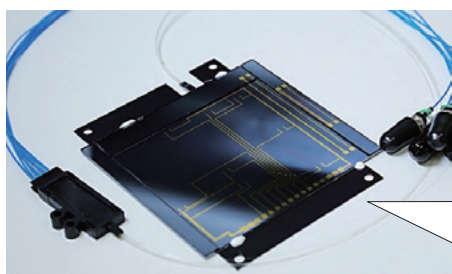
図1 超低損失・新設計光素子技術

用計算が可能な量子コンピュータは、実現されれば、従来のスーパーコンピュータでは困難であった革新的な材料開発や化学反応の設計が可能となり、エネルギー問題などの地球規模の課題解決に貢献するものとして大きな期待が寄せられています。私たちは、2020年度から開始されたJST（国立研究開発法人科学技術振興機構）のムーンショット型研究開発事業の1つのプロジェクトに参加して、量子情報処理向けの光回路デバイス技術により、常温動作を可能にする光の波としての性質を使った大規模な汎用量子コンピュータの実現に向けて取り組んでいます。

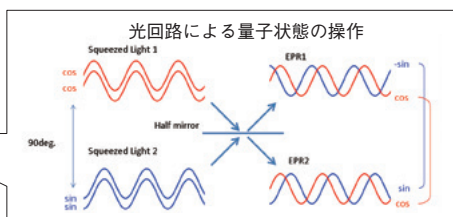
新たな価値創造に臨まれているんですね。成果を1つ教えてくださいませんか。

私に取り組んでいる光回路は、もともとは光ファイバ通信の部品技術としてシリコン基板上に光の通り道である光導波路回路を集積するPLC（Planar Lightwave

Circuit：平面光波回路）と呼ばれるもので、光分岐回路や波長合分波器等を実現してきたものです。その技術を発展させて、さらに高性能な光回路をつくり出そうというのが私の研究です。この高性能な光回路技術は、光ファイバ通信に使われる光の半分以下の波長の光（可視光）の制御も可能とするため、光による演算のみならず、スマートグラス向けの超小型RGBレーザ光源にも適用されています。RGB（赤緑青）3原色の半導体レーザは単色ではさまざまな場面に使われ始めていますが、それらを組み合わせてRGBの光源をつくるには、干渉等を使ってレーザ光の特性を使いこなす光学系（光回路）の技術が重要となります。従来は、それをレンズやミラー等で構成していたため、サイズが大きく組み立てるのが大変でした。そこで、その部分に可視光PLC技術を適用しました。これにより、スマートグラスのつるに収まるような超小型光源モジュールを実現できる、世界最小クラスの光学系を実現しています。



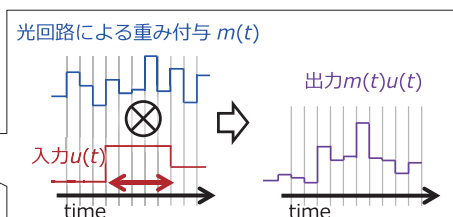
光の波で量子状態を操作する回路



(a) 連続量量子情報処理回路（量子テレポーテーション回路）



光の周波数で時間分割と重み付けする回路



(b) 光周波数領域重み付アップサンプリング処理回路

図2 光波演算技術の例



自分の想像力が邪魔にならないように に努力する

世界最小記録が塗り替えられているのですね。どのようにしてテーマを見つけていらっしゃいますか。

私の研究のベースとなる光回路技術は、ある意味、光ファイバ通信向けデバイス技術として研究が成熟して、新しい回答等の提案をしにくい分野ともいえます。そこで、私はどんな光回路があり得るのかということよりも、光回路にどんな光を入れるかということのほうが重要ではないかと考えることにしました。これは、はじめのほうで述べたアナログ計算の特徴を活かすうえで、どんな情報を扱うかが重要なものと同じです。光通信の波長とは異なる可視光を入れることでRGB光源をはじめとするさまざまな応用が考えられますし、信号への情報の載せ方次第でアナログ計算が可能となり、光の量子（光子）を入れれば光量子コンピュータができるかもしれないのです。そして、それは、そのための新たな光回路を生み出す源泉となると考えています。さらに、今までとは違う観点を養うという意味で、AIや量子コンピュータ等のディープテックベンチャーの動きにも注目しています。玉石混交ではありますが基礎技術を一気に商用化するエネルギーには目をみはるものがあります。また、コラボレーションも重要です。それにより、これまで培ってきた光デバイス技術が全く違う分野に応用が可能となります。そこから大きな刺激をいただいて研究の醍醐味を感じています。

歴史のあるNTT研究所で活動する研究者としてのアドバンテージを感じることはありますか。また、研究活動において大切にしている姿勢を教えてください。

さまざまな応用やコラボレーションが可能なのは、ほかでは真似が難しい優れた光回路技術があつてこそだと思っています。私の所属する研究所の光部品技術には半世紀におよぶ研究成果の蓄積があります。そういった土台があれば、少し付加価値を加えるだけ、ちょっと変わったことを

してみるだけで、一流の研究成果につなげることも可能です（もちろん上手くいかない場合も多々あります）。さらに、ものづくりを行ううえで必要となる研究設備も充実していて、そういった環境は、デバイス研究を進めるうえで非常に大きなアドバンテージになっています。逆にいうと、NTTの研究者には、これまで積み上げられてきた技術を発展させ、世の中に送り出していくという使命があり、そのような努力を通してさまざまな技術を集約することが可能になり、より大きな技術の流れをつくっていけるのではないかと考えています。

もちろん、研究所のアドバンテージだけで研究できるわけではないので、自分から価値を生み出していく必要があります。その際に大切にしていることとしては、自分の想像力の限界が研究の限界にならないようにするということです。例えば、光回路の研究では光という自然現象を扱います。自然現象のほうが、私の想像力よりも遥かに豊かで、思いもよらないことがいっぱい起こります。「自然現象だからこんなことは起こらないはず」と決めつけて考えず、「こうなったら良いな」というのを考え抜いて、そこから研究をスタートさせることが大切だと思っています。図1(b)に示した設計手法は、そのような考えに基づいて生まれた手法で、散乱を使うことで所望の特性を持った光回路を実現しています。光回路は、普通は散乱があると損失になるので、散乱はできるだけ少なくするというのが一般的な考え方です。それをスタート地点にせず、まずは問題を一般化して所望の特性を持った光回路を実現するにはどうしたらよいかと考えて生み出されたのが図の設計手法となります。もちろん、このような姿勢で臨んだとしてもそれが正しいとは限りませんが、でも、大丈夫です。間違った考えは、計算や実験を通して自然現象が正してくれるので、遠慮なく間違えてよいと思っています。正しいことを考えるのではなく、「こうなったら良いな」ということを一生懸命考える、まずは、それが大切だと思っています。



まず「良いアイデア」の定義について考えてみる

想像力が妨げになるとは意味深いですね。研究者ならではのご苦労はありますか。

研究は上手いかずに苦労するのが普通なので、私自身はポジティブに考えて、粘り強く頑張ってみることが多いです。これは昔からそうだったのかなと思います。私の最初の研究のテーマは光導波路と半導体レーザーのハイブリッド光集積という光部品の実装（組立て）技術でした。複数の光部品を組み合わせるので、位置合わせや固定など全部が上手いかないと組み上がらないものでした。頭の中では絵にしてみると積み木を組み上げるようなものなのですが、すぐにできそうでしたが、なかなか上手いかず、1カ月以上悪戦苦闘しました。原因を調べては、徹底的に考えて、修正していきました。そして、最初の1個が出来上がったときには、周囲に人がいたら驚いたと思いますが、泣くほど感動して声を上げたように思います。小さな成功かもしれませんが、自分だけが世界で初めてそれができたことを知っていると思うと、とても嬉しかったことを覚えています。

こうした経験もあって、困ったなと思ったときに、困難から抜け出すために、できることだけを頑張るのではなく、しっかりと困難と向き合ってよく考えることが大切だと思うようになりました。そのためには、粘り強く考え抜き、その先に良い方法を見つけ楽観的になることが大切だと思っています。それでも解決しない場合は、解釈を変えてあるいは前提条件を変えたらどうなるか考えて、行き詰まらないことで楽観的になれるようにしています。例えば嫌だと思ふ仕事も自分なりに解釈して価値や意義を見出すようにしています。そうすることで学ぶことは多いです。そして仕事を広げることで出会える人も多くなってよりいろいろな考えに接することができると考えています。

後進の研究者の皆さんに一言お願いいたします。

私はNTTに入社して研究所に配属されて、それからほ

ぼ研究開発に従事してきました。途中、研究者として何をしたいのか分からなくなることもありましたし、研究は「仕事だから」と感じてしまうこともありました。20年以上が過ぎて、最初のころのことを時々振り返るようになりました。そうして初心にかえて研究に取り組んでみて、少し研究の楽しさが分かるようになってきた気がします。自分を客観的に見るうえで、時々初心にかえることはとても有効なことのように思います。

また、過去に私の研究テーマのアイデアについて若い研究者に聞かれたことがあります。その人はちょうど研究テーマを新しく考えようとしていたときだったと思います。私は「アイデア自体は自然なもので、君もそういうのをそのうち思いつくよ」等と答え、上手くアドバイスできなかったかなという思いが残っています。今なら「まず良いアイデアの定義について考えてみては」と答えるかなと思います。良いアイデアの定義は人それぞれで、特許で稼げるのが良いアイデアとか、他の研究にたくさん使われるのが良いアイデア等、いろいろあるかと思いますが、私の定義は自分が好きになれるアイデアが良いアイデアです。好きなら情熱を持って他の人と議論もできますし、実現するために困難も乗り越えられるからです。そのように定義すると、良いアイデアを生み出す＝アイデアにこだわりを持てるように、結果や周囲の目は気にせず、自分なりに考え抜いて、自分なりの確信（それを証明や説明しきれなくても）を持つことが大切なのではないかと考えています。

若い皆さんへのメッセージとしては、初心を大切に、そして良いアイデアと情熱を持って他の人と議論していけば、きっと楽しく研究できるのではないかと、ということになるかと思います。

挑 戦 可 る 研 究 開 発 者 た ち CHALLENGERS



杉村 義文

NTT ファシリティーズ
主任研究員



自分の特徴を最大限に 活かして研究開発に臨 もう。先人たちのチャレ ンジを受け継いでより有 用な成果を生み出そう

NTT ファシリティーズは全国70カ所以上のNTTの通信建物に地震観測システムを設置して、地震発生時の建物の揺れ等の観測を実施し、そのデータを基に建物の安全度判定をサポートするサービスを提供しています。こうした地震観測技術を応用展開した防災ソリューションを開発・提供し、安心・安全な社会の実現に貢献する杉村義文主任研究員に、研究開発の概要や建築分野における研究開発者の姿勢について伺いました。



構造ヘルスモニタリングの判定指標と 耐震補強設計における地震記録の活用

現在、手掛けていらっしゃる研究開発について教えてください。

私が担当して進めてきた研究開発は、「強震観測」「振動実験」「構造解析」を連携させた地震防災技術です（図1）。自身は中でも特に、地震の影響を受けた建物の健全性をシステムで判定する、構造ヘルスモニタリングの判定指標と、地震観測データの耐震補強設計等への活用を主なテーマとして取り組んでいます（図2、3）。

東日本大震災の直後に建物管理者や利用者から、建物を継続して使用してよいかといった不安の声が多く上がりました。その不安を解消する建物安全度調査は建築構造の専門技術者を必要とすることもあり、被災直後の建物の健全性を把握する方法や体制の整備は企業や行政機関の大きな課題となっています。また、建物の安全性に対する不安解消ばかりではなく、使用可能な建物を避難先や防災拠点として機能させることも重要な課題であることはいうまでもありません。こうした背景から、地震観測データを応用した構造ヘルスモニタリングは注目を集めています。

レジリエントな社会の実現

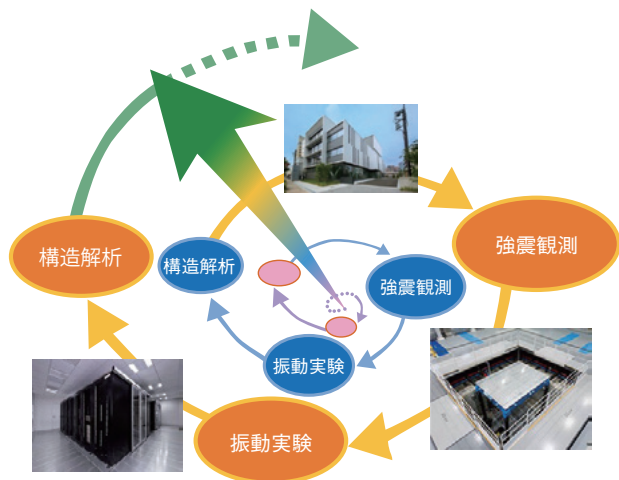


図1 NTTファシリティーズにおける地震防災技術開発のイメージ

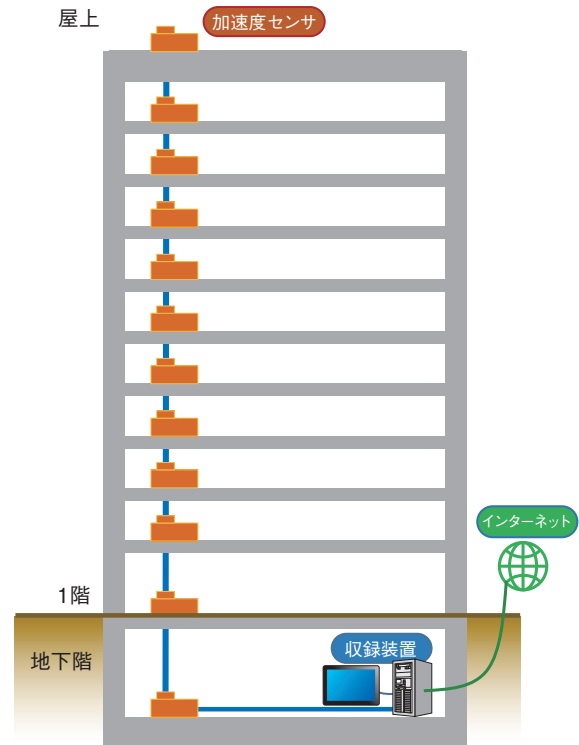


図2 構造ヘルスモニタリングのシステム構成図

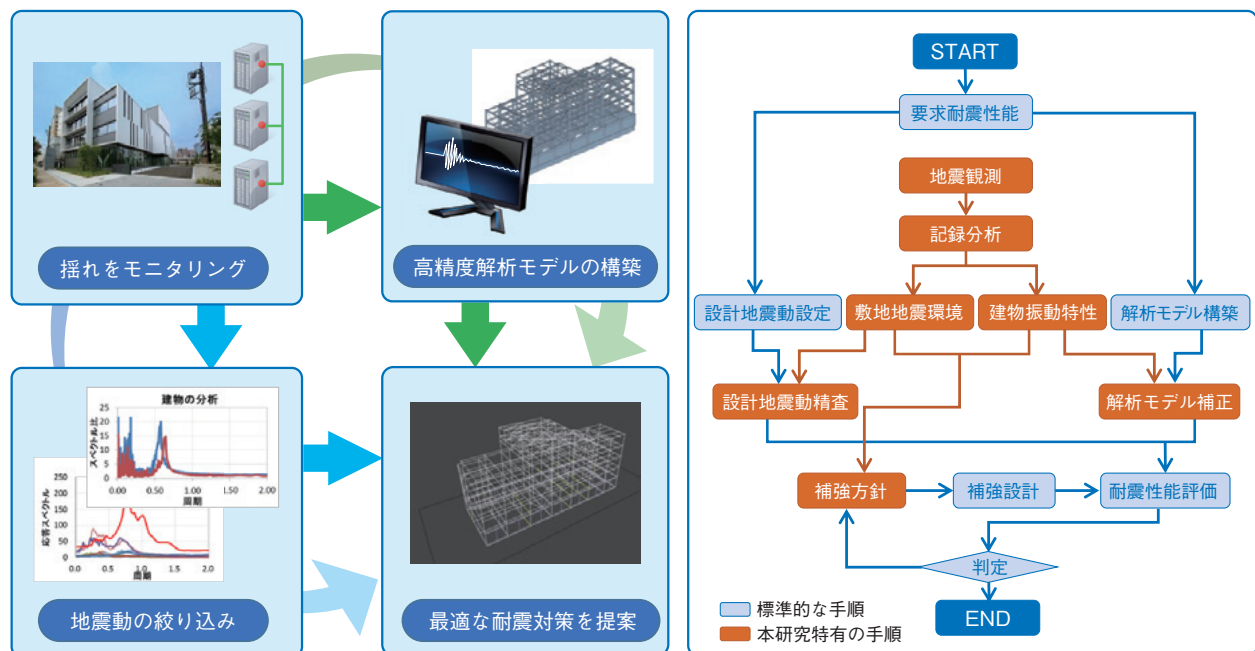


図3 観測記録より建物・地盤性状を把握し最適な耐震対策を提案する手法



建物は内外装等で仕上げられていますから、地震の揺れによる建物の被害を直接見て確認できる範囲は限定されてしまいます。そこで、地震計などのセンサを建物の各所に設置し、その観測データや建物の構造等から地震による建物の損傷の有無とその程度を推測して建物の健全性を評価するのが構造ヘルスマonitoringです。構造ヘルスマonitoringの技術的なポイントは解析アルゴリズムによる損傷推定にあります。NTTグループは全国70カ所以上の通信建物に地震計測システムを設置しており、ここから得られる揺れの強さや揺れ方等のデータとNTTファシリティーズが保有する構造解析技術を活用し、こうしたデータをはじめとする複数の指標を用いて多角的に分析するアルゴリズムを研究し、その妥当性を検証し、高い精度の判定を可能とした建物安全判定サポートシステムを開発、サービスを提供しています。

地震大国と呼ばれる日本にとって重要な技術を開発されているんですね。

私たちが提供しているシステムは、建物の健全度を地震直後に安全・注意・危険の3段階で自動判定し、その結果をディスプレイに表示するとともに、あらかじめ登録している関係者にもメールで通知します。構造ヘルスマonitoringの研究開発は地震発生時にその真価が問われます。その判定にあたっては、明らかに危険、あるいは安全であるものは特に気にすることはないのですが、実際の場合、危険と安全の間で一線が引かれているわけではありません。危険であるものを安全と判定することは事故に直結するのであってはならないことで、逆に安全なものを危険と判定することは安全サイドに考えると良さそうなのですが、避難の際の混乱を招く等、ビル管理者等が気にするところでもあり、こうした事態を回避するために、精度の高い判定が必要になります。

一方で、判定にあたっては過去のデータや知見の蓄積がベースとなるのですが、地震の揺れ方は個々に異なっており、建物に損壊を与えるような大地震の頻度は高くはなく、また地震が発生しないと新しいデータは入手できないため、判定結果と実際の被害状況（危険度）との乖離が生じる可

能性があります。

そこで、私はさらなる精度向上の可能性を模索する取り組みにチャレンジしています。まず、多角的な視点からの判定です。建築構造の技術者は、地震が発生し、ある建物で地震観測記録が採取できたら、そのデータからまず入力地震動の加速度応答スペクトル（地震の揺れによる応答加速度を周期ごとにスペクトル表示したもの）を求めて建物の固有周期との交点から建物に作用したであろう地震の力の強さを把握して、損傷の有無を推測します。さらには、揺れの加速度記録を基に建物の各階の層せん断力（水平方向に建物を変形させる力）を算出し、塑性化の状況やエネルギーの吸収状況を知ることもできます。層間変形角と入力地震動の応答スペクトルと建物のエネルギー吸収状況を組み合わせれば高精度に判定できる可能性があります。

前述のとおり、建物が大きく損傷した記録は限られていますから、現在は兵庫県の防災科学技術研究所にある実大三次元震動破壊実験施設（Eディフェンス）で行われている実物大の建物を壊す実験公開データや数値解析シミュレーション公開データを活用させていただいています。



性質をかんがみ、少しずつでも着実に歩んで向上していく

どのようなお気持ちで研究開発をしてこられたのですか。

これまでの軌跡を振り返ってみると、私は高校生のときに建築分野へ進むと決意し、大学の建築学科に入学し、大学院修了後研究者となってから「同調粘性マスダンパーを有する建物の設計法に関する研究」で博士号を取得しました。その後、建物の安心・安全にかかわる仕事を中心に活動してきました。建築分野において構造や設備、デザイン、環境などさまざまな選択肢がある中で、建築の構造に強く興味を抱いて追究してきたことが今の研究開発につながっていると思います。

私は研究開発においては対象とするものの性質をかんがみ、少しずつでも着実に向上させることが必要だと感じて

います。ここで、建築分野はIT分野に比べると技術変化の速さがゆっくりしているようにみられることがあります。この関係を自分のひそかな趣味のカメラの本体とレンズに例えると、カメラ本体がIT分野で、レンズが建築分野と置き換えられるかもしれません。研究開発のタームについて、カメラの本体は年に一度は新しい機種が発表される中、レンズについてはかなり昔のレンズが今でも現役として活用されている、これと同じようなものかもしれません。

私の研究領域である地震と建築構造に関する研究の歴史は古く、その過程において耐震に始まり、制振・免震の技術に関する研究開発が行われてきました。例えばNTTの通信建物は震度7でも耐えられる耐震構造を基本とし、阪神淡路大震災のときも東日本大震災のときも、天井や外装材などの非構造部材の損傷はあるものの、建物を支える役目の構造躯体に致命的な損壊を受けた建物はありませんでした。阪神淡路大震災の後、日本国内では1990年代後半ごろから、地震エネルギーを建物本体ではなくダンパーで吸収することにより建物本体の損傷を低減して揺れを減少させる制振構造、および地震の揺れを遮断することで建物の揺れを大幅に軽減する免震構造の建物が建設されてきました。

私は研究開発者として、この制振・免震技術、さらには構造ヘルスマニタリングを含む建物の安全性に関する研究開発をさらに先に進める役割を担いたいと考えています。そして、その役割は競争ベースのスピード重視よりも、他者とともに市場をつくり、共に成長してシステムを使ってくださるお客さまや社会の役に立つことだと考えています。

先人たちは、それこそ勇気あるチャレンジを通じて耐震、制振、免震等の構造設計や構造ヘルスマニタリングにかかわる研究開発を行ってくれたと思っています。そのおかげで現在はさまざまな課題が明らかになっています。構造ヘルスマニタリングにおける判定精度向上においては得られたデータをどう処理し、何と比較するか等、深く追究していくためには時間が必要な課題があります。私は今、それらに1つずつ対処しているわけですが、それも先人たちの実行力があったからこそです。先人たち

のチャレンジによって明らかになった課題をより適切なサービスへと昇華させていくことで社会に役立てようと考えています。

先人たちの努力をベースとしてより深く研究されるとき、課題やテーマを探す際に心掛けていることはありますか。

筋が通っているかどうかはとても大事なことだと思います。一般的に、研究開発は優先順位の高いものに注力しますが、得てして緊急度が高く、短期的なテーマにリソースをつぎこむことが多くなりがちです。ただ、お話ししたとおり、先人たちの取り組みを有用なサービスにするための長期的な取り組み、重要度の高い取り組みにも臨んでいます。

目下のところ、武蔵野の研究所にある耐震試験をするための振動台の維持向上および後継設備の構築や、NTTグループの地震観測システムの維持向上とデータ活用が優先順位の高いものです。

そして、先人たちの貴重な研究に対する営みの継続を大切にしています。少し古い考え方もかもしれませんが、私にはやはりそれを引き継がなければならないという使命感があります。

このような考えは、当人の業務経験から得られるものもありますが、その人の個性のほうがより支配的な気がします。私は最近「人はそれぞれ違うもの」であると強く感じています。そして、その個性（特性）の善し悪しは一概に決められるものではなく、善し悪しを判断する根拠もまた、個性によって違ってよいと思うのです。例えば、自分の子どもが悪いことをしたとします。子どものしたことは悪いことであると私が思っているだけで、社会からみたらそれは悪くないかもしれません。ですから、子どもに私と同じ価値観を持ってほしい、同じように成長してほしいと思うことは、つついってしまうことは正直ありますが、案外間違っているのではないかと思います。これを会社のメンバとの関係に置き換えれば自分とその方の意見に相違があってもよいと思います。

自分と違う意見はありがたいものです。私は、同じことをしても喜ぶメンバとそうでないメンバがいるように、さまざまな個性を持った人がいるからこそ組織の安定力が増



し、仕事上の抜け漏れがない状態を保てると考えます。私にも志向や理想がありますが、メンバの意見が違うからといってそれを否定せず、1つの考え方として受け止めています。



常に刷新され続ける社会の常識を学ぶ努力が必要

研究開発者の個性が活かされているからこそサービスが充実しているのかもしれないですね。

もちろん、地震などないほうがよいに決まっていますが、それでも地震発生時にシステムが役に立ったよとお客さまから声をかけていただくと嬉しいものです。過去に私が構造設計を担当したビルが宮城県内に2棟ほどあるのですが、東日本大震災に遭っても大きな被害を受けることはありませんでした。そういう事実を目の当たりにすると安全にかかわる仕事をしていて社会の役に立てた実感を持つことができ、良かったなと思います。

また、長年、研究開発をしていて最近改めて実感するのが商品化というフェーズの重要性です。現在、私が担当しているテーマは研究が進み、実用化から開発、商品化という段階を迎えています。この商品化のフェーズにおいては、さまざまな業務の経験者がその多様性を活かして商品化に参画することで、よりサービスが充実すると考えます。

社会は常に変化しますから、自分の知らないうちに実はそれが常識となっていた、それを認識するのが遅れたということは当たり前にあります。商品化のフェーズにおいてはこうした常に刷新され続ける社会の常識を学ぶ努力も必要だと感じます。

今後、研究開発者としてどのような姿勢で臨まれるのでしょうか。また、後輩の研究者の皆さんに一言お願いいたします。

後輩の皆さんには自分の特徴・個性を最大限に活かして研究開発に臨んでほしいと思います。外部から影響を受けることも自分の考えを貫くこともほどほどがよいでしょう。それは、自分が「正しい」と思うことはあるでしょうが、他の人も同じように自分が正しいと思うことがあり、必ず

しもそれが一致しているわけではありません。それが個性なのです。

だから「謙虚になろう。互いに認め合おう」と言うこともありますが、そもそもそのようなことを言うのをあえてやめようと思うことがあります。なぜならば、謙虚でないことや認めないことも個性だと思うからです。周りの研究者を認めつつ、自分はこうあるべきというものを持つことも大事なこともかもしれませんが、それすらも個性ですね。

研究開発者、あるいは会社員、エンジニアと考えると、組織人として多少は謙虚に人の意見に耳を傾けられたらよいと思うこともありますが、人それぞれ耳を傾けるにしてもそれに多少の差があってもよいと思います。皆さんが全く同じであることは組織としてもよくないと私は考えています。

最後に私は、全世界の約78億人のうちの1人として、これから変わらずに自分の力を活かし、建築構造の分野を進展させる役目を担っていきたい、この道を突き進んでいきたいと考えています。

繰り返しになりますが、耐震・制振・免震等を対象とするような建築構造の研究領域は地震が発生しないと新しいデータは入手できません。そして、地震はいつ、どこで、どのような性質のものが発生するのか分かりません。このことで、過去のデータの蓄積から予測して、改善する、研究開発をするという、後追いのような営みにジレンマを感じる研究開発者も多いはずですが、だからこそ、先読みできるように殻を破ることも研究開発者には必要です。私自身も後追いしている状況にありますが、それでも私は自分なりに何かの役に立てればという気持ちで研究開発に臨んでいこうと思います。



藤堂洋介 特別研究員

次世代基礎理論の構築と目的特化型暗号が切り拓く「共通鍵暗号」の未来

情報通信のセキュリティを考えるうえで必要不可欠な技術である「暗号」。暗号の方式には「公開鍵暗号」と「共通鍵暗号」がありますが、今回は共通鍵暗号における基礎理論の構築と目的特化型暗号の研究に従事する藤堂洋介特別研究員にお話を伺いました。

◆PROFILE：2012年日本電信電話株式会社入社（修士卒）、NTTセキュアプラットフォーム研究所所属。2015年CRYPTO Best Paper Award受賞、2017年博士号取得（神戸大学）、2019年7月～2020年10月ルール大学ボーフム客員研究員、2020年CRYPTO Best Paper Award受賞。2021年4月～NTTセキュアプラットフォーム研究所 特別研究員。現在、NTT社会情報研究所 特別研究員。



暗号化と復号に共通の鍵を使用する「共通鍵暗号」

◆「共通鍵暗号」とはどのようなものなのでしょうか。

情報通信において、何かを隠す、守るといったようなことを考えたとき、最終的なよりどころとなるものが「暗号」です。そして暗号はセキュリティという大きなシステムを構成する最小単位のパーツ、いわば歯車であるといえます。この歯車が欠けたり、歪んだりしているとシステム全体に影響を与え、安全性の問題に直結します。そのため「いかに安全性の高い、高性能な歯車をつくり上げるか」を追求するのが暗号研究といえるでしょう。

暗号には、暗号化と復号に別々の鍵を使用し、そのうち暗号化の鍵を公開する「公開鍵暗号」と、暗号化と復号に同一の鍵を

使用する「共通鍵暗号」とがあります（図）。

公開鍵暗号は庭の物置などに掛ける「南京錠」に例えることができます。南京錠は誰でもロックすることができますが、開けるときには専用の鍵が必要となります。南京錠をたくさん配布しておき、対応する鍵を持っている人だけが開けられるという仕組みが「公開鍵暗号」です。これをデジタル的に再現するには、素因数分解や離散対数問題、格子問題など、解くことが難しいような数学の問題を仕組みとして利用します。そのため、そうした難しい数学の問題を解くとき同様に、暗号化・復号にはコンピュータを使った複雑な計算が必要となります。

一方、共通鍵暗号は、旅館などにある「セキュリティボックス」に例えることができます。ロックを掛けるときにはある番号を入力し、解除するときには同じ番号を入力する仕組みです。共通鍵暗号は公開鍵暗号とは違い、使う環境に応じて効率的な計算を

公開鍵暗号

- ・≡南京錠
- ・暗号化・復号に別々の鍵を使用
- ・複雑な数学の計算が必要

共通鍵暗号

- ・≡セキュリティボックス
- ・暗号化・復号に同一の鍵を使用
- ・効率的な計算により作成

図 公開鍵暗号と共通鍵暗号



行ってつくり上げるという考え方が基本になっています。そのため、共通鍵暗号は公開鍵暗号に比べて100倍～1000倍の処理速度を持ち、大量の情報を扱う場合に適しています。

私はこのうち共通鍵暗号を扱っており、現在では中長期的には「次世代の共通鍵暗号基礎理論」、短中長期的には「目的特化型暗号とソリューション」を研究テーマとしています。

◆「次世代の共通鍵暗号基礎理論」はどのような研究なのでしょうか。

共通鍵暗号は公開鍵暗号と違い、解くことが難しい数学問題のようなバックグラウンドを持たないため、暗号自体が本当に安全なのかどうか、どうやって安全性を保証するのか、が非常に重要な課題となっています。

例えば古代ローマの政治家ガイウス・ユリウス・カエサルが使用したとされる「シーザー暗号」は暗号化前の文（平文）の各文字を決まった数だけシフトする共通鍵暗号とみなすこともできますが、いとも簡単に解読されてしまいます。一般的に、共通鍵暗号は誰でもつくることができますが、素人の設計では、すぐに解読されてしまうという欠点があります。共通鍵暗号を専門とする暗号学者の登場から半世紀近くが経ち、今では解読が難しいとされる暗号がいくつも開発されています。しかし、ある暗号にさまざまな攻撃を行いテストして安全性を保証できても、将来、暗号解読の天才が現れたときの安全性までは保証することはできません。

そこで、新たな解読方法・解析方法を発見したり、既存の解読方法・解析方法に対して絶対的に安全を保証するにはどうしたら良いかという方策を探索したりする研究が共通鍵暗号の基礎理論です。もちろん、本当の意味で「絶対に安全な暗号」を作成することは困難ですが、「特定の攻撃に対しては絶対に安全」のように少しずつ安全性を保証していくような取り組みです。

これは暗号学者としてはある意味ライフワークにあたるもので、私は入社以来「Integral Cryptanalysis」という解読方法に着目し、暗号の複雑度合い、専門用語でいうと「代数次数」を正確に見積もることによる攻撃法の脆弱性について研究しています。簡単にいうと「暗号が攻撃を受ける際、少なくともこのレベルよりは安全性は低いという、暗号の安全性を“上から押さえる”」研究です。その結果、暗号分野の最高峰国際会議といわ

れるCryptoにおいて、2015年に日本人として初となるBest Paper Awardを受賞し、さらに2020年には世界歴代3人目となる2回目の受賞を果たしました。また、最近では、少なくともこのレベルよりは安全性が高いという、安全性を“下から押さえる”研究にも取り組んでいます。

◆「目的特化型暗号とソリューション」はどのような研究なのでしょうか。

先ほど暗号を歯車に例えましたが、歯車は基本的にどこに使われるか分からない状態で製造されます。そのため、可能な限り安全性の高い、高性能な歯車をつくろうとするわけですが、世の中には当然「この製品にしか使わない」という特殊な歯車も存在するでしょう。

そこで、この歯車と同様に用途に合わせてオーダーメイドの暗号をつくろう、というアプローチが「目的特化型暗号とソリューション」の研究です。最近ではIoTデバイスやスマートカードでも個人情報など重要なデータを扱う機会が増加し、暗号化が求められるデバイスは多様化しています。それに対するソリューションとして、パソコンよりも計算能力が限られているようなデバイスにも実装可能な「軽量暗号」の研究を進めています。

目的に特化したオーダーメイド暗号の設計

◆共通鍵暗号の研究はどのような分野に活用が可能でしょうか。

「次世代の共通鍵暗号基礎理論」の研究は、攻撃者サイドに立った暗号の安全性を“上から押さえる”研究に、設計サイドに立った「少なくともこのレベルよりは安全性は高い」という暗号の安全性を“下から押さえる”研究も合わせ、汎用的な「標準暗号」を構築することが考えられます。現在の暗号の土台は40年前に構築されたものですから、新たな汎用的標準暗号が構築されれば、それが次世代の土台となって安全性を高めることができ、あらゆる分野で活用されるのではないのでしょうか。

そして、目的特化型暗号の1つに「超低消費電力暗号」がありますが、これは医療分野での活用が期待されます。例えば、ある体内埋め込み型の医療機器が、人体に関するさまざまなデータを収集し、医療機関に送信することを想定してみましょう。そうし

た人命にかかわるセンシティブなデータは、剽窃や改ざんを防ぐため当然暗号化されるべきです。しかし、機器のバッテリーが切れるたびに再手術するのでは大変です。そこで、小さなバッテリーで長時間稼働するような機器が必要となり、暗号も消費電力を極力抑えることが求められるわけです。

これまでの暗号に対するアプローチは、ある意味汎用的で、すべての要素についてバランスを取り、全体のパフォーマンスを向上していくようなものでしたが、シチュエーションに合わせてある部分を犠牲にしても他のある部分の性能を振り切る、というものが私のめざす目的特化型暗号です。このほかにも小さなセンサなどでは回路規模を可能な限り小さくする、CPU～メモリ間の通信では遅延を可能な限り小さくするなど、用途に応じたさまざまな暗号が考えられます。

守秘義務のあるデータや個人情報を扱うような組織の方に情報の用途を伺って、それぞれの用途に特化した新しい暗号を作成するような活動ができれば面白いのではないかな、と考えています。

◆今後の研究の方向性について教えてください。

まずは究極の「耐タンパー性」をめざすことです。現在の暗号の安全性に関する研究では、平文と暗号文を第三者に見られることは想定していますが、その途中段階、つまり暗号化処理の工程を見られることまでは想定していません。しかし、すでにハードウェアの消費電力やそこから漏れ出てくる電磁波などの情報か

ら暗号鍵を推測する「サイドチャネル攻撃」と呼ばれる攻撃が登場しています。ソフトウェアの場合はさらに深刻で、例えばスマートフォンにダウンロードしたアプリからリバースエンジニアリングにより暗号化部分のアルゴリズムを取り出すといったケースも出てきています。こうした暗号化処理の工程への攻撃に耐える強さを耐ダンパー性と言います。

こうした暗号化処理の工程を見られてしまうという状況の中、現在は100%安全とはいえなくても、万が一暗号化のアルゴリズムが流出した場合にも安全なものをつくる、「ホワイトボックスクリプトグラフィ」あるいは「グレーボックスクリプトグラフィ」といった研究分野にも注力しています。

◆現在の研究環境の特徴について教えてください。

NTTの強みは「優秀な人材が多い」ことです。私が10年前に入社したときには、まだ共通鍵暗号のことも、論文の書き方も、研究の進め方も知りませんでしたが、先輩方からたくさん指導していただいて今に至ります。新しい研究分野というものは自分で生み出さなければいけませんが、研究の基本を理解する過程においては、1人で勉強するよりも先輩方が切り拓き巧みに敷いたレールを辿るほうが、理解の質と速さの面でかなり有利でしょう。

また、現在同じ研究所に「暗号」という共通のカテゴリで複数の特別研究員がいるということも貴重ではないかと思います。1つのカテゴリに複数の特別研究員がいると研究に多様性が生まれますし、それが新しい技術の創造につながるのではないかと考えています。何より、特別研究員の指導を受ける若手研究者にとっても大きな成果を出せば任用されるという実績ですので、励みになるのではないかと思います。



(今回はリモートにてインタビューを実施しました)



デジタル化・ICTにより 文化芸術に関する 地域の課題解決に貢献

NTT ArtTechnologyは、デジタル化やICTにより文化芸術の保存・活用を図ることで、地域の活性化に貢献する会社だ。文化芸術を「守り」、「活かし」、「つなぐ」という3つのフェーズのアクティビティにより地方創生への貢献をめざす思いを国枝学社長に伺った。



NTT ArtTechnology 国枝学社長

超高精細なデジタル化で再現性の 高いレプリカを実現し、活用する

◆設立の背景と目的、事業概要について教えてください。

NTT東日本では、地域の方々と連携し課題解決に取り組んでおり、これまでに農林水産業等の一次産業を中心に推進してきました。こうした活動を通して自治体をはじめとする地域の方々といろいろお話しをしている際に、芸術作品の劣化からの保存や災害等で損壊した歴史的建築物の修復、伝統技術、伝統芸能などの無形文化財の継承等の文化財保護に関するご相談を結構いただきました。一方で、最近のICTの進歩が目覚ましく、高速大容量な通信、高精細なデジタルアーカイブの実現、AIの活用等の環境が整ってきました。そこで、ICTにより文化芸術に関する地域の課題解決を行うことを目的に、2020年12月1日にNTT ArtTechnologyが設立されました。

また、日本の電話事業100周年（1990年）の記念事業として、「コミュニケーション」というテーマを軸に科学技術と芸術文化の対話を促進し、情報交流の拠点（センター）となることをめざして1997年4月にオープンした、NTT インターコミュニケーション・センター（ICC）の運営も2021年4月に引継ぎました。現在NTT ArtTechnologyでは、①多様な有形無形の文化財等の高精細デジタル化を行う「文化財のデジタル化」、②デジタル化した作品をオンラインで配信するなどの「デジタル化した文化財を活用したサービスの開発・提供」、③「ICCの運営」、④ICTを活用したサテライト/バーチャルミュージアム構築や運

営等を行う「ICTと文化芸術を活かした地域活性化事業」の4事業を展開しています。

◆ICTでどのように文化財保護や文化芸術を活かした地域の活性化に貢献できるのでしょうか。

地域の価値ある文化や芸術を集積して「守り」、先進テクノロジーを用いて発信することで「活かし」、当社がつなぎ役となり、地域と地域、地域と世界を「つなぐ」の3つのフェーズがあると考えています。

例えば浮世絵の作品には、芸術的・学術的価値がありますが、空気や光に当たることで、退色・変色等の劣化が生じます。これを質感や凹凸等の立体感まで再現できるような高精細デジタル化を行い、再現画像（作品のレプリカ）で展示を行い、現物は保存することで、作品の劣化の機会を減らし、価値を維持できます。加えて、レプリカならば明るいところで注視することも可能であり、またデータであれば自由に拡大することもできます。これにより新しい発見につながった事例もあります。建物を同様に（3D）高精細デジタル化することにより、修復の際には現存していないオリジナルの見本とすることも可能です。さらに伝統技術・伝統芸能を詳細にデジタル化することで、継承者不足という課題の解決ツールとして活用できます。これらが「守り」フェーズの貢献です。

こうして蓄積されたレプリカを印刷して公共施設や病院等に飾ったり、モニタに表示したり、あるいはVR（Virtual Reality）等で表示するといった活用で新たな利用価値が創造されます。

さらに、デジタル化した作品のデータを、大容量でセキュ

アナネットワークで伝送することで、文化芸術の流通が可能となり、特定の場所に依存しないサテライトミュージアム、バーチャルミュージアムを構築することで、質の高い作品を身近に鑑賞することができるようになります。これが「活かす」フェーズです。

そしてその先に、身近に作品を鑑賞することで、実物を見たい、という知的好奇心を喚起し現地の美術館・博物館への送客につながぐことも期待でき、人流による地域経済への貢献にもつながっていきます。これが「つなぐ」フェーズです。

◆ ICCの展示会をショーケースとして、グローバルも視野に展開 ◆

◆どのような事例があるのでしょうか。

2020年12月1日より、ICCにおいて「Digital×北斎【破章】北斎vs廣重 美と技術の継承と革新」と題する体験型美術展を行っています。これは、独自の画像処理技術により、和紙の繊維1本1本まで再現できる20億画素のデジタルデータを作成したアルステクネ社グループとの連携により実現したものです。フランス国立オルセー美術館所蔵の絵画、山梨県立博物館所蔵の葛飾北斎の版画、大阪浮世絵美術館所蔵の歌川廣重の版画、神奈川県立歴史博物館所蔵の版画がアルステクネ社によりデジタル化されており、それぞれの所蔵元より公式レプリカとして認定されています。実は本展は第2弾で、これに先立ち2019年11月～2020年2月の間、第1弾の「Digital×北斎【序章】～先進テクノロジーで見えた170年目の真実～」と題する展示会を行いました。その際のお客さまの反響や評価を基にNTT東日本が事業化を決定し、NTT ArtTechnologyの設立、「Digital×北斎【破章】」の開催に至りました。この展示については海外にも発信しました。

こうした展示をご覧いただいた方々や、当社の取り組みに興味を持った方々から引き合いをいただき、「巨大映像で迫る五大絵師 — 北斎・広重・宗達・光琳・若冲の世界 —」(<https://faaj.art/2021tokyo/>)への出展、額装されたモニタに閉域ネットワークを介して作品デー

タを配信し、高齢者専用住宅、病院、オフィスビルの壁面に飾る事例、静岡県の自治体では市庁舎で自治体ゆかりの作品を展示するサテライトミュージアムの実施、千葉県の自治体では所蔵作品をデジタル化して市内の美術館で「Digital×浮世絵」展を開催するとともに市内の病院等の施設へ配信する等の展示、そして東日本大震災復興支援企画の一環で、東京藝術大学生が東日本大震災の記録の保存・記憶の継承のために描いたスケッチ絵画をデジタルアーカイブ化し、東京と仙台に同時配信を行いました。

また、バレエの公演（無観客）も通常では行わないような規模のオーケストラやコーラスの編成や、ドローン駆使した空撮等、これまでの舞台にないことに挑戦してデジタル映像を制作して有料配信する施策への協力も行いました。

ご利用の方々からは、遠隔の美術館にある作品を質感まで本物そっくりな状態で見ることができることへの評価や、教育的な観点からの評価、病院等では院内の雰囲気づくりに関する評価をいただいております。さらに、過去に訪れた美術館の記憶がよみがえった、いつかその美術館へ行って本物に出会いたいといった感想も出てきています。

◆今後の展望についてお聞かせください。

現在は、地域の文化財のデジタル化やそれらを活かしたサテライト/バーチャルミュージアムの提案などをNTT東日本と連携して行っています。また近々、先ほどご紹介した額装したモニタに閉域ネットワークで作品データを配信してご鑑賞いただくサービスを正式にリリースする予定です。

デジタル化の対象についても、現在は絵画や版画など平面の作品が中心となっていますが、今後は仏像や彫刻といった立体にもチャレンジしていきます。また、伝統芸能のデジタル化も手掛け始めています。より多くの事例を積み重ね、地域と地域を結びつけ、地方創生に貢献していき、将来はぜひ日本文化のデジタルデータを活用して海外との文化交流をはかりたいと考えています。

文化芸術の価値を高めるソリューションを提供

取締役デジタルアート推進事業部長（企画部長兼務）

鈴木 健広さん

◆担当されている業務について教えてください。

地域には、貴重な文化芸術がたくさんありますが、保管・保存に手一杯で、活用や継承まで進めることができない、といった声が全国各地から数多く出ております。その課題解決を通じた地域貢献をビジネスの芽として育てるために当社が設立されました。私は本件に、事業化の検討、会社



鈴木健広さん

設立の準備段階からかわっており、会社設立後はデジタルアート推進事業の責任者として、文化芸術のデジタル保存に始まり、オンライン配信やデジタル技術を用いた展示といった活用をソリューションとして提供していくことに取り組んでいます。

こうした地域からの声に1つずつ対応している一方で、文化財のデジタル化やその活用については、具体的なイメージを喚起させるまでには行きついていないところがまだまだあり、「Digital×北斎【破章】北斎vs廣重 美と技術の継承と革新」のようなショーケースへの訪問や事例紹介を通して、この取り組みの重要性をご理解いただけるよう、努力しているところです。まだ黎明期の段階にあるこの取り組みを何とか花開かせるために、今一生懸命仕込みをしているステージにあるのかと思っています。

◆ご苦労されている点を伺えますか。

文化財のデジタル化には費用がかかりますので、その費

用をかけただけの価値はあるのか、という問いを受けることがあります。また、オリジナル至上主義を唱え、デジタル技術による複製物（レプリカ）を「偽物」とみなす方も少なからずいらっしゃるのも事実です。

こういった方々に口頭での説明によって理解を促そうとしても、理解しづらいものなのでこちらの意図を伝えるための工夫が必要となります。北斎展のようなショーケースを実際に目で見ていただき、デジタル技術の進歩を交えつつ文化芸術のデジタルによる活用事例や取り組みの効用等をご説明差し上げることで、理解促進を図ることができます。こうしたプロセスを1つひとつ繰り返し、オンラインやデジタル技術を活用した新たな文化芸術の鑑賞スタイルを提案していくことが大切だと考えています。

◆今後の展望について教えてください。

文化芸術の価値は、オリジナルとレプリカを比較し真贋を見定めるようなことではなく、オリジナルを大切に保存しバックアップを取りながら、レプリカを活用していくことで高まっていくと考えます。デジタル化により、オリジナルの価値が減るものではなく、むしろ高まるのです。デジタル化は目的ではなくあくまでも手段です。デジタル化することにより、オリジナルの劣化を食い止めることができます（守り）。そして、さまざまなデジタル技術を活用することで、作品の魅力を存分に伝えることができます（活かし）。さらにこうした「活かし」の取り組みを広く展開し連携させることで、各地域の文化芸術どうしがつながれば、各地域の魅力が多くの方に共有され、訪問者の増加等、オリジナルの周辺に新たな価値をもたらすことができます（つなぐ）。

私たちの事業はこうした価値創造のお手伝いによりもたらされるものです。黎明期の段階では、この価値創造を理解していただくために、実際に目で見て理解してもらうことが重要です。そのためにも実績を1つひとつ積み重ねていくことに注力していきます。

NTT ArtTechnology ア・ラ・カルト

■「Digital×北斎【破章】北斎vs廣重 美と技術の継承と革新」鑑賞記

ICCで行われている企画展「Digital×北斎【破章】北斎vs廣重 美と技術の継承と革新」を案内していただきました。「ここに展示されている作品はすべてレプリカです。場内のデモの操作はすべて非接触になっています」と説明を受けつつ、入口ではコミュニケーションロボットのお出迎えにより早速入場です。

入口すぐのところに、葛飾北斎の版画、富嶽三十六景の凱風快晴の印刷されたレプリカが2枚掲げられています。1枚は非常に鮮やかな色合いで印刷されており、日常よく見るものです。もう1枚はやや薄い色合いで優しい感じがするものです。これをよく見ると、和紙の繊維の1本1本が見え、さらに紙の凹凸まで再現されています。これが、和紙に色がのった実際の版画の画素数20億のレプリカです。どちらもマット紙というツルツルの洋紙で、この2点の再現性の違いに驚きました。

この先は富嶽三十六景と歌川廣重の東海道五十三次の版画が、手元の操作によるバーチャルな動きを付けた映像のコーナーをはさんで展示されています。廣重の時代には使う色が増えてきたそうで、それもしっかりと確認できます。それぞれが額に入っている展示されているので、まさに本物感満載です。中にはモニタを額に組み込んだものもあり、これですらも本物と見まがうようなものです。ふと気付いたのが、額にはガラス板がなく、しかも通常美術館は薄暗い中で作品展示しているところが、ここは明るい中の展示です。レプリカなので、光や空気による劣化を気にする必要がないのです。

途中、おもむろに油絵が展示されています。どこかで見たことのある作品かと思いきや、フランスのオルセー美術館の、セザンヌ、モネ、ゴッホ、ルノアール、ゴーギャン等による作品のレプリカです。浮世絵が西洋の印象派に与えた影響を説明するために展示されているそうです。以前、これらの作品の実物を見たことがあるので、古い記憶をたどりながら見ていくと絵の具の凹凸や光沢まで見事に再現されており、周囲の雰囲気を感じなければまさに現地で鑑賞しているような感じです。浮世絵に影響を受けたというゴーギャンの作品の展示に粋なはからいを感じつつ、本物を見たいという衝動にかられながら会場を後にしました。



体験型美術展「Digital×北斎【破章】北斎vs廣重 美と技術の継承と革新」
開催日程： <https://www.ntt-east.co.jp/pr/hokusai-hasyo/> をご参照ください
開催場所：NTT インターコミュニケーション・センター (ICC) ギャラリーE