

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7年8月1日発行 毎月1回1日発行 第37巻第8号(通巻437号)

8 AUGUST
2025
Vol.37 No.8



特集

2025年日本国際博覧会とNTT R&D 知の交響で人と情報に迫り未来を描く

For the Future

新たなデジタル社会を切り拓く「光電融合」:世界で開発が加速—前編—

グループ企業探訪

NTTコノキューデバイス

from IOWN Global Forum

IOWN Global Forum アニュアルメンバーミーティング(ストックホルム)と活動の報告



4 特集1

2025年日本国際博覧会とNTT R&D

- 6 はじめに——幸せな進化をつくる未来のコミュニケーション
- 9 IOWN×空間伝送——離れた空間が1つになるコミュニケーション体験
- 13 コミュニケーションのあり方を問いかける「ふれあう伝話」と「せかいがきこえる伝話」——電話から、伝話へ
- 17 「Another Me Planet」——未来の可能性を見せる自分の分身
- 21 感情を纏うパビリオン——ヒトとモノが呼応するコミュニケーション体験
- 25 主役登場 草深 宇翔 NTT人間情報研究所



26 特集2

知の交響で人と情報に迫り未来を描く

- 28 人と情報の本質を究め、人と情報をつなぐ——未知なる真理の探究と学際的研究により持続可能な未来を切り拓くコミュニケーション科学
- 32 身体に根ざした共感の科学から、つながる家族のウェルビーイングへ——身体を介した共感メカニズムの解明および身体性情報伝送技術を活用した離れた家族のつながり支援
- 36 気の利く対話AIのための「空気を読む」技術——マルチモーダル情報を用いた対話の場・関係の理解とインクリメンタル応答生成
- 40 音の聴き方を自ら学ぶAI——自己教師あり学習によるさまざまな音の汎用表現学習技術から、大規模言語モデルを活用した音の理解の最前線へ
- 43 データの交わりに隠れた未知の知識を発見する——無限の仮説を考慮して生体現象を解釈するAIモデルと高信頼メディカルヘルスケアへの展望
- 47 ロボットに心を感じる子どもたち——未来の幼児教育を支える学習コンパニオンロボット
- 51 「NTTコミュニケーション科学基礎研究所 オープンハウス2025」開催報告
- 55 主役登場 鈴木 雄太 NTTコミュニケーション科学基礎研究所



56 For the Future

新たなデジタル社会を切り拓く「光電融合」： 世界で開発が加速 ——前編——

60 特別企画

標準化・知的財産の一体的活用の戦略的な取り組みで知財経営を積極的に推進

63 挑戦する研究者たち

秋山 満昭

NTT社会情報研究所 上席特別研究員

セキュリティに関する人間中心・オフENSIP・社会技術的観点から、認知にかかわる脅威に対抗する「コグニティブセキュリティ」の確立に向けて取り組む



特集

68 挑戦する研究開発者たち

松村 崇志

NTT東日本 先端テクノロジー部 オープンイノベーションセンタ
第三テクノロジー担当 チーフ

あらゆる産業においてバイオ技術が用いられ、社会課題が解決される社会、「バイオエコノミー社会」の実現をめざす



For the Future

特別企画

73 明日のトップランナー

北川 冬航

NTT社会情報研究所 特別研究員

加速度的に増大するデジタル危機を解決する、次世代の安全な「公開鍵暗号技術」



挑戦する研究者たち

78 グループ企業探訪

株式会社NTTコネクティブデバイス

新たなものを自ら開発した、XRグラス「MiRZA® (ミルザ)」



挑戦する研究開発者たち

82 from IOWN Global Forum

IOWN Global Forum アニュアルメンバーミーティング(ストックホルム)と活動の報告

明日のトップランナー

86 Webサイト オリジナル記事の紹介

9月号予定
編集後記

グループ企業探訪

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

本誌ご購入のお申し込み、お問い合わせ先
一般社団法人電気通信協会 ブックセンター
TEL (03)3288-0611 FAX (03)3288-0615
ホームページ <http://www.tta.or.jp/>

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



2025年日本国際博覧会と NTT R&D

本特集では、2025年日本国際博覧会(大阪・関西万博)における
NTT研究所の取り組みについて、NTTパビリオン関連を中心に最新の技術、
およびその活用方法等について紹介する。

はじめに—— 幸せな進化をつくる未来のコミュニケーション —— 6

NTTが大阪・関西万博で伝えたい思いの1つである「まるで隣にいるような、存在を感じる未来のコミュニケーション」について、NTT研究所の取り組み、および関連する技術について概説する。

IOWN×空間伝送 —— 離れた空間が1つになるコミュニケーション体験 —— 9

大阪・関西万博のNTTパビリオンで展示されている、音楽ユニット“Perfume”のパフォーマンスをIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) でリアルタイムに伝送した取り組み、および技術内容について紹介する。

コミュニケーションのあり方を問いかける 「ふれあう伝話」と「せかいがきこえる伝話」 —— 電話から、伝話へ —— 13

NTTパビリオンの屋外中間領域等で体験可能な、触覚で人の存在を伝え合う「ふれあう伝話」と、物語を聴く「せかいがきこえる伝話」について、関連する要素技術、および取り組み内容を紹介します。

未来のコミュニケーション

IOWN

リアルとバーチャルの連動

空間伝送

光電融合デバイス



「Another Me Planet」

—— 未来の可能性を見せる自分の分身 —— 17

バーチャルNTTパビリオンで体験可能な、未来の職業に就いた自分とコミュニケーションすることができる「Another Me Planet」を中心に、関連する要素技術、および取り組み内容について紹介する。

感情を纏うパビリオン

—— ヒトとモノが呼応するコミュニケーション体験 —— 21

IOWN時代のコンピューティング基盤である「IOWN光コンピューティング」とNTT独自の次世代メディア処理AI（人工知能）「MediaGnosis」の取り組み、および身体行動理解技術について紹介する。

主役登場 草深 宇翔 NTT人間情報研究所 —— 25

床振動が伝える，“そこにいる” 感覚



はじめに——幸せな進化をつくる未来のコミュニケーション

本特集では、2025年日本国際博覧会（大阪・関西万博）におけるNTT研究所の取り組みについて、NTTパビリオン関連を中心に最新の技術およびその活用方法を紹介します。特集冒頭の本記事では、NTTが万博で伝えたい思いの1つである「まるで隣にいるような、存在を感じる未来のコミュニケーション」の概要について解説します。

キーワード：#2025年日本国際博覧会、#未来のコミュニケーション、#IOWN

ひだか こうた しむむら じゅん
日高 浩太 / 島村 潤
もちづき たかよし ひらお みさ
望月 崇由 / 平尾 美佐

NTT 人間情報研究所

背景 ～コミュニケーションの変遷と課題～

今私たちは、スマートフォンひとつで世界中の誰とでも瞬時につながることができます。ビデオ通話で離れた家族と話し、SNSで世界中の人と交流し、リアルタイムで情報を共有できます。インターネットに代表される通信技術やスマートフォンなどのデバイスの進化によって、ここ数年で人々の「つながる力」は飛躍的に高められました。

しかし皮肉なことに、こうした技術の発展は、必ずしも人々の心理的・感情的な隔たりを近づけたとは限りません。むしろ近年では、社会の分断や個人の孤立といった現象がますます深刻化しています。SNSに代表される「同質性の高いつながり」は、異なる価値観との接点を減らし、社会的な理解や共感を阻む温床にもなり得ます。過剰な情報がかえって人々の注意力を奪い、本質的なコミュニケーションの質を低下させているという指摘も少なくありません。

さらに、情報の信頼性や共有のあり方も課題となっています。誰もが発信者になれる一方で、フェイクニュースや陰謀論といった誤情報が拡散されやすくなり、社会の分断をおおる要因となることもあります。テクノロジーが進化したにもかかわらず、人々の間には「情報の壁」や「感情の距離」が存在し、それが誤解や対立を生み出しています。

このような背景のもと、NTTは「つながる」ことの意味をあらためて見直し、分断を乗り越えるための未来のコミュニケーションのあり方を探求しています。そして、その挑戦の一環として取り組んでいるのが、



図1 1970年日本万国博覧会で実験したワイヤレス通信システム

2025年日本国際博覧会（大阪・関西万博）での出展です。

万博に取り組む意義 ～未来のコミュニケーションの提案～

NTTは、通信という社会基盤を支える存在として、その前身である日本電信電話公社時代から現在に至るまで、万博やスポーツ大会といった世界的なイベントを通じて未来のコミュニケーションのあり方を積極的に提案・実践してきました。

1970年の日本万国博覧会では、世界で初めてワイヤレス通信システムを実用化（図1）することに成功しました。来場者が自由に手にとって、全国どこへでも通話ができる「パーソナルコミュニケーション」の実験を実施しました。これにより「固定された場所で受ける」通信から「個人が自由な場所で使える」通信への発想の転換が生まれ、後の携帯電話やスマートフォンにつながる礎となりました。

1998年の世界的なスポーツ大会では、PHSマルチメディア通信や腕時計型PHS（図2）の実験を通じて、「ウェアラブルコミュニケーション」の未来像を提示しました。当時としては革新的だった人が身につけるデバイスは、今やスマートウォッチやイヤホン型端末など、当たり前技術となっています。

コロナ禍という特殊な状況の中で、2021年に開催された世界的なスポーツ大会でも、最新の通信技術により次世代の「パブリックビューイング」の実験を実施しました。超高臨場感通信技術Kirari!をセーリング競技やバドミントン競技に適用し、実際の競技会場の「臨場感」を別の場所に再現（図3）することができました。また超低遅延通信技術をマラソン競技に適用することで、距離を超えた「一体感」を醸成することにもチャレンジするなど、選手と観客をつなぐ「スポーツ観戦」の未来像を提案しました。

NTTはこれまで、人々がいかにすれば

より深くつながれるのかを追求してきました。2025年の大阪・関西万博においても、未来のコミュニケーションの創出に取り組みました。本プロジェクトは、現代社会における分断や孤立といった課題に対し、次世代テクノロジーを活用して新たなつながりのあり方を模索する試みです。高度な通信技術が普及する一方で、共感や気配といった非言語的な要素はまだまだ十分に伝えることができません。IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 時代のコミュニケーションは、こうした繊細な感覚にも対応し、人と人との本質的な理解を支える手段へと進化していきます。NTTパビリオンでは、つながりの質を高めるとともに、多様で柔軟なつながりのかたちを

生み出し、未来の社会における新たなコミュニケーションの可能性を提示しています(図4)。

未来のコミュニケーションのあり方 ~共感と関係性を支える2つの進化~

未来のコミュニケーションは、大きく2つの方向に進んでいくと考えられます。1つは、コミュニケーションの質の向上によって、より深い共感や心理的な安心感を育む方向。もう1つは、これまでになかった多様な関係性——例えば「未来の自分」や「空間・環境」との対話——を通じて、社会や自己とのつながり方をそのものを拡張する方向です。

■コミュニケーションの質の向上による共感の醸成

現代社会では、リモートでのやり取りが日常化する一方で、「相手が本当にそこにいる」と感じにくい、あるいは「自分の存在が伝わっていない」と感じる瞬間が増えています。こうした「実在感」の欠如が、孤立や誤解を助長しているのが実情です。

この課題に対して、空間全体の共有感覚を高めるコミュニケーション環境が1つの解決策になると考えています。例えば、離れた空間どうしをリアルタイムで統合し、

まるで1つの空間にいるような体験を実現することは、協働や共感の基盤をつくり出します。学校、職場、地域、文化圏を越えた人々が同時に「そこにいる」という感覚は、分断された社会の再接続に貢献します。今回の大阪・関西万博では、吹田市の万博記念公園の特設ステージ上のパフォーマンスを、周囲の空間情報と一緒にまるごとリアルタイムで伝送。夢洲のNTTパビリオンに再現することで、まるで相手が隣にいるような、存在を感じるコミュニケーション体験を提供しました。詳細は本特集記事『IOWN×空間伝送——離れた空間が1つになるコミュニケーション体験』で紹介いたします。

また、1対1のリモートコミュニケーションにおいて、視聴覚に加えて触覚を共有することも、人と人との感情的距離を縮める手段として重要です。遠くにいる家族と手のぬくもりを感じ合う、言葉にできない感情を「触れ合う」ことで伝える——このような感覚的なコミュニケーションは、安心感や共感を深めるだけでなく、介護や医療、教育などの領域でも新たな支援のかたちを提供します。今回の大阪・関西万博では、映像と音声に加えて触覚・振動を送り合うことができる端末を会場内外の複数個所に設置。初めて会う人とでも気軽に触れ合うコミュニケーションができる「未来の電話」



図2 1998年の世界的なスポーツ大会で実験した腕時計型PHS



図3 2021年の世界的なスポーツ大会における洋上ワイドビジョンでの中継模様



図4 NTTパビリオン内の様子

をつくることにチャレンジしました。詳細は本特集記事『コミュニケーションのあり方を問いかける「ふれあう伝話」と「せかいがきこえる伝話」——電話から、伝話へ』で紹介します。

これらの進化は、単にリモートコミュニケーションを「リアルに近づける」ことが目的なのではなく、「心が通い合っている」と実感できるような“深いつながり”を育み、共感や安心感を醸成する基盤になると考えています。

■多様なコミュニケーションによる新たな関係性の構築

もう1つの方向性は、これまで接点がなかったものとの関係性の再構築です。AI（人工知能）の進展により、言語や文化の違いを超えた人と人のつながりはもちろん、従来の枠を超えて、自分自身や自身を取り巻く環境とのつながりが、新たな関係性を生み出す鍵となります。

デジタルヒューマンなど、AIを通じた自分自身とのコミュニケーションはその代表例です。過去・現在・未来の自分と対話することで、自己の価値観や目標、変化に気付き、深い内省と自己肯定感が促進されます。このような自分自身とのコミュニケーションは、個人の精神的な安定や自己成長に寄与するだけでなく、他者との関係においてもより成熟したつながりを生む土台になると考えられます。今回の大阪・関西万博では、デジタルのもう一人の自分である「Another Me[®]」との対話を通じて、自身の新たな可能性に気付くことができるコミュニケーション体験の提供にチャレンジしました。詳細は本特集記事『Another Me Planet——未来の可能性を見せる自分の分身』で紹介します。

さらに、感情に応答する建築や都市とのコミュニケーションも新たな潮流です。人

の心に呼応して光や音、空間構成が変化するインタラクティブな環境により、人の内面が可視化・共有されることで、他者との感情的なつながりが生まれやすくなります。今回の大阪・関西万博では、NTTパビリオン来場者の表情や盛り上がりを分析し、その結果をNTTパビリオンのファサード（幕）に反映させて人工的に幕を揺らしています。揺れている幕や音に気付いたパビリオンの外の人々が、NTTパビリオンに興味を持っていただけると、中と外が通じ合います。そんなモノを介した多様な人となりがあえる未来の先駆けとなる技術を実装しました。詳細は本特集記事『感情を纏うパビリオン——ヒトとモノが呼応するコミュニケーション体験』で紹介します。

なお、こうした「自分」や「モノ」との新たな関係性の探求に加えて、NTTパビリオンでは言語の壁を越える新たな技術も導入しています。有名アスリートの一言語の音声からクロスリンガル音声合成技術を用いて多言語音声を生成し、6カ国語による紹介アナウンスを実現しました。この技術により、声質を維持しつつ言語の壁を越えた情報伝達が可能となり、多様な聴衆との関係構築に役立ちます。声だけで、世界中の人々とつながるコミュニケーションの可能性が広がっているのです。

おわりに

未来のコミュニケーションに関する取り組みは、単に先端技術を誇示するものではありません。私たちが大阪・関西万博で提案するのは、人と人、人と空間、さらには人とモノといった新しい関係性を再構築するための問いかけでもあります。これからの社会では、テクノロジーを前提とするだけでなく、人の感性や倫理、文化と調和する

かたちで設計されたコミュニケーションが求められます。例えば、AIが人の感情を理解し、会話をより自然なものにする。センサが空間の反応をきめ細かくフィードバックし、安心感のある対話を実現する。こうした技術は、冷たく機械的なものではなく、むしろ人間らしさを引き出す装置として機能する可能性があります。

私たちは、こうした人間中心の未来像を見据え、社会とともに成長するテクノロジーのあり方を模索しています。分断を越えて多様な人々が理解し合い、協働し合う社会。それを可能にする新たなインフラとして、未来のコミュニケーションのかたちを提案していくことが私たちの使命です。2025年の大阪・関西万博は、その第一歩となる場です。これからの10年、20年を見据え、私たちは真に“つながる”社会の実現に向けて、技術と人間性の橋渡しを続けていきます。



(上段左から) 日高 浩太 / 島村 潤
(下段左から) 望月 崇由 / 平尾 美佐

未来のコミュニケーションは、テクノロジーを前提とするだけでなく、人間の感性や文化と調和しながら、新たな関係性を築くものであると私たちは考えています。大阪・関西万博をその出発点として、今後も人間中心の社会を支える技術のあり方を模索・提案していきます。

◆問い合わせ先

NTT人間情報研究所
サイバー世界研究プロジェクト



IOWN×空間伝送——離れた空間が1つになる コミュニケーション体験

本稿では、2025年日本国際博覧会（大阪・関西万博）のNTTパビリオンで展示されている、音楽ユニット、PerfumeのパフォーマンスをIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）でリアルタイムに伝送した取り組みと技術内容について紹介します。本取り組みでは、吹田市の万博記念公園と夢洲のNTTパビリオンをIOWNでつなぎ、NTTで研究開発している動的3D空間伝送再現技術と触覚振動音場提示技術によって、離れた場所でパフォーマンスをしているPerfumeが目の前に現れるような体験を実現しています。

キーワード：#IOWN, #空間データ伝送, #大阪・関西万博

背景とねらい

現在開催している2025年日本国際博覧会（大阪・関西万博）は、前回の日本万国博覧会（大阪万博）で「未来の電話」としてワイヤレスステレオフォンを発表してから、ちょうど55年後にあたります。NTT研究所では、これからの未来社会は映像と音声による2Dコミュニケーションを超えて、離れた場所の3D空間全体をIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）による低遅延で共有し、さらに視覚・聴覚にとどまらず人間の五感すべてがつながるコミュニケーションが当たり前になると考え、その実現をめざしています。

大阪・関西万博では、そのような未来のコミュニケーションを体現する取り組みとして、夢洲のNTTパビリオンと吹田市の万博記念公園をIOWNでつなぎ、音楽ユニット、Perfumeのライブパフォーマンスを伝送する、世界で初めての検証実験に挑戦しました。検証実験では双方向コミュニケーションが可能なほどの低遅延で、3D空間に加えて触覚情報までを伝送することで、まるで演者が同じ空間にいるかのような体験を実現しています。本稿では、検証実験で用いた「動的3D空間伝送再現技術」と「触覚振動音場提示技術」の2つの技術

を解説します。また、それらの技術を用いて、ライブパフォーマンス伝送がどのように実現されていたか、舞台裏を紹介します。

動的3D空間伝送再現技術

動的3D空間伝送再現技術は、空間の“動的”な時間方向の変化、つまり「空間の動き」までを伝送する技術になります。ライブパフォーマンスを伝送しようと考えたとき、従来の動的な3D空間を計測する技術には、いくつかの問題点がありました。

1つは広い領域を精度高く計測するのが難しいことです。3Dデータを計測する方法にはMicrosoft KinectなどのRGB-Dカメラが知られています。しかし、RGB-Dカメラは、計測範囲が数mと狭いものが多く、さらに計測できる限界に近い距離では計測値の歪みも大きいため、RGB-Dカメラを複数組み合わせることで広域を撮影・統合することは困難となります。

2番目の問題は、計測から表示までの低遅延性を保つのが難しいことです。RGB-Dカメラ以外の、一定領域を動的3D計測する方法として、もっとも商用化が進んでいる方法には、ポリュメトリックキャプチャ方式があります。ポリュメトリックキャプチャは、多数のカメラを対象の周囲へ配置することで、3Dデータを測定する手法ですが、多くのカメラ画像から3次元形状を推定・復元する処理が必要のため、遅延の比較的小さいものでも数秒程度の処理時間

| | | | |
|-----------|-----------|------------|-----------|
| まつもと | たかひろ | ちぎら | ひろし |
| 松元 | 崇裕 | /千明 | 裕 |
| むらさき | かずひこ | もちつき | たかよし |
| 村崎 | 和彦 | /望月 | 崇由 |
| たにだ | りゅういち | しまむら | じゅん |
| 谷田 | 隆一 | /島村 | 潤 |

NTT人間情報研究所

が必要です。一方で、電話やWeb会議などのような、双方向でコミュニケーションするシステムを違和感なく利用するには、片道200ms未満で計測から提示までを完了する必要があります。またポリュメトリックキャプチャは、スタジオなどの照明条件が一定で安定した環境が求められるため、曲や演者の動きに合わせて、激しい照明演出のある今回のライブパフォーマンスでは適用が困難でした。

NTT研究所が開発する動的3D空間伝送再現技術は、ポリュメトリックキャプチャのようにカメラだけを用いるのではなく、1台のカメラに3台のLiDAR（Light Detection And Ranging）^{*1}を組み合わせた独自の計測装置（図1）で3D空間を計測します。図1の計測装置を複数セット用いて、すべてのカメラとLiDARをネット



図1 動的3D空間計測ユニット

*1 LiDAR：レーザ光を照射し、その反射光の情報に基づいて対象物の3D形状を点群データとして計測する技術です。

ワーク経由で時刻同期制御することで、広域な空間の計測を実現します。計測に利用されるLiDARは、主に自動運転のために車載用途で利用されるもので、最大200 m離れた対象の位置情報を計測が可能です。また動的3D空間伝送再現技術では、カメラの画像データに、深度値が直接取得できるLiDARデータを組み合わせることで処理を軽くし、計測から表示までを短時間で実現しています。

カメラ・LiDARの時刻同期制御には、Precision Time Protocol (PTP) と呼ばれる、ネットワークを通じてナノ秒からサブマイクロ秒の精度で、機器の時刻同期を実現するプロトコルを利用しています。1つひとつのLiDARは、1秒間に10回の頻度でしか空間を計測することができませんが、3台のLiDARが空間を計測するタイミングを、PTPに基づいて30分の1秒ずつ変化させることで、1秒間に30回の空間計測を実現しています。このように複数のセンサデータを位置・時刻に基づいて、高い精度で一致・収集することは、別々のLiDARが計測したデータを1つの3Dデータとして正確に統合したり、色情報のないLiDARの3D点群*2データを、別センサであるカメラの画像で着色したりするセンサフュージョンでも重要となり、本技術を実現する土台となっています。

上記のとおり、カメラとLiDARを組み合わせることが特徴の本技術ですが、実現には多くの技術的な課題が存在しました。

課題の1つは、LiDARが計測する点群データはカメラ画像と比べて「疎」であるということです。一般的に、LiDARはレーザを走査線として発射し、送出先の物体表面に当たって戻るまでの時間で、対象の距離を計算するTime-of-Flight (ToF) という方法が用いられます。そのため計測可能な空間密度は走査線の数に依存しますが、現時点では密度の高いものでも128本程度になります。この本数は、カメラがFull HD画質でも水平方向に1080 pixの粒度で撮影できることを考えると、疎なことが分

かるかと思えます。

2番目は、複数台のカメラ・LiDARで計測するときに生じる、機器間のノイズやズレの問題です。複数のカメラ・LiDARで計測したデータを正しく1つに統合するには、各機材の位置関係を正確に取得し、さらに各機材の計測歪みを精緻に補正するキャリブレーションが求められます。しかし、キャリブレーションを完全に誤差なく実施することは難しく、誤差から生じる各点群データのズレや歪み、さらには点群データをカメラ画像で色付けするときの誤り対策が必要となります。

動的3D空間伝送再現技術では、「密度」と「ズレ・歪み」の問題を、独自の高密度化技術と、ノイズ除去技術で解決しています。高密度化技術では、従来手法の20倍高速な独自アルゴリズムを開発することで、低遅延でカメラ画像からLiDARの計測できていない領域の深度値を予測します。またノイズ除去技術では、高速に動く物体に発生する残像ノイズを除去する手法、カメラ画像から誤って色付けされた点群データを除去する手法、さらには多くのアングルから計測した3Dデータを1つに統合するときに、各計測機材のノイズ・歪みが蓄積して見た目が悪化することを防ぐフィルタ処理が施されています。

これらの研究成果により、動的3D空間伝送再現技術ではデータ計測から、高密度化・ノイズ除去を適用し、さらにデータを送受信して3次元情報として閲覧可能な状態にするまでを100 ms未満で実現しました。そのため本技術は、違和感なく双方向コミュニケーションができるとされている片道200 msの遅延値より大きくリアルタイム性が高まっています。また3D空間の計測密度やズレ・歪みの課題についても、NTTパビリオンの大画面の3D LEDディスプレイ

プレイで違和感なく視聴できる水準を達成しています。

触覚振動音場提示技術

触覚振動音場提示技術は、地面の構造や形状、履いている靴、地面を踏む強さで変化する足元の触覚振動を、定位感も含めて計測し、離れた場所へ再現する技術です。例えば、今回のライブパフォーマンスでは、木製ステージの上を、ブーツを履いたPerfumeが、キレのあるダンスで踏みしめる足元の質感・感触を、あたかも同じステージにいるかのように伝えることができます。また定位感を含めた計測・再現とは、振動を発生させる対象の位置が変化したときに、振動を感じる側が、その位置変化を感じられるように再現することです。例えば、パフォーマーが左右に動いたときに、触覚振動も右・左それぞれの方向から伝わるように伝達できる技術となります。

従来技術では、触覚振動の計測には、床下へ多数のマイクをアレイ状に並べる手法が一般的でした。しかし、マイクを埋め込む手法は、アリーナやステージの床を二重にして、多数のマイクを設置や、信号を収集する配線を実施するなど、施工・構築コストが大きくなる問題があります。また、今回のようなライブパフォーマンスでは、床のマイクが触覚振動だけでなく、楽曲の音まで計測してしまうため、取得したい信号だけを明瞭に計測できない問題がありました。そこでNTT研究所では、独自の小型無線センサ(図2)を開発し、開発したセンサを足元へ直接取り付けの手法を実現しました。また開発した小型無線センサには、空気の振動を音として計測する一般的なマイクではなく、加速度を計測するセンサを採用しています。加速度センサを用い



図2 足元触覚振動計測センサ

* 2 点群：3D空間に位置情報を持つ多数の点で記述するデータ表現形式。LiDARで計測された点群は色情報を持たず、色情報はカメラなど別のセンサで計測をする必要があります。

ることで、マイクを使う方法とは異なり、ダンス中の楽曲のような環境音の影響を受けずに、触覚振動を計測することが可能になります。一般的に、加速度で触覚振動を計測すると「ブーツが固い木の上をコツコツと叩く感触」のような“振動の質感”が、マイクと比べて失いやすい問題があります。しかし、本技術では振動の再現時に周波数別に強調・抑制を制御することで、加速度データでも質感の再現を実現しています。

またNTT研究所では、定位感を含めて振動を再現するため、振動が発生した場所を追跡するトラッキングシステムを新たに開発しています。具体的には、カメラによるマーカレスのトラッキングと、独自設計の自発光マーカによるトラッキングの2つを組み合わせる手法を開発しました。本手法により、今回のパフォーマンスのように、計測対象が頻繁に移動して、交互に場所を入れ替える環境でも、トラッキング対象を一度も見失わないロバスト性を実現しました。

さらに計測した位置情報付きの触覚振動を、大規模な環境で、効率的に再現すると

ころにもNTT独自の技術が用いられています。NTTパビリオンは最大70名が同時に体験するため、体験スペースに敷き詰められる50 cm×50 cmのOAフロア床（フリーアクセスのタイル）は352枚にもなります。厄介なことにタイルどうしは振動が伝達されないため、体験スペースのどこでも振動を体験可能にするには、すべてのタイルに振動子を取り付ける必要が出てしまいます。そこでNTT研究所では、独自の振動伝搬層を追加する床設計を開発し、振動子の数が約3分の1になっても、前後左右に斜めも加えた8方向の定位感を維持して、迫力ある振動を再現することを実現しました。さらに独自開発した振動コントローラ（図3）を用いて、計測した振動源の位置に応じて、どのタイルの振動子を揺らすかを制御することで、全体が一樣に揺れる表現や、演者の位置関係に応じて振動場所が変わる表現など、さまざまな振動演出が実現されています。

またNTT研究所では、車いすの方でも不自由なく体験できる工夫として、手でも振動を感じられるデバイスを開発しました

（図4）。本デバイスは、近くの床の振動を計測して、手で持つデバイスへ振動を伝達するシンプルな構造となっているため、利用者が体験する位置によらず、柔軟に対応できるようにになっています。

実証実験の舞台裏

ライブパフォーマンスを伝送する実証実験は、大阪万博（EXPO'70）が開催された吹田市の万博記念公園の電気通信館跡地と、夢洲の大阪・関西万博のNTTパビリオンを接続して、2025年4月2日に実施されました。2つの場所は、NTTパビリオンの体験テーマである“PARALLEL TRAVEL”に合わせて、1970年と2025年を象徴する拠点として選定され、直線距離で約20 kmの区間をNTT西日本が提供するAll-Photonics Connect powered by IOWNを使用することで、データ伝送を実現しています。

万博記念公園では、10 m×15 mのテント内にパフォーマンスをするためのステージを構築しました（図5）。ステージの周囲には、動的3D空間を計測する7セットの計測装置、振動位置をトラッキングする28台のカメラ、さらにはステレオ映像を撮影する4K解像度の3Dカメラが4セット設置されました。またPerfumeの3人の声はピンマイクで、足元の触覚振動は、両足のブーツの裏に取り付けた3セットの振動センサで計測しました。

2つの場所をIOWN APNで伝送した動的3Dデータ、触覚振動データ、ステレオカメラデータ、音声データの総伝送量は25 Gbit/sにのぼり、動的3Dデータは研究所

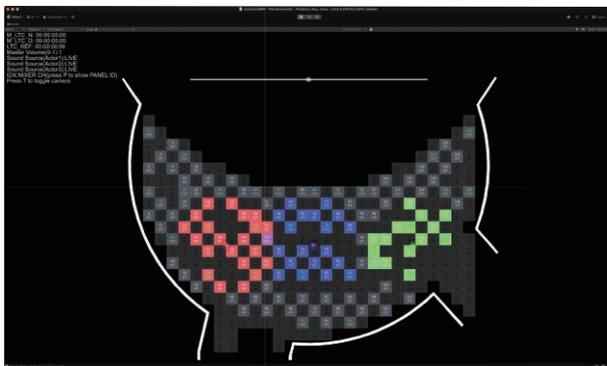
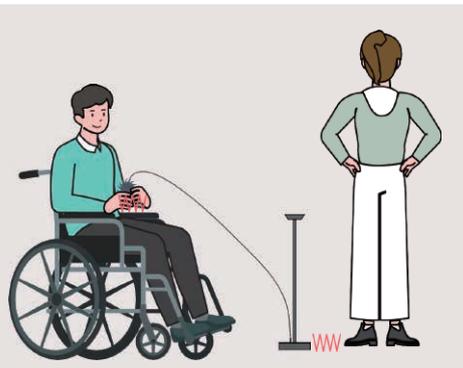


図3 独自コントローラによる床面の触覚振動制御

体験の様子



デバイス



図4 多様な人に向けた振動表現の拡張



図5 パフォーマンスを実施したステージ



図6 パビリオンと実際の3Dデータ再現の様子

独自のデータ形式で1秒間に4500万点を伝送しました。またステレオ映像の伝送は4K60pの映像を、IP (Internet Protocol) ベースの映像伝送規格で業界標準である SMPTE2110で実施し、触覚振動・音声データは音声信号を低遅延でIP伝送できる Dante 規格で伝送しました。

またデータを受信・再現するNTTパビリオンでは、動的3Dデータとステレオカメラデータを、事前にボリュメトリック撮影した“過去のPerfume”である3Dデータと融合させながら、横幅13.2m・高さ4.8mのヒビノ社が取り扱う3DLEDディスプレイシステム「Immersive LED System」*³ (図6)へ表示することで、迫力ある表現を実現しました。伝送した動的3Dデータには、リアルタイムでカメラワークや光の粒子などの演出を追加することで、動的3Dデータを活かした表現を実現しています。また触覚振動は、3DLEDディスプレイに

立体的に表示される演者の位置に合わせて、床に設置した128個の振動子を制御することで、視覚・聴覚に加えて触覚が組み合わさったライブ体験を実現しました。

本実験の準備は、万博記念公園にテントを設置した3月中旬からライブ本番までの3週間弱にかけて、特に集中して進められました。同期間は、万博記念公園側のメンパと、NTTパビリオンのある夢洲側のメンパに分かれて作業を進めることになりましたが、映像・音声・照明などの演出に必要な機材は、IOWN APNを通じた制御によるリモートプロダクションで実施することで、各担当が2つの会場を往復する回数が大幅に減り、効率的に作業を進めることができました。

本伝送実験は、1度きりのライブパフォーマンスとして、NTTパビリオンに招待した多くのメディア関係者の前で披露しました。また同ライブ伝送の様子は、特設サイトを通じてYouTubeにもライブ配信しています⁽¹⁾。また約7分間のパフォーマンス後には、NTTパビリオンと万博記念公園にいるPerfumeとの間で、掛け合いをする双方向コミュニケーションも実施しており、2つの場所の距離を感じさせない低遅

延で、視覚・聴覚に五感も加わったIOWNによる未来のコミュニケーションの可能性を感じていただくことができました。

本実験のライブパフォーマンスの様子は、4月2日にライブ伝送したままの状態で作成しており、万博期間中は当日の様子を体験できるコンテンツとして、NTTパビリオンのZone2で体験できます。

今後の展望

本稿で紹介した動的3D空間伝送再現技術・触覚振動音場提示技術は、高臨場な体験を届けるスタジアム・アリーナ向けソリューションへの応用可能性があると考えています。また計測したデータをサイバー空間上でも利用可能にすることで、メタバース向けのコンテンツとして人が体験するだけでなく、自動運転や社会インフラの維持管理など、多様な産業分野のサイバー空間での予測・分析・シミュレーションに利用するなど、さまざまな活用の可能性があると考えています。

参考文献

- (1) <https://group.ntt.jp/expo2025/pavilion/perfume/>



(後列左から) 村崎 和彦/ 山口 真理子/
望月 崇由/ 島村 潤/
松元 崇裕/ 駒崎 掲/
千明 裕/ 吉田 大我/
谷田 隆一/ 青木 政勝
(前列左から) 鈴木 智史/ 草深 宇翔/
小長井 俊介

本稿の空間データ伝送実験の様子は、YouTubeでもご覧いただくことができますが、実際にNTTパビリオンで体験すると、臨場感の全く違う体験となっています。未来のコミュニケーションを感じられる特別な体験となりますので、皆様ぜひ会場まで足を運びください。

◆問い合わせ先

NTT人間情報研究所
サイバー世界研究プロジェクト

* 3 Immersive LED System: 専用の3Dメガネを装着することでステレオ立体視ができる3DLEDディスプレイシステム。本実験ではパッシブ方式の3Dメガネで視聴できる3DLEDディスプレイシステムを利用しています。



コミュニケーションのあり方を問いかける「ふれあう伝話」と「せかいがきこえる伝話」——電話から、伝話へ

NTTパビリオン屋外中間領域に、触覚で人の存在を伝え合う「ふれあう伝話」と、物語を聴く「せかいがきこえる伝話」を展示しています。「ふれあう伝話」はIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) による低遅延通信で振動も共有し、新しい触れ合いを体験可能にします。「せかいがきこえる伝話」ではレトロな電話機を使い、多様なつながりの物語を聴くことができます。これらはこれまでの、そしてこれからのコミュニケーションを伝え合うメディアとしての体験展示です。

キーワード：#2025年日本国際博覧会、#未来のコミュニケーション、#IOWN

公衆電話から125年、「伝話」がつなぐ未来のつながり

2025年4月13日、2025年日本国際博覧会(大阪・関西万博)が開幕しました。「いのち輝く未来社会のデザイン」をテーマに掲げる本万博では、社会や人々のあり方に革新をもたらす新しい技術や価値観が提示されています。その中でNTTは、2種類のつながるメディアを展示しています。音声や映像だけでなく、「触覚」を通じて人と人をつなぐ遠隔触覚コミュニケーションメディア「ふれあう伝話」、レトロな電話機を用い「つながりの物語」を、受話器を通して聴くことができる「せかいがきこえる伝話」を出展しています。今年日本で最初の公衆電話が登場してからちょうど125年という節目にあたります。1900年、東京に設置された初の公衆電話は、以降、公共の場におけるコミュニケーションのインフラとして、多くの人々の想いをつないできました。「ふれあう伝話」は、そうした歴史を受け継ぎながら、公共の場で生まれる偶然の出会いや、初めて会う人とでも触れ合うコミュニケーションが気軽にできてしまう、そんな新しいコミュニケーションのあり方をめざしています。また「せかいがきこえる伝話」は人と人が出会い、響き合う物語に耳を澄ませることを通じてつむいできたコミュニケーションのかたちを体験することができ、通信を通して生まれる人と人のつながりの豊かさを、物語を聞くことで体験する機会を提供しています。

「ふれあう伝話」がつなぐ未来

「ふれあう伝話」は、「未来の電話をつくる」というテーマから始まりました。1970年の大阪万博のころにおける「未来の電話」とは、固定電話をワイヤレス化し携帯性が加わるといった、主に機能面の進化をさしていました。しかし、現代における通信技術の成熟につれて、求められるのは機能や情報量の多さでなく、「豊かで実感を伴うつながり」を実現するかという質的な変化となりました。

そうした背景から、「電話から、伝話へ。」というコンセプトに至りました。私たちは、これまでの「電話」が担ってきた「情報を伝える道具」としての役割を超えて、相手の存在そのものを伝える「伝話」へと進化させることをめざしています。単に言葉をやり取りするだけではなく、手のひらに伝わる振動や心拍を感じることで、「今、つながっている」という感覚を直感的に届けることができます。触れ合いの感覚を通信に取り入れていくことは、単に情報を交換することではなく、信頼や共感、そして“実感”を伴ったつながりを育むことです。「ふれあう伝話」は、そんな未来のコミュニケーションの原型であり、人と人、心と心をつなぐための新たな道をつないでいきます。

振動伝送技術

NTTの研究所では、誰もが共通して持つ感覚である「触覚」に着目し、従来の映

こまざき 駿崎^{†1} / わたなべ 渡邊^{†1}
 かかく^{†1~3} 掲 / じゅんじ 淳司^{†1~3}
 しぶさわ 渋沢^{†1} / もちつき 望月^{†1}
 うしお^{†1,2} 潮 / たかよし 崇由^{†1}

NTT人間情報研究所^{†1}
 NTT社会情報研究所^{†2}
 NTTコミュニケーション科学基礎研究所^{†3}

像や音声によるコミュニケーションに加えて、触覚を感じられる情報通信技術の研究を進めてきました⁽¹⁾。こうした身体的なコミュニケーションを通じて、人と人との“つながり”をより深く、直感的に実感できる新たな体験をめざしています。

触覚には温度、圧力、振動などさまざまな種類があり、その中でも、「ふれあう伝話」では特に「振動」を扱っています。振動情報は、音声データと同様に時系列の波形データとして扱えるという特性を活かして伝送しています。送信された振動の波形データが装置に届くと、内蔵された振動子はその波形に合わせて動作し、受信者の手のひらにリアルな触感として伝わります。

「ふれあう伝話」は、映像・音声・振動の3つの情報を双方向でやり取りができる遠隔触覚コミュニケーションメディアです。ユーザが机や、丸い手のマークがついたパネルに触れると、その動作がリアルタイムに計測され、振動触覚として音声波形に変換されて、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) を経由して相手側に送信されます。受信側では同様に振動子が作動し、振動として再現されることで、あたかも相手と触れ合っているかのような感覚が得られます。

このように、「ふれあう伝話」は、離れていても身体感覚を共有できる新しいコミュニケーションのかたちを実現しています。



図1 「ハイタッチでつなぐ」ふれあう伝話

IOWNで触覚伝送技術がつなぐ 「ふれあう伝話」

また、「ふれあう伝話」のリアルタイムな触覚体験を可能にしているのが、NTTが開発した次世代通信基盤IOWNです。IOWNは、最先端の光技術を使って、豊かな社会を創るための構想です。IOWNは従来のネットワークと比較して、非常に低い遅延と高い転送性能を備えています。そのため、例えばハイタッチのように同時に触れ合いを生むインタラクションでも、ずれを感じることなく、まるで本当に目の前の人と触れ合っているかのようにハイタッチの感覚を実現します。触れたその瞬間、相手の存在に実感を持つことができます。従来の触覚通信では、ネットワーク遅延がリアルタイム性の障壁となっていました。これを克服するIOWNの導入により、まさに「今、そこにいる」ような存在感を通信越しに再現できるようになりました。

実際に、「あっち向いてホイ」やじゃんけん、そしてハイタッチの体験を通し、来場者の方からずれのないコミュニケーションに驚きの声をいただいています。

2つのコンセプトでつなぐ 「ふれあう伝話」

今回の大阪・関西万博では、「ふれあう伝話」は2つのコンセプトで展示されています。それぞれが異なる場所にある意義やその場に合うように設計されており、訪れ

る人々に多様な触れ合いの体験を提供します。

〈「ハイタッチでつなぐ」ふれあう伝話〉(図1)は、日本館と関西国際空港にそれぞれ1台ずつ設置されています。関西国際空港に到着した海外からの来訪者と、万博会場の日本館にいる来場者が、「ふれあう伝話」を通してあいさつしながらハイタッチを行い、その振動を互いに共有することができます。

モニタの両脇には丸い手のマークが設けられており、そこに触れることで相手にも振動が伝わります。また触ったときに相手側の手のマークが光ります。言語の壁を越え、ハイタッチした感覚を伝え合うことができます。

初めて会う相手であっても、手のひらに伝わる振動は、互いの存在を自然と実感させてくれます。この触覚的なやり取りによって、日本館の来場者は“向こう側”にいる人々への関心を抱き、訪問者もウェルカムな気持ちを受け取り、万博への期待を高める効果が期待されます。また触覚によるコミュニケーションは、非言語でも楽しめることから、言語の壁を越えてさまざまな人をつなぐことができます。

〈「いのち」ふれあう伝話〉(図2)は、NTTパビリオンと、同じ万博会場内にある生物学者の福岡伸一氏がプロデュースするシグネチャーパビリオン「いのち動的平衡館」を結んでおり、触れる感覚に加えて、心臓の鼓動まで共有することが可能です。

それぞれのモニタの前には机が設置され

ており、来場者が手を置くと、その触れた感覚が相手の机に振動として伝わります。振動を送った際には、相手側の机の手のマークが光り、視覚的にも相手側に情報が伝わっていることが確認できます。

また、NTTパビリオン側には聴診器型のマイクが設置されており、胸に当てると心拍を計測し、相手側のテーブルに“鼓動”として届きます。送っている人の鼓動は、自分のテーブルでも振動として感じられます。手のひらに伝わる鼓動は、他者の“いのち”を感じ、個々の存在が他者と関係性の中で生きていることを、身体を通して理解する場を提供しています。

過去の研究がつなぐ、 触覚コミュニケーションの系譜

「ふれあう伝話」の背景には、NTTが長年取り組んできた身体性メディア研究の蓄積があります。2019年からNTTインターコミュニケーション・センター (ICC) で展示されていた「公衆触覚伝話」⁽²⁾は、映像と音声に触覚情報を加えることで、対面での触れ合いを再現する試みでした。湾曲したモニタとテーブルが一体化したこのメディアは、遠隔にいながら一緒にそこに“いる”感覚を提供し、初対面の人どうしでも積極的に触れ合える場をつくり出しました。また、〈「いのち」ふれあう伝話〉で使用された聴診器型デバイスは、「心臓ピクニック」⁽³⁾、⁽⁴⁾というワークショップで活用されていた「心臓ボックス」の技術に基づい



図2 「いのち」ふれあう伝話



ています。このボックスは、胸に当てた聴診器から取得した心拍を振動に変換し、他者に手渡すことで命の存在感を伝えるものでした。さらに「ハイタッチでつなぐ」ふれあう伝話には、2020年から研究を進めている「リモートハイタッチ」⁽⁵⁾の技術が応用されています。新型コロナウイルス感染症の拡大により無観客で行われたスポーツ大会などで、選手と家族がハイタッチで応援の気持ちを共有するために活用されました。映像・音声に加えて振動の情報を遠隔で送り合い、触感を伴う遠隔ハイタッチ体験を実現するものです。「リモートハイタッチ」は、何らかの理由によって離れた場所にいる人どうしても、喜びや応援の体験を身体感覚が伴うかたちで共有することで、単純に映像・音声でつながるよりも深い心と心の“つながり”が醸成されることをめざしています。この「リモートハイタッチ」の取り組みは、これまで、病院に長期入院中の小児が、小児の憧れのバスケットボール選手たちを応援するイベントや、新型コロナウイルス感染症蔓延下、無観客で行われたフェンシング選手権において、アスリートと遠隔の家族とをつなぐ状況下で実施されてきました。

「せかいがきこえる伝話」がひらく、つながりの記憶

「いのち」ふれあう伝話の隣にある、もう1つの展示「せかいがきこえる伝話」は、音声を通じて人と人の物語を届けるメディアです(図3)。レトロなスタイルの電話機が3台(黄色と赤色のプッシュ式公衆電話と水色のプッシュ式家庭用電話機)が並んでおり、それらの受話器を取り、3桁の番号を押すと、そこから“つながりの物語”をテーマにしたさまざまなストーリーが流れてきます。

例えば、「#408 グッドナイト」では恋人どうしの寝前の会話、「#373 裏側」では地球の裏側に住む少年との国際電話、「#396 春」では受験に合格したことを母に報告する声流れます。10種類の物語(英語版も同様に10種類)は、家族、社会、地球、生命など、さまざまなスケールのつながりを扱い、聴く人の心に語りかけます。人と人のつながりの価値に改めて思いを馳せるきっかけとなる体験です。

この展示は、単なる音声コンテンツの再生装置ではなく、「聴く」という行為そのものに価値を見出す体験装置です。重みのある受話器を手にとることで、聞き手は自然と物語へと気持ちが導かれていきますし、プッシュボタンで番号を選ぶ操作は、10種類のストーリーのタイトルから自らが選び、

能動的な物語との出会いにつながります。そして体験者は、それぞれの物語を自身の記憶や感情と重ね合わせながら受け取り、過去の出来事や身近な人との記憶を呼び起こすきっかけにもなります。

こうして「せかいがきこえる伝話」は、来場者1人ひとりの体験を通じて、人と人とのつながりの深さや多様性、そしてそれを支えてきた“電話”というメディアの歴史的意義を思い起こすことにつながります。

NTTが長年培ってきた通信技術は、単に高速・大容量のデータ伝送を可能にするものだけではなく、人と人とのつながりによって生まれる物語を支え続けてきました。「せかいがきこえる伝話」は、そうした日常のかけがえのない瞬間を再構築し、社会や世界、そして私たち自身の心のあり方に新たな気づきをもたらす展示となっています。

Well-beingの視点からみたつながりの物語

現代の企業には、単なる利益追求にとどまらず、製品やサービスを通じて社会や環境に貢献する姿勢が求められています。NTTはこれまで、電話や通信技術を通して人と人をつなぐ取り組みを続けてきました。こうした“つながり”は、Well-being*にとって、欠かせない要因で



図3 せかいがきこえる伝話

す。「せかいがきこえる伝話」は、かつて電話が育んできた多様な“つながりの物語”を、レトロな電話機を通じてもう一度体験できる展示です。それぞれの物語には、人とのつながりの温かさや気付き、すなわちさまざまな人々のWell-beingを読み取ることができます。ぜひ、会場にて受話器を手に取り、Well-beingなストーリーに耳を傾けてみてください。

情報通信からつながりの本質へ

「ふれあう伝話」も「せかいがきこえる伝話」も、人と人がつながることの意味を問い直しています。テクノロジーは人と人の距離を縮め、情報のやり取りを高速化しました。そこへさらに振動を通じて触れ合うことで、相手の存在を感じることができる「ふれあう伝話」、人とのつながりの物語に耳を傾けることで、自身の物語を呼び起こす「せかいがきこえる伝話」。こうした体験は、コミュニケーションの本質に立ち返りながらも、未来の可能性を拓くものです。

* Well-being: 身体・精神・人とのつながりなど、さまざまな側面を含む、それぞれの人のよく生きるあり方、よい状態を意味します。本展示では、さまざまな人のWell-beingに関する物語を音声によって提示しています。研究サイト: <https://www.rd.ntt/sil/project/socialwellbeing/>

おわりに

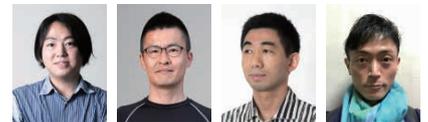
万博会場にある2つの「伝話」は、それぞれ、コミュニケーションのあり方を問いかけています。「ふれあう伝話」は、技術革新だけでなく、人と人とのつながり方そのものに問いを投げかけるメディアです。音声や映像による情報のやり取りを越え、触覚という“身体的な実感”を共有することで、コミュニケーションはより深く、豊かなものになる可能性を秘めています。「せかいがきこえる伝話」は、人と人の関係そのものをかたちづくる物語を通じて、その意味を問い直しています。

125年前に公衆電話が公共空間に登場したように、「伝話」もまた、これからの社会における新たなインフラとなるかもしれません。2025年の万博という機会を通じて、多くの方が未来の「伝話」に触れ、感じ、つながり合うきっかけとなることを期待しています。

■参考文献

- (1) 駒崎・渡邊: “遠隔地をつなぐ振動伝送体験デザイン原理の構築に向けて” 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, Vol. 17, No. 1 p. 32-41, 2023.
- (2) 早川・大脇・石川・南澤・田中・駒崎・鎌本・渡邊: “高実感を伴う遠隔コミュニケーションのための双方向型視聴触覚メディア「公衆触覚伝話」の提案,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 25, No. 4, pp. 412-421, 2020.

- (3) 渡邊・川口・坂倉・安藤: “心臓ピクニック”: 鼓動に触れるワークショップ,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 3, pp. 303-306, 2011.
- (4) 坂倉・渡邊・川口・安藤: “「生命」のシンボル・グラウンディング 鼓動に触れるワークショップ「心臓ピクニック」の評価と展開,” アートミーツケア学会オンラインジャーナル, Vol. 4, pp. 20-29, 2012.
- (5) 駒崎・渡邊: “触覚伝送による”リモートハイタッチ”: アスリートの家族間コミュニケーションや聴覚障がい者との観戦検討,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 27, No. 1, pp. 2-5, 2022.
- (6) <https://www.rd.ntt/iown/>
- (7) https://socialwellbeing.ilab.ntt.co.jp/tool_connect_vibrotactilephone.html
- (8) <https://www.ntt-west.co.jp/brand/>



(左から) 駒崎 掲 / 渡邊 淳司 / 望月 崇由 / 渡邊 淳司

「ふれあう伝話」は、未来のつながり方を体感できるメディアです。初めて会う人と触れた瞬間、遠くの相手の存在を実感することができます。ぜひ万博会場で、初めて会う方との“触れ合い”を体感してみてください。

◆問い合わせ先

NTT人間情報研究所
サイバー世界研究プロジェクト



「Another Me Planet」 ——未来の可能性を見せる自分の分身

今回の2025年日本国際博覧会（大阪・関西万博）では、24時間いつでも体験可能な「バーチャル万博」も開催されています。バーチャルNTTパビリオンでは、夢洲のリアル会場と連動したコンテンツを提供しており、さらにリアル会場の1テーマである「Another Me[®]」の世界観を感じてもらえるよう、未来の職業に就いた自分とコミュニケーションすることができ、それを通して自分の新たな可能性を感じてもらおうコンテンツ「Another Me Planet」を提供しています。本稿では、Another Me Planetの内容ならびにそれを実現する技術について紹介します。

キーワード：#2025年日本国際博覧会、#リアルとバーチャルの連動、#Another Me

リアルとバーチャルが連動する バーチャルNTTパビリオン

今回の2025年日本国際博覧会（大阪・関西万博）では大阪 夢洲のリアル会場に加えて、常時体験可能なバーチャル空間の会場「バーチャル万博⁽¹⁾」も開催されている点もポイントです。バーチャル万博においてもNTTはパビリオンを出展しており、リアル会場と連携するかたちでRoom1, 2, 3の3つの会場から構成されています（図1）。

バーチャルNTTパビリオンにおけるRoom3のテーマ「Another Me[®]」は、NTTが2020年に提唱した「デジタルツインコンピューティング構想」におけるブランドチャレンジ⁽²⁾の1つです。自律的に行動可能な自分のデジタルツイン「Another Me」と人が共生することで、Another Meを通して人が自分の新たな可能性に気

付き、人生における各種機会の拡大を実現することをめざしています。

バーチャルNTTパビリオンの「Another Me」では、バーチャル空間ならではの利用者1人ひとりに合わせたコンテンツを自由度高く提供可能な利点を活用し、Another Meの世界観を体験者がより身近に感じられる独自のコンテンツとして「Another Me Planet」を公開しています。働いている自分をユースケースとし、今はない未来の職業に就いたAnother Meとのコミュニケーションを通して、自分だけでは難しい自分の新たな可能性に気付くことで、自分の未来の可能性を広げることを目的としたコンテンツです。Another Meの実現に向けた各種取り組み、ならびに「Another Me Planet」とその中でのAnother Meの実現内容について紹介します。

Another Meを構成する技術

自分の分身「Another Me」において、何の要素があれば「自分」が表現できるのでしょうか。技術的な検討を進めるうえで、NTT研究所では「自分」の要素を「1）深層」「2）表層」の大きく2要素に分けて研究開発を進めています（図2）。「1）深層」は、自分が先天的に持っている、または、各種経験を通して後天的に獲得した、その人の行動の基準となる要素です。具体的には各種経験に基づく「記憶」の構造化や「価値観」の軸の抽出、脳波等の活用による「感性」の抽出などに取り組んでいます。「2）表層」は、行動の表現方法となる要素です。外見に加えて、NTT研究所では自分らしい「声」の生成、「発話内容」の生成、身体の「振る舞い」の生成などに取り組んでいます。

このようなAnother Meを構成する各技術を組み合わせ、さまざまな領域でのAnother Meの活用方法の実証も進めています。自分の分身による新たな表現として、デジタルな分身による舞台表現の実証、自分の分身による人間関係の構築の支援として、バーチャル空間での関係構築支援の実証を進めてきました。

本「Another Me Planet」では、Another Meを通してさまざまな「とりえるかもしれない自分」を可視化することで、

バーチャルNTTパビリオン

二項対立の新しいあり方をバーチャルならではの方式で表現

未来と現在、自分と他人、リアルとバーチャルが対立する世界から徐々に溶け合っていく様をバーチャルパビリオン体験を通じて表現

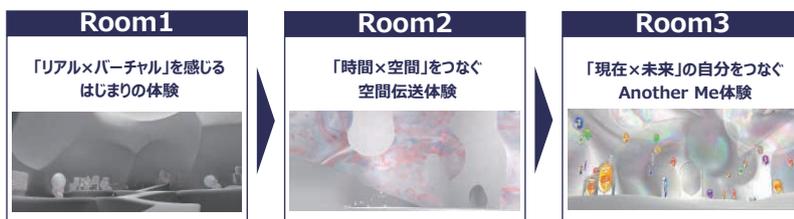


図1 バーチャルNTTパビリオンの構成

※ 現、NTT西日本

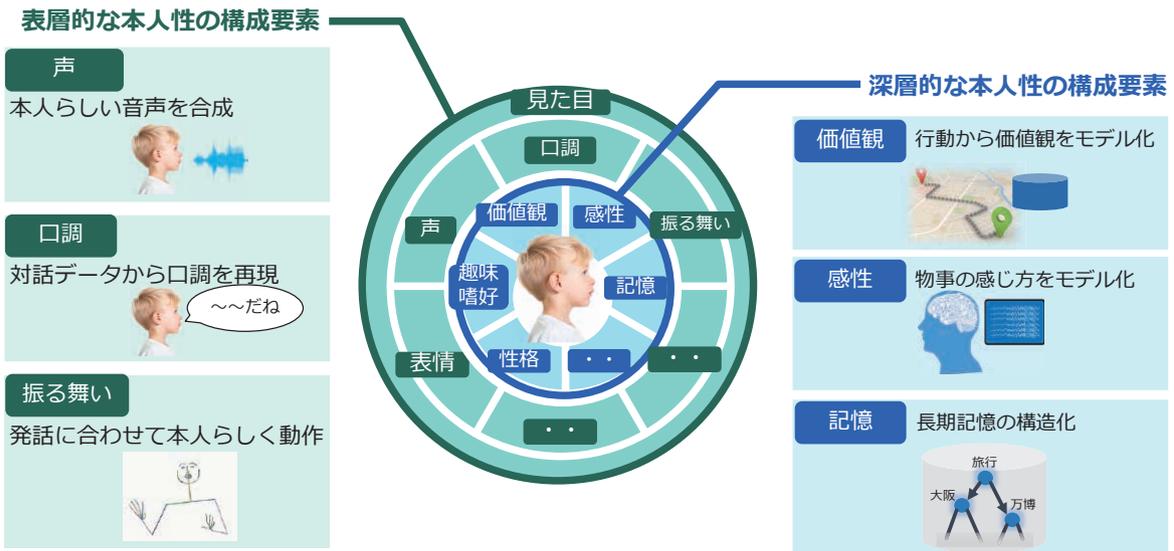


図2 Another Meの構成

自分の可能性を広げることに対する実証を進めています。

【Another Me Planet】——未来の自分の分身とのインタラクションにより自分の可能性を感じるアプリケーション

バーチャル万博のNTTパビリオンにおいて、Another Meのコンセプトである「Another Meを通して、人が自分の新たな可能性に気づき、人生における各種機会の拡大を実現する」を利用者に体感いただくために、提供したアプリケーションが「Another Me Planet」です（図3）。

人生における「働いている自分」をユースケースとし、自分の持つさまざまな可能性を感じていただくために、今、存在する職業ではなく未来に生まれそうな職業に就いたAnother Meを生成します。さらに、Another Meとのインタラクションも通して、自分だけでは気づきづらい「自分の可能性」を可視化ならびに実感いただけるようにし、自分の未来の可能性に気づきを与えることを目的としたコンテンツです。

コンテンツの全体は、図4に示す流れになっています。まず、アプリケーション利用者は、Another Meの外見を生成するために、見た目の設定と顔写真の撮影を行います。次に、Another Meの話す声をアプ



図3 Another Me Planet



図4 Another Me Planetの体験フロー

リケーション利用者のらしい音で生成するために、生成する声のベースとなるごく短い文章を利用者に読み上げてもらいます。

最後に、Another Meの発話内容に特徴を持たせるために、利用者でアンケートに答えていただきます。以上を基に、「未来の

職業に就いたAnother Me」を生成します。生成されたAnother Meは未来の職業の紹介を行います。さらに、アプリケーション利用者は、「未来の職業に就いたAnother Me」に対して、テキストベースでいろいろと質問をすることが可能です。

「未来の職業についての自分」に、より自分らしさを感じていただくために、Another Meに必要な要素を加えています。「表層」の要素の活用として、外見だけでなく、Another Meが話す声をアプリケーション利用者に近いものにしていきます。また、「深層」の要素を考慮した表現として、Another Meが話す内容をアプリケーション利用者の特徴を考慮して決定しています。

このAnother Meとして話す声の表現や、Another Meとして話す内容の表現を実現するために、NTT研究所で研究開発を進めている技術を用いています。

「Another Me Planet」におけるAnother Meを構成する技術

■zero-shot音声合成技術

「Another Me Planet」では、ユーザの

声を数秒程度録音し、ユーザの声の特徴を反映させた音声で「未来の職業についての自分」が話し掛けてくれます。この音声は、NTT研究所の最新の音声合成技術⁽³⁾の機能の1つである、Zero-shot音声合成を用いて生成されています(図5)。

Zero-shot音声合成は、声をつくりたい人(目的話者)の音声(参照音声)を数秒程度用意するだけで、ニューラルネットワークのモデルを用いて参照音声の特徴を高精度に抽出し、その特徴を反映させ、目的話者の声に近い合成音声を生成する技術です。その際、特設音声合成モデルを学習せずに目的話者の音声生成ができるため、ユーザやサービス提供者の負担は数秒の参照音声準備のみに抑えられ、手軽な利用が可能となっています。非常に忙しい著名人や企業幹部、長時間の音声録音が難しい高齢者や児童・未就学児など、幅広い目的話者・ユーザ層への利用が見込まれます。また過去に録音・録画したデータから参照音声を切り出すことで、発声機構を失ってしまった方のかつての声の再現や、声変りをする前の声での音声生成など、さまざまな利用シーンでの応用が期待できます。

■NTT版LLM「tsuzumi」を用いた発話生成ならびに倫理的不適切度合いの推定技術

「Another Me Planet」において、ユーザは「未来の職業についての自分」と対話を行うことができます。日本語で発話するAnother Meの発話の内容を生成するエンジンにはNTTが研究開発を進めているLLM(大規模言語モデル)「tsuzumi」⁽⁴⁾を用いています。アプリケーションの利用者が決定したAnother Meの未来の職業、ならびに、アンケートに対して回答した内容を基にシステムが設定したAnother Meの性格特性や作業特性に基づき、未来の職業に就いたAnother Meの発話生成を行うプロンプトを作成します。このプロンプトを用いて、発話生成を目的とするtsuzumiに対し発話の生成をリクエストすることで、アプリケーション利用者らしさを感じられるような、未来の職業に就いたAnother Meの発話内容を自動生成します(図6)。

発話生成を目的とするtsuzumiが生成したAnother Meの発話文の候補に対し、最終的な発話内容のクオリティをさらに上げることを目的としたNTT研究所で研究

Zero-shot音声合成

数秒程度の目的話者の声を用意するだけで、音声合成モデルを学習せずにその人の**声色・話し方に類似した合成音声**を生成可能

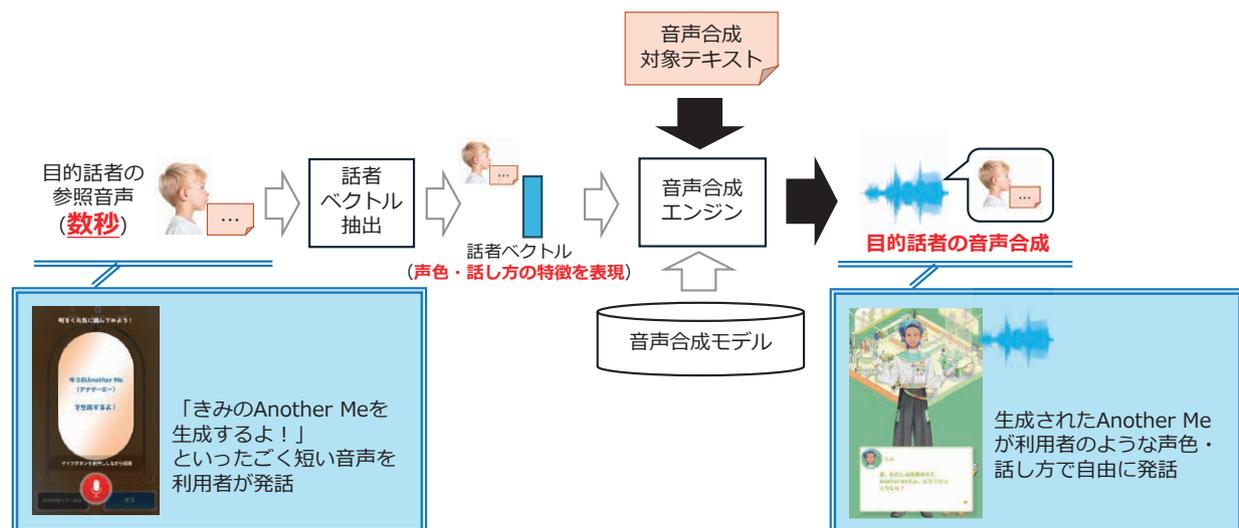


図5 zero-shot音声合成ならびにAnother Me Planetでの活用



図6 tsuzumiを用いて生成されるAnother Meの発話例

開発を進めている技術⁽⁵⁾も用いています。生成された発話内容の倫理的不適切度合いを自動で判定し、問題がある単語や文章が含まれる可能性が十分に低いことを確認し、そのうえで、Another Meの最終的な発話内容を決定しています。この発話内容の倫理的不適切度合いを自動で判定する技術にもtsuzumiが活用されています。文章に含まれる倫理的不適切度合いを推定できるようにtsuzumiをチューニングし、判定対象の文章を入力すると、入力した文章の倫理的不適切度合い、ならびに、その倫理的不適切度合いである判断した理由を応答することが可能になっています。

今後の展望

近年のAIの著しい技術進展により、AIは私たちの生活の多くの場面において、より密に私たちにかかわってきています。「Another Me Planet」を通して、Another Meをはじめとする人と直接インタラクションするAIと私たちのより良い関係性を探るべく、「Another Me Planet」を提供するシステム構築を通して得られた知見、会期を通してSNS等で得られた感想やシス

テム利用状況のデータを継続収集し、いろいろなユーザ観点での人とやり取りするAIによるコミュニケーションの受容性や、発話生成をはじめとする各種技術の有効性の知見を深めていく予定です。

なお、「Another Me Planet」は下記の二次元コードまたはURLから利用可能となっています。ぜひ、「未来の職業についての自分」とのインタラクションをお楽しみいただき、ご自分の可能性をお感じになってください。

■ Another Me Planet 特設サイト



<https://ame.expo2025.group.ntt/>
(2025年10月13日まで体験可能)

■ 参考文献

- (1) <https://www.expo2025.or.jp/future-index/virtual/>
- (2) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2020/11/13/201113c.html>
- (3) <https://youtu.be/gVaob4sWhLk/>
- (4) https://www.rd.ntt/research/LLM_tsuzumi.html
- (5) 大賀・長谷川・西田・齋藤：“LLMを用いた

不適切発話データの自動生成に関する研究,”
言語処理学会 第30回年次大会 発表論文集,
pp. 2159-2164, 2024.



(上段左から) 伏尾 佳悟 / 大塚 淳史 / 野本 済央

(下段左から) 永徳 真一郎 / 中村 孝 / 大賀 悠平

リアルとバーチャル、人とAIといった、相反しているものを、それぞれの特徴を活かしながら共生させることによって、どちらかだけでは困難だった新たな価値を生み出すことができるのではないかと考えています。そのようなリアルな人の可能性を広げていく技術や社会実装に向けて、これからも研究開発を進めていきます。

◆ 問い合わせ先

NTT人間情報研究所
デジタルツインコンピューティング研究プロジェクト

感情を纏うパビリオン ——ヒトとモノが呼応するコミュニケーション体験

本稿では、2025年日本国際博覧会（大阪・関西万博）におけるNTTパビリオンの未来のコミュニケーション創出のコンセプトの1つである「感情を纏うパビリオン」を実現している、IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）光コンピューティングとMediaGnosisの組み合わせ、および、NTTパビリオンへ訪問されるお客さまへの安心・安全を提供している、IOWN光コンピューティングと身体行動理解技術の組み合わせについて紹介します。

キーワード：#IOWN光コンピューティング、#IOWN Data Centric Infrastructure、
#光電融合デバイス

大阪・関西万博のNTTパビリオンにおける演出概要

人の感情や感覚がモノと連携する未来のコミュニケーションの実現に向け、IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）時代のコンピューティング基盤である「IOWN光コンピューティング」とNTT独自の次世代メディア処理AI（人工知能）「MediaGnosis」を活用し、音楽ユニットPerfumeの演出が上映されるZone2内部に設置された5台のカメラで撮影した来場者の顔映像を、1秒に1回の頻度で表情分析し、笑顔の人数を算出し、その笑顔の数に応じてNTTパビリオンを覆う幕を複雑に制御しています（図1）。

また、NTTパビリオンへ訪問されるお客さまへの安心・安全を提供するため、「IOWN光コンピューティング」と「身体行動理解技術」を活用し、NTTパビリオン外部に設置された16台のカメラで撮影した映像から人物を検出し、カメラごとの混雑度（個々のカメラ撮影範囲の人物検出数／個々のカメラの撮影範囲面積）の算出結果、および、検出した人物の骨格を推定し当該人物が転倒しているかどうかを判定し、転倒者が検出されたエリア情報をNTTパビリオンのキャストが所有する運用者端末に通知しています。通知を受けたNTTパビリオンのキャストは、混雑度緩和のためのお客さまの誘導、もしくは転倒されているお客さまの介護のため、当該エリアにタ

イムリーに駆けつける運用を実現しています。

IOWN光コンピューティングの特徴

IOWN光コンピューティングは、GPU（Graphics Processing Unit）などのアクセラレータを搭載するサーバと光電融合スイッチから成るハードウェア部と、GPUなどのアクセラレータを柔軟に制御するDCI（Data Centric Infrastructure）コントローラのソフトウェア部から構成される、次世代のコンピューティング基盤です（図2）。

市中においてマーケティングやセキュリティなどの目的で映像処理のAI化が加速



図1 大阪・関西万博NTTパビリオンにおけるDCIシステム概要

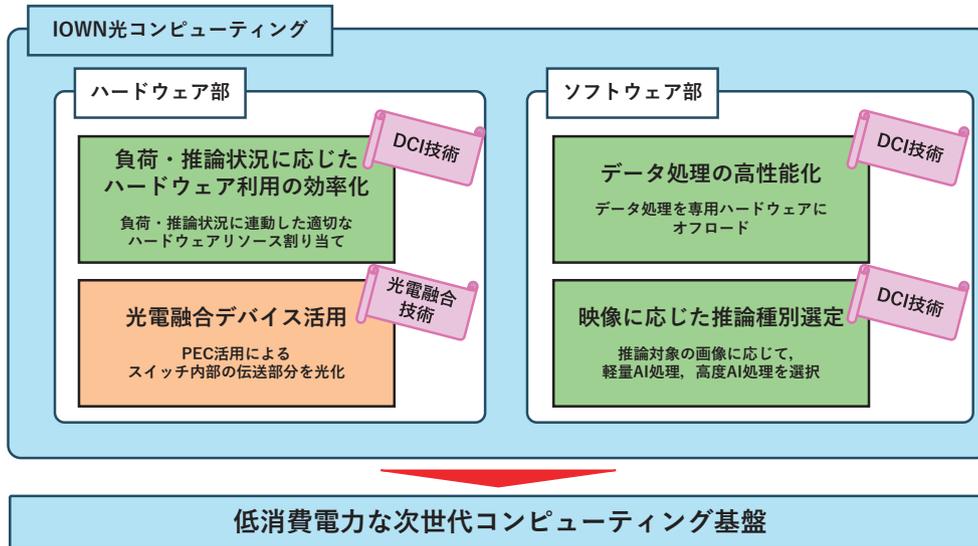


図2 IOWN光コンピューティングの構成・特徴

していますが、一般的なアクセラレータの利用ではGPUなどの物理リソースが単調増加してしまう、通信量の増加によりイーサネットスイッチの処理能力の限界を迎えてしまうなどの課題があり、特に電力消費量の増大に関しては地球環境への影響が問題視されています。その課題解決に向け、GPUなどの物理リソースの効率的な利用、光電融合デバイスを活用したイーサネットスイッチの適用により、標準的なサーバ構成と比較し消費電力を8分の1に抑えています。

DCIコントローラの特徴には大きく3点あります。

1点目は、データ処理の高性能化に向けた、最先端ハードウェアの性能を引き出す、ソフトウェア実装技術です。GPUやスマートNIC (Network Interface Card) などの専用ハードウェアへの処理のオフロードにより、高速なデータ処理、低消費電力化を実現しています。

2点目は、推論を担うアプリケーションの負荷状況や推論状況に応じて、ハードウェア利用を効率化する技術です。具体的な例を挙げると、人物の映像解析の場合、人が多い日中帯には推論に必要なGPUなどの物理リソースを増加させ、人が閑散となる夜間には物理リソースを減少させる技術です。推論処理に必要な物理リソース量

を適正化することで、消費電力を削減しています。

3点目は、映像の内容に適した推論選定技術です。従来技術では、人が映っている画像と人が映っていない画像を区別することなく、同一の推論を実施していますが、本技術では人が映っている画像は高度推論処理、人が映っていない画像は軽量推論処理というように、画像ごとに処理する推論の種別を都度決定し、推論処理の実行回数を最小限に抑えることで低消費電力化を実現しています。

光電融合スイッチの特徴は、従来のイーサネットスイッチ機構とは異なる、スイッチ内部の伝送部分を電気接続から光接続に置き換える、光電融合デバイスを組み入れたイーサネットスイッチであり、従来技術の128ポートイーサネットスイッチを小型筐体1つで構成可能とすることにより、イーサネットスイッチの性能向上、低消費電力化を実現しています。

光電融合スイッチ内部に組み込まれている光電融合デバイスは、従来の400 G光モジュール8個分のデータ処理性能、従来の光モジュールと比較し、2分の1の消費電力性能を有している非常に小型のデバイスです。

MediaGnosisの特徴

来場者の方の感情を分析し、パビリオンを覆う幕の制御につなげるための技術について概略・特徴を説明します。具体的には、DCIの推論選定技術を活用しながら検出を行ったパビリオン内部の来場者の方の顔画像に対して、NTT独自の次世代メディア処理AI「MediaGnosis」を用いて来場者の表情を分析します。この分析結果から特に楽しそうな表情や驚いた表情の感情をしている来場者の人数を算出し、パビリオン内部の盛り上がりとして幕演出の制御に反映しています。大阪・関西万博の実環境で利用するにあたり、MediaGnosisの感情分析AIモデルに対して、以下の2点の課題を解決するように改良を実施しました(図3)。

1点目は、5台のカメラが設置されているNTTパビリオンのZone2では、演出によって照度が大きく変化するモニタと、舞台上に設置されている経時的に点灯・消灯するLEDが光源となります。したがって、来場者の方々の顔の見え方が一定ではなく経時的に大きく変化するという、光学的に非常に不安定な環境での運用が想定されます。さらに、多数の来場者の方がカメラに同時に映りこむ際に、一部の来場者どうしの顔が重なり、顔全体が取得できないケースも

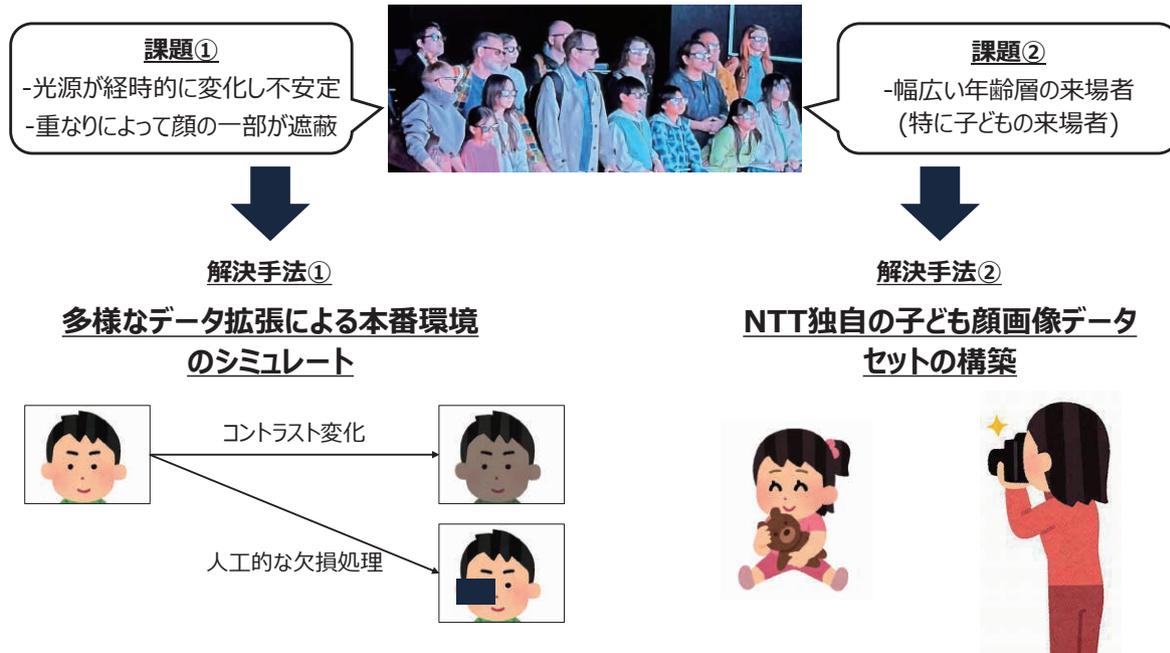


図3 MediaGnosisにおける課題と解決手法

発生すると考えられます。そこで、コントラスト変換や画像の人工的な欠損処理などを含めた10種類以上のデータ拡張技術をAIの学習に導入しました。これらの拡張は万博での本番環境で発生し得る変動を疑似的にシミュレートし、AIモデルが本番の環境下でも安定した挙動を行うように学習されることが期待できます。結果として、万博で想定される状況下においても、高いロバスト性を持つ顔感情分析AIを実現できました。

2点目は、万博では幅広い年齢層の来場者、とりわけ子どもの来場者の方が多いことが想定されます。しかし、AIを学習するための市中データの多くは15歳以上の方の顔画像から構成されており、15歳未満の年齢層の表情分析において高い性能を実現することが難しいという課題がありました。これは、不特定多数が閲覧できてしまう市中データは、プライバシーの観点で子どもの顔画像を含めにくいという事情があると考えられ、市中のデータをどれだけ集めても、なかなか子どもに対する性能向上にはつながりません。そこで0歳から15歳の年齢層の顔画像を中心とした希少価値の高いデータセットをNTT研究所

内部でだけ閲覧可能なかたちで独自に作成しました。データセットの作成にあたっては、大人の顔画像データセットと同等の人数の被験者を集めることは困難であるため、画角や背景のパターンを多数用意して撮影することで、少ない人数でもできる限り豊富なバリエーションを準備しました。この独自データセットをAIの学習に活用することで、子どもを含む幅広い年齢層の来場者に対して高い分析性能を実現しました。

開幕前に実際のNTTパビリオンZone2においてさまざまな年齢・国籍を含むエキストラの方にご協力いただいた実証では、幕演出に対して十分な性能と頑健性を確認することができました。この成果は、NTT独自のAI技術であるMediaGnosisの強みとして、大阪・関西万博の演出にとどまらず幅広いユースケースで活用できると考えています。

身体行動理解技術の特徴

身体行動理解技術は、監視カメラやロボット搭載カメラから人の身体行動を認識する技術です。大阪・関西万博では、NTTパビリオン敷地内における転倒者をNTT

パビリオン外部に設置されたカメラの映像から検出するAIをDCI上で動作させることで、NTTパビリオンのAIによる見守りを効率的に実現しています。

多くの転倒検出技術は監視カメラ等のエッジ端末にAIモデルを搭載するか、CPU/GPUサーバを設置しAIモデルを搭載しますが、前者のAIモデルは簡略化され精度が低下する傾向にあり、サーバで動作させる場合では多くのカメラに多数の人を想定した効率的なAIモデルにならないことがほとんどです。今回、NTTパビリオン外部に設置された16台のカメラに対してAIによる見守りを実現するため、多カメラ多人数の推論に対応させたAIモデルを具備した転倒者検出技術を確認する必要がありました。

技術のポイントは2点あります(図4)。

1点目は、カメラの高さ、角度の変化に対応した転倒検出モデルの創出です。NTTパビリオンの外部に設置されているカメラは4～8 m程度の範囲にさまざまな高さで設置され、カメラの角度も多様です。これまでの転倒検出モデルは屋内を対象としていることがほとんどであり、屋外に設置されたカメラの高さや角度の変化に対応す

ポイント① さまざまな高さ、角度のカメラ映像に適した転倒検出モデルの創出



ポイント② 人物数の変化にロバストな人物トラッキングモデルの構築

図4 身体行動理解技術における技術ポイント

ることが困難でした。そのため、カメラの高さや角度の変化に対応した転倒検出モデルの構築に向け、イベント会場を模した映像データセットを制作しました。50人程度の演者がイベント会場にいる状況下を想定し、演者が転倒を含む行動を演じ、それらの行動にアノテーションを実施して、多カメラ多数の映像データセットを制作しました。そのデータセットを用いることで従来の転倒検出モデルよりもさまざまなカメラの高さ、角度のカメラ映像に対して転倒者を検出可能なモデルを構築しました。

2点目は、人物数に依存しない人物トラッキング技術です。転倒者の検出では、まず人物を検出し、その人物が一定時間動作せず転倒姿勢であることを判別して、転倒者の有無を通知します。そのため、映像中に映る人物1人ひとりをトラッキングしてIDを付与、管理する必要があります。また、人物1人ひとりをトラッキングすると、人物ごとの処理が必要になるため、人物数の増加に応じて処理量が増加、多人数が映るカメラのある大規模なイベント会場への適用が困難な場合があります。今回、人物ごとに生じるトラッキング内部の処理をGPUで並列処理可能とすることで、人物数の変化に対してロバストな人物トラッキングモデルを構築しました。特に従来CPUで処理せざるを得なかったループ処理をGPUで並列処理可能とすることで、複数のカメラ映像に多人数が映る場合においてもCPU処理量の増加を低減したうえで、効率的にGPUで実行可能としました。また、転倒検出モデルはDCI上で動作させ

ており、DCIによる低消費電力化の恩恵を受けています。

今後の展開

DCIは、今回の大阪・関西万博で培った知見を活用し、2026年度完了予定の商用版の開発を進めていきます。さらに、IOWNの実現目標である2030年に向けて、さらなる消費電力の削減、新たな価値の創出に取り組んでいきます。

光電融合デバイスは、さらなる小型化、およびCPUやGPUとの接続などのコンピュータ内部の電気接続を光接続に置き換えを進めるとともに、CPU、GPUなどの同一種別のリソースを束ねるリソースプールの仕組みを導入し、必要な物理リソースを自由につなぐコンピュータの実現、さらなる低消費電力化に取り組んでいきます。

MediaGnosisは、デモサイト(<https://www.rd.ntt/mediagnosis/demo/>)でも試していただけるように、顔感情分析に限らずさまざまな機能を持つメディア処理AIであることから、大阪・関西万博での取り組みを通して積み上げた技術・知見・データを基に、MediaGnosisの多様な画像認識機能に対して、さまざまな実環境でロバストに動作するAIの実現を図っていきます。さらに、MediaGnosisの最大の特徴である「知識集約型アーキテクチャ」と組み合わせ、画像に限らずさまざまなメディア処理の性能向上をめざします。

身体行動理解技術は、大阪・関西万博で得られた多カメラ多数に対して効率的に

行動を認識するための技術を発展させ、転倒だけでなく、人のより高度な行動を多カメラ多数の環境下でリアルタイムに検出する技術の確立をめざします。これにより、さまざまな業界の業務行動への適用拡大に取り組んでいきます。



(上段左から) 岡 順一 / 史 旭 / 水野 伸太郎

(下段左から) 鈴木 聡志 / 中澤 裕一 / 高木 基宏

本稿では、大阪・関西万博における、「感情を纏うパピリオン」を具現化するMediaGnosis、およびDCI、かつ、NTTパピリオンの安心・安全な運用に向けた身体行動理解技術、およびDCIの取り組みを紹介しています。今後これらの技術を発展・普及させ、IOWN構想の実現に貢献していきます。

◆問い合わせ先

NTTソフトウェアイノベーションセンター
システムソフトウェアプロジェクト



主役登場

床振動が伝える、 “そこにいる”感覚

草深 宇翔 Takahiro Kusabuka

NTT 人間情報研究所
サイバー世界研究プロジェクト
主任研究員



万博においてNTTが掲げるビジョンの1つである「まるで隣にいるような、存在を感じる未来のコミュニケーションを創出」をめざし、NTTパビリオンではIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) を活用した新しい体験が提供されています。その1つが、リアルタイムに空間をまるごと伝送することで、五感を通して遠く離れた空間を感じるコミュニケーションの体験です。私が所属するチームでは、遠隔地にいる人がまるで“そこにいる”かのように存在感を振動で伝える「触覚振動音場提示技術」を担当しました。

具体的には、万博記念公園で行われる音楽ユニットPerfumeの皆さんのパフォーマンスを、約25 km離れた夢洲の会場へIOWNを通じてリアルタイムに伝送する試みです。私たちのチームでは、ダンスのステップにより発生する振動をセンサでとらえ、夢洲の観客席の床裏に設置した128個の振動子により振動を提示し、あたかもその場で本人がダンスをしているかのような存在感の提示をめざしました。

私はHCI (Human-Computer Interaction) を専門とし、近年ではマルチモーダルなUI (User Interface) /UX (User Experience), つまり複数の感覚を通じた人とコンピュータのデザインについて研究を行っています。今回扱った触覚は、人の身体や空間認知に深くかかわる感覚です。今回は「映像や音楽に加えられた振動が、観客に演者の存在を感じさせるのか」という点に着目し、探求しました。

事前の実験段階では、振動を提示する床

のプロトタイプを複数タイプ構築し、歩行やダンス等を行った際の映像と振動を収録・提示しながら検証を進めました。検証の中で、「今、後ろに誰かが歩いてきた気がした」という声や、移動する振動を避けるような被験者の動きが観察され、床から提示される振動がただの物理刺激ではなく、存在感や没入感に影響を与える可能性を強く実感しました。一方で、こうした存在感を実際に質の高いコンテンツとして実現するには困難もありました。振動は出力装置の物理特性に依存します。加えて、客席は90平米ほどあり観客は好きな位置に立って鑑賞できます。触覚提示デバイスとしては大規模なため、実装コストやシステムの実現可能性の観点から振動子数を間引きながらも、振動を床全体へ伝播させる方法が求められました。そこで、振動子の選定・システム構築だけでなく、振動を効率よく伝播させる床の構造や施工方法について設計を行い、施工期間には実際に工事現場に入り、関連メンバーと協力しながら自分達の手で振動提示のための床を実現させました。

また、映像と振動から知覚される印象にギャップや、時間的なズレがあると違和感が生まれ、存在感に影響があることも問題となりました。センサで収録した振動をそのまま提示するとモコモコとした印象を受け、ハイヒールでダンスをしている映像から受けるカツカツとした印象とは異なります。こうした映像との違和感や不一致を音響処理の手法やパラメータを試行錯誤しながら突き詰め、最終的には映像や音楽と調和した振動提示により、存在感を感じさせ

る質の高いコンテンツを実現しました。

さらに、社外のパフォーマー・演出家・運用・技術チームとの共創も大きな挑戦でした。リハーサルを重ねる中で「振動に広がりしてほしい」「カツカツとした感じももっとほしい」「振動とスピーカのタイミングがずれている」などのフィードバックをいただきながら、毎日全体で連携しシステムの改良、各処理の見直し、パラメータの再調整を行いました。逆に、演出家やパフォーマーの方とは振動を意識した、普段とは異なるステップについて相談させていただくこともありました。公演直前のギリギリまで一丸となり細部を詰めていく時間は技術的なハードルやそれを乗り越える苦勞もありましたが、極めてクリエイティブでエンジニアリングであり、貴重な体験でした。NTTパビリオンの来場者からは、「足音の振動がすごくてそこにPerfumeいる？って錯覚した」「振動は鳥肌……ライブよりリアル」「振動も合わさると、ふと“存在”を感じる瞬間があってゾクとした」「振動ありのライブビューイングをもっとやってほしい」という振動への高い評価を多数いただきました。社内外のプロフェッショナルとの共創により「振動が新しい意味を生む」という新たな体験を実現できたことに大きな喜びと感謝を感じました。

こうした振動を使った存在感の拡張はエンタメ領域だけでなく、多様なシーンへの応用可能性を秘めていると考えています。さまざまな場面で人と人が距離を超えてつながる感覚や体験を、HCIをベースとして共創により実現していきたいと思っています。

知の交響で 人と情報に迫り未来を描く

NTTコミュニケーション科学基礎研究所(CS研)では、

人と人、人とコンピュータとの間の「ここまで伝わるコミュニケーション」の実現をめざし、

「人を深く理解し極める」人間科学の研究および、

「人の能力に迫り凌駕する」情報科学の研究に取り組んでいる。

本特集では、CS研の最近の基礎研究成果について紹介する。

人と情報の本質を究め、人と情報をつなぐ

——未知なる真理の探究と学際的研究により持続可能な未来を切り拓くコミュニケーション科学—— 28

NTTコミュニケーション科学基礎研究所で取り組む「ここまで伝わるコミュニケーション」の実現に向けた基礎研究成果について、最新の取り組みについて紹介する。

身体に根ざした共感の科学から、つながる家族のウェルビーイングへ

——身体を介した共感メカニズムの解明
および身体性情報伝送技術を活用した離れた家族のつながり支援—— 32

人のウェルビーイングの向上・維持に不可欠な他者との共感や絆の形成において、身体を介した共感メカニズムの理解や、身体性情報の相互作用を遠隔コミュニケーションに応用する研究について紹介する。

気の利く対話AIのための「空気を読む」技術

——マルチモーダル情報を用いた対話の場・関係の理解とインクリメンタル応答生成—— 36

対話AIが会話場面や話者どうしの関係を認識し、「空気を読む」応答する能力の実現をめざして、対話状況認識・対話者間の親しみ認識・人間の会話に追従するインクリメンタル応答生成について紹介する。

音の聴き方を自ら学ぶAI

——自己教師あり学習によるさまざまな音の汎用表現学習技術から、
大規模言語モデルを活用した音の理解の最前線へ—— 40

私たちの身の周りの多様な音をAIに理解させるための汎用的な音の表現学習技術について概観し、大規模言語モデルを活用することで文章と音の意味を対応付けた理解の実現に向けた展望を紹介する。

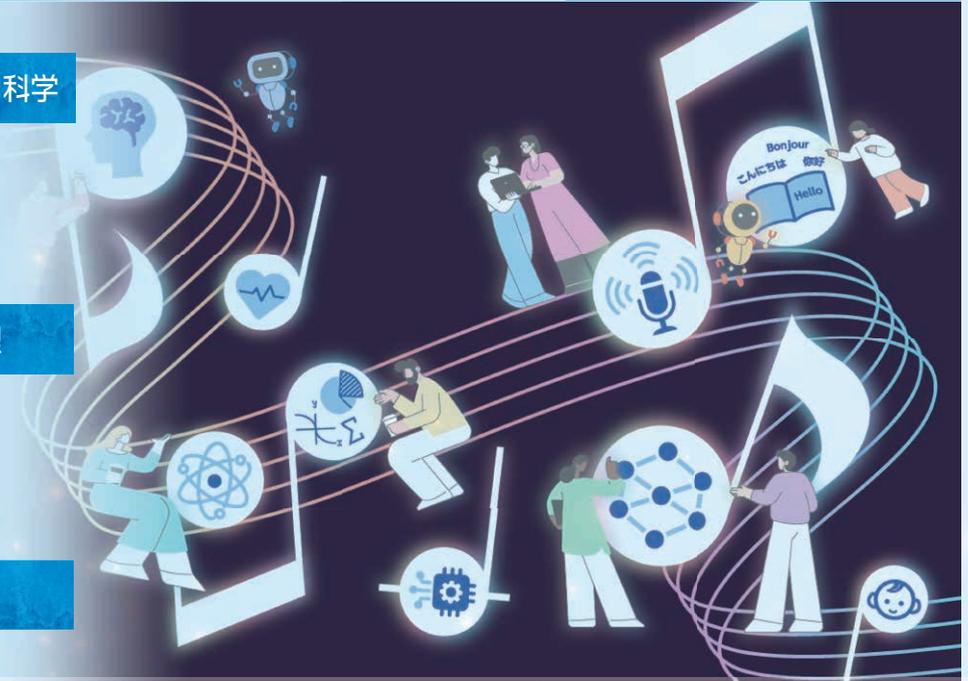
コミュニケーション科学

人間情報科学

メディア処理

機械学習

人工知能



データの交わりに隠れた未知の知識を発見する

——無限の仮説を考慮して生体现象を解釈するAIモデルと
高信頼メディカルヘルスケアへの展望——

43

人々の生命や健康とかがかわる分野でのAI利用においては、AI予測が持つリスク・不確かさの評価が重要な課題である。AIが生体现象を説明する際に無限の仮説を考慮することで、予測のリスク・不確かさを定量化する機械学習手法を紹介する。

ロボットに心を感じる子どもたち

——未来の幼児教育を支える学習コンパニオンロボット——

47

ロボットが幼児教育における学習コンパニオンとして社会に受け入れられるために、子どもがロボットから知識を学べるか、子どもとロボットのインタラクションが子どもの行動にどのような影響を与えるかを探った実験心理学的研究について紹介する。

「NTT コミュニケーション科学基礎研究所 オープンハウス2025」 開催報告

51

2025年5月20～22日に「知の交響で奏でるわたしたちの未来」をテーマに開催された研究成果の公開イベント、NTTコミュニケーション科学基礎研究所のオープンハウスの開催模様を報告する。

主役登場 鈴木 雄太 NTTコミュニケーション科学基礎研究所

55

瞳孔径から読み解く心の動き



人と情報の本質を究め、人と情報をつなぐ ——未知なる真理の探究と学際的研究により持続可能な 未来を切り拓くコミュニケーション科学

NTTコミュニケーション科学基礎研究所（CS研）では、情報と人間を深く理解し究める基礎研究と、その理解から得られた知見に基づき、情報と人間をつなぐ基盤技術を創出することにより、人と人、人とAI（人工知能）、さらには人と社会との「ここまで伝わるコミュニケーション」の実現に向けた研究開発を行っています。本稿では、CS研における最新の研究の取り組みについてその一部を紹介し

キーワード：#コミュニケーション科学、#人工知能、#脳科学

な や ふとし
納谷 太

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
所長

はじめに

昨今「VUCA」という言葉をよく見聞きするようになりました。「Volatility（変動性）」、「Uncertainty（不確実性）」、「Complexity（複雑性）」、「Ambiguity（あいまい性）」の単語の頭文字をとった造語ですが、あらゆる物事がめまぐるしく変化し、将来の予測が困難な状況を指して用いられています。元は1990年代後半に軍事戦略の複雑さの表現のために使われたのが、2016年の世界経済フォーラムであるダボス会議で「VUCAワールド」という言葉が使われ、世界中に認知されるようになりました。近年の全世界規模の異常気象や自然災害の甚大化、新型コロナウイルスなどの感染症のパンデミックなどに加え、グローバルな社会情勢の変化に伴う各国の経済政策の大幅な転換や、生成AI（人工知能）を代表とする科学技術の急激な進歩などが複雑かつ相互に影響を及ぼし合うことにより、今後の未来をより一層不確実で予測困難にしています。

このようなVUCAの時代においてこそ、複雑化し多様化する情報の本質的な性質や価値を理解することと同時に、情報の受け取り方に応じてさまざまな意思決定を下し行動を引き起こす私たち人間自身の感覚・認知・行動・情動のメカニズムや、その多様性を深く理解することの重要性が増していると考えます。NTTコミュニケーション

科学基礎研究所（CS研）では、設立以来、情報の本質や人間の本質の深い理解に基づく新発見や、この新発見に基づく革新技術の創出を推進しています。本特集では、多様化する情報や人間の本質の理解をめざす基礎研究と、いまだ顕在化されていない情報を発見し人とつなぐ技術や、さらには、多様化する人と人、人と社会とを結びつける新たなコミュニケーション形態の創出をめざしたCS研の最新の取り組み事例について、その一部を紹介します。

情報の本質を理解する

CS研では、人と人、人とコンピュータとのコミュニケーションにおける情報を伝達するあらゆるメディアを対象にした情報処理技術に関する研究を進めています。昨今のAI技術の進歩は著しく、例えば画像や音声の認識に関するAIは急激に性能を高め、人間を上回るパフォーマンスを達成しています。中でも人の音声認識技術においては、多人数の会話であっても話者を切り替えて文字起こしできるAIボイスレコーダーなどのポータブルデバイス⁽¹⁾が発売され、高性能な音声認識に加えて、生成AIと連携した要約の作成など、業務効率を格段に向上する製品が生まれています。このような製品は、人の音声処理に特化した技術の高度化によってなされているものですが、最近では人の音声に限らず、自然が

くり出す音や動物の鳴き声や乗り物の音など、私たちの身の周りにあるさまざまな音をAIに理解させる研究も進んでいます。

従来の音の認識処理では、生データである音の信号に含まれる周波数成分や強弱、音の高さなどの基本的な情報を手掛かりに、それぞれの音を区別するのに有用な「特徴量」と呼ばれる数値に変換する処理（特徴抽出）を人手で設計し、この特徴量とその音が表す正解ラベル（例えば「犬の鳴き声」など）をペアとして与え、互いに異なる音を分類するように学習させる方法が一般的でした。しかし、分類すべき音の対象が増大し、例えば、「ワン」と擬音語で表現される犬の鳴き声の中でも、それが「威嚇して吠えている」のか「喜んで鳴いている」のかを聞き分けるなどのタスクでは、どのような特徴量がそれぞれの認識に本質的に有用なのかを人手で設計することは非常に困難になります。このような課題に対し、昨今、特徴抽出を人手ではなく機械学習によって自動的に実現する「表現学習」と呼ばれる手法が注目されています。

表現学習の中でも、大量の多様な音データだけを用い、正解ラベルを必要としない、「自己教師あり学習」という手法は、人手を介する必要なく、コンピュータに音を聞かせるだけで、個々の音の本質的かつ汎用的な特徴表現を学習できる技術です。本特集記事『音の聴き方を自ら学ぶAI——自己教師あり学習によるさまざまな音の汎用表

現学習技術から、大規模言語モデルを活用した音の理解の最前線へ⁽²⁾』では、「音の穴埋め問題」として、元の音の一部をマスクして隠した部分を予測するという新しい自己教師あり学習を定式化することにより、あらゆる音を構成する本質的な特徴表現を自動で獲得することを可能にしたMasked Modeling Duo (M2D) という技術を紹介しています。M2Dは、環境音や話者の識別、音楽のジャンル認識や楽器分類などのベンチマークタスクの高精度化を達成していますが、これをさらに発展させ、M2Dと大規模言語モデルとを組み合わせた技術により、さまざまな金属を叩いた際の音について、金属素材の特性などを根拠として、各金属がどのような音を出すかをテキストで詳細に説明する言語タスクなど、さまざまな応用に対しても高い性能を発揮しています。

人の本質を理解する

CS研では、情報科学、心理学、神経科学の3つの切り口から、人の感覚・情動・運動の仕組みを解明する人間科学の研究や、子どもが言語や社会性などを学習する発達科学に関する研究を推進していますが、ここではほんのごく一部の研究事例を紹介します。人間科学の研究の中でも、当人も言語化したり自覚したりすることが困難である「潜在的な」心の状態を生体信号から解読する「マインドリーディング」の研究⁽³⁾では、主に瞳孔径の変化などの目の動きから、その人の音楽や顔の好みを読み取ったり、どちらの方向からくる音に注意を向けているのかをとらえたりするなどの研究成

果⁽⁴⁾をあげてきています。最近の研究では、心理状態を読み取るだけでなく、ipRGCと呼ばれる、網膜にある錐体・桿体に次ぐ第三の光受容細胞を活性化させる特殊な光を用いることで、ユーザに意識させることなく、集中力を向上させ、短期記憶課題のパフォーマンスを高めることや、眠気・疲労感をやわらげる介入効果があることを発見しています⁽⁵⁾。その人の認知状態に合わせて適切に照明光を変えることにより、自律神経を整えることや、仕事を疲労感なく効率的に行えるような環境を提供できる未来をめざした研究です。

また、トッパスリートなどの優れた潜在脳機能の解明をめざした最近の私たちの研究では、プロ野球選手の打者のタイプごとに視線移動戦略の違いがあることが分かってきました⁽⁶⁾。野球の打撃では、打者は投球されたボールの動きを正確に把握するために、視野の中心でボールをとらえ続ける視線の動きが重要になります。ボールが投手の手からリリースされた直後では、打者から見たボールの視野内での動きの速度（視角速度）は小さいものの、ボールが近づくにつれてその速度は急上昇するため、打者は「サッカード」と呼ぶ目の素早い動きにより、ボールの予測到達位置へ視線を先回りさせる必要があります。しかし、サッカードを行っている最中は、視覚情報が一時的に抑制されるため、打者にとってボールの正確な情報を得ることが困難になります。このような先行研究の知見から、「サッカードを行うタイミング」が遅い打者ほど、ボールをより長くとらえ、正確な視覚情報を活用できる可能性が示唆されています。この指標を用いて、あるプロ野球球団所属

の39選手を対象に打撃時の視線を計測して分析したところ、スイング速度、すなわち身体能力は平均的ながら、サッカードタイミングが遅く観測能力が高いため、最多本塁打・首位打者・最高出塁率を記録している選手Aのようなタイプがいる一方で、サッカードタイミングが早く観測能力は低いものの、スイング速度は高く、首位打者・最高出塁率を記録している選手Bのようなタイプもいることがわかりました。頭の動きを合わせて分析したところ、選手Aは現在の球速に合わせて頭を動かすことで、ボールを目の中心にとらえ続ける戦略をとっており、一方、選手Bは球速によらず頭の動きが一定であり、過去の経験を用いてボール軌道を予測する戦略をとっているという違いが明らかになりました。これは打者の特性に応じた多様な視線移動戦略が存在することを明らかにしたものであり、個々人の視覚情報処理の多様性に応じて、効果的なトレーニング法や指導法を確立するうえで足掛かりとなる成果です。今後、競技力の向上に留まらず、リハビリや技能習得などへの応用をめざしています。

人と情報をつなぐ

センシング技術やICTの向上により、これまで人間が直接観測することが困難であった事象をとらえ、追跡できるようになってきました。しかしながら、人間がいまだ見つけられていない事象そのものや、その事象の発生要因が未知である事例は数多く存在します。例えば、新型コロナウイルスなどの感染症のパンデミックがどのようにして発生したのか、その発生経路の正確な

把握や、ウイルスの変異の仕方、重症化しやすい人の体質などをさまざまな観測データから明らかにすることは、新たな感染症の拡散を防ぎ、より効果的な治療法や予防法の研究開発において重要な課題です。昨今では、一般的な健康診断の検査データだけでなく、遺伝子情報を用いることにより、病気のなりやすさの将来予測や、早期発見に役立てる営みも行われています。この際、観測されたさまざまなデータの項目が膨大になるにつれ、データの組み合わせの中から、特徴的な症状を持つ患者群の塊を見つけ出すことは極めて難しくなります。CS研では、このようなデータとデータの交わりの中から、そこに潜む隠れた未知の情報を抽出する「関係データ分析」という機械学習技術を2000年代ごろから研究してきました。ここでの技術のポイントは、データの組み合わせ方や、そのグループングの仕方に関し、あらかじめ人間が想定し得るパターンを決めておくのではなく、そのパターンについてデータ駆動的に「無限通り」の可能性を考慮する点にあります。本特集記事『データの交わりに隠れた未知の知識を発見する——無限の仮説を考慮して生体現象を解釈するAIモデルと高信頼メディカルヘルスケアへの展望⁷⁾』では、CS研における最新のデータ分析技術を活用し、未知なる知識を発見する試みについて紹介しています。

また、ChatGPTなどの生成AIをビジネスシーンで活用する機会が増大していますが、ユーザが求める所望の結果を効率良く得るには、役割や事前情報や知識、事例などのさまざまなコンテキストをプロンプトとしてテキストで入力して指定し、何度か

試行錯誤する必要があります。最近のChatGPT-4oなどでは、入出力に音声や画像を用いることができるようになっただけでなく、リアルタイムでの対話による応答ができるようになってきました。しかしながら、現状の対話システムは、ユーザが毎回その設定を指定する必要があります。人間どうしの自然な対話のように、その場で起きている対話の状況や、対話に係る他者を含んだ人間関係の理解および、これに基づいた相手の気持ちや立場を考慮した適切な対話をすることはまだ困難です。本特集記事『気の利く対話AIのための「空気を読む」技術——マルチモーダル情報を用いた対話の場・関係の理解とインクリメンタル応答生成⁸⁾』では、人間のように対話の状況や相手の感情の機微をとらえ、ユーザが求める所望の情報をより自然に提供できる対話AIをめざした取り組みについて紹介しています。

このような対話AIは、エージェントやコミュニケーションロボットに導入されることにより、アミューズメントや接客、介護などその適用範囲が徐々に拡大しています。中でもこどもの教育現場におけるコミュニケーションロボットの活用は、対話AI機能が進歩するほどその期待が高まるものと考えられ、子どものさまざまな興味や好みに応じて、子どもが知りたい、またはまだ知らない情報や知識を提供できるようになる可能性があります。このような将来を見据えて、CS研では発達科学研究の一環として、子どもがロボットそのものをどのような存在としてとらえているのか、年齢によるとらえ方の変化などについて、実験心理学的手法により解明する研究を進め

ています。本特集記事『ロボットに心を感じる子どもたち——未来の幼児教育を支える学習コンパニオンロボット⁹⁾』では、会話や身振りでインタラクションできる社会的ロボットが5歳児の利他的行動に与える影響と、子どもの自律的な学びに寄り添うパートナーとしてのロボット活用に向けた今後の展望について述べています。

人と人、人と社会をつなぐ

スマートフォンやソーシャル・メディアなどのICTの発展と普及により、人と人、人と社会とのコミュニケーション形態は劇的に変化してきました。コロナ禍をきっかけに、ビデオ会議やチャットツールなどが広く普及し、対面でコミュニケーションする機会は以前に比べれば大きく減少しています。一方で、私たちがいきいきとした良好な状態、すなわちウェルビーイングを維持するためには、人と人との共感や絆を深め合うことが重要です。CS研では、特に身体の役割の重要性に注目し、人と人との間で共感が生じるメカニズムを調べる研究を進めています。また、この知見に基づき、早産で生まれ入院している赤ちゃんや親や家族といった、離れて過ごす家族間の絆を深めることを目的として、赤ちゃんの心臓の鼓動に触れる感覚を伝送して再現する装置を構築し、身体を介した相互作用を実現する遠隔コミュニケーションの実証実験を進めています。本特集記事『身体に根ざした共感の科学から、つながる家族のウェルビーイングへ——身体を介した共感メカニズムの解明および身体性情報伝送技術を活用した離れた家族のつながり支援¹⁰⁾』にて

詳しく紹介しています。

また、SNSの普及によって、人と社会とのかかわりは非常に多様化・複雑化しています。家族内や、子育て、地域コミュニティなど、さまざまな場面における個々人の周囲の人間関係の変化を客観的にとらえることは、個々人の人々とかかわり合いを支援するうえで重要でありながら、その方法は容易ではありません。CS研では、SNSのメッセージログの中身には立ち入らず、メッセージ間の間隔や頻度などの特徴量の変化を基に、その人を取り巻く人間関係の変化（疎遠化・親密化など）を二次元空間上の軌跡として可視化し、専門家ではない一般の人でも把握できるようにした Social Orbit というツールを構築しています⁽¹¹⁾。本ツールを用いた実証実験により、自分では気づきにくい他者とかかわりかたに気づき、自身の行動を見直す効果を確認しています。VUCA時代の中、さまざまな社会環境において、各人が望ましい行動変容を自らが選択し促進できる社会の実現をめざした取り組みです。

おわりに

CS研における最新の研究の代表例をいくつか紹介しました。人と情報、人と人をつなぐという観点からは、これまでになく視点で新たな研究分野を切り拓くうえでも極めて重要だと考えています。2025年5月の報道発表「基礎数学と物理学（量子光学）で独立に研究されてきたモデルのつながりを解明⁽¹²⁾」は、基礎数学の分野で研究されてきたモデルが、光と物質が相互作用する仕組みを記述した「2光子量子ラビモデル」

という物理モデルと同値であることを、基礎数学における空間の対称性という考え方に基いて証明した画期的な成果です。数学と物理の研究者間の連携を一層深めると同時に、量子光学においても新たな性質の発見が期待できる研究成果といえます。CS研は、未知なる真理の探究と学際的研究を加速し、人とAIが互いに協力することにより、持続可能な未来の実現に向けて貢献していきます。

参考文献

- (1) <https://jp.plaud.ai/>
- (2) 仁泉：“音の聴き方を自ら学ぶAI——自己教師あり学習によるさまざまな音の汎用表現学習技術から、大規模言語モデルを活用した音の理解の最前線へ,” NTT技術ジャーナル, Vol.37, No.8, pp. 40-42, 2025.
- (3) 柏野・米家・Liao・古川：“身体から潜在的な心を解読するマインドリーディング技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.26, No.9, pp.32-36, 2014.
- (4) H. Liao, H. Fujihira, S. Yamagishi, Y. Yang, and S. Furukawa: “Seeing an auditory object: Pupillary light response reflects covert attention to auditory space and object,” *Journal of Cognitive Neuroscience*, Vol. 35, No. 2, pp. 276-290, 2023.
- (5) https://www.kecl.ntt.co.jp/openhouse/2025/exhibition_19.html
- (6) 上田・柏野：“プロ野球打者の視線移動から見る多様なボール情報取得戦略,” 第18回 Motor Control 研究会 (MC18), 2024.
- (7) 中野：“データの交わりに隠れた未知の知識を発見する——無限の仮説を考慮して生体現象を解釈するAIモデルと高信頼メディアカルヘルスケアへの展望,” NTT技術ジャーナル, Vol.37, No.8, pp. 43-46, 2025.
- (8) 千葉：“気の利く対話AIのための「空気を読む」技術——マルチモーダル情報を用いた対話の場・関係の理解とインクリメンタル応答生成,” NTT技術ジャーナル, Vol.37, No.8, pp. 36-39, 2025.
- (9) 奥村：“ロボットに心を感じる子どもたち——未来の幼児教育を支える学習コンパニ

オンロボット,” NTT技術ジャーナル, Vol.37, No.8, pp. 47-50, 2025.

- (10) 村田：“身体に根ざした共感の科学から、つながる家族のウェルビーイングへ——身体を介した共感メカニズムの解明および身体性情報伝送技術を活用した離れた家族のつながり支援,” NTT技術ジャーナル, Vol.37, No.8, pp. 32-35, 2025.
- (11) https://www.kecl.ntt.co.jp/openhouse/2025/exhibition_14.html
- (12) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2025/05/13/250513a.html>



納谷 太

CS研は、人とAIが共存する「ここまで伝わるコミュニケーション」の実現に向けて、広く学際的な基礎研究に取り組むとともに、パートナーの皆様とのコラボレーションにより新たな価値創造に貢献していきます。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
企画担当



身体に根ざした共感の科学から、つながる家族のウェルビーイングへ——身体を介した共感メカニズムの解明および身体性情報伝送技術を活用した離れた家族のつながり支援

人と人との共感や絆は、私たちがいきいきとした良好な状態、つまりウェルビーイングを維持するうえでとても大切です。では、共感や絆はどのようにして生まれるのでしょうか。また、共感を抱き、絆を深めることを支援するためには、どのような情報を伝え合うことが大切なのでしょう。本稿では、共感や絆の形成における身体の役割に注目し、共感が生じるメカニズムを調べた研究を紹介します。加えて、離れて過ごす家族の絆を促進するために、遠隔コミュニケーションにおいて、身体を介した相互作用を応用する試みについても紹介します。

キーワード：#共感、#身体性情報伝送技術、#家族のつながり支援

むらた あいこ
村田 藍子

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

ウェルビーイングにおける社会的つながりの重要性

人と人との共感や絆は、私たちがいきいきとした良好な状態、つまりウェルビーイングを維持するうえでとても大切です。人々のウェルビーイングをテクノロジーによっていかに支援できるかを論じた Calvo と Peters の著書では、共感がウェルビーイングの重要な要因であることが指摘されています⁽¹⁾。また、世界保健機関 (WHO: World Health Organization) の憲章においても、「健康とは、単に病気でないとか虚弱でないということではなく、身体的・精神的・社会的に満たされた状態である」と定義されており、社会的なつながりが人の健康にとって不可欠であることが明記されています⁽²⁾。では、共感や絆はどのようにして生まれるのでしょうか。また、共感を抱き、絆を深めることを支援するためには、どのような情報を伝え合うことが大切なのでしょう。本稿では、共感や絆の形成における身体の役割に注目し、共感が生じるメカニズムを調べた研究を紹介します。加えて、離れて過ごす家族の絆を促進するた

めに、遠隔コミュニケーションにおいて、身体を介した相互作用を応用する試みについても紹介します。

情動の社会的影響

共感には、相手の気持ちを理解する「認知的共感」と、相手と同じ気持ちを感じる「情動的共感」の2種類があります。特に、情動的共感には、相手の表情やしぐさを見たときに、無意識のうちに生じます。例えば、誰かの笑顔を見ると、それに合わせて自分も口角が上がったり⁽³⁾、誰かが痛みを感じている様子を見ると、自分が痛みを感じたときと同じような脳の活動が起こったりする⁽⁴⁾ことが分かっています。これらの知見は、表情や痛そうな様子など、他者の情動に関する刺激を見せた際に、観察者の情動反応^{*1}を計測するという、情報のやり取りが送り手から受け手へと一方向に流れる形式の実験手法によって明らかにされたものです。さらに、実際の生活では、私たちはさまざまな場面で他の人たちと一緒に情動を体験するため、共感は一方向的に生じるものではなく、お互いに影響を与え合うものだと考えられます。例えば、お祭りや儀式、スポーツ観戦のような強い情動が生じる場面であれば、家庭や職場でもお互いの情動から影響を受け合っているのではないのでしょうか。このように、他の人と一緒に情動を

体験し、お互いの情動反応を観察する共同体験場面では、私たちの情動はどのように変化するのでしょうか。

ある研究では、友人と一緒に冷水に手を入れた場合、1人で行ったときよりも痛みを強く感じることが報告されています⁽⁵⁾。この研究では、氷水に手を入れる課題を、1人で行う条件と2人で行う条件とで主観的な痛みの強さを比較しました。その結果、2人で行った場合のほうが、1人で行った場合よりも主観的な痛みが強まることが明らかになりました。さらに、この効果は、相手が初対面の人である場合には生じず、友人どうしである場合に生じることが示されました。このように、共同体験によって主観的な痛みが増幅するという知見は非常に興味深いものですが、その情動反応がどのようなメカニズムで強まるのかについては、まだ明らかになっていません。例えば、友人がそばにいるという状況そのものが痛みの感覚に影響を及ぼしているのでしょうか。それとも、友人が感じている痛みに伴う情動の強さが、自分の情動反応に影響を及ぼしているのでしょうか。

この疑問に答えるために、私たちの研究では、痛みの増幅がどのような仕組みで起こるのかを調べました。2人の参加者に同時に軽い痛み刺激を与え、痛みに伴う情動反応を測る実験を行いました。初対面の相手だと情動の増幅が起こりにくい、という

*1 情動反応：恐怖や喜びなどの情動に伴って現れる心身の反応で、主観的な感情体験に加え、心拍や発汗、呼吸の変化など自律神経活動（交感・副交感神経系）による生理的応答を含みます。

先行研究⁽⁵⁾の結果を踏まえて、同じ大学の学生でペアをつくり、2人がアイスブレイキングをして打ち解けた後に実験を行いました。一緒にいるだけで情動反応が強まるのか、それとも相互に観察することで強まるのかを調べるために、一方の条件では相互に様子が見え、もう一方の条件ではパーティションで相手の様子が見えないように設定しました。情動反応を測るために、自律神経活動、特に交感神経活動の指標とされる指尖容積脈波を計測しました。指先にセンサを装着して指尖容積脈波を計測することで、指先の血流量の変化をとらえることができます。交感神経活動が高まると末梢血管が収縮し、血流量が減少するため、指尖容積脈波の振幅変化（特に収縮度合い）を基に情動反応の強さを評価しました。そのうえで、相手の情動反応からどのような影響を受けたのかを検討するための分析を行いました。その結果、お互いの様子が見える条件では、相手の情動反応が自分よりも強い場合に自分の情動反応も強まる一方で、相手の反応が弱い場合には影響を受けないことが明らかになりました。また、相手の様子が見えない条件ではこのような影響は見られなかったことから、他者とともに痛みを経験する際には、情動の相互作用を経て、無意識のうちに痛みが増幅される可能性があると考えられます⁽⁶⁾。このように、人は情動を経験する際、お互いの情動から影響を受けることが分かっています。

身体性情報の伝送による親密感の変化

このような情動の相互作用は、親しい相手との間で特に起こりやすく⁽⁵⁾、相手との一体感やつながりの強さを反映することから、人と人とのつながりに深く関与していると考えられています⁽⁷⁾。また、ある研究

では、体に触れることで情動の相互作用が強まることが報告されています⁽⁸⁾。この研究では、恋人が痛みを経験している際に、手を握る条件と握らない条件を比較し、手を握ることで呼吸や心拍といった生理的な情動反応の同期が強まることが分かりました。つまり、相手の身体に触れることで、無意識のうちに身体的な反応が共鳴すると考えられます。さらに、情動反応の同期が強いカップルほど、手を握ってくれる相手の存在によって痛みがやわらぐことも示されました。ここから、触れることで身体的な反応が共鳴し、相手の存在による安心感がより深まった可能性が考えられます。

では、相手が無意識のうちに示す身体的な反応に関する情報（身体性情報）を直接触れるかたちで受け取れるとしたら、相手とのつながりや親密さは変わるのでしょいか。NTT コミュニケーション科学基礎研究所が開発した、心臓の鼓動に触れる感覚を再現する装置⁽⁹⁾を用いて実験を行いました。この装置は、録音した心音を振動スピーカ内蔵の「心臓ボックス」で再生する仕組みです。実験では、参加者は初対面の相手とオンラインでつながり、相手から自己紹介をしてもらいます。参加者を2つのグループに分け、一方はオンライン環境で相手の映像を見ながら心臓ボックスを両手で包み、相手の心音の振動を体験しました。もう一方は映像を見るだけでした。その結果、心音の振動を体験した参加者のほうが、相手との心理的距離をより近く感じやすいことが明らかになりました⁽¹⁰⁾。

家族の遠隔コミュニケーションへの応用

身体性情報を直接触れられる振動として伝送することが親密感の向上に寄与し得る前述の実験結果を踏まえ、私たちは岩手医

科大学と共同で、この心音の振動を再現・伝送する技術を、離れた家族の遠隔コミュニケーション支援に応用する取り組みを開始しました。

日本は先進国の中でも周産期医療のレベルが高く、特に、在胎28週未満で産まれる赤ちゃんは超早産児^{*2}と呼ばれますが、そうした赤ちゃんの生存率は、日本が世界で1番高いことが分かっています⁽¹¹⁾。早産や低出生体重などで生まれた赤ちゃんは新生児集中治療室（NICU：Neonatal Intensive Care Unit）に入院することになります。数カ月間の長期入院となる場合もあり、親子の触れ合いが不足することで、親のメンタルヘルスや愛着形成に影響が生じることがあると報告されています⁽¹²⁾。NICUでは、カンガルーケア（親子が直接肌を触れ合わせるように胸に赤ちゃんを抱くケア）など、親が赤ちゃんと直接触れ合うケアを積極的に設け、入院中から親子関係の構築を支援しています。しかし、新型コロナウイルスのようなハイリスクな新興感染症への対策や、家族の時間的制約（仕事や年上の子どもの育児など）、地理的条件（病院までの交通アクセスなど）のために面会機会が制限されてしまうことがあります。

コロナ禍の面会制限をきっかけとして、岩手医科大学附属病院を含む多くのNICUではオンライン面会が導入され、その後も、これらの事情で対面面会を頻繁にできないご家族が、対面面会の補助として利用しています。オンライン面会は、赤ちゃんのきょうだいや祖父母も手軽に、また同時に面会

*2 超早産児：早産児は、妊娠37週未満で生まれた赤ちゃんを指し、中でも超早産児は妊娠28週未満で出生します。通常より大幅に早く生まれるため、体の機能がまだ十分に発達しておらず、出生直後からNICUでの集中的な医療ケアが必要となります。

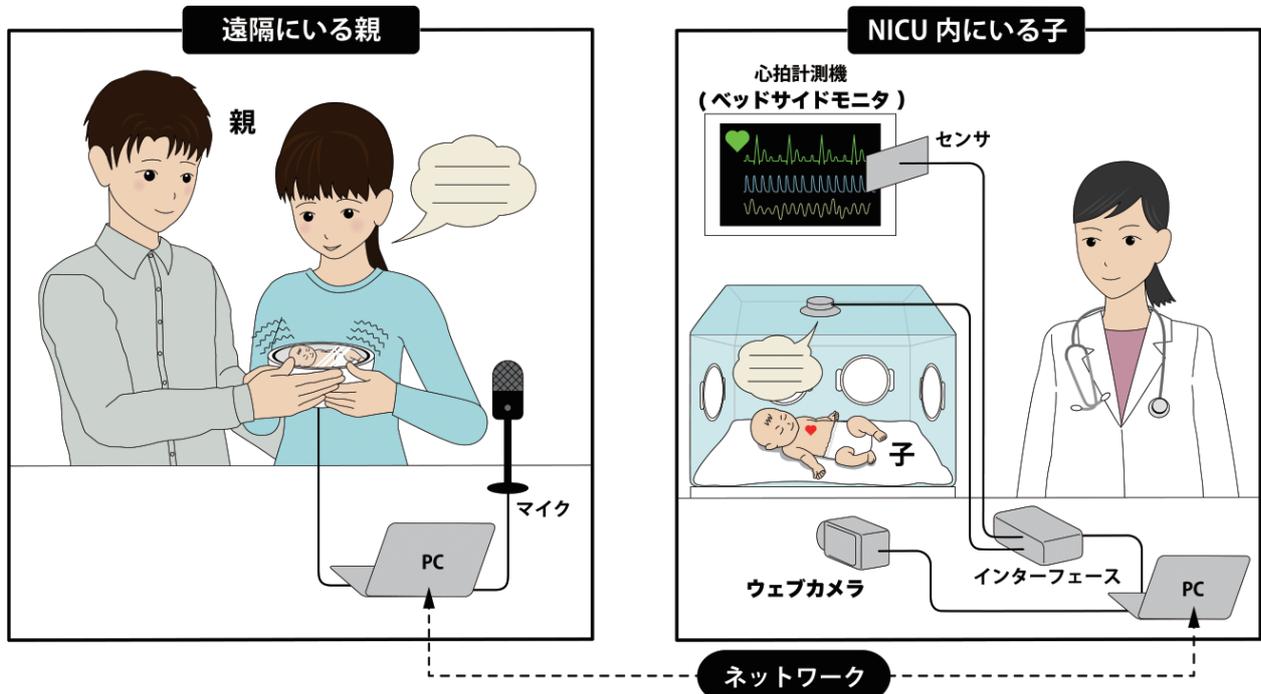


図1 身体性オンライン面会システムの構成



図2 心音の振動を伝えるモニタつきデバイス

赤ちゃんに届け、赤ちゃんの身体性情報を遠隔の家族に伝送する「身体性オンライン面会システム」を考案しました。家族は胸に抱えたデバイスを通じて、保育器の中の赤ちゃんの心拍に同期した心音の振動を映像と同時に体験し、家族の声はマイクを通じて保育器の上に設置した振動アクチュエータから赤ちゃんに届けられます⁽¹⁴⁾ (図1, 2)。親が赤ちゃんに声をかけると、マイクで取得した音声は、ネットワークを通じて赤ちゃんの保育器のフレームにつけた振動アクチュエータに届けられます。振動アクチュエータを使うことで、保育器内にスピーカを入れなくても保育器全体がスピーカの役割を果たし、家族の声を赤ちゃんに届けることができます。赤ちゃんの心臓の鼓動については、直接心音を取得しようとする、聴診器型のマイクを赤ちゃんに装着する必要があり、赤ちゃんの負担が

できるというメリットがありますし、赤ちゃんやその周りの様子を見ることで、親の不安が軽減することも期待されます。しかし、その一方で、見えるのに触れられない葛藤

や、泣いている我が子に何もしてあげられない罪悪感を抱くこともあることが指摘されています⁽¹³⁾。

この課題に対して私たちは、家族の声を

大きくなってしまふことが懸念されました。そこで、ベッドサイドモニタに表示されている、心電図に基づいたリアルタイムの心拍情報を取得し、そのタイミングに同期するように、モデル心音をデバイスに内蔵した振動スピーカで再生することで、実際の赤ちゃんの心拍リズムで「トクントクン」という心臓の鼓動の触感を提示する方法を採用しました。モデル心音は、人工的に生成したものではなく、実際に別の新生児の心臓の鼓動音を聴診器型マイクで録音し、作成したものを用いています。デバイスにはディスプレイがついており、Webカメラで撮影されたリアルタイムの赤ちゃんの様子が、赤ちゃんの鼓動の振動と同時に届けられます。この身体性オンライン面会を、実際にNICUに入院する超早産児のご家族に体験してもらったところ、コンピュータ画面で赤ちゃんの様子を見るだけの通常のオンライン面会に比べて、アンケートでは赤ちゃんの存在をより近くに感じられたと回答した人が多く、インタビューでも、「抱っこしている感覚が、視覚・触覚の双方で感じられた」「心拍を感じて、抱いているような感覚になり、寂しさが軽減した」といった声が寄せられました。これにより、離れていても、触れ合いを通じて育まれる親子の絆や愛着の促進につながる可能性が示されました⁽¹⁵⁾。

まとめ

私たちの研究をとおして、身体性情報のやり取りが共感や絆の形成に大きな役割を果たすことが明らかになってきました。この身体性情報を遠方に届ける技術が共感や絆を深め、ウェルビーイングの促進に役立っているよう、今後さらなる研究を進めていきます。

参考文献

- (1) R. A. Calvo and D. Peters : "Positive Computing: Technology for Well-being and Human Potential," MIT Press, 2014.
- (2) <https://apps.who.int/gb/bd/>
- (3) U. Hess and S. Blairy : "Facial mimicry and emotional contagion to dynamic emotional facial expressions and their influence on decoding accuracy," *Int. J. Psychophysiology*, Vol. 40, No. 2, pp. 129-141, 2001.
- (4) T. Singer, B. Seymour, J. O'Doherty, H. Kaube, R.J. Dolan, and C.D. Frith : "Empathy for pain involves the affective but not sensory components of pain," *Science*, Vol. 303, No. 5661, pp. 1157-1162, 2004.
- (5) L. J. Martin, G. Hathaway, K. Isbester, S. Mirali, E. L. Acland, N. Niederstrasser, P. M. Slepian, Z. Trost, J. A. Bartz, R. M. Sapolsky, W. F. Sternberg, D. J. Levitin, and J. S. Mogil : "Reducing social stress elicits emotional contagion of pain in mouse and human strangers," *Curr. Biol.*, Vol. 25, No. 3, pp. 326-332, 2015.
- (6) A. Murata, H. Nishida, K. Watanabe, and T. Kameda : "Convergence of physiological responses to pain during face-to-face interaction," *Sci. Rep.*, Vol. 10, 450, 2020.
- (7) L. Noy, N. Levit-Binun, and Y. Golland : "Being in the zone: physiological markers of togetherness in joint improvisation," *Front. Hum. Neurosci.*, Vol. 9, 187, 2015.
- (8) P. Goldstein, I. Weissman-Fogel, and S. G. Shamay-Tsoory : "The role of touch in regulating inter-partner physiological coupling during empathy for pain," *Sci. Rep.*, Vol. 7, 3252, 2017.
- (9) 渡邊・川口・坂倉・安藤 : "心臓ビクニック: 鼓動に触れるワークショップ (<特集> ハプティクスとVR)," *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 16, No. 3, pp. 303-306, 2011.
- (10) N. Kameyama, A. Murata, J. Watanabe, and H. N. Ho : "Influence of touching heartbeat on emotional state and interpersonal closeness," *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan*, Vol. 28, No. 4, pp. 321-324, 2023.
- (11) 藤村 : "NRNJ データベースからみた 22, 23 週児の現状," *周産期医学/周産期医学編集委員会 編*, Vol. 51, No. 8, pp. 1085-1092, 2021.
- (12) L. Garfield, D. Holditch-Davis, C. S. Carter, B. L. McFarlin, D. Schwertz, J. S. Seng, C. Giurgescu, and R. White-Traut : "Risk factors for postpartum depressive symptoms in low-income women with very low-birth-weight infants," *Adv. Neonatal Care*, Vol. 15, No. 1, pp. E3-E8, 2015.
- (13) S. J. Rhoads, A. Green, A. Mitchell, and C. E. Lynch : "Neuroprotective core measure 2: partnering with families-exploratory study on web-camera viewing of hospitalized infants and the effect on parental stress, anxiety, and bonding," *Newborn Infant Nurs. Rev.*, Vol. 15, No. 3, pp. 104-110, 2015.
- (14) 村田・鳥谷・駒崎・松本・外館・渡邊淳司・赤坂真奈美 : "NICU 環境の新生児と親のつながりを支援する身体性オンライン面会システムの検討," 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2A1-12, 2024.
- (15) A. Murata, K. Komazaki, Y. Toya, A. Matsumoto, G. Sotodate, M. Akasaka, and J. Watanabe : "Supporting Family Bonds with Hospitalized NICU Extremely Preterm Infants through an Embodied Online Visitation System," *IDC 2025, New York, U.S.A., June 2025*.



村田 藍子

人と人のつながりを支える技術として、身体性情報伝送の効果を科学的に検証し、支援が求められる人々に役立つかたちでの実用化をめざします。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
人間情報研究部 感覚共鳴研究グループ



気の利く対話 AI のための「空気を読む」技術 ——マルチモーダル情報を用いた対話の場・関係の 理解とインクリメンタル応答生成

対話システムが人間の日常生活に溶け込み、「気の利いた」会話ができるようになるには、会話の場面や対話者どうしの関係を認識し、適切な間合いで応答を行うといった「空気を読む」能力が求められます。私たちはこれまで、「空気を読む」対話システムの実現をめざし、さまざまな対話処理技術の研究に取り組んできました。本稿ではそのうち、日常会話のシーンを理解する対話状況認識、対話者間の心理的距離感を理解する親しみ認識、人間の対話のテンポに追従するためのインクリメンタル応答生成の3つの研究をピックアップして紹介します。

キーワード：#対話状況推定、#心理的距離感の推定、#インクリメンタル応答生成

ちば ゆうや
千葉 祐弥

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

「空気を読む」対話処理技術

大規模言語モデル (LLM: Large Language Model) の進展により、対話システムの応答の自然さは飛躍的に向上しました。ChatGPTをはじめとする多くの AI (人工知能) アプリケーションでは、会話による操作がすでに一般的になっています。しかし、対話システムが私たちの日常生活に参画し、「気の利いた」振る舞いをするためには、システムにも「空気を読む」ことが求められます。例えば、友人どうしの雑談で会話を盛り上げるように話題を振ったり、あるいは議論が硬直したときに適切なアドバイスをしたりするには、対話参加者間の関係や対話の目的などの対話状況を的確に把握する必要があります。話者間の対立を仲裁するなど、ときには人々の心理的距離感までも考慮した振る舞いが求められる場合もあるでしょう。加えて、

対話のテンポに追従して適切なタイミングで応答できることも重要です。私たちはこれまで、人間と共生するパートナーとしての対話システムの実現をめざし、さまざまな「空気を読む」対話処理技術の研究に取り組んできました。本稿では、このうち3つの研究について紹介します。

対話状況の推定

対話システムが私たちの日常会話に自然に加わるには、状況に応じた振る舞いが求められます。例えば、喫茶店での友人どうしの会話と会社での同僚との議論の場面では、会話に参加するシステムに求められる対話は異なります。前者のような場面ではカジュアルな話し方で会話を盛り上げてほしいですし、後者のような場面では議論を邪魔しないように話しかけるタイミングを計ったり、フォーマルな話し方をしたりする必

要があります。本研究では、こうした状況に応じた対話制御の実現をめざしました。

最初に、状況ごとに異なる会話の言語的特徴を、因子分析によって調査しました⁽¹⁾。図1に因子分析の手続きの概要を示します。まず、それぞれの発話から、意図や話者の心的態度、文法的要素などを抽出します。それらに対話全体で集積し、特徴量ベクトルとして扱います。このようにして抽出した特徴量ベクトルに対して因子分析を行うことで、会話の特徴を説明する軸、すなわち因子を得ることができます。国立国語研究所が提供する日本語日常会話コーパス⁽²⁾を用いた分析では、7つの因子を抽出しました。言語学や社会学などで蓄積されてきた会話分析の知見と照らし合わせ、それぞれ「説明」「依頼」「語り」「丁寧」「感情」「関与」「提案」と名付けました。これらの因子は対話の仕方や目的に関する要素であると解釈できます。各状況の対話に対する因



図1 因子分析の手続き

子の重みを比較した結果、例えば会議における会話では説明的な成分、同僚どうしの会話では丁寧さの成分、友人・知人との会話では感情を表す発話の成分が大きかった、対話の性質の違いが明らかになりました。この知見は、日常生活に参画する対話システムの行動方針を設計するための指針となると期待できます。

続いて、対話中の周囲の情報から実際に対話状況を推定する技術に取り組みました。提案手法では、対話場面を収録した動画画像情報、音響情報、会話内容を用いて、4つの対話状況、すなわち対話の「形式」、「場所」、「会話に伴う活動」、および「対話参加者間の関係」を推定します(図2)。推定モデルの基盤には、当時の自然言語処理分野で分類タスクに広く用いられていたBERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) を採用しました。図3に手法の概要を示し

ます。動画画像情報と音響情報は、それぞれ事前学習済みのモデルを用いて埋め込みベクトルに変換し、言語情報と組み合わせてモデルに入力します。ここで、4つの状況の間には一定の相関関係が存在することが分かっています。例えば、家族との会話は自宅で起こることが多く、社会的な関係の相手との会話は会社や学校で行われやすいといった傾向がみられます。そのため、各状況を個別の推定タスクとして扱い、タスク間の関係性を考慮するマルチタスク学習を導入しました。実験の結果、動画・音響・言語のすべての情報を統合して用いることで性能が向上し、さらにマルチタスク学習を併用することで、より高い性能が得られることが示されました⁽³⁾。

話者の心理的距離感の推定

人間の振る舞いは、相手に対して抱く親

しみによっても変化します。例えば、話者の言語的振る舞いが相手との心理的距離や上下関係に影響されるとするポライトネス理論⁽⁴⁾や、親密さに応じて自己開示の深さが変化するとする社会浸透理論⁽⁵⁾などがよく知られています。また、非言語的な振る舞いに関しても、親しみを感じる相手に対しては、しぐさや態度が相手に近似する「同調」などの現象がみられるといわれています⁽⁶⁾。このような背景から、システムが話者の親しみの度合いを理解できることは、人間と社会的関係を築くうえで重要な要素といえます。そこで本研究では、話者の言語的・非言語的振る舞いから対話相手に対する心理的距離感、すなわち親しみを推定する手法を研究しました。

まず、大学生・大学院生どうしの雑談を収録したSMOC (Spontaneous Multimodal One-on-one Chat-talk) コーパスを利用し、話者間の親しみを表現する言語的・非言語的振る舞いを分析しました。言語的な振る舞いとしては発話の意図と発話中の心理的・社会的要素を抽出し、非言語的振る舞いとしては発話の韻律的情報(話速、基本周波数、応答タイミング)や表情、視線、姿勢を抽出しました。言語的振る舞いの分析では、親しみが低い話者間の会話ではネガティブな感情を伝達する発話が多いこと、親しみが低い話者間の会話では相手の欲求や習慣を聞く質問の頻度が高いことが示されました。このことから、対話者は仲の良い間柄ではより率直に自身の意見を表明する傾向がある一方で、関係の初期段階では相手のことをよく知る会話が多く行われる傾向があることが示唆されます。非言語的

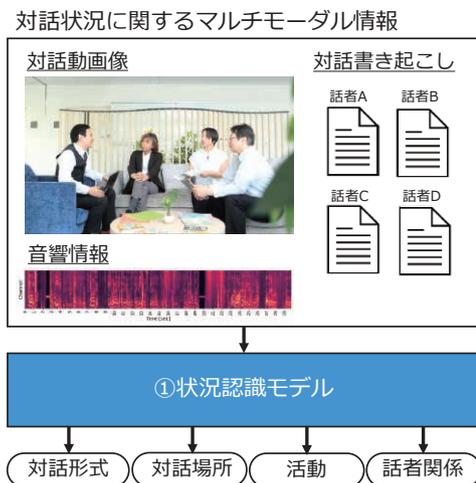


図2 対話状況の推定

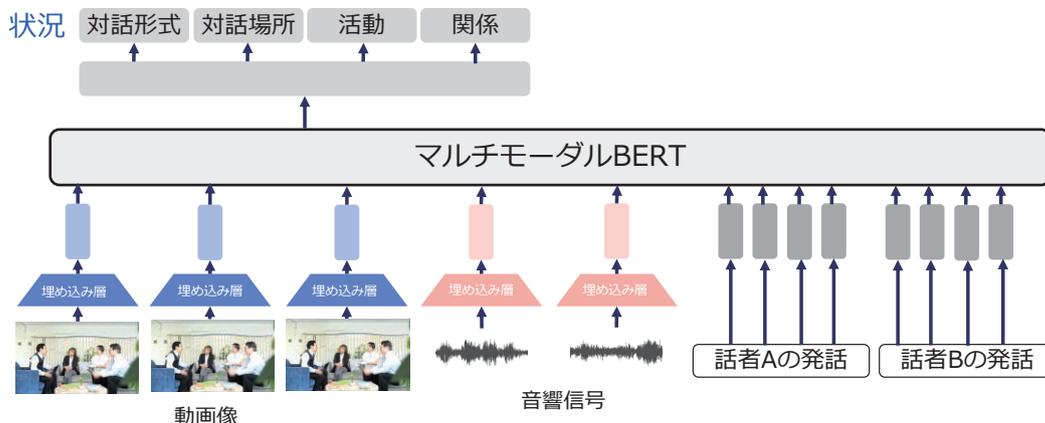


図3 対話状況推定モデル

振る舞いの分析では、表情や姿勢、一部のジェスチャが親しみの高い話者間でより同調していることが示されました。これらの結果から、抽出された言語・非言語的振る舞いは対話相手に対する親しみの推定に有効であることが示唆されます。

そこで本研究では、これらの特徴量を用いて話者の親しみの度合いを推定するモデルを構築しました⁷⁾(図4)。図5に提案モデルの概要を示します。まず、発話から言語情報、韻律情報、表情・姿勢情報を抽出し、MS-BLSTM (Multi-stream Bi-directional Long Short-Term Memory) を用いて統合します。これを、文脈を扱うBLSTMに入力し親しみを3段階で推定します。実験では、複数のベースラインモデルと提案モデルを比較し、提案

手法がこれらのベースライン手法よりも性能が高いことを示しました。特に、テキスト情報のみを用いて親しみを推定する先行研究のモデルよりも高い性能を得ることができ、マルチモーダル情報の利用が話者間の心理的距離感の推定に有効であることを示しました。

人間の会話の間合いに追隨するインクリメンタル応答生成

人間の会話では、会話の内容だけでなくターン交替*も重要です。人間は相手の発話を聞きながら自身が次に話す内容や、話し出すタイミングを予測しながら会話をしているといわれており、これによって非常に短い時間で話者の交替が行われます。こ

れに対して、対話システムの応答生成の仕方は大きく異なっています。一般的なパイプライン型の音声対話システムでは音声認識、応答生成、音声合成の各モジュールが同期的に駆動し、前のモジュールの処理が終わったら次のモジュールの処理というかたちで順次実行されます。そのため、人間と比べると話者交替にかかる時間が長くなってしまいます。本研究では、人間の会話の仕方を参考にした応答生成を実施することで、システムのターン交替の時間を短くすることをめざしました。

本研究で構築したインクリメンタル応答生成の概要を図6に示します。ユーザの発話はストリーミング音声認識により逐次認識され、システムは部分的な音声認識結果が得られるたびに応答生成を実施します。これにより、ユーザ発話が終わる前に複数の応答候補を保持することができます。その後、ターン交替のタイミングで、応答候補の中からもっとも適切な応答を選択し、システム発話としてユーザに提示します。この応答生成の手法は、名古屋大学と共同して開発した対話システム構築ツールキット⁹⁾に導入され、多くの人々が利用できるかたちで公開されています。ターン交替の予測方法にはいくつかの方法がありますが、ここでは最先端の予測手法であるVAP

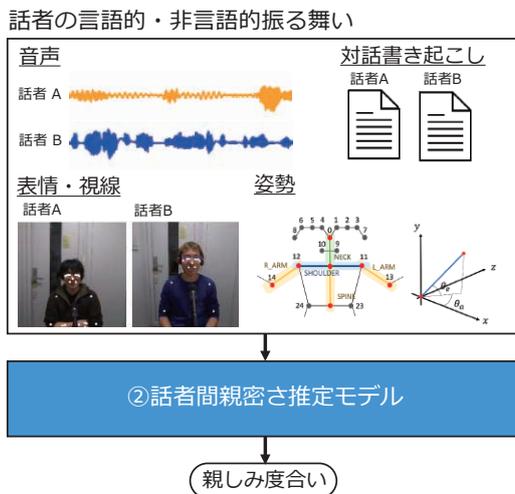


図4 心的距離感（親しみ）の推定

* ターン交替：それぞれの話者は発話する番（ターン）を持ち、別の話者とターンを授受することで会話が成立します。このプロセスをターン交替や順番交替、ターンタイミングなどと呼びます。

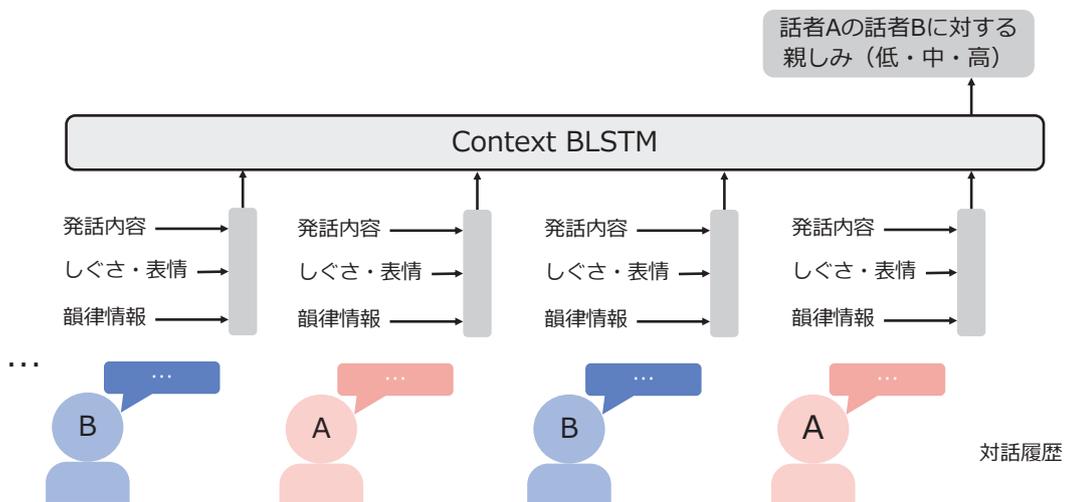


図5 心的距離感推定モデル

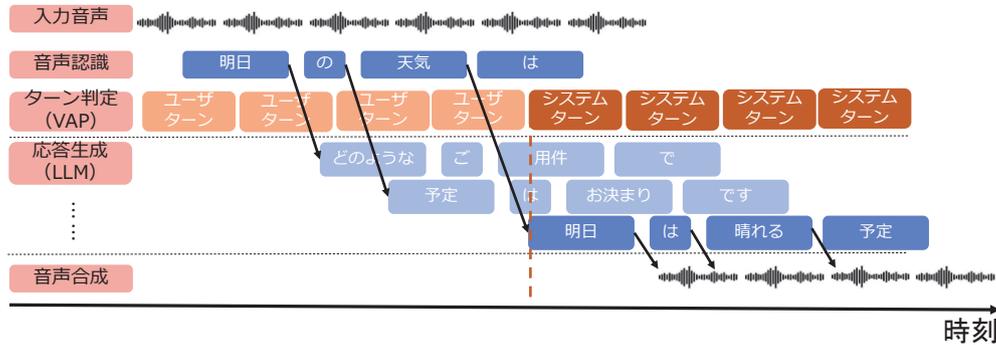


図6 インクリメンタル応答生成

(Voice Activity Projection) を採用しました。

このシステムを用いて、インクリメンタル応答生成がユーザ評価やタスク達成率など対話に与える影響を調査しました⁽⁹⁾。評価指標として、満足度、一貫性、自然性といった対話システムの評価に一般的に用いられる評価尺度と、音声インタフェースの評価尺度⁽¹⁰⁾を採用しました。タスク指向の対話においては、これに加えてタスク達成率も比較しました。結果から、インクリメンタル応答生成は、ターン交替までの時間自体は短縮できるものの、ユーザ評価が従来手法よりも低下してしまうことが示されました。1つの大きな理由は、ターン交替の時間が短い場合は必然的に応答生成に使えるユーザ発話が短くなるため、破綻した応答が出やすくなってしまっていることにありました。これは、満足度の高い会話を行うためには単に高度なターン交替手法を用いるだけでは不十分で、それに合わせた正確な応答生成を行うことが必要であることを示唆しています。人間は対話相手の特性や過去の対話のやり取りを考慮したり、まだ話されていない相手の発話を予測したりすることで破綻のない会話ができていると考えられ、インクリメンタル応答生成においてもこのような情報を取り入れる必要があると考えています。

まとめと今後の展望

本稿では、私たちのグループで取り組んでいる対話処理技術の中から、「空気を読む」能力に焦点を当てた研究を紹介しました。対話システムが人間の会話に参画し、人々と共生するパートナーとなるためには、

個々の技術についてさらなる精度向上が求められます。一方で、より多様な対話処理技術にも目を向ける必要があります。例えば、現在の対話システムは基本的に1対1の会話を前提としており、複数人による対話の管理には依然として多くの課題があります。また、高齢者や子どもといった多様なユーザに対しても頑健に会話が行える技術の開発が重要です。さらに、対話中に変化状況に応じてタスクを柔軟に遂行したり、コミュニケーション上の齟齬を適切にフォローしたりするためには、システムの対話戦略の研究も欠かせません。今後は、これらの対話処理技術に関する研究をさらに発展させていきます。

本稿で紹介した成果の一部は名古屋大学、東北大学との共同研究によるものです。

参考文献

- (1) Y. Chiba and R. Higashinaka: "Analyzing variations of everyday Japanese conversations based on semantic labels of functional expressions," *ACM Transactions on Asian and Low-Resource Language Information Processing*, Vol. 22, No. 2, pp. 1-26, 2023.
- (2) H. Koiso, Y. Den, Y. Iseki, W. Kashino, Y. Kawabata, K. Nishikawa, Y. Tanaka, and Y. Usuda: "Construction of the corpus of everyday Japanese conversation: An interim report," *Proc. of LREC*, pp. 4259-4264, 2018.
- (3) Y. Chiba and R. Higashinaka: "Dialogue situation recognition in everyday conversation from audio, visual, and linguistic information," *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 70819-70832, 2023.
- (4) P. Brown and S. C. Levinson: "Politeness: Some universals in language use," Cambridge University Press, 1987.
- (5) I. Altman and D. Taylor, *Social penetration: "The development of interpersonal relationships,"* Holt, Rinehart & Winston, Vol. 212, 1973.
- (6) R. Levitan and J. Hirschberg: "Measuring acoustic-prosodic entrainment with respect to multiple levels and dimensions," *Proc. of INTERSPEECH*, pp. 3081-3084, 2011.
- (7) Y. Chiba and A. Ito: "Speaker intimacy estimation in chat-talks based on verbal and non-verbal information," *IEEE Access*, Vol. 12, pp. 184592-184606, 2024.
- (8) 東中・光田・千葉・李: "Pythonと大規模言語モデルで作るリアルタイムマルチモーダル対話システム," 科学情報出版, 2025.
- (9) Y. Chiba and R. Higashinaka: "Investigating the impact of incremental processing and voice activity projection on spoken dialogue systems," *Proc. of COLING*, 2024.
- (10) K. S. Hone and R. Graham: "Towards a tool for the subjective assessment of speech system interfaces (SASSI)," *Natural Language Engineering*, Vol. 6, No. 3-4, pp. 287-303, 2000.



千葉 祐弥

今後も人間と共生するパートナーとしての対話システムの実現をめざし、人間どうし、人間・機械間のコミュニケーション技術に関する研究を進めます。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
協創情報研究部



音の聴き方を自ら学ぶAI——自己教師あり学習によるさまざまな音の汎用表現学習技術から、大規模言語モデルを活用した音の理解の最前線へ

音や画像などメディア情報から意味の抽出に有用な特徴量を学習する表現学習は、AI（人工知能）による優れたデータの理解を可能にしました。本稿では、私たちの身の周りのさまざまな音をAIに理解させるための音の表現学習技術を紹介し、学習した表現は、動物の鳴き声の分類や音楽ジャンルの識別など、音の理解にかかわる幅広い問題に応用できます。私たちは、表現学習の中でも、音データだけを用いて学習を行う「自己教師あり学習」を活用して技術を深化させており、さらに大規模言語モデルを活用した文章の意味と対応付ける音の理解へと発展させています。

キーワード：#表現学習、#自己教師あり学習、#音の理解

にいずみ だいすけ
仁泉 大輔

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

はじめに

音や画像などメディア情報から、それらの理解に有用な特徴量の自動抽出処理を学習により獲得する表現学習^{*1}は、AI（人工知能）による優れたデータの理解を可能にしました。本稿では、私たちの身の周りのさまざまな音をAIに理解させるための音の表現学習技術を紹介し、学習した深層学習^{*2}モデルは人の声や動物の鳴き声といった音の種類の認識や音楽ジャンルの識別など、幅広い音の理解にかかわる問題に応用できます。表現学習の中でも、音データの内容を示すラベルを推論する従来の「教師あり学習」^{*3}手法に代わって、データそのものから教師ラベルをつくり出す「自己教師あり学習」^{*4}手法が注目されています。この手法を用いることで、ラベル付けされていない大量のデータを活用し、より有効な表現を学習することが可能になります。私たちはこの自己教師あり学習を活用し、

音の表現学習技術を発展させてきました。その技術は、言語を介してメディア情報を取り扱うニーズの高まりを背景に、音と言語を対応付ける表現^{*5}の学習へと発展し、さらには大規模言語モデル（LLM）の持つ文章の意味に対する深い理解を活用する学習手法へと発展しています。

データを理解するための基礎技術「表現学習」

表現学習は、音や画像などのメディア情報をコンピュータで理解するために、有用な特徴量（＝表現）の自動抽出処理を学習する技術です。従来は、信号処理により得られる音の大きさや高さ、周波数成分など基本的な情報を基に人の手で用途に特化した特徴量を設計していましたが、例えば会話音声や乗り物の音、動物の鳴き声など、多様で複雑な音の理解には限界があります。この解決として登場した深層学習は、メディア情報とそのラベルを用いる教師あり学習

により、多様な音のデータを互いに区別するうえで重要となる特徴量を自動的に抽出する表現学習を実現し、より優れた理解を可能にしました。さらに近年では、大量のデータに内在する豊かなパターンから教師ラベルなしで表現を学習できる自己教師あり学習が着目されています。この学習手法は、教師ラベルをデータ自体から生成することで、ラベル付けのコストを必要とせず、効率的な表現学習を実現しています（表）。

音の細かな違いを吸収する表現「BYOL for Audio」

多様な音を理解するうえで有用な特徴量をどのように学習すればよいか、その答えの1つとして画像分野の手法BYOL（Bootstrap Your Own Latent）を基に自己教師あり学習手法BYOL for Audio（BYOL-A）⁽¹⁾を提案しました。BYOL-Aは音のパターンをとらえながらも、細かな違いを抑えた数値の表現を学習します。例え

- *1 表現学習：表現の自動抽出処理を、深層学習などを用いる学習により獲得すること。
- *2 深層学習：多数の層で構成されるニューラルネットワークを学習することで目的とする処理を行えるようにさせること。
- *3 教師あり学習：メディア情報などのデータと対になる教師ラベルを利用して、機械学習モデルが入力データのラベルを推論できるように学習させること。
- *4 自己教師あり学習：メディア情報などのデータそのものから教師ラベルをつくり出して学習を実現すること。
- *5 表現：メディア情報の特徴を数値で表したもの。

表 表現の実現方法の変遷

| フェーズ | 実現方法 |
|---------------------|--|
| 深層学習登場以前 | 人の手で用途に合わせて特徴量を組み合わせて設計 |
| 教師あり学習を用いた深層学習ベース | 大量のデータに分類ラベル付けを行い、分類問題を用いる教師あり学習を通じて、データを互いに区別するうえで重要となる特徴量の自動抽出モデルを獲得 |
| 自己教師あり学習を用いた深層学習ベース | 大量のデータから、データそのものを手がかりに生成した教師ラベルを用いる学習を通じて、特徴量の自動抽出モデルを獲得 |

ば犬の鳴き声は音の高さや大きさ、または犬の種類によって異なりますが、「ワン」と擬音語で表されるように、大まかには「犬の鳴き声」と理解されます。BYOL-Aは、このように音に違いがあっても同じ音のパターンであれば同じ数値表現を抽出することを学習目標とすることで、有用な表現の学習を可能にしました(図1)。その実現のために、BYOL-Aでは音の違いに対して頑健(ロバスト)な、すなわち多少の変化に影響されにくい表現を学習します。具体的には、背景雑音、音の長さ、音の高さ(ピッチ)、音量といった特性にランダムな変化を加えた2つの音を用意し、それらから得られる数値表現ができるだけ一致するように、繰り返し学習を行います。つまり、元の音に異なる変化を加えた音に対しても、同じ数値表現を抽出できるように訓練することで、音の本質的な特徴をとらえ、その意味につながる表現を自動抽出させます。その結果、従来の手法と比べて発話キーワード認識で20ポイント以上精度を改善するなど、表現学習がタスクの飛躍的な性能向上をもたらしました。その背景には、学習した表現がさまざまな問題において音の種類ごとにクラスタ(かたまり)を構成し、クラスタごとに分類することを容易にしていることが挙げられます(図2(a))。

この技術の鍵は、その学習の仕組みにあります。直接的には、音の特性に変化を加えた2つの音を、同じような数値で表現できるように学習させることが目的です。しかしその結果として、音の種類ごとに自然とクラスタが形成されるような、音の意味を反映した表現が得られるようになります。いわば「風が吹けば桶屋が儲かる」ように、一見遠回りに見える仕組みによって、AIは音をどのように「聴く」か、自ら学習することにつながるといえるのです。ここで「音の意味」とは、例えばそれが犬の鳴き声なのか、あるいは楽器の音なのかといったように、タスクや問題ごとに異なる音の概念を指しています。この学習によって得られた表現は、音の本質的な特徴を反映しており、その結果、問題ごとに異なる音の概念に応じたクラスタを形成できるようになります。こうした仕組み(アルゴリズム)の工夫こそが、自己教師あり学習の研究の面白さです。

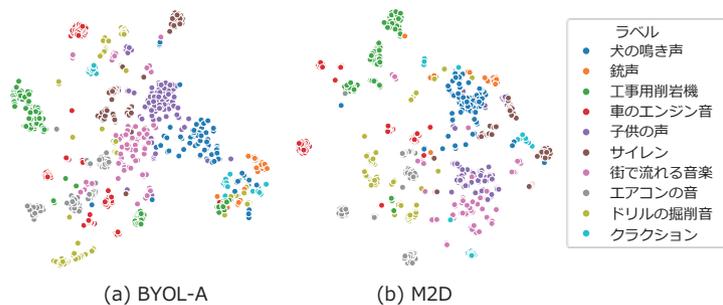
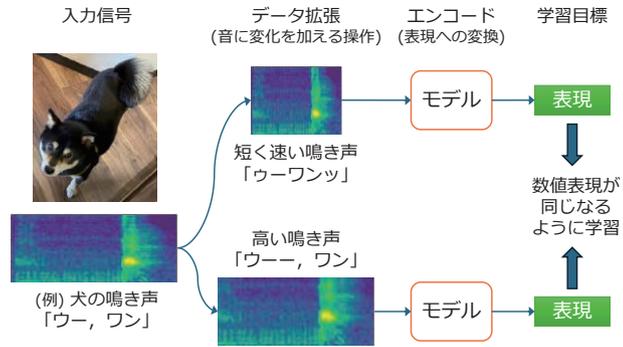


図2 10種類の環境音データ (UrbanSound8K) に含まれる音の表現の分布

音の穴埋め問題で優れた表現を学習する「Masked Modeling Duo」

BYOL-Aでは音に変化をつけて学習を行うため、変化をつける音の特性について十分にその詳細を表現できないという問題がありました。BYOL-Aではとらえきれない細かな違いも含め、音を構成する本質に迫る特徴を抽出するため提案した新たな自己教師あり学習手法Masked Modeling Duo (M2D)⁽²⁾は、「音の穴埋め問題」、すなわち音の隠された部分の予測を通じて表現を学習します(図3上)。マスクによって一部を隠したデータや、未来のデータを予測する学習手法は、LLMをはじめとする自然言語処理の分野で大きな成功を収め、優れた表現を学習できることが知られています。M2Dでは、見えている部分の入力データを表現に変換し、その表現を用いて隠された部分の表現を予測します。例えば、メロディの一部が欠けた音楽データから欠損部分を予測する場合、曲の構造やリズムに関する特徴が表現に反映される必要があります。同様に、犬の鳴き声、演奏される音楽、さざ波の音など、多様な音を学習することで、それぞれの音の背後にある構造的なパターンを示唆する特徴が効果的に抽出されるよう学習されます。さらに、この

学習手法はBYOL-Aとは異なり、細かな違いも区別できるように表現学習が進みます。例えば、隠されたピアノの音の一部を正確に予測するためには、音程や音の長さ、強さといった情報をできるだけ忠実に表現を保持する必要があります。このように、予測精度を高めるための最適化が促されるため、音の詳細な特徴までをとらえる表現が学習されます。

その結果、M2Dは音の種類ごと、より密に集まったクラスタを形成し(図2(b))、結果として多くのタスクへの応用において、性能を大きく向上させました。例えば、心音の聴診において病気の兆候を示唆する心雑音の検出に適用した場合、BYOL-Aでは従来法の性能に達しなかったのに対し、M2Dはそれを上回る結果を示しました⁽³⁾。これは、心音に含まれる雑音成分、いわば微細な音の違いに関する情報を、M2Dの表現がより保持できていることが貢献していると考えられます。

音とその説明文を対応付ける「M2D-CLAP」

近年の生成AIにおいては、言語を介したAIとのやり取りが不可欠です。そのため、メディア情報を言語と対応付ける技術は、

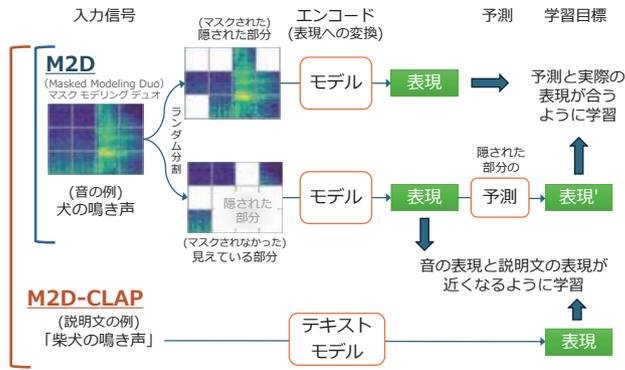


図3 音の穴埋め問題で学習するM2Dおよび、テキストモデルを統合し拡張したM2D-CLAP

AIによる情報の理解や生成を支える重要な要素となっています。そこで提案したM2D-CLAP⁽⁴⁾は、音の数値表現に加えて、音の内容をその説明文に対応付けられる表現をも兼ね備えた手法です。そのため、音の穴埋め学習を行うM2Dに、音と言語の対応関係を学習するCLAP (Contrastive Language-Audio Pre-training) を統合しました。このアプローチにより、音響信号とその言語による説明文の意味を結びつけ、内容の近さを数値で表せる表現を獲得できます (図3下)。例えば、「雷雨の音」という説明文とその実際の音が近い数値表現を持ち、異なる音とは異なる表現になるように学習されます。これにより、「犬の鳴き声」といったテキストに対応する音の検索や、事前に学習していない「電気自動車」「バイク」などの新しく定義されたラベルへの分類問題を解くゼロショット学習が可能になります。このように言語を用いて音の問題を解くことができるようになる一方で、教師あり学習であるCLAPを組み合わせるために、CLAPの学習において必要となる説明文を作成するコストが発生します。しかし近年、音響イベント検出など音の内容を記述する技術の発展により可能になっている音の説明文の自動生成を、音の表現学習に利用するサイクルが生まれつつあります。M2D-CLAPはこのトレンドを踏まえ、自動生成された説明文を活用した学習を実現しています。

M2D-CLAPは、CLAPにより学習される音と言語に対応付ける表現に加えて、従来の音の表現学習においても最先端の性能を実現している点が、他の手法にはない特徴です。このように、M2D-CLAPは音と言語の対応付けを含む多様な応用場面におい

て、汎用的に幅広く活用できる表現を提供できます。

LLMの知識を学ぶ「M2D2」

LLMの知識や文章の意味に対する深い理解を音の表現学習に活用したのがM2D2⁽⁵⁾です。例えば「さまざまな金属を叩いた際の音」を尋ねるプロンプト文章でLLMに質問すると、素材の特性などを根拠に、各金属がどのような音を出すかを詳しく解説します。これは、LLMが音に関する豊富な知識を持っていることを示しています。さらに、LLMは文章の言い回しの違いやニュアンスの機微を理解し、適切な応答を生成できるため、文の意味に対する深い理解も備えています。そこで、M2D-CLAPによる学習においてテキストモデルにLLMを用いることで、LLMを用いた文章の表現、いわばLLMの知識が反映された表現を通じて音の表現を学習させることが可能になります。このようにLLMの知識を活用することで、M2D2は音についての理解が高度化し、音の検索や説明文生成の性能を向上させました。またさらに、LLMから学んだ音の表現は、LLM自体と組み合わせて利用することで、例えば単に説明文の生成にとどまらず、音を通じた状況の理解に基づく対話の実現など、さらに高度な応用への発展が期待されます。

まとめ

これらの研究により、多様な音を理解するための表現は、音の特徴を効果的にとらえるだけでなく、言語の持つ意味との結びつきを獲得し、LLMの知識を活用できる汎

用表現へと進化してきました。しかし、これらの技術はまだ研究段階にあり、音は画像や言語と比べて非常にデータが少ないなど、実用化に向けてはさまざまな課題が残されています。将来的には、こうした課題を克服し、日常のさまざまなシーンにおける音を学習し、私たちの身の周りの音を理解するAIの実現をめざしています。それにより、例えば音を通じて日々の健康状態をモニタリングするサービスなど、音を活用した幅広い問題解決に役立つことが期待されます。

参考文献

- (1) D. Niizumi, D. Takeuchi, Y. Ohishi, N. Harada, and K. Kashino: "BYOL for Audio: Exploring Pre-Trained General-Purpose Audio Representations," *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Language Process.*, Vol. 31, pp. 137-151, 2023.
- (2) D. Niizumi, D. Takeuchi, Y. Ohishi, N. Harada, and K. Kashino: "Masked Modeling Duo: Towards a Universal Audio Pre-Training Framework," *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Language Process.*, Vol. 32, pp. 2391-2406, 2024.
- (3) D. Niizumi, D. Takeuchi, Y. Ohishi, N. Harada, and K. Kashino: "Exploring Pre-trained General-purpose Audio Representations for Heart Murmur Detection," *Proc. of EMBC 2024*, pp. 1-4, 2024.
- (4) D. Niizumi, D. Takeuchi, Y. Ohishi, N. Harada, M. Yasuda, S. Tsubaki, and K. Imoto: "M2D-CLAP: Masked Modeling Duo Meets CLAP for Learning General-purpose Audio-Language Representation," *Proc. of Interspeech 2024*, pp. 57-61, 2024.
- (5) D. Niizumi, D. Takeuchi, M. Yasuda, B. T. Nguyen, Y. Ohishi, and N. Harada: "M2D2: Exploring General-purpose Audio-Language Representations Beyond CLAP," *arXiv:2503.22104*, 2025.



仁泉 大輔

急速な発展を遂げるAIが音などメディア情報を理解するための仕組みとして学習方法があり、その妙が結果として得られる効果を変えていくその面白さを知っていただければ幸いです。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
メディア情報研究部



データの交わりに隠れた未知の知識を発見する ——無限の仮説を考慮して生体现象を解釈する AIモデルと高信頼医療ヘルスケアへの展望

近年さまざまな生体情報のデータ解析によって医療ヘルスケアの推進につながる数多くの知見が得られるようになってきました。一方で、人々の生命や健康と密接にかかわる分野でのAI（人工知能）の利用においては、特にその解析・予測・判断におけるリスク・不確かさの評価が重要な課題として注目されるようになってきています。本稿では、モデルが生体现象を説明する際に無限に存在し得る仮説を考慮することで、データ解析のリスク・不確かさを明示的にとらえさせようとする機械学習手法について解説します。

キーワード：#バイオ医療ヘルスケア、#データ解析、#組合せ論

未知の知識を獲得するための 機械学習

人工知能（AI）は私たちの生活に不可欠なものとなってきています。音声・音楽・画像・動画・テキスト・ゲームなど各種メディア制作や、動画配信サービス・商品推薦システムのバックエンドなど、さまざまな場面にAI技術が活用されています。特に近年の大規模言語モデルや生成AIの発展はめざましく、かつてAIの概念の黎明期にサイエンスフィクションとして描かれてきたような世界、例えば人類とAIが共存するような世界がすでに現実のものとなりつつあります。実際に、自然・社会に現れる多くの諸課題に対して、AIは私たち人類と遜色ない能力を発揮するどころか、場合によっては人類を超えるようなことも少なくありません。AIのさらなる発展は、おそらく私たち人類の生活をより豊かで便利なものへと導いてくれるでしょう。では具体的に、AIのさらなる発展にはどのような方向性があるのでしょうか。そして、その発展は今後の私たちの生活にどのような変革をもたらしてくれるのでしょうか。

NTTコミュニケーション科学基礎研究所では、AIのさらなる発展に関する重要な方向性の1つとして、「未知の知識の推論」能力に注目しています。この「未知の知識」という言い回しは一見すると逆説的な表現ですが、私たちは、実際にこのような能力

を養い・鍛え・発揮してきたことによって、現代の社会にまで発展してきたといっても過言ではありません。私たちは現実の世界で起こった現象から仮説を導き出し、さまざまな「未知」の現象に対しても想像を巡らせることで、あたかもそれらを「知識」の1つであるかのようにとらえることができます。そして、膨大な年月をかけて培ってきた知識や経験をもとに、「未知の知識」に対してもその確かさ・不確かさを「推論」することができます。例えば、かつて伝染病や未開の病原体は一度流行してしまうと、特定の地域に対して長期間甚大な被害を出し続けてしまいましたが、それに対して現代では新種の感染症や未知の病気に対しても、（ある程度のリスクを含んでいたとしても）有用な対処法や治療法が圧倒的な短期間で見出されるようになってきています。

人類は長い歴史の中でさまざまな経験を蓄積してきたことにより、このような統計的推論が可能となってきました。ただし、歴史が示すとおり、その経験の蓄積には膨大な年月を要します。そこで、私たちの研究チームでは、このような「未知の知識を推論」する能力をAIに実装し、人間を超えるような豊かな想像力とその統計的推論の高精度化を実現することで、私たちの生活に重大な変革をもたらされるかもしれないと期待しています。例えば、未知の新種の感染症の発生リスクを予測することに

よって世界的流行・パンデミックを未然に防ぐことができるかもしれません。あるいは近い将来、地球外生命体によって地球へ運ばれてくるかもしれない未知の病原体への対応手段をあらかじめAIが予測し準備することで、人類滅亡の危機を未然に回避することができるかもしれません。

本稿では、「未知の知識」の表現形式の中でも、特に構造的仮説に焦点を当てていきます。ここでいう構造的仮説とは、順列・分割・バイナリ木・カンブリア木・バイナリ系列・因子グラフ・長方形分割など、知識の効果的・効率的な表現を実現する離散構造のことを指しています。これらは、バイオ医療ヘルスケア応用を展望した生体情報処理の諸課題において頻出する未知の知識の表現法として特に有用です。例えば、ランキング・マッチング課題では「順列」が重要な役割を果たし、大規模データに対する検索システムに備わるランキング機能に活用されています。分類・クラスタリング課題では「分割」が活躍し、大規模データの中の隠れたクラスタ構造を発見するのに役立ちます。階層クラスタリング課題には「バイナリ木」が活用され、データの中に隠れたクラスタ構造の階層を発見するのに有用です。系統樹解析課題には「カンブリア木」が用いられ、例えば遺伝子の変異・融合・組み換えなど生体の系統的なイベント発生軌跡をとらえるために活用されています。このように、構造的仮説はデー

なかの まさひろ
中野 允裕

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

タの中に隠れた未知の知識を表出させるための有用な道具として注目されてきています。ここからは、構造的仮説を未知の知識の表現法とするAIについて、いくつかの応用事例とともに、それらを汎化する方法、そしてバイオメディカルヘルスケア応用への展望を紹介していきます。

関係データ解析

「不定愁訴」とは、患者が何らかの体調不良を自覚しているにもかかわらず、その医学的な原因を特定することができずに適切な治療処置を提供することができない事象を指しています。日本においては特に1960年代からこのような事象の発生が顕著になってきています。ここでは、不定愁訴をデータ駆動的に解釈する1つの有力な方法として関係データ解析と呼ばれる一手法を概説していきます。簡単のため不定愁訴にまつわる観測データを図1に示すような二値の行列で表すことにします。これは患者群を行（垂直方向）に、症状群を列（水平方向）に対応付けて、ある1つの要素はその行の患者がその列の症状を持っているかどうかを二値（図では白黒）で表現した行列データです。図1(a)のように、不定愁訴を表す観測データは一見すると無秩序の

ように見えるかもしれませんが、図1(b)のように、患者群の並び順と症状群の並び順を適切に入れ替えて、かつ赤い長方形分割の補助線を加えることで、ある種のクラスタ構造を表出させることができます。この赤い補助線として示している長方形分割は、各ブロック内になるべく似た要素を集まるように誘導しています。したがって、各ブロックは特定の患者群と特定の症状群の共通した類似性を暗示しているものともとらえることができます。これは広義の意味において、不定愁訴の中に表れる新しい病気を示唆し得るものともとえられるかもしれません。応用上は、非常に単純化した例として、各ブロックのある患者に対して有用であると分かった治療・処置が、同一ブロックに属する別の患者に対する有効な治療法に対する手掛かりとなり得るかもしれません。

関係データ解析の文脈における「未知の知識」とはこの場合、観測データを解釈するための長方形分割とらえることができます。そこで関係データから長方形分割仮説を推論するためのAIモデルの構築が研究されてきました。AIの力を借りてさまざまな長方形分割仮説に対してその確かさ・不確かさを推論することによって、不定愁訴を解消する手掛かりが得られることを期

待しています。では、このようなAIモデルの構築に対して求められるもっとも重要な要件とは一体何なのでしょう。その重要な要件の1つは、ありとあらゆる長方形分割仮説をAIが漏れなく想像できることにあります。不定愁訴のようなメディカルヘルスケア応用を見据えた場合、もしもAIが想像することすらできない仮説があり、その仮説の中に真実があったのだとすれば、そのAIによる推論は真実を見逃すことで結果的に私たちの生命・健康に重大な影響を及ぼしてしまうかもしれません。

このような動機から、関係データ解析の発展において、ありとあらゆる長方形分割仮説を漏れなく想像し、その確かさ・不確かさを推論することができるようなAIの構築が探求されてきました。歴史的には、2007年に正則分割と呼ばれるクラス、2009年に階層分割と呼ばれるクラスについて、それらクラスに属するすべての長方形分割を想像し得るAIモデルの構築に成功してきました。しかし、これら正則分割・階層分割は長方形分割全体の中のごく一部に制限されたクラスであり、依然としてあらゆる長方形分割を想像し得るAIモデルの構築にはいたっていませんでした。私たちの研究チームの貢献は、2020～2021年にかけて、2つの方式によってあらゆる長方形分

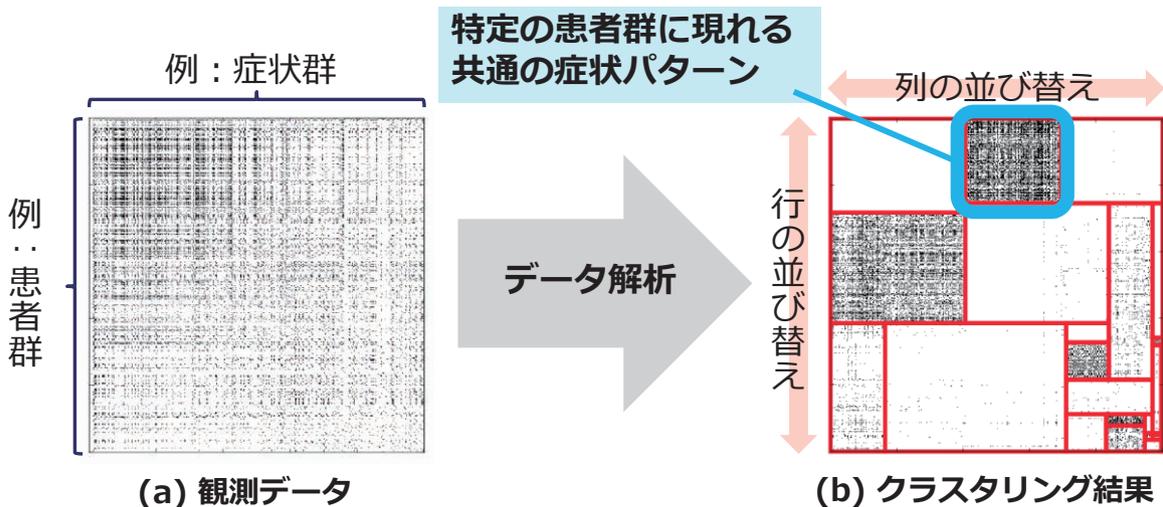


図1 不定愁訴応用を見据えた関係データ解析

割を想像し得るAIモデルの構築に成功したことにあります^{(1), (2)}。

この成功は、組合せ論の知見に基づいて、あらゆる長方形分割の集合が、ある特定の順列のクラスと一対一対応関係を持つ事実を用いて、一見するとAIが直接想像することが容易でない長方形分割を、順列（つまり数字の並び順）というAIが取り扱いきやすい表現で間接的に想像する機構を導入したことによるものです。私たちは、実世界のいくつかのベンチマークデータをとおして、従来のように制限されたクラスにとどまらずにあらゆる長方形分割を想像し得る能力がAIモデルの高機能化・高信頼化に寄与することを確認してきました。この成果によって、AIにあらゆる長方形分割を漏らすことなく想像し得る能力を保証することができるようになりましたので、今後はその推論能力をさらに高精度化していくことにより、実社会の不定愁訴に対して関係データ解析の知見から、その解消につながる重要な洞察を見出ししていきたいと展望しています。

系統樹解析

細胞の分化や遺伝子の変異のように、時間経過とともに系統的な進化・発達構造を持つ対象からその系統樹を推論する技術は系統樹解析と呼ばれ、さまざまな応用事例において重要な役割を果たしてきています。

例えば近年、人工多能性幹細胞（iPSC：induced Pluripotent Stem Cells）の分化構造に対する系統樹解析は特に注目を集めている応用事例の1つといえます。iPS細胞はある種の分化万能性を持つことが知られており、体のさまざまな組織・器官・臓器へと分化誘導できる可能性が期待されています。そのため、その分化の原理を理解し適切に誘導することができるようになれば、患者から採取した体細胞をiPS細胞化し培養することで、移植用臓器・組織・器官を作成できるようになるかもしれません。また、従来採取が困難であった病変組織の細胞をつくり出すことによって、その発症原理の理解や有効な治療・薬剤の解明に役立てられる可能性も期待されています。別の観点からは、昨今の感染症の世界的流行・パンデミックにおいても、系統樹解析は発生源の推論や感染拡大を防ぐ手掛かりを見つげるための有用な道具として活用されています。一般に、感染症の持つ遺伝子は、その拡大の過程で変異・融合・組み換えなどの事象を経て系統的な変容を遂げていきます。そのため、その発展の系統樹を辿ることができれば、その発生源・感染経路への手掛かりとすることができるかもしれません。

系統樹解析の文脈における「未知の知識」は、図2に示すとおり、遺伝子の系統的な変異をカンブリア木として表すことができます。これは、親遺伝子が2つの子遺伝子

へ分岐するイベントと、2つの親遺伝子から1つの子遺伝子へ組み換えが起こるイベントを用いて、遺伝子の系統的な変異を系統樹として表しています。このような系統樹は一般に膨大な仮説を取り得ることから、AIの力を借りて系統樹を推論することのできる技術が期待されてきました。では、そのようなAIに求められるもっとも重要な要件とは何でしょうか。不定愁訴に対する長方形分割仮説と同様に、私たちはデータの中に隠れた系統樹、すなわちありとあらゆるカンブリア木構造を漏れなく想像し得る能力が重要であると考えています。それでは、ありとあらゆるカンブリア木仮説を漏れなく想像し、その確かさ・不確かさを推論することができるようなAIはどのようにして実現することができるのでしょうか。興味深いことに、前述の関係データ解析における長方形分割と順列の関係とよく似た事実として、あらゆるカンブリア木の集合は特別な順列の集合と一対一対応関係を持っていることが組合せ論の分野において知られています。この事実を利用して私たちは、順列を介して間接的にあらゆるカンブリア木を想像し得る能力を持ったAIモデルの構築に成功しました^{(3), (4)}。私たちは、このようなあらゆるカンブリア木を想像し得るAIモデルを用いてiPS細胞の分化構造を推論し、そのメカニズムを明らかにすることで、今後の再生医療の発展につながる重要な洞察を見出ししていきたいと展望して

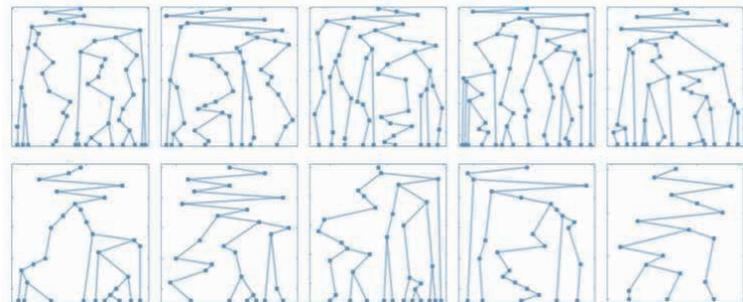
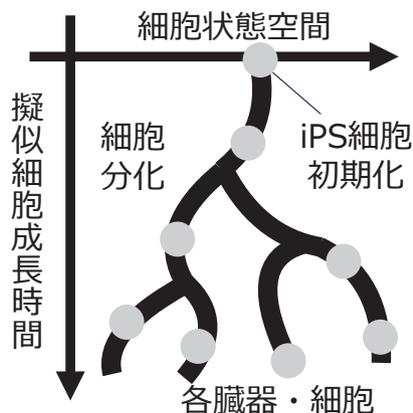


図2 細胞分化構造推論を見据えた系統樹解析

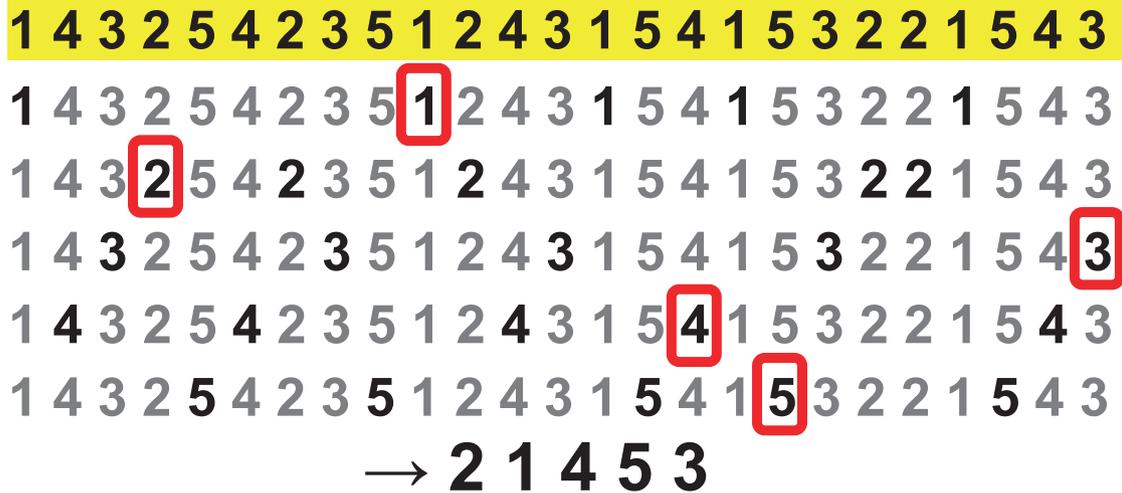


図3 スーパーペイズ法のご概念図

います。

今後の展望：スーパーペイズ構想

ここまで関係データ解析と系統樹解析の2つの応用事例に対して、それぞれ長方形分割とカンブリア木を「未知の知識」としてそれらを漏れなくAIに想像させ得る方法について紹介してきました。それでは、別の課題に対して他の構造的仮説をAIに想像させたい場合にはどうすればよいでしょうか。改めてそのような機構を1から構築していかないといけないのでしょうか。私たちはこのような対症療法なAIモデルの個別実装とは真逆のアプローチとして、対象とする課題に対して、AIが自律的に適切な構造的仮説を見出して想像できるような機構の実現をめざしています。このような構想を、私たちの研究チームでは「スーパーペイズ法」と呼んで2022年から提唱しています⁽⁵⁾ (図3)。

これは、代数的組合せ論と極値組合せ論の知見をペイズ統計へ輸入したものととらえることができます。より具体的には、代数的組合せ論において、順列・分割・バイナリ木・カンブリア木・バイナリ系列・因子グラフ・長方形分割などのさまざまな構造的仮説は、順列からの全射または全単射

によって統一的に表現できることが分かってきています。そして、極値組合せ論において、「超順列」と呼ばれる冗長な数列はその部分系列にあらゆる順列を含んでいることが知られています。図3は長さ5の順列を含む超順列の例を表しています。あらゆる順列を含む「超順列 (superpermutation) 」になぞらえて、私たちはこのような構想をスーパーペイズと呼び、私たちユーザがその構造的仮説の表現形式をあらかじめ指定することなく、AIモデルが対象とするデータからデータ駆動的にその表現形式自体を推論することができる枠組みへ拡張をめざしています。

最近2025年になって私たちの研究チームではその理論基盤が整備できましたので、今後その本格的な実装に取り組みようとして始めています。私たちは「未知の知識を推論するAIをとおして高信頼メディカルヘルスケアの発展に貢献できるよう、努力を惜しまずに研究を進めていきます。

参考文献

- (1) M. Nakano, A. Kimura, T. Yamada, and N. Ueda: "Baxter Permutation Process," Proc. of NeurIPS 2020, pp. 8648-8659, 2020.
- (2) M. Nakano, Y. Fujiwara, A. Kimura, T. Yamada, and N. Ueda: "Permuton-induced Chinese Restaurant

Process," Proc. of NeurIPS 2021, pp. 27695-27708, 2021.

- (3) M. Nakano, D. Chijiwa, R. Shibue, Y. Fujiwara, R. Nishikimi, T. Iwata, A. Kimura, T. Yamada, and N. Ueda: "Permutree Process," OpenReview, 2024.
- (4) M. Nakano, H. Sakuma, R. Nishikimi, R. Shibue, T. Sato, T. Iwata, and K. Kashino: "Warped Diffusion for Latent Differentiation Inference," Proc. of AISTATS 2024, pp. 4789-4797, 2024.
- (5) M. Nakano, R. Nishikimi, Y. Fujiwara, A. Kimura, T. Yamada, and N. Ueda: "Nonparametric Relational Models with Superrectangulation," Proc. of AISTATS 2022, pp. 8921-8937, 2022.



中野 允裕

真実はいつも1つ。これは確かに真実かもしれませんが、しかし、解釈はいつも多重の有力な候補があり得るものです。メディカルヘルスケアにおけるAIの活用には、このような多重の仮説を陽にとらえられる能力が重要となってくるかもしれません。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
 メディア情報研究部
 生体情報処理研究グループ



ロボットに心を感じる子どもたち

——未来の幼児教育を支える学習コンパニオンロボット

技術の進展により、ロボットが子どもの生活にかかわる機会が増えています。近い将来、ロボットは幼児教育を支える学習コンパニオンとして、私たちの生活に浸透していくと考えられます。しかし、子どもがロボットをどのように認識し、受け入れているのかについては十分に解明されていません。本稿では、子どもがロボットから知識を学べるのか、ロボットとの社会的インタラクションが子どもの行動や心の感じ方にどのような影響を与えるのかを探る実験心理学的研究を紹介します。

キーワード：#発達科学、#子ども、#ロボット

おくむら ゆうこ

奥村 優子

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

子どもの学習

子どもは養育者とのコミュニケーションを通じて学びを深めていくと考えられています。私たちはこれまで、親子のコミュニケーションが、子どもの学習に大きな影響を与えることを明らかにしてきました^{(1), (2)}。例えば、社会的な手掛かりとしてのアイコンタクトやジェスチャー、発話スタイルといった親のかかわりが、子どもの知識の獲得や言語発達に影響を与えることを示しています。私たちの目標は、子どもの学習メカニズムを科学的に解明し、エビデンスとAI（人工知能）の融合に基づく教育支援技術確立することです。こうした研究成果を、教育・育児・医療支援などの実用的な場面につなげていくことをめざしています。

近年、学習のあり方は多様化しており、AIやロボットを活用した教育が注目されています。子どもがロボットから知識やスキルを学ぶ機会は今後さらに増えていくでしょう。子どもが学びやすい支援方法の実現に向けて、私たちがめざす未来は、学習コンパニオンロボットを活用した幼児教育の実現です。これからの社会では、ロボットが養育者の役割の一部を補完し、言語発達や絵本読み、感情教育など、子どもの自発的な学びを支える存在になることが期待されます。

しかし、子どもがロボットをどのように認識し、受け入れているのかについては十分に解明されていません。AIロボットの低年齢層への普及を見据え、子どもとロボッ

トのかかわり方を学術的に検討することは喫緊の課題といえます。こうした知見は、ロボットを活用した教育の設計指針に活かされ、幼児教育の向上にもつながります。本稿では、子どもはロボットから知識を学べるのか、ロボットをどのような存在としてとらえているのかを探る実験心理学的研究を紹介します。

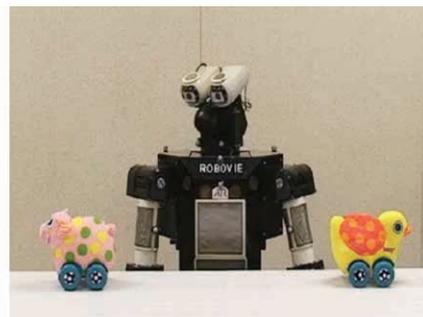
ロボットからの学習

AIやロボットを活用した教育に関心が高まる中、赤ちゃんがロボットから知識や情報を学べるのかを明らかにすることは重要です。通常、赤ちゃんは、養育者などのヒトから学習していますが、ロボットからも学習できるのでしょうか。

この疑問に答えるため、赤ちゃんがヒトまたはロボットから学習の様子を比較する研究を行いました⁽³⁾。実験では、生後12

カ月の赤ちゃんが、ヒトまたはロボットの視線だけを利用して物体をどのように覚えるかを分析しました（図1）。その結果、赤ちゃんはヒトの視線を追随し、視線が向けられた物体情報をよく記憶し、好んで触れることが示されました。一方、赤ちゃんはロボットの視線を追随するものの、物体の記憶や選好といった学習はみられませんでした。この結果によると、学習におけるロボットの影響はヒトよりも小さいと考えられます。

では、赤ちゃんがロボットをコミュニケーション可能な存在として経験すると、ロボットに対する反応は変わるのでしょうか。ロボットに赤ちゃんの名前を呼ぶ発話手掛かりを追加して実験したところ、赤ちゃんはロボットの視線をよりよく追随し、視線が向けられた物体を記憶できるようになりました⁽⁴⁾。赤ちゃんにとってロボットは見慣れない存在であり、どのようにかわれば



ATR知能ロボティクス研究所「ロボビー」

ヒトとロボットが視線を向けた物体に注意を向けて学習するか否かを比較

図1 赤ちゃんに提示した映像の例

よいのか分からなかったのかもしれませんが、ロボットがコミュニケーション可能な存在であると示すことで、赤ちゃんの学習が促進されるのです。

生後12カ月の赤ちゃんはロボットの視線を追従できること、さらにロボットの発話が、赤ちゃんの学習を促すことが明らかになりました。この知見は、乳児期、つまり非常に幼い時期から、ロボットを教育支援に活用できる可能性を示唆しています。

ロボットが見ていると良い子に振る舞う

幼児期になると、子どもは他者と言葉によるインタラクションを行うようになります。では、この時期の子どもにとって、ロボットはどのような存在なのでしょう。

子どもは成長の過程で、他者への共感からはじまり、段階的にさまざまな社会性を身に付けていくことが知られています。そこで、5歳ごろから発達がみられる戦略的な社会性⁽⁵⁾に注目し、ロボットがどのよう

な影響を与えるかを実験心理学的手法により検証しました。

子どもは5歳ごろになると、誰かに見られていることに敏感になり、観察されているときには自分を良く見せようとします。例えば、観察者の前では、自分が持っているものを他者に多く分け与える利他的行動をとったり、不正行動を控えたりする傾向があります。しかし、観察者がロボットの場合、子どもがどのように行動を変えるのかについては、これまで明らかにされていませんでした。そこで、5歳児がロボットに見られているときに良い行動を示すのか、また、ロボットとのインタラクションの経験が子どもの行動にどのような影響を与えるのかを検証しました⁽⁶⁾。

実験には、5歳児112名が参加しました。まず、子どもはロボットと対面しました(図2(a))。社会的ロボット条件では、子どもは、発話や身振りを交えたやり取りが可能なロボットとのインタラクションを経験しました。一方、非社会的ロボット条件では、プログラムされた発話や動作を定期的に再

生するだけで、インタラクションが成立しにくいロボットと接しました。さらに、静止ロボット条件では、動かないロボットと対面しました。また、観察者がいないロボットなし条件も設定しました。

次に、子どもの利他的行動を測定するために、シール分配課題を実施しました。この課題では、子どもに10枚のシールを与え、それが子ども自身のものであると伝えました。そして、ロボットの前で、シールを自分と他者との間で分けるよう求めました。つまり、子どもが他者にシールを分ける様子を、ロボットが見ている状況です。

実験の結果、5歳児は、社会的ロボットとのインタラクションを経験すると、そのロボットの前では他者にシールを多く分けていました(図2(b))。つまり、社会的ロボットに見られていると、利他的行動を示しました。この行動は、ヒトの大人に見られているときと同程度であり、社会的ロボットにはヒトの観察者と同じような効果があることが分かりました。一方、非社会的ロボットや静止ロボットのの前では、観察者が

■ ロボットとの対面場面

ロボットはVstone社製のSota

| | 実験条件 | | | |
|---------------|---------|----------|--------|--------|
| | 社会的ロボット | 非社会的ロボット | 静止ロボット | ロボットなし |
| インタラクション(反応性) | ○ | × | × | — |
| 自律性(発話・身振り) | ○ | ○ | × | — |

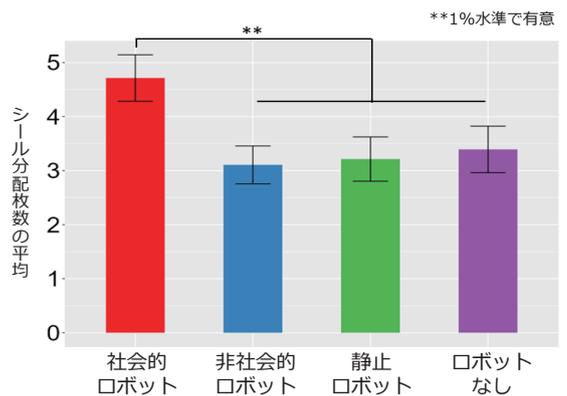
■ 分配課題

- 子どもにシールを10枚与える
- ロボットの前で、シールを自分と他者との間で分配



(a) 実験手続き

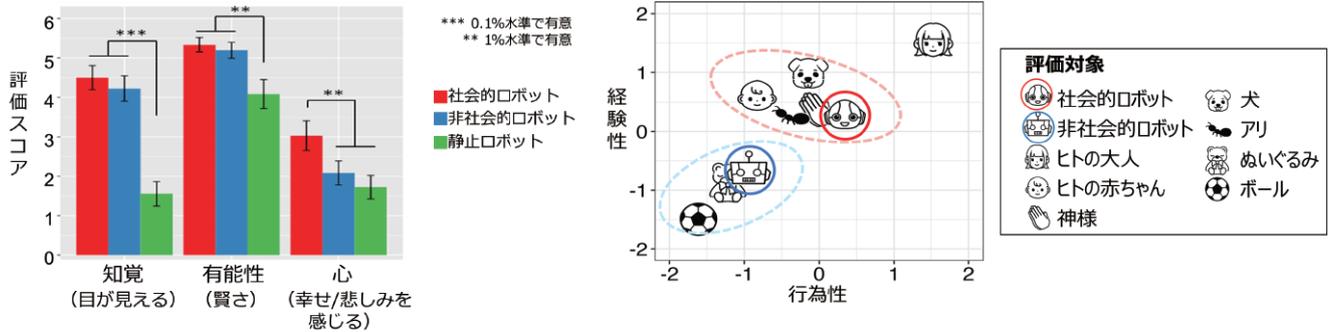
5歳児112名は、4条件のいずれかに参加(各条件28名)。子どもはロボットと対面し、その後分配課題に取り組んだ。



(b) 分配課題の結果

社会的ロボットの前では、相手に多くのシールを分配する傾向が見られた。

図2 実験概要



(a) 子どもは社会的ロボットに対して、非社会的ロボットや静止ロボットよりも心を強く感じる

(b) ロボットを含む多様な対象への心の感じ方

図3 子どもがロボットの機能に応じて感じる印象の比較

いない場合と行動は変わらず、他者にはあまりシールを分けようとしませんでした。これらの結果は、ロボットとの社会的インタラクションの経験が、5歳児の利他的行動を促進することを示唆しています。子どもは社会的ロボットのの前では、見られていることを気にして行動を変えるのです。

ロボットに心を感じる

子どもの行動に影響を与えるロボットの特性を明らかにするため、ロボットが子どもにどのような印象を与えるのかを調べました。5歳児は、社会的ロボット、非社会的ロボット、静止ロボットと接した後、「ロボットは物を見ることができるか(知覚)」「ロボットは賢いか(有能性)」「ロボットは幸せや悲しみをを感じるか(心)」という特性について尋ねられました。各質問では、「とてもそう思う」から「全くそう思わない」までの7段階で評価してもらいました。

その結果、5歳児は、知覚と有能性については、社会的ロボットと非社会的ロボットのいずれにも高い評価がされましたが、両者の間に有意な差はみられませんでした。一方、心に関しては、5歳児は社会的ロボットに対して、非社会的ロボットや静止ロボットよりも、心を強く感じていることが明らか

になりました(図3(a))。これは、ロボットとのインタラクションを経験することで、子どもがロボットを幸せや悲しみをを感じる「心ある存在」ととらえるようになる可能性を示唆しています。

子どもは、社会的ロボットに対して、非社会的ロボットや静止ロボットよりも「心がある」と考えていることが実験的に確かめられました。では、ロボットへの心の感じ方が、どのような対象と似ているのかさらに検証を進めました。

大人は、心を「行為性」と「経験性」の2つの軸でとらえていることが示されています⁽⁷⁾。「行為性」は、考えたり計画を立てたりする能力を指し、「経験性」は、嬉しさや空腹といった感情や感覚を持つことを指します。そこで、心の2軸の側面から、5歳児がロボットをどのようにとらえているかを、「ヒトの大人・ヒトの赤ちゃん・神様・イヌ・アリ・ぬいぐるみ・ボール」など多様な対象と比較しました⁽⁸⁾。

その結果、5歳児は、社会的ロボットに対して、ぬいぐるみよりも強く心を感じており、ヒトの赤ちゃんや犬、アリといった生物に近い存在としてとらえていることが分かりました(図3(b))。一方、非社会的ロボットには、ぬいぐるみと同じような心の感じ方がなされていることが分かりま

した。

同様の調査を大人にも実施したところ、社会的ロボットと非社会的ロボットの区別は小さく、どちらもぬいぐるみなどの無生物に近いものとしてとらえられる傾向がみられました。大人は社会的ロボットに心を感じにくくなっており、幼い子どものほうが、ロボットに心を強く感じていることが明らかになりました。

ロボットを活用した未来の幼児教育

本稿では、社会的ロボットが子どもの自律的な学びに寄り添う学習コンパニオンとして有用である可能性について、新たに明らかになってきたことを解説しました。こうした知見は、AIを活用した幼児教育の設計指針における重要な基盤となることが期待されます。近い将来、ロボットは幼児教育を支える学習コンパニオンとして、私たちの生活に浸透していくでしょう。子どもへの教育的効果を高めるには、ロボットを子どもがどのようにとらえ、受け入れるのかを明らかにすることが重要です。

今後の展望としては、子どもの学習や発達のメカニズムに関する科学的理解をさらに深め、学習コンパニオンロボットなどを

ロボットはVstone社製のSota



図4 ロボットが子どもの好みに合ったお薦めの絵本を案内するシステム「びたりえタッチ」

用いた子どもが学びやすい支援手法を考案したいと考えています。特に、発達障がいや難聴などのさまざまな特性を持つ子ども、そして幼少期に逆境的な出来事を経験した子どもたちの理解も欠かせません。例えば、自閉スペクトラム症の子どもは、ヒトよりもロボットに親しみを感じやすいとの報告があり、そうした子どもとのかかわり方も今後の重要な課題です。さらに、子どもとの長期的なかかわりも、学習を支えるうえで重要な要素です。

こうした知見を踏まえて、子どもが学びやすいかかわり方や適切な支援方法を設計することで、AIを活用した幼児教育の充実につながることを期待されます。現在は、社会的ロボットを活用し、子どもの好みや発達段階に応じて個別最適化した絵本を推薦するAIシステム「びたりえタッチ」の研究を進めています⁽⁹⁾(図4)。さらに、社会的ロボットと絵本の感想を音声対話するシステム開発も進めており、子どもの絵本読み活動の活性化に向けた効果的な支援技術の創出をめざしています。

今後も、子どもとロボットのかかわりの検証を通じて子どもの学習メカニズムへの

理解を深めながら、学習コンパニオンとしてロボットを活用した幼児教育支援に寄与することをめざしていきます。

参考文献

- (1) Y. Okumura, Y. Kanakogi, T. Kobayashi, and S. Itakura: "Ostension affects infant learning more than attention," *Cognition*, Vol. 195, 104082, 2020.
- (2) 奥村・小林・大嶋: "ことばの発達, 日本語と英語で何が違う?," *NTT技術ジャーナル*, Vol. 28, No.9, pp. 21-25, 2016.
- (3) Y. Okumura, Y. Kanakogi, T. Kanda, H. Ishiguro, and S. Itakura: "The power of human gaze on infant learning," *Cognition*, Vol. 128, No.2, pp. 127-133, 2013.
- (4) Y. Okumura, Y. Kanakogi, T. Kanda, H. Ishiguro, and S. Itakura: "Can infants use robot gaze for object learning? The effect of verbalization," *Interaction Studies*, Vol. 14, No.3, pp. 351-365, 2013.
- (5) S. Grueneisen and F. Warneken: "The development of prosocial behavior: From sympathy to strategy," *Current Opinion in Psychology*, Vol. 43, pp. 323-328, 2022.
- (6) Y. Okumura, T. Hattori, S. Fujita, and T. Kobayashi: "A robot is watching me!: Five-year-old children care about their reputation after interaction with a social robot," *Child Development*, Vol.

94, No.4, pp. 865-873, 2023.

- (7) H. M. Gray, K. Gray, and D. M. Wegner: "Dimensions of mind perception," *Science*, Vol. 315, No.5812, p. 619, 2007.
- (8) 池田・奥村: "心の知覚の発達," 日本赤ちゃん学会第24回学術集会, 2024.
- (9) https://www.rd.ntt/cs/team_project/icl/cd/research_innovative10.html



奥村 優子

子どもを研究することは、思いがけない発見に満ちています。新たな気づきと挑戦の連続の中で、子どもの学びの仕組みを探る基礎研究と、その成果を幼児教育に活かす応用研究に取り組んでいきたいと考えています。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
協創情報研究部
コミュニケーション発達研究グループ



「NTTコミュニケーション科学基礎研究所 オープンハウス2025」開催報告

NTTコミュニケーション科学基礎研究所では、最新の研究成果を多くの方々
に知っていただくイベントとして、2025年5月20～22日の3日間、大阪・京橋に
あるNTT西日本i-CAMPUS内のQUINTBRIDGEとPRISMを会場に「オー
ペンハウス2025」を開催しました。来場者は完全現地参加型の事前予約制とし、
1078名（昨年比2割増）の方々にご来場いただきました。本稿ではその開催模様
を報告します。

キーワード：#情報科学, #人間科学, #AI

| | | | |
|------|-------|------|-----|
| くまの | しろう | わたなべ | なおみ |
| 熊野 | 史朗 | /渡邊 | 直美 |
| たなか | ゆうすけ | こうむら | たくや |
| 田中 | 佑典 | /上村 | 卓也 |
| しぶえ | りょうへい | はやし | さだお |
| 渋谷 | 遼平 | /林 | 定雄 |
| ふじなが | ひろゆき | あおやま | かずお |
| 藤永 | 裕之 | /青山 | 一生 |
| みやうち | みき | | |
| 宮内 | 美樹 | | |

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

オープンハウスの概要

NTTコミュニケーション科学基礎研究
所（CS研）は創立以来、人と人、あるい
は人とコンピュータの間の「ここまで伝
わる」コミュニケーションの実現をめざし、
時代を先取りした基礎研究に取り組んでい
ます。その最新成果を「見て、触れて、感
じていただく」イベントとして、例年5月
末から6月上旬にNTT京阪奈ビル（京都
府精華町）にて「NTTコミュニケーション
科学基礎研究所 オープンハウス」を開
催してきました。2020年から2022年の3年
間は、新型コロナウイルス感染症対策とし
て現地開催を取りやめ、特設ウェブサイト
上で講演・展示動画を公開するオンライン
開催としました。2023年には、関西主要駅
からのアクセスが良いNTT西日本のオー
プンイノベーション施設「QUINTBRIDGE」
（大阪市）を会場に、4年ぶりに現地での
展示開催を再開しました。翌2024年には、
隣接する「PRISM」も利用し、2019年以來
となる現地での招待講演や研究講演を含む
フル現地開催を実現しました。そして2025
年は、昨年に引き続き「QUINTBRIDGE/
PRISM」を会場として5月20～22日の3日
間、フル現地開催を行いました。本年は「知
の交響で奏でる わたしたちの未来」をテー
マに、招待講演1件を含む講演6件（計11
回）を「QUINTBRIDGE」で、研究展示
20件を「PRISM」で実施しました。昨年同
様にスロット制の事前予約方式を採用し、

来場者は昨年比約2割増の延べ1078名とな
りました。講演では、研究講演（5件）を
各2回実施するという新たな試みを行い、
新設した自由席も奏功して、延べ1037名（1
講演平均94名）の方々にご聴講いただき
ました。

招待講演

招待講演では、慶應義塾大学 名誉教授・
一般社団法人 今井むつみ教育研究所 代表
の今井むつみ先生に「人はどのように知識
を構築していくのか—記号接地とアブダク
ション」と題する講演をいただきました（写
真1）。「生成AI（人工知能）がスマートフォ
ンやクラウドサービスを介して生活インフ

ラの一部となりつつある現在、AIは私たち
の知性にどのような影響を与えるのか」こ
の根源的な問いに対し、今井先生は「AIと
人間の思考・学習の違い」を鍵に据え、言
語習得研究の知見を踏まえた議論を展開さ
れました。

講演の第1のキーワードは「記号接地問
題」です。1990年代にカナダの認知科学者
S. Harnadが提起したこの問題は、身体を
持たないAIが外界の対象を言語記号に結
びつけられず、真の意味理解に至らないと
いう課題を指摘します。「人間の子どもは
「ミルク」「パン」などの語を五感全体で経
験しながら対象に接地させますが、AIは別
の記号の連鎖としてしか定義できず、言語
の海を漂流し続ける」この対比が示されま



写真1 招待講演（今井むつみ先生）

した。

第2のキーワードは「アブダクション推論（仮説形成推論）」です。子どもは獲得した語を語彙全体の中に位置付け、範囲を推論しながら意味体系を構築します。この過程は科学者が実験と修正を繰り返しながら仮説を洗練する営みと同型であり、人間の知識創造の源泉であると説明されました。対照的に、多数のデータから帰納統計的にパターンを抽出する現在のニューラルネット型AIは、因果メカニズムを仮定するアブダクションを欠き、新たな知識の発見や概念の枠組み転換が難しいと指摘されました。

さらに今井先生は、アブダクション推論に不可避の「誤り」とその修正プロセスこそが、人間の柔軟で創造的な学習を支えると述べられました。AIが汎用的で自律的な学習を実現するには、記号接地問題の解決と、どの知識をいつ活用するかを判断する「フレーム問題」の克服が重要であり、これらは人間理解とAI開発双方の核心課題になるとまとめられました。

本講演は、生成AI時代における言語・認知研究とAI技術の接点を提示し、多様な参加者から活発な質疑が寄せられました。講演映像は後述の研究講演と同様に当オープンハウスの特設ウェブサイト⁽¹⁾で約1年間公開予定です。

研究講演

研究講演では、CS研の最新成果の中から注目度の高い5テーマを選びました。各講演後には活発な質疑が行われ、高い満足度（全講演平均90%以上）が来場者アンケートでも裏付けられました。

- ① 「身体に根ざした共感の科学から、つながる家族のウェルビーイングへ～身体を介した共感メカニズムの解明および身体性情報伝送技術を活用した離れた家族のつながり支援～」と題した村田藍子（人間情報研究部）による講演では、表情や心拍などが無意識のうちに相手と同調することで生まれる情動的共感に注目し、遠隔家族間での情動の共有を実現する触覚伝送デバイス



写真2 研究講演（村田 藍子）



写真3 研究講演（千葉 祐弥）

- を紹介しました（写真2）。離れて暮らす家族のQOL（Quality of Life）向上に向けた応用が期待されます。
- ② 「気の利く対話AIのための『空気を読む』技術～マルチモーダル情報を用いた対話の場・関係の理解とインクリメンタル応答生成～」と題した千葉祐弥（協創情報研究部）による講演では、対話場面の雰囲気や相互関係を、言語・声色・表情といったマルチモーダル情報から推定し、会話の流れに合わせて適切なタイミングで気の利いた応答を生成する新しい対話エージェントの試みを紹介しました（写真3）。日常生活の中でさまざまな情報から場面

- を理解し、人を身近にサポートする対話システムの実現が期待されます。
- ③ 「音の聴き方を自ら学ぶAI～自己教師あり学習によるさまざまな音の汎用表現学習技術から、大規模言語モデルを活用した音の理解の最前線へ～」と題した仁泉大輔（メディア情報研究部）による講演では、大量の環境音を自己教師ありで学習して多様なタスクへ転用可能な汎用音響表現を獲得し、さらに大規模言語モデルと連携させることで「音の意味理解」へと拡張する最新の研究を紹介しました（写真4）。日常生活音による健康状態のモニタリングなど、幅広いサービスへの応用が期

待されます。

- ④ 「データの代わりに隠れた未知の知識を発見する～無限の仮説を考慮して生体現象を解釈するAIモデルと高信頼メディカルヘルスケアへの展望～」と題した中野允裕（メディア情報研究部）による講演では、無限個の仮説を扱えるノンパラメトリックベイズ法に基づき、生体現象データを統合解析して未知の因果構造を抽出する方法を紹介しました（写真5）。関係データ解析・系統解析・軌跡推論の3つの応用事例を示し、高信頼なメディカルヘルスケア実現へ道を拓く手法を提示しました。
- ⑤ 「ロボットに心を感じる子どもたち～未来の幼児教育を支える学習コンパニオンロボット～」と題した奥村優子（協創情報研究部）では、幼児が社会的ロボットとかわる実験を通じて、ロボットの視線や呼びかけが子どもの利他的行動や記憶を促進することを示しました（写真6）。ロボットが人の生活に浸透するこれからの時代において、学習コンパニオンロボットがどのように受け入れられ、幼児教育にどのような影響をもたらすかという新たな視点を提案しました。

研究展示

今年のオープンハウスでは「データと学習の科学」「メディアの科学」「コミュニケーションと計算の科学」「人間の科学」の4カテゴリに関する最新成果20件を展示しました。各展示は現地会場において研究員によるパネルやディスプレイを用いたインタラクティブな説明を実施し、その中でも12件に関してはより直感的に研究を理解していただくためのデモを実施しました（写真7）。以下は、各カテゴリの展示名です。

■データと学習の科学（6件）

- ・ 多重の思考を相互に協調させながら学習するAI
～決定木の重ね合わせ学習に基づく透明性の高いデータ解析～
- ・ 少ないデータで高精度な空間予測を実



写真4 研究講演（仁泉 大輔）



写真5 研究講演（中野 允裕）



写真6 研究講演（奥村 優子）

現します

～ニューラルガウス過程に基づくメタ学習技術～

- ・ラベルなしデータだけで新環境に適応するAI

～ソースフールドメイン適応の理論的解釈～

- ・超低消費電力を達成する光AIの実現に向けて

～特殊な構造を考慮した光ニューラルネットワークの訓練法～

- ・光と物質の相互作用を結び数理～非可換調和振動子の数理が示す新たな統一性～

- ・ノイズがあっても高精度な量子計算を実現！

～人工ノイズでノイズを整えて量子計算の精度を高める技術～

■メディアの科学（4件）

- ・空中に触感を生み出す

～集束超音波を用いた非接触な触感の再現～

- ・騒がしい環境で録音音声をクリーンな音声に変換

～多ストリーム拡散モデルのアンサンブル推論による音声強調～

- ・リアルタイム音声変換を用いたライブ配信

～高音質で低遅延なリアルタイム音声変換～

- ・データ圧縮の効率を高めます

～複数の符号木による汎用的で高効率な可逆圧縮符号化～

■コミュニケーションと計算の科学（4件）

- ・社会的ロボットが見ていると良い子にふるまう

～ロボットとのやり取りが幼児の思いやり行動を促進する～

- ・第二子の言語発達の緩やかさは小学生で解消する

～年上きょうだいの有無が子どもの言語発達に及ぼす影響～

- ・過不足のない忠実な機械翻訳を実現します

～単語対応を用いた大規模言語モデル機械翻訳の選好最適化～

- ・自分を取り巻く人間関係の変化をSNS



写真7 会場の様子

でとらえる

～Social Orbit—SNSログを用いた関係変化の可視化法～

■人間の科学（6件）

- ・手を引くAIが街をご案内

～牽引力覚デバイス「ぶるなび4」の社会実装に向けたコラボ実現～

- ・入院中の赤ちゃんと家族のつながりを支援します

～NICUの新生児と家族をつなぐ身体性オンライン面会～

- ・目でとらえる打撃の真髄

～プロ野球選手の視線データが明かす一流打者の視線移動戦略～

- ・身体運動に宿る“選球眼”

～身体を制御する能力が迅速な意思決定能力を支える～

- ・集中力を高める特殊な光

～ipRGCを変化させるステルス光を用いた心理状態の改善～

- ・休日の寝坊、やはり問題あり！？

～睡眠パターンに現れる睡眠負債が反応速度に与える影響～

オープンハウスを終えて

2025年のオープンハウスでは、昨年に引き続き事前予約制を導入し、安全性と快適性に配慮しながらも、会場配置の刷新、講演回数数の増加、自由席の導入など踏襲と挑戦のバランスを図ることで、より多くの方々にご来場いただきました。CS研の研究員

にとっても、多彩な経歴を持つ来場者の皆様と直接会話し、自由闊達なディスカッションを行えたことは大変有意義でした。また、QUINTBRIDGEのメインステージでは、会場全体を活用したレイアウトにより、聴講の方々が講演者を間近に感じつつ質疑応答を交わすことができました。PRISM会場でも、20件の展示をコンパクトにまとめたことで、効率的にご覧いただけたと感じています。本イベントの開催にご協力くださった皆様に、心より御礼申し上げます。

■参考文献

- (1) <https://www.kecl.ntt.co.jp/openhouse/2025/index.html>



(左から) 林 定雄 / 宮内 美樹 / 田中 佑典 / 上村 卓也 / 熊野 史朗 / 渡邊 直美 / 渋江 遼平 / 藤永 裕之 / 青山 一生

今後ともCS研の研究にご注目ください。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
企画担当



主役登場

瞳孔径から読み解く心の動き

鈴木 雄太 Yuta Suzuki

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
人間情報研究部
感覚表現研究グループ



私たちは、外界から感覚器をとおしてさまざまな情報を得ています。例えば視覚では、目から入った光が網膜を経て脳に伝えられて処理されることで、世界を「見る」という体験が成り立っています。視覚科学の発展により、そのメカニズムは徐々に明らかにされてきましたが、いまだ十分に解明されていない機能や神経の仕組みが残されています。NTTコミュニケーション科学基礎研究所ではAI（人工知能）を含めた多様なアプローチを活用しながら、心まで伝わる深いコミュニケーションを支える人間の知覚・認知とその背後にある脳のメカニズムを明らかにすることをめざして、日々研究を進めています。

私たちは、瞳孔の大きさなどの目から得られる生体信号をとおして、脳の働きを読み解こうとする研究を行っています。瞳孔径は周囲の明るさに応じて変化し、同時に感情や注意、判断といった、さまざまな心の状態を反映して変化していることが知られています。こうした目の情報を使った研究を私たちは「アイメトリクス研究」と呼んでいます。近年では、高性能な小型センサ技術の進展により、メガネ型のデバイスを装着するだけで視線や瞳孔径の情報を簡便に取得できるようになってきました。

私たちのアイメトリクス研究では、瞳孔径の変化を通じて人間の認知過程を読み取る「マインドリーディング」に取り組んでいます。私がこれまでに行った研究では、

2つの音が交互に繰り返される音列に対して、聞こえ方が時間とともに自然に切り替わる現象（知覚交代）に注目し、知覚交代のタイミングで瞳孔がどのように変化するかを調べました。聞こえ方の変化は本人にしか分からない主観的な体験ですが、私たちは知覚交代が頻繁に生じる数10秒前から、すでに瞳孔径が大きくなっていることを発見しました。つまり、知覚交代の前から、脳の中ではその準備が進んでいて、その活動が瞳孔径に反映されていると考えられます。このように、瞳孔径をとおして脳における情報処理の状態（内部状態）を知ることによって、音の聞こえ方に限らず、これから起こる意識的な体験を予想したり、自分がどのような状態であるかを事前に知ることによって、その後の行動を決めたりするような手掛かりが得られるかもしれません。

また、瞳孔径から脳活動を読み取るといったアプローチに加えて、光を使って集中力の持続や眠気の軽減を促すといった能動的な介入を行う研究を始めています。私たちがこの研究で注目しているのは、内因性感受性網膜神経節細胞（ipRGC）です。ipRGCは、従来知られていた錐体・桿体細胞に次ぐ「第3の光受容細胞」とも呼ばれ、短波長光（青緑色）に対してよく反応し、網膜に存在しながら、概日リズムや睡眠といった非視覚的な生理機能に関与することが知られています。近年の研究では

ipRGCの刺激に伴い、脳の前頭前野を含めたさまざまな領域で活性がみられることが明らかになってきました。ipRGCは色を感じる錐体とは独立に光を受感するため、視覚的には同じ色に見える光でも、その波長成分を制御することでipRGCへの活性強度だけを変えることが可能です。私たちの最近の研究では、作業記憶課題の実施中にipRGCを活性させる光を背景に提示することで、課題のパフォーマンスが向上することが確認されました。さらに、課題中の主観的な疲労感や眠気の軽減がみられることを発見しました。この知見をうまく活用すれば、オフィスや教育環境における照明のipRGC活性をうまく制御することによって、効率良く作業ができる環境づくりにつながるかもしれません。また、他の生体情報と組み合わせることで、より適切な睡眠を促す仕組みなどに応用できる可能性もあります。

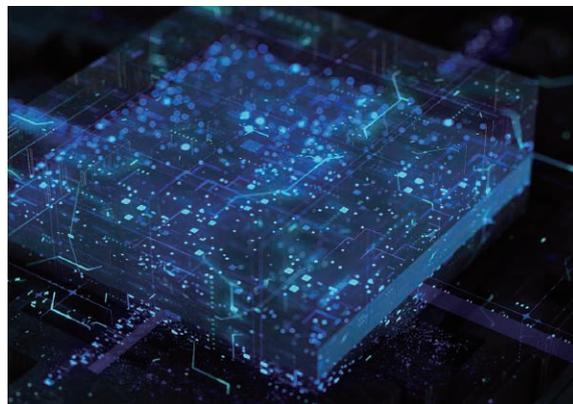
アイメトリクス研究によって多くの脳のメカニズムが明らかにされてきましたが、いまだに解き明かされていない課題も数多く残されています。アイメトリクス研究が進むことで、主観的な体験をリアルタイムに他者と共有したり、自分でも気付いていない内的な状態をフィードバックするような技術や適切な介入技術の実現により、人と人とがより深く理解し合い、豊かなコミュニケーションを築いていける未来に貢献できることを願っています。



新たなデジタル社会を切り拓く「光電融合」： 世界で開発が加速 ー前編ー

デジタル社会の急速な進展に伴い、データ処理量は急激に増加している中で、従来の電気信号だけに依存した情報処理技術は物理的限界に直面しています。光と電気の特性を融合させることで通信・コンピューティングの高速化と低消費電力化を同時に実現する「光電融合技術」が注目されています。国内外で注目されている背景、その主要技術と期待されている利用シーンについて解説します。

キーワード：#光電融合、#シリコンフォトリソグラフィ、#コパッケージドオプティクス(CPO)



はじめに

デジタル社会の急速な進展に伴い、データ処理量は指数関数的に増加し続けています。生成AI（人工知能）の普及、ビッグデータ活用、IoT（Internet of Things）サービス・クラウドサービスの拡大、5G（第5世代移動通信システム）/6G（第6世代移動通信システム）への移行など、あらゆる領域でデータ処理の高速化・大容量化が求められる中、従来の電気信号だけに依存した情報処理技術は物理的限界に直面しています。従来の電子回路では配線密度や発熱などの物理的制約が顕在化し、特にデータセンタでは電力消費と冷却コストが大きな課題になっています。これらの課題を解決する革新的アプローチとして注目されているのが「光電融合技術」です。

前編では、光と電気の特性を融合させることで通信・コンピューティングの高速化と低消費電力化を同時に実現する光電融合技術について、注目されている背景、光電融合技術とは何か、主要技術を解説します。後編では、主要プレイヤーの動向と、光電融合の課題を整理し、今後を展望します。

光電融合が注目されている背景

■データ量の増加と電力消費

インターネット、通信網等のデジタル化

を支える基盤インフラであるデジタルインフラは、データ爆発とエネルギー消費という2つの課題に直面しています。IDC（International Data Corporation）社の予測によれば、世界のデータ生成量は2025年までに175 ZB（ゼタバイト、つまり175兆ギガバイト、3年前の2022年の2倍程度）に達するとされています⁽¹⁾。増大するデータを処理するデータセンタの電力消費量は、国際エネルギー機関（IEA）の予測では2030年までに9450億 kWhに達し、世界の電力消費量の約3%を占めるとされています⁽²⁾。

国内では、電力広域的運営推進機関（2025年1月公表）が取りまとめた今後10年間の電力需要の予測によると（図1）、人口減少や節電等の影響はあるものの、データセンタや半導体工場の新増設等による電力需要の増加によって、全体の電力需要も増加傾向となる見込みです。具体的には、データセンタや半導体工場の新増設を見込むエリアの拡大等に伴い、取りまとめた最終年度（2034年度）における全国の需要電力量は8524億 kWhとなり、2024年度比で約6%の増加の見込みです。

従来の電気信号による情報処理では、配線の抵抗による電力損失や信号遅延が避けられず、ムーアの法則に基づく半導体の微細化による性能向上も物理的限界に近づいています。特に、チップ間・ボード間の電気配線がボトルネックとなり、システム全体の性能向上を阻害しています。

光電融合技術は、電気信号の処理能力と光信号の高速・低損失伝送特性を組み合わせることで、これらの課題を根本的に解決する可能性があります。特に、以下の点で従来技術に対する優位性があります⁽³⁾。

- ① 伝送速度：光信号は電気信号に比べて高周波での損失が少なく、テラビット級の高速伝送が可能になります。
- ② 消費電力：光配線は電気配線に比べて距離当りの電力消費が少なく、長距離伝送での省電力効果が大きいです。
- ③ 伝送密度：波長多重技術により、単一の物理媒体で複数の信号を同時に伝送可能です。

つまり、電気信号に比べて広帯域・低損失・低遅延の特性を持ち、長距離かつ大容量の情報伝送に強みがあります。これを近距離（チップ間・チップ内）にも応用することで、システム全体の性能向上が期待されています。

■グローバル市場における開発競争

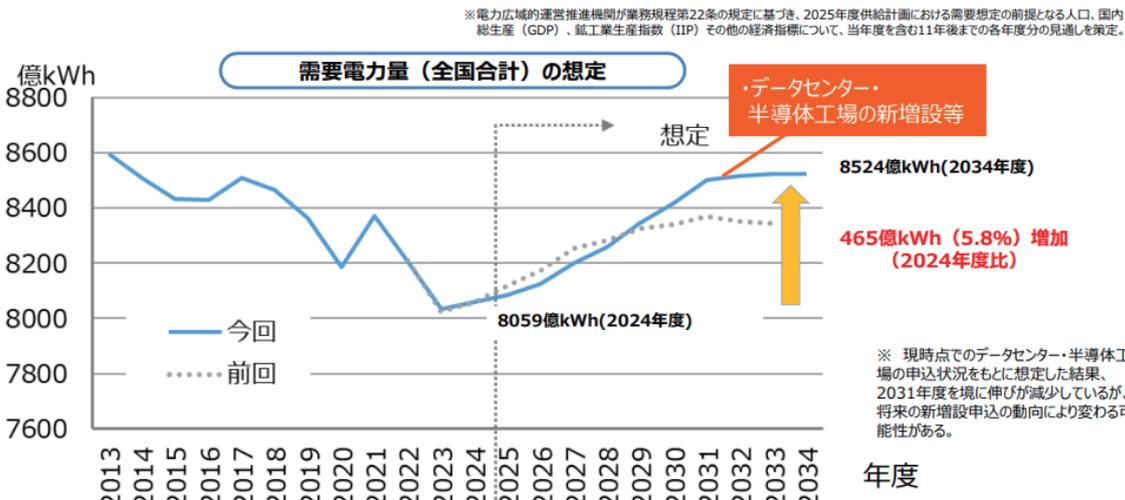
光電融合は、先進半導体開発における重要技術として、次世代半導体技術の中核にあります。その中核技術であるシリコンフォトリソグラフィ技術や光I/Oインタフェースの開発が進行中です（これらの技術の詳細は後述します）。経済産業省・NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）を中心に研究開発支援が行われており、「光電融合デバイスの社会実装」が国家戦略の一環となっています。

国際競争力の強化という観点で、米国、

欧州、中国でも同様に、光電融合技術を活用した次世代情報インフラの開発が加速しています。図2は、光配線技術に関連した日本、米国、欧州の国・民間プロジェクトを示しています。米国では、DARPA (Defense Advanced Research Projects

Agency) 等が光を使ってチップ間の接続性能を大幅に改善するプロジェクトを遂行しています。欧州では、光技術に関する技術プラットフォーム Photonics21がフォトニクス技術の戦略策定や研究開発を欧州委員会と連携しながら実用化に向けて推進し

ています。また、中国では、国家情報光電子イノベーションセンタが光電融合技術の研究、実用化を牽引する中核機関として、シリコンフォトニクスを含むフォトニクス、集積回路、通信インフラ技術を積極的に推進しています。



出典：経済産業省資源エネルギー庁、「今後の電力需要の見通しについて」、2025。
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/085_06_00.pdf

図1 需要電力量 (全国合計) の想定

光配線技術に関連した各国の国・民間プロジェクト

<https://arpa-e.energy.gov/technologies/programs/enlightened>

| 機関・課題名 | 内容 | 総額 | 2014 | 2016 | 2018 | 2020 | 2022 | 2024 | 2026 | 2028 | 2030 |
|-------------------------------------|---|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 米 DOE, ARPA-e ENLITENED | 光集積技術により情報伝達を電気から光に変え、データセンターのエネルギー効率を改善。 | \$25M | | | | | | | | | |
| 米 DOD, DARPA PIPES | 光を使ってチップ間の接続性能を大幅に改善。(100 Tbps, 1pJ/bit) | \$45M | | | | | | | | | |
| 米 DOD, DARPA LUMOS | 異種材料集積によって多数のレーザを集積し、光ニューロモルフィック計算などに応用 | \$70M | | | | | | | | | |
| 米 HPE The Machine | メモリドリップコンピューティング+光接続 | - | | | | | | | | | |
| 欧 Microsoft Optics for the Cloud | クラウドコンピューティングへの光技術の適用とそれによる新しい応用の開拓 | - | | | | | | | | | |
| 日 NEDO 光工実装事業 | チップ間等のデータ通信の光配線技術とその実装技術の基礎技術開発 | 228億円 | | | | | | | | | |
| 日 NTT IOWN | 光を中心とした革新的技術を活用したネットワーク・情報処理基盤 | - | | | | | | | | | |

日本がいち早く、プロジェクトを組成し、研究開発に着手、技術で先行(技術研究組合が実施)

出典：経済産業省、第4回 半導体・デジタル産業戦略検討会議「デジタル産業政策の新機軸」、p.66, 2021。
https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/semicon_digital/0004/04.pdf

図2 光配線技術に関連した各国の国・民間プロジェクト (経産省資料)



表 期待される光電融合技術のユースケース

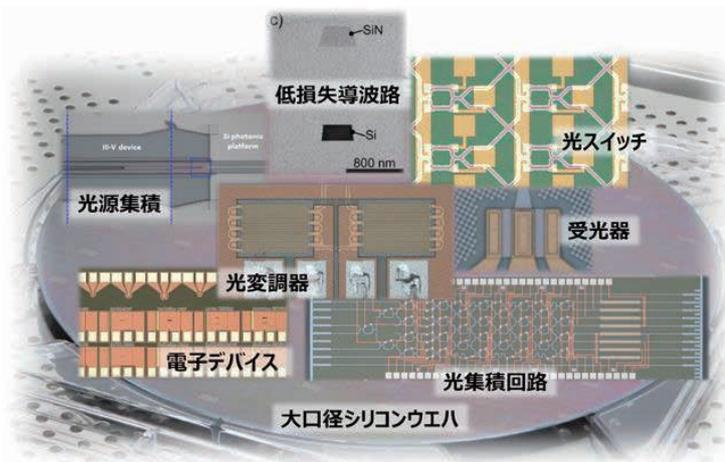
| 分野 | 背景・課題感 | ユースケース | 光電融合がもたらす効果 |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| データセンタ・通信インフラ | データトラフィックの爆発的増加を背景に消費電力の削減が急務となっている | 光インターポーザやシリコンフォトニクスを活用した高速・低消費電力の光I/O | 帯域幅の拡大 (Tbit/s級), レイテンシの低減, 省スペース化 |
| スーパーコンピュータ・HPC (High Performance Computing) | スパコン内部の膨大なデータ通信を高速・省エネで処理する必要性が高まっている | ノード間やプロセッサ間通信の光接続 | 演算処理のスケーラビリティ向上, エネルギー効率の改善 |
| AIチップ・エッジコンピューティング | AI推論のリアルタイム性やエネルギー効率の必要性が高まっている | 光電融合型AIアクセラレータ (光ニューラルネットワークなど) | 光信号処理による超低遅延推論, 省電力演算 |
| 自動運転・モビリティ | 自動運転システムでは大量のセンサデータを瞬時に処理する必要がある | LiDARの高精度化・小型化, 車載ネットワークの高速化 | センサの高分解能化, リアルタイムデータ処理 |
| 量子通信・量子コンピューティング | 量子情報処理のためには光子ベースの信号伝送が必須である | フォトニック量子チップ, 量子暗号通信ネットワーク | 量子ビットの伝送損失の最小化, 長距離通信への応用 |
| バイオ・医療機器 | 生体情報を非侵襲かつ高精度に計測したいニーズ | 光センサを内蔵したウェアラブルデバイスや診断装置 | リアルタイムかつ高精度なバイタルセンシング |
| 宇宙・防衛用途 | 長距離・高セキュリティ通信, 過酷環境への耐性 | 光通信衛星, レーダ・センサシステム | 小型・軽量・高耐久な通信システム構築 |

出典：公表情報より情報通信総合研究所作成。

日本では、経済産業省が「次世代デジタルインフラの構築」プロジェクトにおいて、データセンタ内の電気配線を光配線に置換する革新的な光電融合技術を中核として位置付け、理論上サーバ内部の配線消費電力を最大100分の1にまで削減しようと考えています。「エネルギー白書」では、電気信号と比べて処理遅延の少ない光信号をデータ処理や通信に使う光電融合技術や、ペロブスカイト太陽電池は技術面で日本は世界をリードしていると分析しており、量産体制の構築や市場開拓が求められるとしています⁽⁴⁾。

■用途の広がり

光電融合技術は、表のとおり、通信・データセンタにとどまらず、自動運転、医療機器、宇宙などに応用範囲が広がっていくことが期待されており、次世代インフラの課題を解決する技術として注目されています。具体的な事業者動向等については、後編で紹介します。



出典：産業技術総合研究所

https://www.aist.go.jp/aist_j/magazine/20240417.html

図3 シリコンフォトニクスによるさまざまな光部品の一括集積

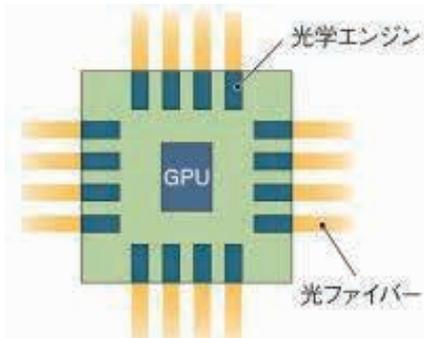
光電融合とは

光電融合技術は、光信号と電気信号の回路を融合する技術であり、電気信号処理の柔軟性と光信号伝送の高速性・低損失性を組み合わせたものです。具体的には、次の

要素技術から構成されています。

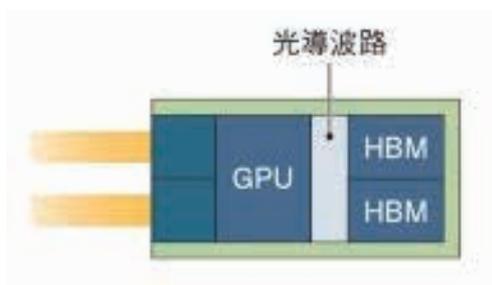
■シリコンフォトニクス技術

シリコンフォトニクスは、シリコン (Si) 基板上に光回路と電子回路を集積する技術です。図3のとおり、半導体で使われるSi基板上に、光を電気に変換する光集積回路 (PIC: Photonic Integrated Circuit) や



出典：日経エレクトロニクス，2025年6月号の図を一部転載。
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/mag/ne/18/00128/00008/>

図4 CPO



HBM (High Bandwidth Memory)：3次元積層技術を用いた高性能メモリ

出典：日経エレクトロニクス，2025年6月号の図を一部転載。
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/mag/ne/18/00128/00008/>

図5 光I/O技術

光導波路を形成します。Siを使うため、半導体製造プロセスの技術やノウハウを活かやすく、低コスト化や大量生産につなげやすい利点があります。

産業技術総合研究所が開発したシリコンフォトニクス光スイッチは、1.25億 Gbitのデータを1秒間で伝送でき、従来の電気スイッチと比較してエネルギー効率が10倍以上高くなっています⁵⁾。

■CPO

CPO (Co-Packaged Optics) は、電子チップ (ASIC, CPU, GPU など) と光学コンポーネントを同一パッケージ内に集積する技術です (図4)。従来のプラグイン型光トランシーバ (電気信号と光信号を相互に変換し、光ファイバを介して通信を行うためのデバイス) と比較して、3つの利点があります。第1に、電気配線の短縮

により信号損失が低減すること、第2に、電気-光変換の効率向上により消費電力が削減されること、第3に、実装密度の向上によりシステムが小型化されることです。

CPOの実装方式には、チップレットベース、シリコンインターポーザベース、有機基板ベースなど複数のアプローチがあり、用途や性能要件に応じて選択されます。

■光I/O技術

光I/O技術は、電子チップの入出力インタフェースに光インターコネクトを直接組み込む技術です (図5)。チップ間通信を電気から光に置き換えることで、3つの効果が期待できます。第1に、ピン数の制約から解放されること (波長多重による並列化)、第2に、距離に依存せず高速通信を実現すること、第3に、消費電力を大幅に削減できること (具体的には1ビット当り

0.1~1 pJ程度) です。

最新の光I/O技術では、シリコンフォトニクスチップレットと電子チップを3次元積層する技術や、電子チップ上に直接光素子を形成する技術などが研究されています。

まとめ

本稿においては、光電融合技術が注目されている背景、光電融合技術とは何かとその主要技術を紹介してきました。

本稿前半でみてきたように光電融合は、電力需要の増加という課題解決手段、通信・コンピューティングの高速化という機能面の向上、ならびに国際競争力の進展という点で期待されています。グローバルに技術開発が進み、今後の市場化に向けた動きがさらに注目されます。

続く後編においては、主要プレイヤーの動向と、光電融合の課題を整理し、今後を展望します。

■参考文献

- (1) IDC：“White Paper, sponsored by Seagate, Data Age 2025: The Digitization of the World from Edge to Core,” 2018.
- (2) <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>
- (3) https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/industrial_restructuring/pdf/023_04_00.pdf
- (4) <https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00749601>
- (5) https://www.aist.go.jp/aist_j/magazine/20210831.html



株式会社情報通信総合研究所
 (左から) 主席研究員 手嶋彩子/
 主任研究員 張 怡

標準化・知的財産の一体的活用の戦略的な取り組みで 知財経営を積極的に推進

NTTドコモは、知的財産（知財）の取り組みである「標準化と知財の一体的活用」の功績が認められ、「内閣総理大臣感謝状」を通信企業としては初めて受賞しました。本件の内閣総理大臣感謝状は、2025年が産業財産権制度140周年の節目にあたることから、産業財産権制度の普及・発展に極めて顕著な功労や功績があった企業などに特別に贈呈されたものです。本稿では、本賞の対象となった「標準化と知財の一体的活用」の取り組みについて紹介します。

キーワード：#標準化、#知的財産、#6G

もりもと あきひと
森本 彰人
つのだ かつり
角田 克典

NTTドコモ

受賞の対象となった「標準化と知財の一体的活用」の取り組みについて

NTTドコモは、モバイル通信技術の国際標準化*¹が加速した3G（W-CDMA：Wideband Code Division Multiple Access）から現行の4G（LTE：Long Term Evolution）、5G（NR：New Radio）に至るまで、世界の主要プレイヤーと連携して国際標準化をリードし、自社で培った最新モバイル技術を利用したビジネスの早期導入を図りつつ、国際標準必須特許*²も確保し、事業で活用していく計画・戦略を長中期で継続し、かつ強化してきています。この活動を通して、NTTドコモは、5Gの国際標準化に関する寄書数（技術提案数）では、国内首位、世界13位（基本仕様であるリリース15では世界10位）となっています。

また、NTTドコモは、経営・事業に関して、国際標準化にはサービス・ブランド・コストの3つの意義があり、「標準化と知財の一体的活用」で取得した国際標準必須特許はこれら3つの意義を戦略的に実現する基盤として必要不可欠と考えています。

なお、コストの観点では、ライセンスによる研究開発投資の回収、事業の知財リスク抑制、製品調達価格の低減などに国際標

準必須特許を活用しており、経営・事業への多面的な貢献を図っています。

「標準化と知財の一体的活用」に関する主な取り組み

■経営戦略：ドコモグループ中期戦略で経営目標として明示

2021年10月に公表された「新ドコモグループ中期戦略」において、「6G時代においても標準化で世界をリードし必須特許を獲得」することを経営目標として掲げ、「標準化と知財の一体的活用」をさらに強化していくことを明確化しています（図1）。

■体制：組織横断的な標準化・知財体制を整備

CTO（Chief Technology Officer）/
CSO（Chief Standardization Officer）

を含む経営層のリーダーシップのもと、R&D部門と知財部門の要員が標準化の成果を国際標準必須特許として組織横断的に漏れなく取得し、経営・事業部門と連携しながら戦略的に活用していくための体制を整備しています（図2）。

■標準化の実績：3GPP標準化をリード

3Gから現行5Gまで世界の主要プレイヤーと連携して国際標準化をリードし、自社で培った最新モバイル技術を利用したビジネスの早期導入を図るため、NTTドコモは国際標準化に精力的に取り組んでいます。NTTドコモの技術者が3GPP（3rd Generation Partnership Project）における、日本初のワーキンググループ議長に就任するなど、日本企業として、モバイル通信の高速化・低遅延・多接続を可能とする多数の要素技術や、全体方式の策定を主

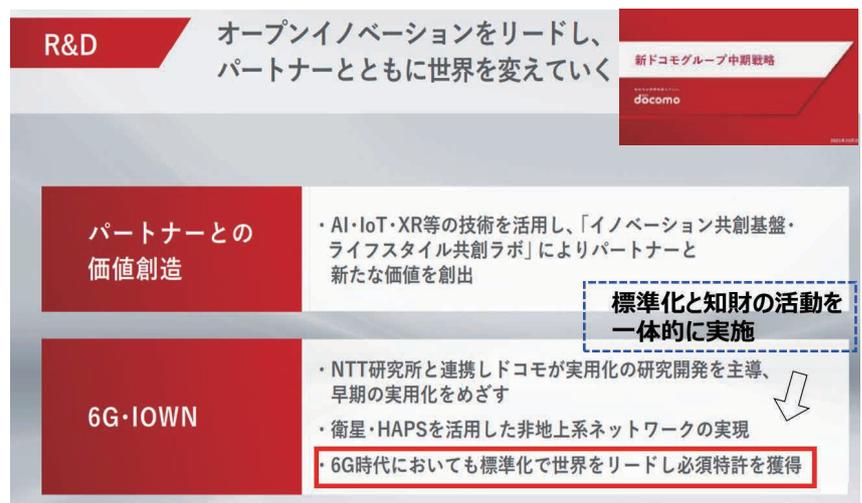


図1 経営戦略：ドコモグループ中期戦略で経営目標として明示

* 1 国際標準化：世界の異なるメーカーの製品間で相互運用を可能とするため、業界内で統一規格を作成する取り組みのこと。
* 2 国際標準必須特許：国際標準規格に準拠した製品の製造・販売やサービスの提供を行う際に必ず実施することとなる特許のこと。

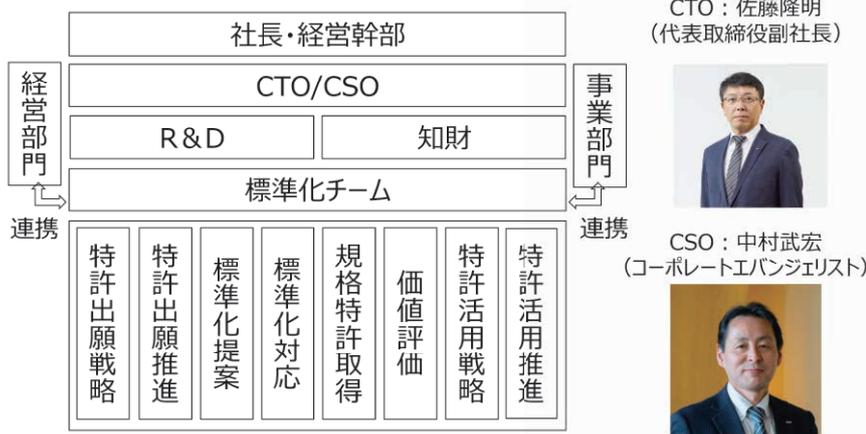


図2 体制：組織横断的な標準化・知財体制を整備

第3世代、第4世代：紫綬褒章を受賞

【3G・4G実用化】

第3世代・第4世代携帯電話システムにおける無線アクセス制御技術の開発

◎受賞理由

以下の開発により、第3世代移動通信システム(3G)、第4世代移動通信システム(4G)の国内外における実現・普及に寄与し、スマートフォンでの快適な通信が可能になるなど、国民生活の利便性向上に貢献しています。

| | | |
|-----------|---|--|
| 3G | 国際標準規格 IMT-2000(W-CDMA)の実現に際し、柔軟な基地局のエリア展開を可能とする新たな無線アクセス制御技術を開発 |  受賞者 尾上誠哉 ※ |
| 4G | 国際標準規格 IMT-Advanced(LTE/LTE-Advanced)の実現に際し、世代が異なる基地局間(3G⇔4G)で移動をした際にも通信の途切れを生じさせない仕組みを開発 | |

※元常務取締役(CTO)、現ITU(国際電気通信連合)電気通信標準化局長

第5世代：5G基盤技術を標準化

【5G実用化】

5G基盤技術の発明で令和5年度全国発明表彰「発明実施功績賞」、「内閣総理大臣賞」受賞※



※受賞者：井伊基之、永田聡、原田浩樹、武田和晃、武田大樹

図3 標準化の実績：3GPP標準化をリード

導し、標準化活動を国際的にリードしています。

上記のモバイル通信の取り組みへの注力の表れとして、「標準化と知財の一体的活用」で創出された3Gから5Gの基本技術は、国際標準必須特許となっており、国産技術の世界的普及・標準化の観点から意義があるものとなっています。

また、日本は地震、台風等の自然災害が特に多い国の1つであり、本知財活動で取得した特許には、緊急速報システム「エリアメール」など日本特有の事情に基づくため、国として国際標準への採用を強く求める必要がある技術に関するものも含まれています。これらの特許も国際標準必須特許

となっており、本知財活動は、日本および事情を同じくする国々における国民の皆様への安心・安全確保の観点でも意義があるものと考えられます。

その結果、3G・4Gでは、携帯電話システムにおける無線アクセス制御技術の開発に関し、NTTドコモ技術者が紫綬褒章を受賞しました。5Gでは、5G基盤技術を国際標準化し、5G基盤技術の発明で令和5年度全国発明表彰「発明実施功績賞」、「内閣総理大臣賞」を受賞しています(図3)。

■知財の実績：世界でも上位の必須特許を保有し、活用

「標準化と知財の一体的活用」に関する知財活動で取得している国際標準必須特許

は、世界全体で利用されるモバイル通信技術にかかわるものであるため、PCT (Patent Cooperation Treaty：特許協力条約) 出願制度*3を活用し、日米欧中を含めた海外最大61カ国でのグローバルな出願・権利化を実施しています。

国際標準必須特許については、特許の権利範囲を標準規格と合致させる必要があるため、標準化完了まで権利化を避ける必要がありますが、完了後は活用のため、早期権利化が重要となります。このため、PCT移行のタイミングを調節し、早期審査制度も適宜活用するなど、権利化タイミングをコントロールしながら、早期の権利取得を図る社内プロセスを整備しています。

そのほか、日本・外国特許庁における円滑な出願審査をサポートするため、モバイル通信の国際標準化や技術の最新動向に関する説明会を開催するなどの取り組みも進めています。

その結果、5Gの標準必須特許シェアにおいて世界有数の地位(通信事業者としては世界首位)を確保しています。高い標準必須特許シェアは、NTTグループの技術力が世界レベルであることの証明であり、投資回収や事業優位性の確保に資するだけでなく、グループ全体のブランド力向上にも寄与しています。

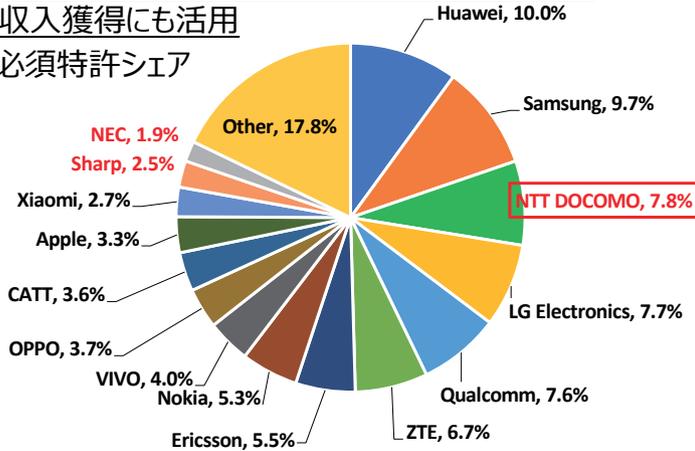
また、NTTドコモが「標準化と知財の一体的活用」の取り組みで取得した国際標準必須特許は、全世界で利用されるモバイル通信の基本方式にかかわるものであり、国内外の通信関連企業の多くが利用しています。

NTTドコモは国際標準必須特許を対象とするライセンス事業を展開し、個別ライセンスまたは特許プールを通じ、公平、合理的、かつ非差別的な条件でライセンス供与を実施しており、海外の大手ベンダとライセンス契約を締結し、ライセンス収入の確保に活用しています(図4)。

*3 PCT出願制度：1つの出願願書を条約に従って提出することによって、PCT加盟国であるすべての国に同時に提出したと同じ効果を与える出願制度のこと。

自社技術を実装した新世代サービスの導入のほか、
知財収入獲得にも活用

・5G必須特許シェア



・公表ライセンス

Samsung, Lenovo, Xiaomi, VIVO, OPPO,
LG Electronics, Sharp, Microsoft, HTC, Huawei, KYOCERA

図4 知財の実績：世界でも上位の必須特許を保有し、活用

今後の展開

モバイル通信技術の国際標準化においては、3Gから5Gに至るまで国際標準必須特許の全体件数が急増しています。6Gにおいてもこの傾向は継続し、世界の主要プレイヤーによる知財取得の競争激化が見込まれています。

また、2025年3月に3GPPにおいて6Gのワークショップが開催され、6Gの標準化に関する議論が開始されています。それに伴い、6Gの国際標準必須特許取得における世界の主要プレイヤーとの競争が始まっています。NTTドコモは、NTTと連携して6G/IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) の研究開発およびサービス提供に向けた取り組みを進めており、次世代の6Gでも標準化で世界をリードし必須特許を獲得できるように、R&Dと知財の標準化チームで丸となって、6Gの標準化・知財を戦略的に進めていきます。



図5 「内閣総理大臣感謝状」を贈呈された前田社長

「内閣総理大臣感謝状」贈呈式の模様

2025年4月18日に「内閣総理大臣感謝状」贈呈式が開催されました。NTTドコモのほか、同じく「内閣総理大臣感謝状」を受賞した旭化成株式会社、株式会社プリDESTONなどの代表者が出席しました。NTTドコモ前田義晃社長が石破茂総理大臣より感謝状を受領しました（図5）。

受賞に際しての前田社長のコメントは下記のとおりです。

『このたびは、「内閣総理大臣感謝状」を賜り誠に光栄に存じます。当社は「テクノロジーと人間力で、明日のあたりまえとなる価値を生み出すこと」を目標に掲げ、「標準化と知財の一体的活用」など、世界中のパートナーとイノベーションをリードする取り組みを進めております。今回の受賞を励みに、次世代の6Gモバイル通信技術の標準化など、明日のあたりまえを生み出し、社会を豊かにするさまざまな挑戦を続けてまいります。』



(左から) 森本 彰人/ 角田 克典

NTTドコモは、NTTと連携して、世界に新しい社会価値を提供する基盤となるIOWN/6Gの実現に向けた取り組みを進めています。標準化と知財は、モバイル通信の最新技術を6Gとして世界に普及させる鍵となるため、関係者一丸で、社会を豊かにする「明日のあたりまえ」を生み出していきたいと思っております。

◆問い合わせ先

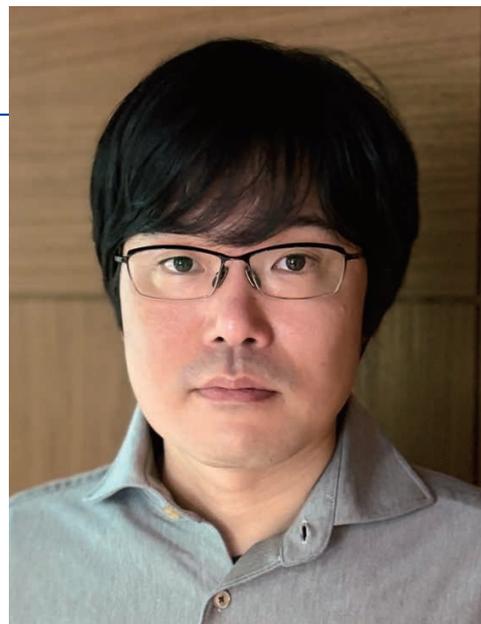
NTTドコモ
知財財産部

NTT社会情報研究所
上席特別研究員

秋山 満昭 Mitsuaki Akiyama

セキュリティに関する人間中心・ オフenseイブ・社会技術的観点から、 認知にかかわる脅威に対抗する 「コグニティブセキュリティ」の確立 に向けて取り組む

最近、ランサムウェアによる情報流出、DDoS (Distributed Denial of Service) 攻撃による交通機関混乱、生成AI (人工知能) 悪用の不正プログラムによる偽契約・転売、SQLインジェクション攻撃や不正アクセスによるデータ改ざん、ディープフェイクを悪用した詐欺等、サイバー攻撃による被害が国内外で発生しています。こうした被害に遭遇しないために、サイバー攻撃そのものを食い止める手段、サイバー攻撃の影響・波及を極小化する技術、人間の心理や行動による防御といった多角的な側面からの対応が必要となります。「人間中心のセキュリティ」「オフenseイブセキュリティ」「社会技術的情報セキュリティ」の観点から研究に取り組んでいる、NTT社会情報研究所 秋山満昭上席特別研究員に、サイバーセキュリティに関する3つのテーマとその共通領域における新たな研究、自分の経験や知識だけを頼りに固執しようと思わず、疑うことやアップデートすること、相互理解、モチベーションの共有を図るという考え方を伺いました。



 「人間中心のセキュリティ」「オフenseイブセキュリティ」「社会技術的情報セキュリティ」の3つのテーマを柱とし、テーマ横断的な研究にも取り組む

現在、手掛けていらっしゃる研究について教えていただけますでしょうか。

ユーザの行動・意思決定や対策に着目するセキュリティ研究「人間中心のセキュリティ (Human-Centered Security)」, 攻撃手法や攻撃者の戦略に着目するセキュリティ研究「オフenseイブセキュリティ (Offensive Security)」, 情報の生成・流通・操作・受容における社会・技術の相互作用に着目するセキュリティ研究「社会技術的情報セキュリティ (Socio-Technical Information Security)」の3つのテーマを柱として研究しています (図1)。

前回 (2022年6月号) では、①Webリホスティングサービス

の脅威発見、②開発者や開発プロジェクトに着目したセキュアなソフトウェア開発、③英語ノンネイティブのフィッシングメール対策、④ユーザスタディの正しい方法論、⑤ソーシャルメディアにおける偽・誤情報の拡散メカニズム分析について紹介しました。これらは、3つのテーマの中で個々に取り組んできた研究ですが、現在は、特に「人間中心のセキュリティ」「社会技術的情報セキュリティ」として個々に取り組む研究のほか、「オフenseイブセキュリティ×人間中心のセキュリティ」「社会技術的情報セキュリティ×人間中心のセキュリティ」といったテーマ横断的な研究にも取り組んでいます。

具体的には、「人間中心のセキュリティ」においては以下の2つがあります。

(1) セキュリティ・プライバシー分野におけるユーザ調査研究の地理的偏りを定量的に分析

人を中心とする研究分野では、ユーザ調査を通じて心理特性や行動特性を解き明かしますが、研究対象の人が西洋偏重であり、

対象が地理的に偏ったこれまでの研究では、その結果の全人類共通性、地理的な違いの有無、その相違点、などの観点の深い分析や洞察が十分ではなく、全体像は明らかになっていませんでした。

そこで、研究分野に対して既存論文を体系的かつ包括的に検索・評価・統合する、体系的文献調査手法に基づいて、人を中心とするセキュリティ・プライバシー研究論文715本を特定し、参加者の居住国・属性・募集方法・研究手法・研究トピックに関して、複数の分析者による評価者間信頼性を保証した方法で分析しました。

本調査により、この分野の期間中の非西洋の人々が対象になるユーザ調査標本数の偏りが大きい（西洋偏重傾向）ことが明らかになりました。一方で、HCI (Human Computer Interaction) 分野における同様の調査（2016～2020年の発表論文が対象）では、非西洋の国の標本数の偏りが緩和される傾向にあることが知られており、セキュリティ・プライバシー分野における偏りのほうが

より顕著な傾向にあることが明らかになりました。また、世界人口比率に基づいた各国の調査度合いを調査した結果、米国、英国、ドイツなどの西洋（Western）の国々は世界人口比率に対して過多に調査されていることが分かりました。一方で、日本を含むアジアおよび中東・アフリカ・南米などの非西洋の大部分の国々では世界人口比率に対して調査が不十分であることが分かりました（図2）。この結果は、当該研究分野における調査対象の偏りの是正に向けた課題提起であると同時に、今後の研究の方向性を示唆するものでもあります。

本調査で判明した西洋偏重を解消し、多様な人々を理解するためのユーザ調査研究方法として、非西洋の人々に対する複製研究の推進により、「研究結果の一般化可能性および地理や文化による人々の差異を明らかにする」こと、「ユーザ調査の対象となる人々の国で活用されているローカルのクラウドソーシングサービスを

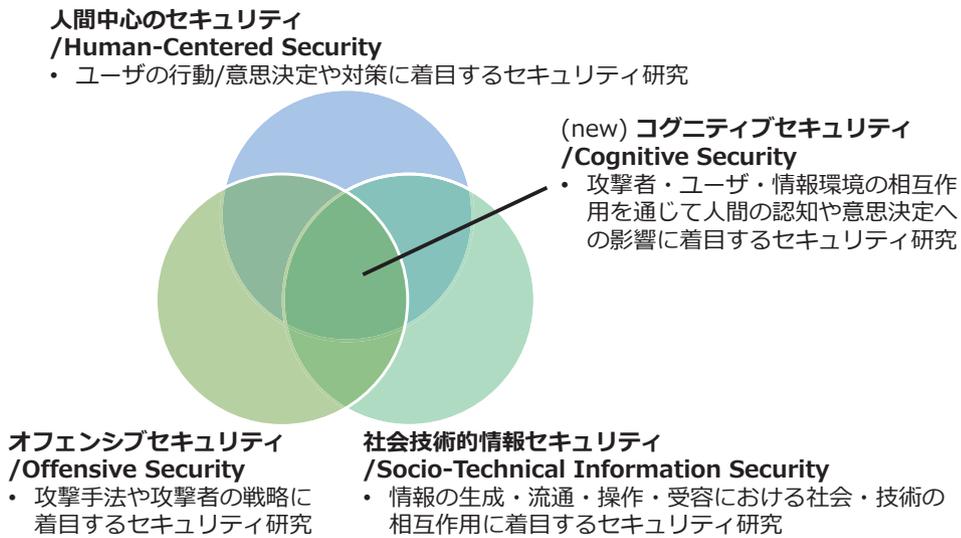


図1 研究テーマの分類

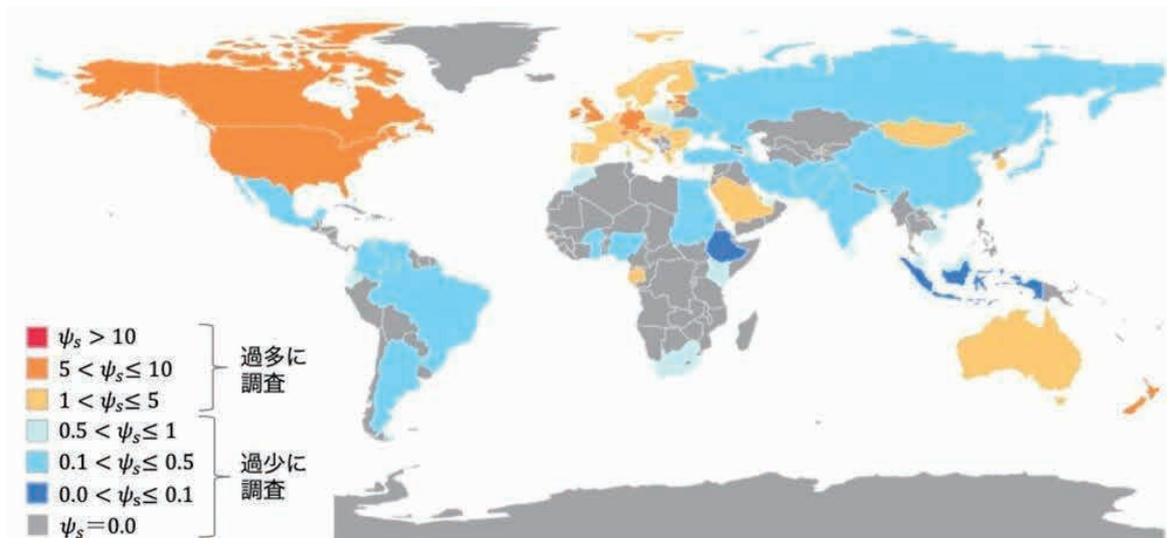


図2 世界人口に占める比率で正規化した各国の調査度合い (ψ_s)

活用する、および、ローカルの言語・文化・環境を熟知した研究者との協業によって研究者のダイバーシティを向上させる」ことによる地理的・言語的障壁の克服を提案しました。

この調査・研究は国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）と共同で実施され、2024年8月14～16日に米国フィラデルフィアで開催されたサイバーセキュリティの最高峰国際会議の1つである「USENIX Security 2024」で発表しました⁽¹⁾。

(2) “セキュア開発ガイドライン” の日米における産業の開発現場における活用実態や運用上の課題の調査

安全なソフトウェアを開発することは、情報社会の根幹を支えるうえで不可欠であり、そのための設計や実装に関する方法や指針を記載した文書が“セキュア開発ガイドライン”とされています。既存の学術研究の多くは一般に公開されているパブリックなセキュア開発ガイドラインだけに注目している一方で、産業の開発現場における活用実態や運用上の課題はほとんど調査されてきませんでした。これを調査した結果、実際の産業の開発現場では、各社が独自に定めている自社製のセキュア開発ガイドラインのほうが広く利用されていることが明らかになりました。加えて、既存研究にて提唱されているセキュア開発ガイドラインの効果的な運用方法（例：ガイドラインに準拠して開発が行われたかの検査など）は、開発者の所属組織の性質によって実践可能性が大きく異なり、小規模な開発プロジェクトや受託開発では、開発者に与えられた裁量やコストの制約等により、特に実践が難しい場合があることも明らかにしました。

これらの調査結果は、セキュア開発ガイドラインに関する学術と産業とのギャップを鮮明にするものであり、安全なソフトウェアの開発を促進するうえでの課題の明確化に寄与しました。今後、調査結果を踏まえて安全なソフトウェア開発を推進することで、ユーザが安心して利用可能なセキュアなシステム・サービスの展開につながることが期待されます。

この成果は、HCI分野におけるトップ国際会議である、「The ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI) 2023」（2023年4月23～28日）で採択、発表されました⁽²⁾。

「社会技術的情報セキュリティ」については、ソーシャルメディアにおけるスパムURLやフェイクニュース・偽情報の拡散などに悪用される偽アカウント（Sybil：悪性ボットの集団）攻撃対策技術の研究です。

従来、ソーシャルメディアにおけるスパムURLやフェイクニュース・偽情報をSybilから送信する攻撃に対して、アカウントの活動パターンなどから容易にボットを検知でき、対策を講じることが可能でしたが、最近では、有害投稿に無害投稿を織り交ぜるなどして正規のユーザの特徴・行動を模倣したり、人間が時折操作して他のユーザと交流をしたりなど、検知を回避しようとするボットが出現し、検知が困難となってきています。

そこで、正規のユーザが意図的に悪性ボットをフォローすることは稀なため、①必然的にボットと正規ユーザ間のつながりは疎となりやすい、②アカウントどうしのネットワークにおいてボッ

トと正規ユーザ間の構造的なギャップを上手く特定することで悪性ボットの検知が可能、③正規ユーザのフォロー行動を攻撃者が操作することは一般に困難なため検知回避もされにくい、といったネットワークの特徴を利用して、Sybil検知問題をグラフ信号処理における「信号復元問題」に落とし込むことで、既存のさまざまな検知手法を理論的に比較・分析することを可能にする方法論を確立しました（図3）。そして、この方法論に基づいてSybil検知手法が高い性能を発揮するための要件を特定し、この要件を満たす新たな検知手法を提案しました。また、既存手法と比較して、提案手法はグラフ構造によらずに安定して高い性能を発揮することを数値実験によって確認しました。

この成果は、2023年1月にセキュリティ分野のトップ国際論文誌である「IEEE Transactions on Information Forensics and Security (TIFS)」に掲載されました⁽³⁾。

テーマ横断的な研究ではどのような取り組みをされているのでしょうか。

「オフENSIPセキュリティ×人間中心のセキュリティ」については、Webブラウザパーミッションメカニズムの解明です。

Webブラウザのパーミッション機構は、Webページがコンピュータやスマートフォンに対して行う操作を制御するための仕組みです。これにより、例えば音声や映像を利用するWebページにおいて、マイクやカメラにアクセスすることを許可するかどうかを選択することができます。このパーミッション機構は、多種多様なWebブラウザごとに実装差異があることに着目し、その実装差異を効率的に評価する方法、その実装差異に基づく新しいセキュリティ・プライバシー脅威を明らかにしました。

通常、Webブラウザは複数種類並列で使われることがなく、Webブラウザごとのパーミッション機構の実装差異には気付きません。実装差異は、ミス等による誤実装やバグのケースがあり、これに起因してセキュリティ・プライバシーの脅威となります。そこで、デバイス上で動作しているさまざまなWebブラウザを横並びに動作させて評価する環境を構築して、さまざまなOS上で動くWebブラウザの網羅的な比較評価を可能としました。これにより、パーミッション機構の多数の誤実装・バグを発見するとともにそれらを悪用したフィッシングやトラッキングなどの新しいセキュリティ・プライバシー脅威を明らかにしました。さらに、発見した脅威がユーザの認識や行動にどのような悪影響をもたらすかをユーザ調査を通じて定量化しました。これら結果に基づいて、Webブラウザのパーミッション機構に関してWeb標準化団体に対してベストプラクティスの共有や標準化を提言しました。

この成果は、2023年2月28日～3月2日に開催された、サイバーセキュリティの4大トップ国際会議の1つである「The Network and Distributed System Security Symposium (NDSS) 2023」にて論文が採択されました⁽⁴⁾。

「社会技術的情報セキュリティ×人間中心のセキュリティ」としては、情報の背後にある“悪意（感情操作による情報蔓延）”

をユーザに知覚させる研究です。

誤情報や感情を操作するコンテンツは、AI（人工知能）による投稿が一般化する一方で、ソーシャルメディアプラットフォームがファクトチェック機能を縮小しており、さらにはファクトチェックそのものの限界もあり、公衆衛生や適切な意思決定に対するリスクがますます高まっています。こうした課題への対処法の1つとして、感情を操作するような表現がコンテンツに含まれるかどうかを検知し、それをユーザに提示することによって、不注意に信じ込んだり他人にシェアしたりする行動を抑制する効果が期待されています。私たちは、この「感情的な操作表現に対する警告ラベル」の有効性を検証しました。具体的には、健康関連のソーシャルメディア投稿において、情報の正誤や警告ラベルの有無がユーザの反応に与える影響を調査しました。その結果、感情的な操作表現を含むコンテンツに対しては、その内容が正しいかどうかにかかわらず、警告ラベルが内省的な行動（不用意なシェアを控えるなど）を促す効果を持ち場合があることが明らかになりました。これらの結果を踏まえ、誤解を招く、あるいは操作的なコンテンツの影響を抑えるためのプラットフォーム戦略や、今後の研究に向けた指針となる提言を行いました。

こうしたトップ国際会議・学会における論文採択が高く評価されて、2024年にNDSS、2025年にUSENIX Securityにおいてプログラム委員に就任しました。日本からのプログラム委員はほとんどおらず、NDSSでは30年以上の歴史の中で日本人として初めてのプログラム委員就任だそうです。また、世界有数の研究者の中でも特に優れた貢献（品質の高い査読、委員内の議論の牽引、献身的なシェパード活動）が認められ、NDSS 2025 Distinguished Reviewerを受賞しました。

さて、これらの研究が進むに伴い、例えばオフENSIVEセキュ

リティで新しい脅威を見つけたときに、脅威のユーザに対するインパクトの調査が必要になり、情報の流通に際しては単に脅威の伝搬のメカニズムだけではなく、ユーザの判断に関する部分の調査も必要になるなど、3つのテーマの重複や連携を考慮していく必要が出てきます。そこで、3つのテーマが重複した部分が、攻撃者・ユーザ・情報環境の相互作用を通じて人間の認知や意思決定への影響に着目するセキュリティ研究、コグニティブセキュリティ（Cognitive Security）という新しいテーマです（図1）。

従来、多様なユーザ属性を考慮し、適切な意思決定や組織のポリシー策定のサポート技術や理論構築の研究において、心理学の方法論や学際の実施が推奨されてきたにもかかわらず、心理学的手法や認知に着目する研究はかなり少ない現状にあります。そこで、「認知」に着目して、個人を標的として短期的に行われるサイバー詐欺・ソーシャルエンジニアリングや、社会や組織を標的として認知・意思決定・行動そのものを操作する目的の偽・誤情報やアルゴリズムによる操作等の「認知にかかわる脅威」（表）に対抗していくテーマとして“コグニティブセキュリティ”を設定しました。

具体的なアプローチとして、①攻撃手法がどう影響を与えるか（認知能力・認知プロセスの理解）、②認知に対する介入が自律的な意思決定にどう影響を与えるか（認知能力・認知プロセスに対する対策）、③集団になることで、どう認知やその介入効果が変わるのか、あるいはしないのか（集団としての認知の理解と対策）といった観点で、「敵対的な状況下において自律的な意思決定を維持することで、認知・情報操作の影響から個人・組織・国家/社会を守るための方法論と実践」という課題解決をめざす、情報科学だけではなく認知心理学等も関係する学際的なテーマです。

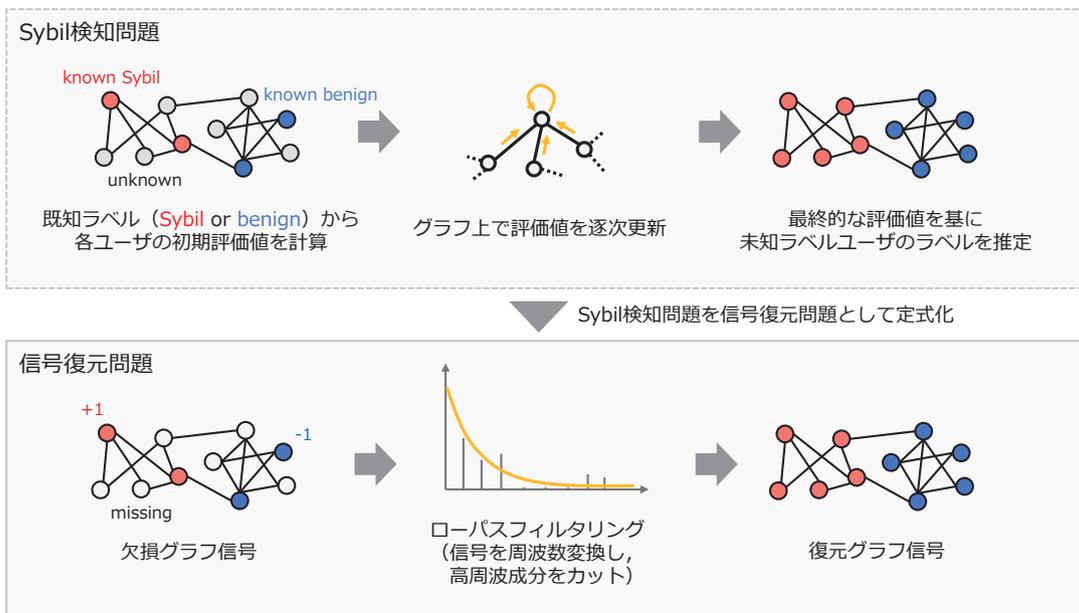


図3 Sybil攻撃対策技術

表 認知にかかわる脅威の分類

| 脅威の種類 | 具体例 | 主な影響内容 | 影響のレベル |
|----------------------|------------------------------------|--------------------|--------|
| サイバー詐欺・ソーシャルエンジニアリング | フィッシング、テックサポート詐欺、ビジネスメール詐欺 | 金銭や個人情報の搾取 | 個人 |
| 操作的デザイン | ダークパターン、FOMO (Fear of Missing Out) | ユーザが望まない選択・行動への誘導 | 個人 |
| アルゴリズムによる操作 | フィルターバブル、AI/LLMによる偏った・誤った回答 | 偏った意見・価値観の形成 | 個人～集団 |
| 偽・誤情報の拡散 | ソーシャルメディア上での虚偽の発言、虚偽情報の共有 | 社会的分断の助長、民主主義の機能不全 | 個人～集団 |

 **自分の経験や知識だけを頼りに固執しようと思わず、疑うことやアップデートすることが重要**

研究者として心掛けていることを教えてください。

通常、自分の経験や知識を活かして研究を進める機会が多く、場合によってはそれを無意識に絶対視することもあると思いますが、逆に自身の経験や知識が邪魔をすることがあることに気付きました。そこから、自分の経験や知識だけを頼りに固執しようと思わず、疑うことやアップデートすることが重要だということを意識しています。

私の研究は、しばしば人間を対象とした実験を行うことがあります。あるとき、日本で日本人を対象に実験を行った結果を論文にしたのですが、査読において、「なぜ日本で実験をするのか、日本の実験の結果が一般化できるのか」と指摘され、論文がリジェクトされたことがありました。この経験から、「国際論文として採択されるには、日本ではなく欧米を対象に調査するのが当たり前だ」と思い込むようになりました。その結果、日本に住んでいるにもかかわらず、欧米の人々を対象に英語で調査をして、結果を論文にまとめて発表するという時期が続きました。

その一方で、日本を拠点に研究をしているにもかかわらず、日本の実態を直接扱えないことに矛盾を感じ、フラストレーションがたまっていきました。さらに、研究のトレンドとしても、欧米人ばかりを対象とした調査が当然のように行われている状況に、違和感を覚えるようになりました。これがきっかけとなり、前述の「セキュリティ・プライバシー分野におけるユーザ調査研究の地理的偏りを定量的に分析」をテーマとした論文の執筆につながりました。この研究を通じて、たとえ定量的な調査であっても調査対象の環境・状況に偏りがある場合、その研究分野自体の普遍性に対する問題となり得ることを示しました。

これを機に、自分のこれまでの経験や知識だけを頼りにしようと思わずに、ときには疑うことやアップデートすることが重要だということを実感しました。

 **勇気と好奇心をもって専門の外に出て、相互理解、モチベーションの共有を図る**

後進の研究者へのメッセージをお願いします。

自分の専門分野だけでは到底解決できない社会的課題があります。こうした課題に取り組むためには、学際的アプローチが必要になります。学際的研究を推進するには、自身の専門分野から外に出る勇気を持つことが重要です。ある分野の専門家でも、一歩外に出ると初学者になるので怖いという気持ちを抱きます。それに対しては、研究者としての好奇心で乗り越えることができます。そして、他の分野の専門家と連携するときには、共通点を見つけ、お互いに理解し合うことができます。逆に、相違点についても、それを興味深いものとしてとらえることで、理解を深めることができるはずですが、さらに、モチベーションを共有することが大切です。たとえ専門分野が異なっても、同じモチベーションを持つことで、経験・知識の違いを超えて協働することが可能になります。

私の研究テーマは学際的なものが多く、その経験をとおしてこれらを実感しています。近年、研究分野の細分化が進んでおり、こうした社会課題ばかりではなく、日常の研究においても学際的領域に踏み込む機会は多くなっています。だからこそ、自身の専門の外に出て、相互理解、モチベーションの共有を図ってください。

■参考文献

- (1) A. A. Hasegawa, D. Inoue, and M. Akiyama: "How WEIRD is Usable Privacy and Security Research?," USENIX Security Symposium 2024, Philadelphia, U.S.A., August 2024.
- (2) F. Kanei, A. A. Hasegawa, E. Shioji, and M. Akiyama: "Analyzing the Use of Public and In-house Secure Development Guidelines in U.S. and Japanese Industries," ACM CHI 2023, Hamburg, Germany, April 2023.
- (3) S. Furutani, T. Shibahara, M. Akiyama, and M. Aida: "Interpreting Graph-Based Sybil Detection Methods as Low-Pass Filtering," IEEE Transactions on Information Forensics and Security, Vol. 18, pp.1225-1236, 2023.
- (4) K. Nomoto, T. Watanabe, E. Shioji, M. Akiyama, and T. Mori: "Browser Permission Mechanisms Demystified," NDSS 2023, San Diego, U.S.A., Feb. -March 2023.



NTT東日本 先端テクノロジー部 オープンイノベーションセンター
第三テクノロジー担当 チーフ

松村 崇志 Takashi Matsumura

あらゆる産業においてバイオ技術が 用いられ、社会課題が解決される 社会、「バイオエコノミー社会」の 実現をめざす

大阪・関西万博では、iPS細胞（人工多能性幹細胞）を活用した「動くミニ心臓」が展示され、ミニ心臓が鼓動する様子を観察できます。iPS細胞を扱う技術分野は、一般的にバイオ技術といわれ、iPS細胞のほか、微生物による抗生物質の生成、生物の変異や遺伝子操作（編集・組み換え）を駆使した品種改良のように、医療・医薬品・健康、食料・農業・漁業領域、環境・エネルギー、材料・素材といった領域で広く活用されています。こうしたバイオ産業は、欧米と比較して日本ではインフラ面の整備などが理由に企業・研究機関どうしの連携が進んでおらず、イノベーションが加速しにくいという課題があります。こうした課題を解決すべく、大容量なネットワークによるデータ転送・活用、リアルタイムで臨場感あるコミュニケーション、AI（人工知能）の活用による、“リモートバイオDX（デジタルトランスフォーメーション）”を提唱し、バイオ産業における課題解決に挑戦する、NTT東日本 先端テクノロジー部 松村崇志氏に、IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）を活用したリモートバイオDXの実現に向けた取り組みと、どんな仕事にも一生懸命に取り組む重要性を伺いました。



バイオ領域におけるイノベーションを 加速し、バイオエコノミー社会の実現 をめざす、“リモートバイオDX”

現在、手掛けている業務の概要をお聞かせいただけますか。

私の所属するNTT東日本先端テクノロジー部オープンイノベーションセンター⁽¹⁾では、先端技術の保有者であるディープテックやスタートアップ、大学・研究機関などと連携し、革新的なテクノロジーを社内に取り込みながら、社内の研究開発力を強化していくことで、地域社会の変革をめざしています。また取り込んだ技術は、展示会やテックマガジン（技術レポート）⁽²⁾を通じて外部発信する取り組みも行っています。非通信領域含めていろいろな技術にチャレンジしているのですが、その中でも私は特にバイオ系の分野を中心に担当しています。

さて、近年の遺伝子（ゲノム）解読のコスト低下、革新的なゲ

ノム編集技術の登場、バイオ研究とAI（人工知能）・ITなどのデジタル技術の融合により、従来の健康・医療分野だけでなく、環境・エネルギー分野、素材・材料分野、食料分野等、あらゆる産業においてバイオ技術が用いられることで社会課題が解決される社会、「バイオエコノミー社会」の実現が期待されています。

バイオエコノミー社会に向けた研究現場では、人の手技が問われる従来型の実験だけでなく、大容量データを活用した実験の重要性も増しており、ロボット等を用いた実験の自動化やデータ・AI駆動による研究の促進といったデジタル技術の活用が求められています。また、研究の進展・複雑化に伴い、さまざまな専門分野の協働によるオープンイノベーションも重要といわれています。

一方で、現在は研究者の物理的距離が離れていると、インフラの遅延やセキュリティなどが障害となり、そういった協働がしにくい現状があります。

そこで私たちは、「人と人とが場所にとらわれず、距離が離れていても円滑にコミュニケーションができる仕組みや、大容量デー

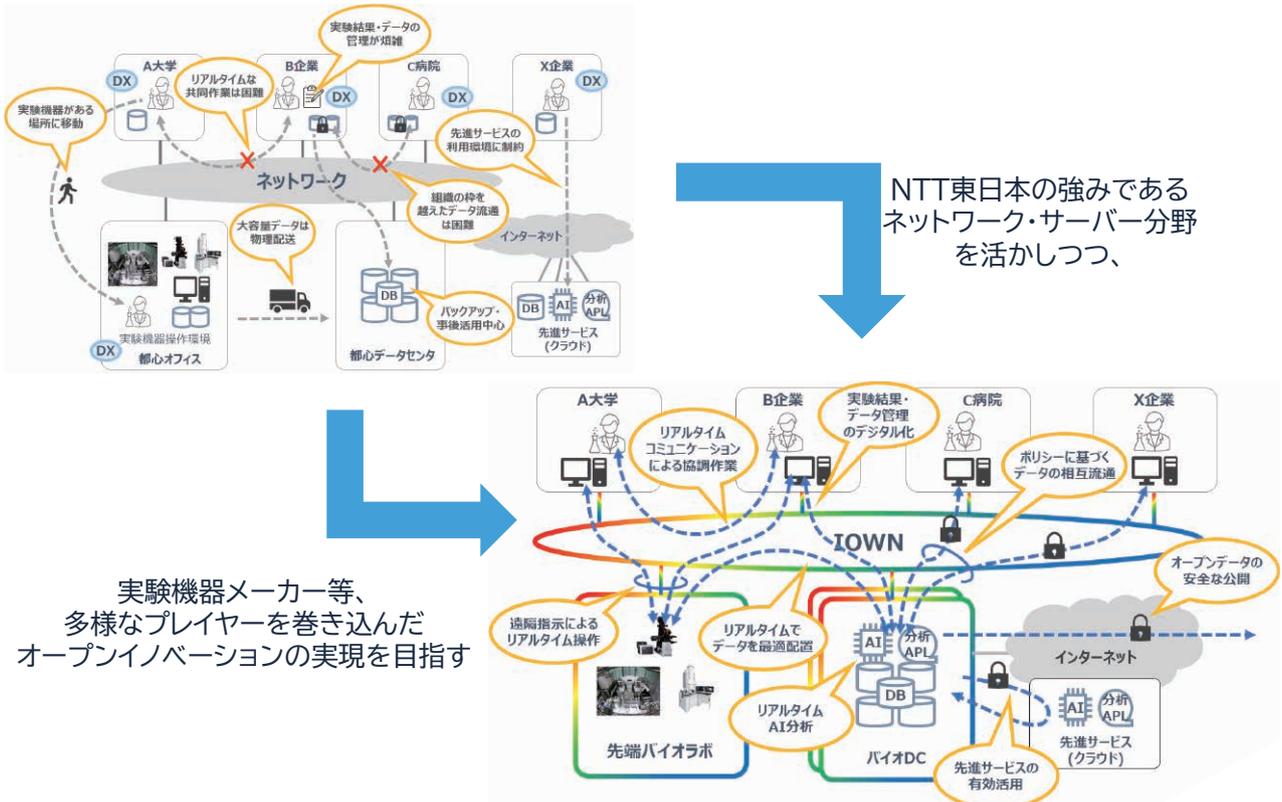


図1 連携のイメージ

タを高速かつセキュアに共有し、AI等も活用した先端的な研究が行われる基盤の整備により、バイオ領域におけるイノベーションを加速させる」取り組みとして、「リモートバイオDX（デジタルトランスフォーメーション）」を提唱し、実現に向けて、先端的な研究ユースケースを有する国立大学法人 東京大学 大学院医学系研究科・医学部附属病院、また実験機器メーカーとして日本電子株式会社、株式会社ニコン、株式会社ニコンソリューションズと2023年12月23日に連携協定を締結しました（図1）。

リモートバイオDXの実現に向けて、具体的にどのような取り組みをしているのでしょうか。

大きくは「遠隔での研究機器操作、データ取得と解析を実現するデジタルインフラの実現」「遠隔での画像データ等の共有化による指導・対話・教育システムの実現」「大規模生命科学・医学データの安全性の高い保管・移動・解析を可能にするデジタルインフラ

の実現」という3点のテーマに取り組んでいます。

1番目の「遠隔での研究機器操作、データ取得と解析を実現するデジタルインフラの実現」については、顕微鏡や画像解析装置など先端的な実験機器を、NTT東日本が提供するAPN (All-Photonics Network) IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) のような高品質で低遅延なネットワークで接続することで、遠隔でも現地さながら操作できることやさらには取得した膨大な実験データを高速に転送し、研究者間で安全にシェアできる仕組みをめざしています。これまで私たちは、実際にAPN IOWN を利用し技術の有効性を確認してきました。

具体的には、東京大学にはクライオ電子顕微鏡という原子レベルで物体の観察ができる計測機器があるのですが、これはとても高価なうえに設置条件が厳しいため、導入数も限られており設置場所も、地下鉄や自動車の走る都内ではなく郊外等静かで広い場所に限られてしまいます。したがって利用に際しては、場合によっては都内から設置場所まで出向いて操作するなどの難があります。

高価な実験機材の操作・映像を遠隔に延伸し、現地さながらの操作環境をIOWNを使い実現

従来構成 (ローカル)

実証構成 (リモート)

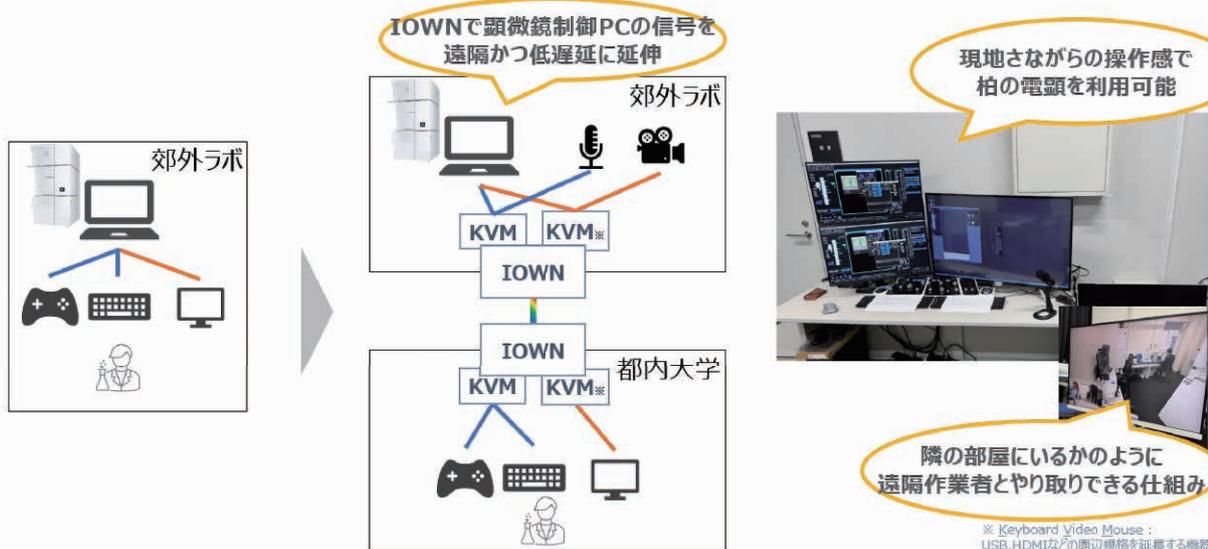


図2 電子顕微鏡の遠隔操作

従来のインターネット経由でのリモートデスクトップのような遠隔接続でもある程度の操作は可能ではあるのですが、質の高いデータを得るには非常に精緻な動作が求められ遅延やジッタの影響も大きく受けてしまいます。こうした背景を踏まえて、私たちは、電子顕微鏡が設置されている東京大学の柏キャンパスとユーザが在籍するキャンパスの間をAPN IOWN で接続し、電子顕微鏡の制御盤等を遠隔で操作できるかを検証しました (図2)。APN IOWNの超低遅延性に顕微鏡メーカーによるチューニング作業を重ねることで、都内からでも郊外の機器を現地さながらの操作感で利用できることを確認できました。

2番目の「遠隔での画像データ等の共有化による指導・対話・教育システムの実現」についてですが、バイオ領域の実験では、複数の研究者が1台の顕微鏡からの画像をリアルタイムで見ながら議論を行うことがしばしばあります。また、操作にあたり専門知識が必要な機器も多く、その指導・指示を遠隔から行えることが重要になります。そこで、リアルタイムなコミュニケーションを実現し、遠隔地からでも同じ場所にいるかのように共同研究ができる世界 (Remote World Collaboration) を目標に実証を行っています。これについては、前述のクライオ電子顕微鏡の遠隔操作の一環として、顕微鏡操作の通信だけでなくカメラやマイクの

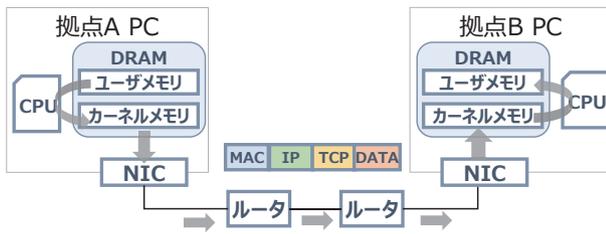
通信を超低遅延に送ることで、まるで隣にいるかのように遠隔作業者とコミュニケーションが取れることが確認できました。

3番目の「大規模生命科学・医学データの安全性の高い保管・移動・解析を可能にするデジタルインフラの実現」については、バイオ領域では、ペタバイト級の膨大な量のデータを扱うことも多く、また、経済安全保障の観点からも重要な実験データを安全に国内で運用・保管できる仕組みが研究者からも求められています。今後爆発的に増加するデータを安全に格納保存できることはもちろん、データ自体を高速に転送し、かつ高性能なAIサーバを用いてリアルタイムな解析ができる仕組みをめざしています。

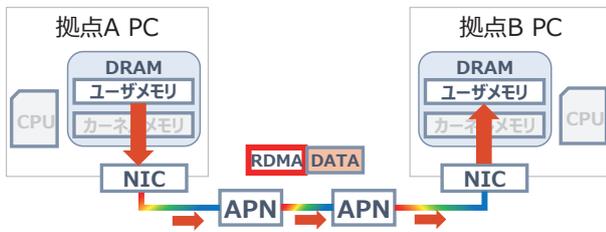
現在はデータを高速転送することにフォーカスを当てて検証に取り組んでいます。具体的には、コンピュータ内のCPUによる処理を介さずにネットワーク越しに直接メモリ間で高速にデータ転送を可能とする「RDMA (Remote Direct Memory Access)」という技術の適用に着目しました。本技術はTCP/IPなど一般的に普及している通信技術に比べるとかなり高速にデータのやり取りができる一方、利用条件としてネットワークがロスレスであること、また通信が成立するための遅延要件がかなり厳しいことから従来はデータセンタ内、それも近接するラック間等での利用に限られていました。そこで、低遅延・大容量回線であるAPN

近距離向け高速通信（RDMA:Remote Direct Memory Access）をIOWN経由で実現

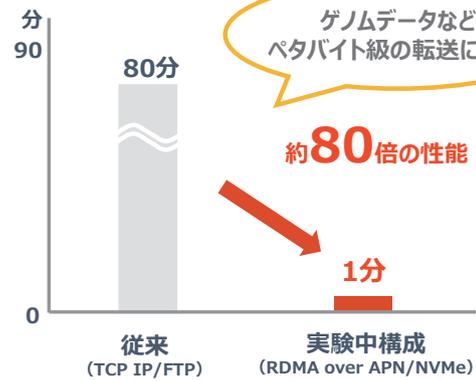
従来（CPUを経由、ヘッダ処理など処理遅延）



実証構成（メモリ間で直接通信、ヘッダ処理を最小限に）



転送時間
（100GBのデータを東京～大阪相当で送った場合 ※1）



※ 疑似的に遅延を付加して検証。
また測定は NTT 未来ねっと研究所の共同実験として実施。

図3 RDMA over APNによる巨大データの高速度転送

IOWN と、NTT未来ねっと研究所が開発しているRDMAの通信を遠隔に延伸できるアクセラレータ装置⁽³⁾を組み合わせ、巨大なファイルデータの送付にチャレンジしました。実際に東京-大阪間の距離を疑似的に設定した回線において、100GB程度のデータではあるのですが転送実験を行ったところ、通常のネットワークにおけるTCP/IPによる転送では約80分を要しましたが、提案手法であるRDMA over APNによる転送では転送時間が約1分程度とかなり短縮できることを確認できました（図3）。

そのほかにも「重要な実験データを安全に国内で運用・保管できる仕組み」については、実験結果をまとめる実験ノートをデジタル化して、ブロックチェーン等の技術と組み合わせることで、実験データの正当性をデジタルに保証する仕組みづくりなども取り組んでいます。



スキルの軸足をもち、技術に限らずその周辺の知見を幅広く身に付けてビジネス的観点を磨く

開発者としてのスキルはどのように磨いているのでしょうか。

私は2014年にNTT東日本に入社したのですが、入社当初は現場設備に関する設計・保守を担当していました。3年目から現在に至るまで現在に相当する開発部に所属しています。これまで、現場業務支援アプリ、相互接続に関するサービス、クラウドを利用したシステム、マス向け大容量回線を支えるシステム、映像関連のサービス等、技術の対象は変遷しているものの、一貫して研究開発業務に携わってきました。学生時代は情報系の研究室に所属しており信号処理などのアプリケーション開発の経験はあったものの、ネットワークやサーバ等NTT東日本の根幹となるインフラ技術にはほとんどかかわっていなかったため、最初から勉強する必要がありました。

1番やりがいを感じたのはネットワーク系です。当時の先輩社員を見習ってルータやスイッチの中古品を集めて自宅のラボを構

築したり、Cisco社などベンダの認定資格取得をめざしたり、こういった市中製品が内部的にどのように動いているかを自らプログラミングで自作するなど自学自習を仕事の合間で行いました。ネットワークが自分の意図したとおりにつながったときの達成感はとても大きかったですし、そうした勉強を続けて興味が出てきたOS（オペレーティングシステム）の仕組みなど周辺の領域を掘り下げていくことで、一般的なコンピュータアーキテクチャに関する理解も深めることができました。このときに身に着けたスキルが、今でも新しい技術を学ぶ際の礎として役立っています。ネットワーク技術のようなインフラで動く技術は、そのほかのIT分野・技術を学ぶうえで大きな土台になっていると実感しています。

開発においてどのようなことを意識しているのでしょうか。

事業会社における開発なので、ビジネス的観点は常に意識しています。

自分がかかわっていたプロダクトのビジネス化を検討しなければならなくなったとき、自分の仕事の分野や技術に限らず他の分野に対しても広く浅く知識をつけていくことの大切さを感じました。例として、今生成AIがとても普及してきていますが、ここまで世の中に浸透した要因はLLM（Large Language Model）のような先端技術だけではなく、社会環境、マーケットの状況、法規制等、技術とは直接関係ない多くの要因が研究され、複雑に重なってそれが奇跡のようにうまくかみ合ったからではないかと思います。テクノロジドリブンの開発を志向している組織に所属している私の立場からすると多少矛盾したような考えかもしれませんが、最新の技術だけでなく、あらゆる幅広い知識・知見をどのように駆使してビジネスにつなげていくか、というのが事業会社に求められているのではないかと思います。

実際に開発中の技術を社会実装、そしてビジネス化していくにあたり、入り口としてユースケースの検討が必要になるのですが、その段階から社会環境を背景とした社会課題を意識することが必要となります。そして、マーケットの状況を把握しながらビジネス戦略を構築して展開していきます。専門的な部分はそれぞれの分野の専門家の知見に頼ることになるのですが、自分の分野以外の知識がないことにはどのような専門家に頼ればいいのか、といった勘所が分からないため、見当はずれとなりビジネスにはつながらなくなります。そういった観点でも、自分一人ですべてやり切ろうとしないことも大事ではないかと思います。

今後どのようなことに取り組みたいのでしょうか。

やはり「生涯エンジニア」として、技術開発とその社会実装を通じて日本のためになるような活動をしていきたいと思っています。例えば現在担当しているバイオの分野にも多くの要素技術がありますし、関連する企業・大学・研究機関は国内だけでなく海外にも多くあります。これから日本が生き残るためには、やはり海外の技術だけに頼らず、日本国内の技術が多く使われ、国際的競争力を磨き世界に勝てるようなモデルをつくるべきなのではないかと思います。

そのために、長い道のりかもしれませんが日本のためになる活動という大きな目標に向かって少しずつ、地道な活動に取り組んでいきたいと思っています。



どんな仕事にも一生懸命に取り組む

後進やパートナーへのメッセージをお願いします。

技術者、開発者にとって、思った結果や成果が出るまでは、実験による試行錯誤、データ収集、情報収集、資料づくり等地味な仕事を積み重ねる必要があります。もちろんそれを一生懸命やったからといって結果に結びつく保証はなく、失敗することもあります。故障やシステムのバグによるトラブル対応、関連組織への説明資料作成などもあり、その原因究明や対策検討も、地道でとても面倒な仕事ばかりです。

私も、こういった仕事に直面しているとき、何のためにやっているのか目的を一瞬見失うことや、自分の人生の大事な時間を使ってまでやるべきことなのかと自問自答することもありましたが、振り返ってみるとどんな仕事でも1つひとつ一生懸命に向き合ったからこそ、自分のスキルが確実に向上し、今でも十分につながっているの、無駄なものは何もなかったと実感しています。最後までやり切れたのは、辛い仕事の中にも必ず何か得られるものがあると信じてやり抜いたからだと思います。時間はすべての人に平等に与えられた資源で限られています。悩まず恐れずにどんどんチャレンジして、ぜひ有意義な技術者人生を過ごしていただければと思います。

■参考文献

- (1) <https://journal.ntt.co.jp/article/30691>
- (2) <https://www.ntt-east.co.jp/aboutus/rd.html>
- (3) <https://ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr202403ra1.html>



NTT社会情報研究所
特別研究員

北川 冬航 Fuyuki Kitagawa

加速度的に増大する デジタル危機を解決する、 次世代の安全な「公開鍵暗号技術」

近年、インターネット界隈で横行するサイバー攻撃を防ぐためにはデータや通信内容の「暗号化」が必須です。また、2030年代には量子計算機(量子コンピュータ)が実用化される見込みです。この量子計算機は、特定のタスクにおいて従来のコンピュータの1億倍の性能ともいわれます。この量子計算機が普及すると、社会のデジタル化はさらに進展し、それを支えるセキュリティ技術の必要性も一段と高まります。今回は、量子技術を利用した次世代の「公開鍵暗号技術」研究のトップランナー、北川冬航特別研究員にお話を伺いました。

◆PROFILE: 2019年東京工業大学情報理工学院にて暗号理論の博士課程(理学)修了。同年、日本電信電話株式会社に入社。2024年NTT社会情報研究所特別研究員。近年は、暗号理論と量子情報の融合領域の研究に従事。2015年電子情報通信学会SCIS論文賞、2020年東京工業大学手島精一記念研究賞(博士論文賞)、2025年電子情報通信学会SCISイノベーション論文賞。



新たな量子計算機時代のデジタル環境に際し、 安心・安全のために必要不可欠な技術

■はじめに「安全な公開鍵暗号技術」とはどのような研究でしょうか。

加速度的に進む現代のデジタル社会では、デジタル化したものやサービスはもはや欠かすことのできない存在です。5G(第5世代移動通信システム)、6G(第6世代移動通信システム)など通信環境の高速化に伴う半導体技術の高性能化や、近い将来、想定される量子計算機の登場などによって、さらなる計算機能力の大幅な向上が高い確率で予測されており、社会のデジタル化はより急速に進展していくと考えられます。

例えば、鉄道事業の決済やインターネット間の取引などに代表される電子マネーの登場は、日常生活の利便性を大きく向上させましたが、こうした電子通貨、電子取引はデジタルならではの不正利用や犯罪をも多く生み出しました。社会のデジタル化は、さまざまな面において利便性を飛躍的に向上させる一方で、これまでの社会には存在しなかった危険性も生み出します。これらの危険性をよく知るユーザほどデジタルを利用したサービスの利便性は認識しつつも、利用をためらう傾向もあるようです。デジタル技術はまだ課題のある技術であり、誰もがより安心・安全に利用可能に発展させていくために必要となるのがセキュリティです。そしてその情報を守るための代表的な方法の1つが「公開鍵暗号技術」です。

この公開鍵暗号技術の研究は、量子計算機が実用化されるといわれる2030年代を目前に、今まさに変革期にあります。その理由の1つは、量子計算機が実現すると、従来の暗号方式では安全性が確保できない状況が生まれてしまうことです。特に世の中で広く使われている「RSA暗号」や「楕円曲線暗号」と呼ばれる従来の公開鍵暗号方式は、量子計算機を用いると簡単に解読されてしまうことがすでに分かっています。「RSA暗号」や「楕円曲線暗号」は私たちのメールのやり取りから金融機関などで、幅広く普及しているため、この事実は衝撃的ともいえます。そのため、量子計算機の研究開発が加速し、突如実現したとしても混乱が生じぬよう、これら既存の公開鍵暗号に代わる量子計算機でも解読できない公開鍵暗号技術の研究開発が、現在非常に盛んに行われています。この研究は「耐量子暗号」と呼ばれます。

また量子計算機の実現が迫ってきたことで、量子計算機ならではの性質を活用した新たな暗号技術を開発する試みも盛んに行われています。安全と考えられてきた既存の「RSA暗号」などをも解読してしまう量子計算機の驚異的な能力を使って、逆にこれまでは実現できなかったようなセキュリティ技術を生み出そうというのが私の研究です。この研究は「量子暗号」と呼ばれます。

私の研究の最終目標は、その専門である暗号理論と量子情報の研究でこの先の将来、量子計算機時代になっても安心・安全を確保して、誰もがデジタル社会の恩恵を享受できるように「新しい暗号方式」、特にこの「量子暗号」を実現することです(図1)。

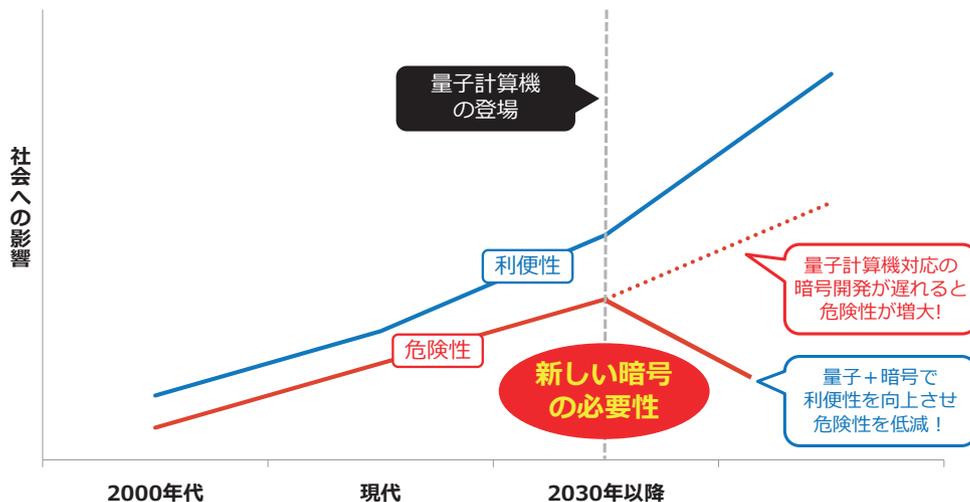


図1 デジタル化の進行に伴う社会的影響の推移イメージ

■具体的にどのような技術研究に取り組まれていますか。

将来の安心・安全なデジタル社会に向けて、暗号理論と量子情報を融合することにより、量子計算機が実用化された後も「複製できない電子情報」の実現をめざしています。

現在の情報処理ではすべての電子情報は0と1の組み合わせであるビット列に過ぎず、理論的にすべての電子情報は簡単に「複製」が可能です。私たちは自身のPC上でファイルをコピーしたり、SNSで友だちと写真の共有などを日常的に行っています。このような電子情報の複製が可能なのは大変便利だといえますが、一方でこれが電子情報の危険な点でもあります。デジタルにおける利便性と危険性は表裏一体です。すべての電子情報は一度悪意のあるユーザの手に渡ると、無制限に複製され瞬く間に拡散されてしまう脅威が生じます。産業スパイによる重要な企業秘密の漏洩や特許技術の盗難といった事案もありますし、身近なところでいえば、書籍や音楽の違法ダウンロードといった事例なども頻発しています。また現状では、他者の電子情報の複製をオリジナルの所有者に知らせるといった機能も存在しないので、所有者は自身の電子情報が複製され悪用されていることには、情報やデータが拡散されてしまってからしか気付くことができないのです。

しかし、量子情報を使用した処理であれば、この既存の情報処理における問題点を解消した「複製できない電子情報」が実現できます。無断複製や悪用といった事例をも情報解析することができます。この方法では電子情報は、1つひとつの量子ビットがどのような状態にあるのかを表す「量子状態（いわゆる qubit）」を用いてエンコードされます。量子状態はその特性から複製不可能性という性質を持っています。そのため任意の量子状態を完全に複製する技術は存在しません。非常に膨大な数の状

態にある量子情報処理へ暗号理論を組み合わせることにより、完全な複製だけでなく断片的な複製すらもできない、暗号理論の観点から見て安全な「複製できない電子情報」が実現できるようになります（図2）。

私はこの「複製できない電子情報」の結実に向けて、量子情報処理に暗号理論を組み合わせる研究に取り組んでいます。そしてまた現在、その応用として「複製できない電子通貨（クオantumマネー）」の研究を注力して進めています（図3）。これまで、この「電子通貨」に関する新方式や関連技術を提案し、その成果は暗号理論および量子情報の主要国際会議において発表し、評価されています。

■研究で苦労された点や今後の研究に向けた課題点を教えてください。

課題としてあげるとすれば、量子計算機の実機がまだ存在しないために、私たちの設計している方式や技術を実証することができないという点です。今は理想的な量子計算機が実現されると仮定して方式の設計を行っており、ハードウェアの実現に先んじてアルゴリズムを完成させることを目標に研究しています。この方針においてはかなりの進展を得ていますが、次の段階として量子計算機のハードウェアの開発状況もみながら、実際に実現される環境において実行可能な方式へと改善・改良していく必要があります。また、先行して理論が完成していることでハードウェアの開発にも指針や好影響を与えることができるはずで

私の研究分野は暗号理論と量子情報の境界領域であり、量子暗号分野などと呼ばれます。この研究は、量子計算機の実現が現実

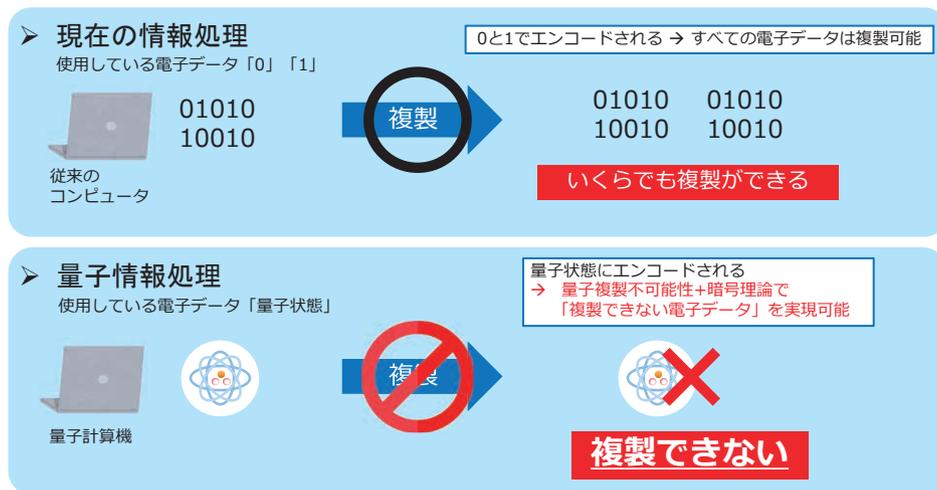
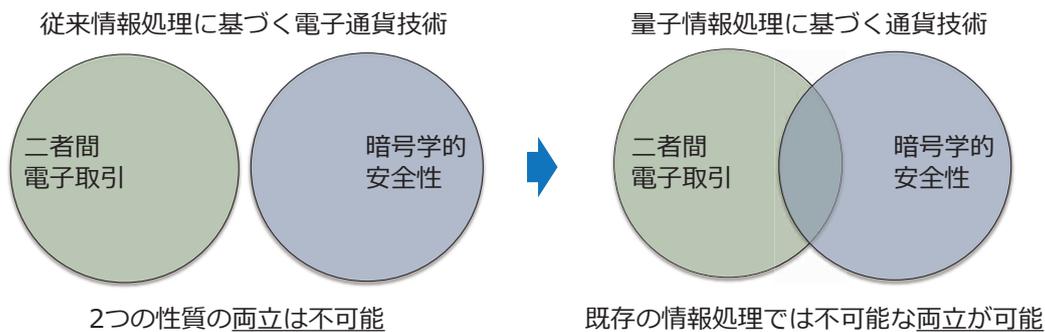


図2 量子状態の電子データが実現する複製不可能性



量子計算機時代の安心・安全な取引を支えるインフラ技術として期待

図3 現在の電子通貨と量子通貨との比較

結果が生まれ、続々と発表されており、その速度はめまぐるしいほどの速さです。私たちのグループでは、これまでに得た成果が他グループと競合することが何度もありました。例えば、暗号理論のトップ会議であるCRYPTOという国際会議に投稿された論文が、2024年は500件程度だったものに対し2025年は650件でした。これは暗号理論のすべての会議の投稿総数ではありませんし、またこの投稿数の増加が量子暗号の進展だけが理由というわけにはいきませんが、この一例をとってもこの分野の研究が急速に進展していることだけは明白です。下手をすると、自分たちが取り組んでいることを矢継ぎ早に他のグループが先に発表してしまうのではという、私たちの懸念も分かっていただけではないかと

思います。研究を計画的にかつ迅速に進めなければ、この分野で主導権を取って研究していくことは難しいため、その点は気を使わなければならない部分だといえます。

**安全性の確保された量子通貨で、
 売買の常識が変化する「完全二者間取引」へ**

■今後の研究の展望を教えてください。

私の現在の目標は、量子技術を利用して「完全二者間取引」を可能にすることです。私が現在研究している「複製できない電子通貨」は、研究業界では「量子通貨」と呼ばれていて、この技術



は電子通貨の概念を変える革新的技術として期待されています。この「量子通貨」の最大の特徴は、従来の情報処理では実現し得なかった二者間電子取引を非常に高い安全性の下で達成できることです。

従来の暗号理論に基づく電子通貨技術では、安全な方式を設計するためには「第三者による取引の監視」が不可欠でした。暗号学的に安全性を担保しようと思うと、銀行などの決裁権者を間に挟み、この決裁権者に取引内容を伝えて、口座の預金を移動してもらうというのが現状では唯一の方法です。しかしこの方法では、あらゆる取引履歴が第三者（決裁権者）に収集されてしまう可能性があります。この事実に対するユーザの抵抗や恐怖は大きく、こうした点が電子通貨技術の普及に対する障壁になり得ています。

これに対して前述のとおり、「複製できない」量子通貨は暗号学的に安全な完全二者間取引を実現します。量子通貨では、量子状態に価値を付与し、ユーザ間で現金のようにその量子状態を送受信してもらい決済を行います。取引に決裁権者を介する必要はありません。このような暗号学的に安全な完全二者間電子取引は、電子情報が複製不可能な量子情報処理だからこそ実現可能なものであり、従来の情報処理では実現することはできません。量子通貨を使用すれば、あたかも実際の店舗において対面で売買するように、通貨を渡して商品を受け取るという行為が、世界中のどこでもネット上で安全に行えるようになるのです（図4）。もちろん、この技術の社会展開には、法律的政治的な対応は別途必要です。

また、今回は「複製できない電子通貨」を例に話をしましたが、同じように量子技術を用いた「複製できないソフトウェア」や「複製

できない暗号鍵」という研究も別の応用例として同時に研究しています。こうした量子技術は、その有効活用によって新しい応用や研究に結びつけることができるので、その可能性は無限大だと考えています。

■現在取り組まれている研究とNTT事業とのかかりについて教えてください。

デジタルトランスフォーメーションはNTTの事業において重要な柱の1つです。デジタル社会の拡大を支える堅牢なプラットフォームの構築はNTTにとって重要な課題ともいえます。量子通貨は「ユーザの理想（完全二者間取引）」と「高い安全性（暗号学的に厳密な安全性保証）」を両立する量子計算機時代のデジタルインフラとして非常に訴求力の高い技術です。私の研究している安全な量子通貨を実現し、盤石なデジタルプラットフォーム構築に貢献したいと考えています。

また、量子計算や量子暗号は量子計算機の実現が迫る今、世界が注目している研究領域です。私の研究は量子計算機自体の開発ではなく、それによって起こることが想定される利便性や危険性に対応するためのものですが、これらの研究領域において革新的な研究成果を創出することは、NTTの技術力の高さを世界にアピールするうえで大変効果的であり、グローバル事業の競争力強化の観点からも重要だと考え、日々取り組んでいます。

■NTTへ入社されたきっかけについて教えてください。

私は2019年に研究者としてNTTに入社しました。入社したい

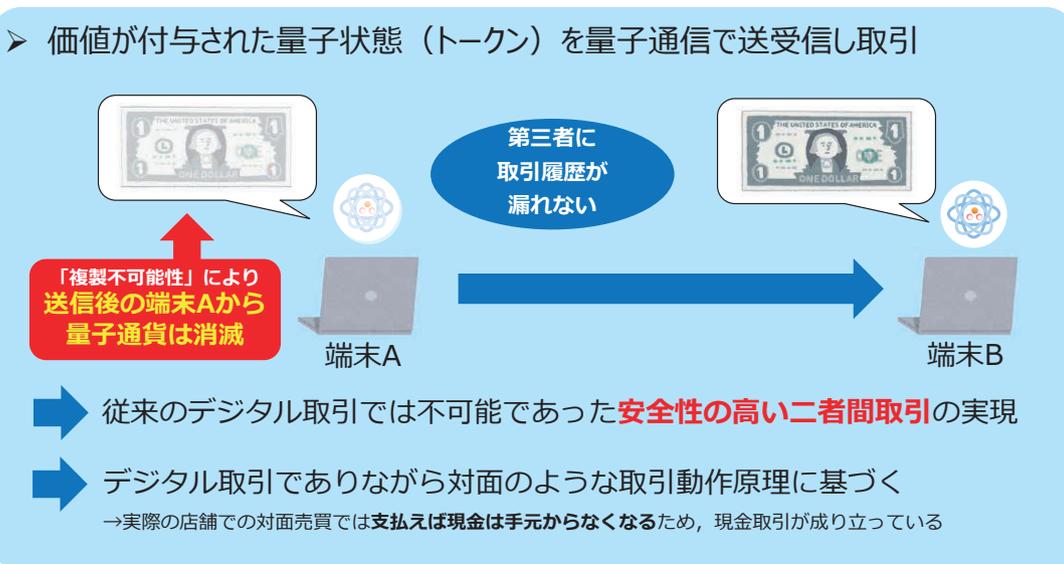


図4 「複製できない電子通貨」を使用した安全な二者間電子取引の実現

と思った1番のきっかけは、博士課程1年のときにNTT研究所でインターンを経験したことです。NTT研究所には、当時から世界的にも著名な暗号理論研究者が数多く在籍しており、通常のインターンの多くは1カ月程度であるのに比べそのときは2カ月の長期インターンだったので。その2カ月間は非常に刺激的な日々でした。結果、そのときの研究を「ユーロクリプト」という国際学会で発表し、高く評価されるという非常に良い成果も得ることができました。そのインターンの期間中に、世界的にも活躍されているNTT内部の研究者の方に「長期間かかるような研究と一緒にやろう」と声をかけていただいたのが入社の大きなきっかけでした。

おかげで大学に戻った後も、自然に「NTT研究所で働けたらいいな」と考えるようになって、博士課程終了後の進路としてNTT研究所を希望し、運良く入社運びになりました。今考えれば、インターンで志望がかなえられたことが私の運命だったようにも思っています。

■所属されているNTT社会情報研究所にはどのような印象をお持ちでしょうか。

NTT社会情報研究所は、情報通信技術により高度化する社会システムや人間社会の変革と発展に貢献する技術の研究開発を行っている研究所です。今すぐに役に立つような技術の研究開発ばかりではなく、長期的な展望に立って社会生活を豊かにするような新技術創出をめざした地道な基礎研究にも力を入れているのが大きな点です。15年から20年先の社会展開を見据えた研究開発も多数ありますし、私の研究もそのようなものの1つです。

NTTという一企業の研究所でありながら、目先の利益だけにとらわれず、惜しみなく真に価値のある研究を行おうとする姿勢は、この研究所の大きな特徴の1つです。

私が所属しているNTT社会情報研究所もいくつかの分野の研究を行っていますが、その中の1つがセキュリティ、暗号理論の研究です。NTTの暗号理論研究は長い歴史を持ち、国内外からも非常に高く評価されています。毎年、世界中から優秀な教授たちや研究者たち、インターンといった方々が私たちの暗号理論研究グループを来訪してくれているのはその証左です。私としても、こうした世界中の研究者の方々と最先端の研究に取り組み、話し合いができることは、研究者としてこのうえない幸せだと感じています。この研究所は、暗号理論研究に関していえば、国内で他にない唯一無二の環境だと感じています。

■研究者・学生・ビジネスパートナーの方々にメッセージをお願いいたします。

これは学生のころからの持論ですが、私は研究の醍醐味は「議

論」だと思っています。1人で黙々と問題を解く時間も楽しいのですが、自分の考えたことをさまざまな人と共有し、議論する中で、良い成果が生まれていく過程は本当に楽しいものです。

例えば、相手が研究者である場合もしかり、学生たち、ましてや基礎的な理論を知らない方たちからでもときには学ぶことがあります。例えば、専門用語を説明したときに出る質問から「ああ、こういう部分が分からないんだな」と、課題を発見でき、次に同じような方々にレクチャーする際の参考になることもあります。また何気ない雑談をきっかけに、非常に優れた成果が生まれることもあり、私は「議論」や「話し合い」の持つ力をこれまで何度も体験してきました。

今後とも議論を重ねて、皆さんと共により良い未来に向けて前進していけたらと考えています。

最後に学生諸君に一言お話しします。NTT研究所は基礎研究の重要性を認識し、地道な基礎研究の積み重ねこそが真の革新的技術の創出につながるという信念を持った研究所です。そのような信念を持っている学生諸君には、NTT研究所は「ぜひに」と心の底からお薦めできる研究環境です。いつか皆さんと一緒に大いに議論し、共に研究できるようになることを楽しみにしています。



(今回はリモートにてインタビューを実施しました)



株式会社NTT コノキューデバイス

<https://www.devices.nttqonoq.com/>



新たなものを自ら開発した、XRグラス「MIRZA®（ミルザ）」



NTT コノキューデバイス
堀清敬社長

2016年にゴーグル型のVR (Virtual Reality) ヘッドセットが相次いで発売され、2022年には多くの企業がメタバース市場に参入し、「メタバース元年」と言われました。VR、メタバースを含むXR (Extended Reality) 市場は、映像のクオリティが低い、楽しめるコンテンツが少なく物珍しさが勝る状況など、期待と現実のギャップが要因となり、一時失速した時期がありました。しかし、コンピュータやデバイス等の性能向上、AI (人工知能) との連携等により市場は伸びており、国内XR市場は2023年度に2851億円に達したという調査報告もあります。こうした中、NTT コノキューデバイスは、XR活用に必須なXRデバイスを開発する会社として設立されました。そこでNTT コノキューデバイス堀清敬社長に、XRグラス「MIRZA® (ミルザ)」の紹介と今後の展開、そして、「我々が届けるデバイスがヒトの生活を豊かにする」という強い信念について伺いました。

“我々が届けるデバイスがヒトの生活を豊かにする”
という強い信念で、MIRZAを自ら開発

■設立の背景と会社の概要について教えてください。

NTT コノキューデバイスは、より多くの方々にXR (Extended Reality) の価値を体験いただけるデバイスの開発をめざして設立されました。NTTグループの技術力と、シャープのスマートフォンをはじめとするさまざまなハードウェア開発のノウハウを結集し、NTT コノキューとシャープとの合併会社として2023年4月より事業を開始しています。

現在、XR技術は、エンタテインメントや遠隔でのコミュニケーションをはじめさまざまな分野で可能性を広げており、それを活用できるXRデバイスへの期待はますます高まっています。こうした状況の中、NTT コノキューデバイスはNTTグループ内でもユニークなメーカーとして世にないXRデバイスの市場・製品をつくりあげるため、企画・開発から販売まで、すべてのプロセスにチャレンジに取り組んでいます。また、XRデバイスの開発と普及をとおして、リアルとバーチャルが融合する“新”時代の実現をめざしています。

私たちは、『We make new device, new “thank you”. new world./ あらたなデバイスを生み出し、あらたな「ありがとう」を生み出し、あらたな世界を生み出す。』をミッションとして、『ヒトから発想し、ヒトが豊かになるXRを。XR on Life Reality。』を

ビジョンに掲げ追求しています。“我々が届けるデバイスがヒトの生活を豊かにする”という強い信念のもと、製品の企画・開発に励んでいます (図1)。

■どのような事業展開をしているのでしょうか。

NTT コノキューデバイスは、XRデバイスをスマートフォンのように日常的に使用してもらい、お客さまにサービスの価値を感じていただけるようXR市場の創出と拡大に取り組んでいます。市場を自分たちで切り拓いていくという強い意気込みのもと、XRデバイスの企画・開発を進めています。また、デバイスだけではなく、NTT コノキューと共に、コンテンツ開発、利用シーンの提案、アフターサポートまでトータルで事業を展開しています。



図1 NTT コノキューデバイスのMVV

現在、XRの技術やデバイスはまだ一般的に広く認知されておらず、市場も未成熟な段階にあります。具体的な利用シーンや用途も明確には定まっておらず、技術の価値やポテンシャルも、まだ十分に理解されていないフェーズです。

このような状況の中、理想とするXRデバイスがまだ世に存在しないのであれば自らつくり出しユーザーへ届けていこうと、NTT コノキューデバイスはXRグラス「MiRZA® (ミルザ)」(図2、表)を開発。2024年9月に発表し、同年10月に販売を開始しました。

MiRZAの特長は下記のとおりです。

- ・電池込みで約125 gの軽量なメガネ型デザインで、重心バランスを考慮した、かけやすさを重視



図2 MiRZAの外観

表 MiRZAのスペック

| | |
|-------------|---|
| 重量 | 約125g |
| サイズ | (使用時) 約187 mm (W) × 約45 mm (H) × 約184 mm (D) (収納時) 約187 mm (W) × 約45 mm (H) × 約96 mm (D) |
| チップセット | Snapdragon® AR2 Gen1 |
| ディスプレイ/光学装置 | 解像度：FHD (1920×1080) 視野角：45° (対角) 輝度：約1000 nits 光学装置：MicroOLED両眼フルカラー ※LetinAR社独自の薄型ミラーバー方式の光学モジュールを採用 |
| 連続使用時間 | 1~1.5時間 ※カメラ使用時や明るさを最大にした際などの負荷の高い使い方の場合 |
| 充電方法/時間 | 本体同梱のUSB Type-Cケーブルにて、2時間以下で充電可能 |
| カメラ | 正面RGBカメラ×1 (撮影画質：FHD)、側面モノクロカメラ×2 ※XR開発プラットフォームの“Snapdragon Spaces”を使用することで、正面RGBカメラの撮影やカメラ画像を用いたXRアプリの開発が可能 ※カメラ利用中は周知のため、LED点滅する仕様としております。(SpacesのCamera Frame Access使用時) |
| オーディオ | マイク×4、スピーカー×2 |
| その他センサ | タッチセンサ(操作用) 近接センサ(装着状態の判定用) 照度センサ(ディスプレイの明るさ自動調節用) 加速度/ジャイロ/カメラによる空間認識センサ(6DoF表現用) |
| 接続方式 | Bluetooth 5.0, Wi-Fi 6E ※スマートフォンと1対1接続 |
| 開発環境 | Snapdragon® Spacesプラットフォーム SDK対応 |

- ・スマートフォンと無線接続による操作が可能で、XRデバイスユーザの50%が煩わしいと思っている (当社グループ調べ) ケーブル接続をなくしワイヤレスに
- ・6DoF (Degrees of Freedom) コンテンツ (視点の回転に加え、前後、左右、上下の移動も可能なコンテンツ) を高輝度・高画質でリアルに表現

MiRZAはドコモオンラインショップやAmazonのチャンネルで販売しています。また、NTT コノキューやNTT ドコモビジネスを通じ、ソリューションも含めたトータルな提案・販売も行っています。

“普段使いのメガネ”のような形状のMiRZAを、XRの世界を体験したことがない方にも、多くの方々の業務・生活をより豊かにしていく

■市場環境はどのような状況でしょうか。その中、どのような事業に注力されていますか。具体的な事例も教えてください。

XRの市場環境としては、VR (Virtual Reality) はゲーム用途として「Meta一強」の市場が確立し、AR (Augmented Reality) / MR (Mixed Reality) は大画面動画視聴ニーズや、法人向けでは作業支援ニーズが顕在化してきました。

デバイスとしてはAppleやMetaのほか、XREALなどの中国勢が続々と参入してきています。

こうした市場環境を背景に、より使い勝手のよいヒトに寄り添うデバイスとして、メガネ型でワイヤレスなXRグラス「MiRZA」が誕生しました。法人向け市場の開拓に向けて、親会社であるNTT コノキューと共にソリューションベンダやパートナーと次のようなPoC (Proof of Concept) やイベント等における体験展示なども推進しています。

■実証実験をはじめMiRZAを活用した主な事例

- ・複合現実製作所の建築鉄骨業向けソリューション「L'OCZ HIT」にMiRZAが対応：ワイヤレスで軽量なデバイス特性を活かし、現場でのさらなる作業効率の向上に貢献します。
- ・地域百貨店での新たな遠隔接客にMiRZAを活用：都市部の大型店舗と接続し現

地スタッフがMirZAをかけることで、店舗内や商品の映像をMirZAのカメラを通じて共有し、ハンズフリーで遠隔地と会話をしながら商品のご紹介・接客を可能にします。

- ・MirZAを活用した、家具の新たな購買体験の実現をめざす実証実験：商品実物や在庫がない場合など、MirZAで家具のARコンテンツをご体験いただくことによる購買促進を目的とし、商品3DモデルならびにXRデバイス活用による店舗での新たな購買体験の可能性を検証しています。
- ・テーマパーク 富士急ハイランドにて、「けものフレンズVぼろじょくと×富士急ハイランド」XR体験イベントでの活用：現実空間を認識し、キャラクターなどのデジタル情報を現実空間に溶け込むようにXRデバイス上に表示することで、まるでキャラクターが現実の世界に現れたような演出を可能にします。

■今後の展望についてお聞かせください。

XRデバイスは今後、“普段使いのメガネ”のような形状に到達できれば間違いなく社会やユーザから支持されると考えています。それを実現させるためには、まずメガネとしてのデザインを成立させ、さまざまな技術的ハードルを乗り越えたうえで、その先にある新たなサービスを創出していかなければなりません。ITデバイスでありながら、視力を補うというメガネ本来の機能に加え、フィット感や掛け心地、形状の美しさといった基本的な要素を満たすことが求められます。さらに、光学系や各種制御部をコンパクトな筐体に収めるハードウェア設計、バッテリーの持続性やユーザビリティに配慮した操作性も不可欠です。

加えて、少子高齢化による技術者不足や技術継承の社会課題に対して、XRデバイスを活用した教育や遠隔からの指示・管理が可能になる。耳の不自由な方がノンリアクションで情報を視覚的に受け取れる。このように具体的なアプリケーションやサービスと組み合わせることで、ユーザにとって実用的かつ価値ある体験を提供していくことが重要です。

この道のりは決して簡単なものではありませんが、1つひとつハードルを乗り越えた先には、ヒトの暮らしの豊かさや「ありがとう」が生まれる未来があると信じています。そして、これまでXRの世界を体験したことのない方々にもXRデバイスの価値を届け、業務や生活をより良く豊かにしていく、私たちはそんなデバイスの実現をめざしていきます（図3）。



図3 MirZAの今後の展開

担当者に聞く

XRデバイスのベンチマークが世の中に存在しない中で、ゼロから企画、技術要素を確認し、MirZAを世の中に出すという強い思いで開発

取締役 商品企画部 部長

小木曾 敦 さん

■担当されている業務と、今後の想いをお聞かせください。

取締役として事業戦略のマネジメントと兼任し、商品企画やパートナー連携から、プロモーションや販路開拓まで、商品全体を統括する役割を担っています。

現在、XRの技術は発展途上であり、社会への浸透の期待はありながらも、課題は多くあります。こうした中、私たちはXRデバイス1号機であるMirZAを発売し、社会や企業においてどのような利用・業務改善につながられるか、お客さまと一緒にユースケースの開拓を行っています。

製品開発においては、自分たちのめざすXRデバイスのベンチマークが世の中に存在せず、全く新しいものをゼロから検討し企画していかなければなりません。また、開発面においても未知なことが多く、企画を実現させるための技術要素を探すことから再出発せざるを得ず、想定以上の時間を要し手戻りも多々発生しました。しかし、この製品を世に出す、という強い思いのもと、2024年10月にMirZAの販売開始に到達できました。

市場における認知が少ないからこそ、お客さまに体験いただいた際には、驚きと感動の言葉を頂戴することもあり、新たな価値や魅力を提供できるチャンスととらえています。

ソリューション開発企業からも日々問合せをいただいております。パートナープログラムに加入のパートナーも50社近くになりました。XRという革新的な技術により、社会のさまざまな方々の課題解決につながるよう、パートナーの皆様と一緒にユースケースの創出、社会実装につなげていきたいと考えています。

最後に私たちは、腕時計を付けている感覚でスマートウォッチをご利用いただくのと同様に、普段メガネをかけている人が「このメガネじゃなくてMirZAをつけよう」と思うような未来を目標にしています。XRの世界を体験したことのない方々にも、さまざまな利用シーンで活用していただき、多くの方々の業務・生活をより豊かに、社会課題の解決につながる一助になれるようなメガネ型のデバイスの開発を推進していきたいと考えています。



チーム間の強いコミュニケーション・連携で MiRZAを開発

設計開発部 部長

桂 敬二 さん



■担当されている業務と、今後の想いをお聞かせください。

MiRZAをはじめとするメガネ型のXRデバイスの設計開発を担当しています。

XRデバイスの設計開発は、「デバイスのデザインに大きくかかわる機構設計」「デバイスの基板、各種デバイス（カメラ、各種センサ等）にかかわる回路設計」「デバイスの動作・ユーザインタフェースにかかわるソフトウェア設計」をもとに行われており、こうした設計開発の責任者をしています。

メガネ型のデバイス自体が、新規商材で世の中に成功事例がなく、「常に装着し続けるための技術（重量を含めた小型化）」「手に取りやすい価格（メガネ+α）」「現実視界を邪魔せず、見やすい表示品位」等において技術が市場ニーズに追いついておらず、市場の動向を確認しつつ、現時点でのベストを模索している状況です。

ソフトウェア設計と異なり、回路・機構設計はさまざまな測定環境・機材（例として恒温槽、測定機器）が必要となるため、シャープの東広島事業所内に当社の事業所を設置し、本社のある東京の山王パークタワーとの2拠点で開発をスタートさせました。

当初は新規商材ということもあり、それぞれのチーム間のコミュニケーションを含めた連携に戸惑いもありましたが、シャープのスマートフォン開発部門の協力もあり、会社設立から2年の現在では連携もうまく回り始めています。今後も、市場ニーズに見合った商品の実現を追求し続けていきたいと考えており、常に市場の動向に目を向け、実現するための技術情報を収集し、市場の求めているものに近づいていきたいと考えています。

NTTコノキューデバイス ア・ラ・カ・ル・ト

■MiRZAを着けてお出かけ

MiRZAの便利さをアピールするため、仕事や自宅における利用はもちろんのこと、MiRZAをかけたまま電車に乗ったり、カフェに行ったりしているそうです（写真）。一見、通常のメガネと変わらないため、電車では意外と気付かれませんが、カフェの店員さんには対面で接客してもらおうと独特なレンズにびっくりされることもあるようです。

こうしたエピソードを含め、MiRZAの最新情報はもちろん、MiRZAの便利な使い方などさまざまな投稿をしていますのでMiRZAのX公式アカウント@qonoq_devicesをフォローしてくださいとのことです。

■執務室の癒し・お土産コーナー

執務室の中に大きな棚があり、その上がお菓子コーナー（お土産コーナー）になっているそうです。あるとき、社員が出張や旅行へ行くとひっそりとそこへお土産を置いたのがことの始まりなんだとか。今では、休憩や残業時の癒しになっているそうです。

■メガネ型のXRデバイス着用を当たり前光景に

MiRZAのユースケース発掘はまずは自分たちから。ということで、毎週行われるマネジメントミーティングでは、参加者全員がMiRZAを着用し会議に臨んでいるそうです。資料の複数表示や個人的に確認したい内容などにはMiRZAが重宝しているとのこと。全員がメガネ型のデバイスを装着している光景は少し異様ですが、それが当たり前光景になるよう、取り組んでいくとのことです。



写真

IOWN Global Forum アニュアルメンバミーティング (ストックホルム) と活動の報告

2025年4月22～25日に、IOWN Global Forum (IOWN GF) は、スウェーデン・ストックホルムにて、IOWN GF設立から5周年を迎えるアニュアルメンバミーティングを開催しました。世界各国から約240名のメンバが参加し、これまでの5年間の活動実績を振り返りつつ、今後の5年間の活動に向けた計画やユースケース、技術検討について活発な議論がなされました。4月24日には、IOWN GFの一般公開イベントである「FUTURES」も併催され、IOWN技術の重要性や展開について講演がありました。ここでは本会合の様様と合わせて最近の活動状況について報告します。

IOWN GF 2025年アニュアルメンバミーティング (ストックホルム) 開催報告

IOWN Global Forum (IOWN GF) では、毎年4月に全メンバ向けの年次会合を開催し、年間活動実績の共有や貢献メンバへの表彰およびSC (Steering Committee) /WG (Working Group) /TF (Task Force) のミーティングを実施しています。

今回開催された2025年アニュアルメンバミーティングは、IOWN GFの設立から5周年を記念する会合であることから、年間の活動の報告や計画だけでなく、これまでの5年間の活動実績を振り返りつつ、今後の5年間の活動方針について議論を行う大きな節目となる会合となりました。

現地には世界約60の会員企業・組織から、250名以上の参加者を迎え (写真1)、オンライン参加者も加わって活発な議論がなされました。

オープニングプレナリでは、President and Chairpersonの川添雄彦氏 (NTT) がオープニングメッセージとして、IOWN GFの設立から5周年を迎えるにあたり、これまでの活動を振り

振り返りつつ、フォーラムを支えてくださった方々のご尽力に対して感謝の意を述べました (写真2)。また、今後5年間に向けた取り組み方針として、これまでIOWNが実現をめざしている低消費電力、大容量、低遅延といった従来の3つの特性に加え、光格子時計ネットワークや量子コンピュータ、量子通信などの量子技術を取り入れた「Beyond Digital」によって新たな価値の実現をめざすことが示されました。

続いて基調講演では、スウェーデン国際開発協力・外国貿易担当副大臣のHåkan Jevrell氏が、次世代技術が進化し、地政学的な不確実性が持続し、産業界が新たな課題に直面する中、将来を見据えたビジネスの競争力を維持するためのシステムとソリューションの開発がますます重要になっていることについてスピーチを行いました。

また、IOWN GFのディレクタ5名について改選結果の発表があり、Eric Hardouin氏 (Orange)、林通秋氏 (KDDI)、水野晋吾氏 (富士通)、Ralph Rodschat氏 (Ciena)、Jefferson Wang氏 (Accenture)の5名の再選が発表されました。

さらに年間表彰プログラムにおいて、IOWN GFのSCやWG



写真1 IOWN GF 2025年アニュアルメンバミーティング (ストックホルム) 参加者

の活動に顕著な貢献をしたメンバへの表彰が行われました。特に2025年にMWC (Mobile World Congress) バルセロナ2025におけるIOWN GFブースと半日セッションでの卓越した貢献が評価され、Marketing Steering Committee (MSC) から4名が受賞しました。また、Technology and Use Case Working Group (TUCWG) から、金融業界向けサービスインフラストラクチャや、エネルギー効率のユースケース、All-Photonics Network (APN)・Data Centric Infrastructure (DCI) アーキテクチャ等の検討に対する卓越した貢献が評価され、6名が受賞しました。

メンバによるプレゼンテーションセッションでは、9つのプレゼンテーションが行われました。

Day2には、富士通のFrancois Moore氏が「Emerging Optical and Compute Services in the Era of AI & Compute as a Service」と題し、AI (人工知能) の新時代を先導する新たな光サービスの必要性について言及しました。NokiaのDavid Neilson氏は、「The Optical Network: A Foundation for the Intelligent Future」と題して、よりスマートな未来のために光ネットワークが基本的に必要であることを論じました。Intel, NTT, Red Hatの代表者が「Offloading Network Functions to

DPU/IPU in OpenShift/K8s: A Use-Case Study with IOWN Deterministic Networking over the Open APN」と題して発表し、NokiaのJohan Bäck氏は、ネットワークの消費電力を削減するための動的な容量割り当ての取り組みを共有しました。最後に、富士通、NEC、NTTの代表者が、deterministic latency computingについて議論しました。

Day3には、NTTの樽林亮介氏が、さまざまな業界イベントで展示されたDCI技術について講演しました。また、NTTの二ノ方一生氏も「Activities and Achievements Related to DCI with Composable Disaggregated Infrastructure」と題してDCIに関するプレゼンテーションを行いました。NokiaのTeresa Monteiro氏が「Operationalization of APN - Solving Coherent Optical Pluggables in Disaggregated Environments」と題して発表し、住友電気工業の西本裕明氏がOpen APNにおける波長パスの経済性について議論しました。

会合では、これらのプレゼンテーションのほかに、WG/TFでのワークショップ、分科会が行われました。エネルギー効率、データセンターの相互接続、リファレンス実装モデルなど、最新のユースケース、業界へのインパクトに関するさまざまな議論が活発に行われました。



写真2 オープニングメッセージ プレゼンテーション模様

なお、今回のメンバミーティングは2025年9月30日～10月3日に米国ダラスで開催される予定となっています。

FUTURESストックホルム2025

2025年4月24日にメンバミーティングに併催して、IOWN GFの一般公開イベントである「FUTURES Stockholm」が開催されました。FUTURESの目的は、IOWN GF外部も含めたIOWN関連技術関係者にIOWN技術開発やユースケース創出の状況や展開を伝えるとともに、メディアやアナリストをとおしてIOWN GFの取り組みの重要性やインパクトに対する認知を広げることで、IOWNのエコシステムを拡大して普及を加速することです。

今回のFUTURES Stockholmでは、250名を超える現地参加者と70名を超えるオンライン参加者を迎え、フォーラムの重要な作業に関するプレゼンテーションやパネルディスカッションが行われました。

グローバルリサーチ企業であるOmdiaのIan Redpath氏からは、「Market Landscape Study」と題して、APNが提供するデジタル経済の未来に関する新しいホワイトペーパーの内容についてプレゼンテーションが行われました。

また「Driving Energy and Efficiency and Sustainability」と題して、NokiaのLieven Levrain氏が司会を務め、Red Hatの杉山秀次氏とOrangeのEric Hardouin氏をパネリストとして、持続可能で高性能なコンピューティングおよびネットワークインフラストラクチャを構築するためのエネルギー効率の取り組みについて、パネルディスカッションを実施しました。

次の公開イベントは2025年10月のミッドタムメンバミーティングと併せてFUTURES Dallasを開催予定です。

IOWN GFの活動状況

IOWN GFの対外的な活動として、2025年3月3～6日にBarcelonaで開催された世界最大の通信業界イベントであるMWC25において、Partner Programmesでのセッション開催と、IOWN GFとして初めてブース出展を実施しました。

Partner Programmesセッションでは「Evolving Networks at the Speed of Light: Sustainable Innovation with the IOWN Global Forum」と題して、Accenture, Ciena, Ericsson, KDDI, Microsoft, Nokia, NTT, NTTドコモ, Red hat, SK telecomは、IOWNの技術やフォーラムがめざす

新たな未来像について語り、AIによって増大するデータセンタ需要や、5G（第5世代移動通信システム）以降のネットワークの実現において、IOWN技術の適用によってエネルギー消費などの課題解決にどのような影響を与えるかについて議論を行いました。

またIOWN GFの出展ブースでは、IOWN GFがめざすビジョンや、APNに関するソリューションの展示や紹介するとともに、金融機関向けのマルチデータセンタインフラストラクチャや、リモートメディアプロダクションといったアーリー・アダプション・ユースケースの取り組みに関する紹介などを行いました。

IOWN GFでは、MWC以外にもOFC (Optical Fiber Communication Conference and Exposition) や ECOC (European Conference on Optical Communications) などの光通信分野における主要な国際会議やThe Open Compute Project (OCP) やLinux Foundationなど外部団体と連携して対外的な情報発信にも積極的に取り組んでいます。

これらの活発な活動を反映して、IOWN GFのメンバは増加しています。2025年度を迎えて以降では、Turkcell, 三井住友フィナンシャルグループ, SOITEC, ピュア・ストレージ・ジャパン, Morgan Stanley, インテック, パトラス大学などが新たに参画し、現在、世界中の164の企業・組織が加入しています(2025年5月末)。IOWN GFは、今後も新メンバの加入を勤めるとともにメンバ間で連携した活動を加速していきます。

■参考文献

- (1) <https://iowngf.org/iown-global-forum-annual-member-meeting-april-2025-highlights/>
- (2) <https://iowngf.org/iown-global-forum-showcases-latest-network-innovation-at-mwc-2025/>
- (3) <https://iowngf.org/industry-event-mobile-world-congress-2025/>

◆問い合わせ先

NTT 研究企画部門
IOWN推進室