

NTT 技術ジャーナル

5 M A Y
2024
Vol.36 No.5

特集

IOWN/6Gに向けた光・電波・音波を活用する 大容量・低遅延伝送技術

トップインタビュー

辻 ゆかり

NTT研究開発担当役員 情報ネットワーク総合研究所 所長

グループ企業探訪

ドコモビジネスソリューションズ

from NTTアーバンソリューションズ

NTTアーバンソリューションズが推進する「街づくり×デジタル」の取り組み



4 トップインタビュー

而今の姿勢で「三方よし」をめざす
辻 ゆかり

NTT研究開発担当役員

情報ネットワーク総合研究所 所長



8 特集

IOWN/6Gに向けた光・電波・音波を
活用する大容量・低遅延伝送技術

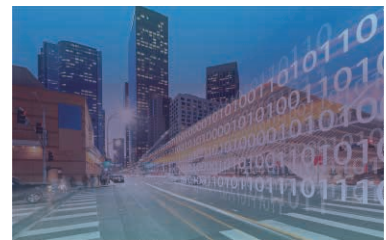
10 IOWN/6Gの実現と世界一・世界初の新たな価値創出に向けて

14 低遅延トランスポート技術と精密バイラテラル制御技術による触覚を伴った
遠隔ロボット制御

19 IOWN/6G時代の社会基盤価値を創造する波動伝搬技術の研究開発

23 大規模データセンタネットワークを支える1.6 Tbit/s級イーサネット光伝送技術の研究開発

28 主役登場 大森 誓治 NTT未来ねっと研究所



For the Future

29 期待高まる国産生成AI（後編）
——LLMとAIガバナンス

36 挑戦する研究者たち

松尾 慎治

NTT先端集積デバイス研究所/NTT物性科学基礎研究所 フェロー

光デバイス・光電融合デバイスで世界をリード。
自分たちの技術を宣伝して、仲間を増やしていく



特集

40 挑戦する研究開発者たち

仲宗根 慎

NTT西日本 技術革新部 IOWN 推進室

古谷 陽平

NTTフィールドテクノ サービスエンジニアリング部
アクセス設備部門

光ファイバセンシング技術で設備エンジニアリングにDXを



For the Future

特別企画

46 明日のトップランナー

中野 允裕

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
NTT物性科学基礎研究所 特別研究員

増え続ける無限のデータを解析するための
「ノンパラメトリックベイズ法」



挑戦する研究者たち

50 グループ企業探訪

株式会社ドコモビジネスソリューションズ

モバイルとソリューションを組み合わせ、お客さま、地域社会の
課題解決のため社会・産業DXを推進していく会社



挑戦する研究開発者たち

54 from NTTアーバンソリューションズ

NTT アーバンソリューションズがめざす「街づくり×デジタル」の取り組み

明日のトップランナー

58 Webサイト オリジナル記事の紹介

6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、ご要望、お問い合わせ先

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

本誌ご購入のお申し込み、お問い合わせ先

日本電信電話株式会社 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/>



from
NTTアーバンソリューションズ



NTT 研究開発担当役員
情報ネットワーク総合研究所
所長

辻 ゆかり Yukari Tsuji

PROFILE

1989年日本電信電話株式会社入社。2014年NTT西日本研究開発センタ所長、2016年NTTネットワーク基盤技術研究所長、2019年NTTアドバンステクノロジー取締役、ネットワークイノベーション事業本部副本部長、IOWN推進室室長、2022年同社IOWNイノベーション事業本部長を経て、2023年6月より現職。



而今の姿勢で「三方よし」をめざす

あらゆるモノを「つなぐ」情報通信ネットワークを構成する基盤技術、および持続可能で豊かな社会を創るための革新的な環境エネルギー技術の研究開発を推進するNTT情報ネットワーク総合研究所。IOWN (Innovative Optical and Wireless Network)、ロバストネットワーク、環境エネルギーを三本柱として、サステナブルな情報社会基盤の実現に貢献し、新たな価値提供をめざす、NTT情報ネットワーク総合研究所の辻ゆかり所長に、研究開発戦略とトップとしての心構えを伺いました。

サステナブルな情報社会基盤を創る

情報ネットワーク総合研究所のミッションについて教えてください。

私たちNTT情報ネットワーク総合研究所 (NW総研) は、あらゆるものをつなぐサステナブルな情報社会基盤の実現を通じて、新たな価値を提供することをミッションに掲げています。サステナブルと聞くと、脱炭素などの環境に関する施策を思い浮かべる方が多いかと思いますが、サステナブルにはそれ以外にも非常に深い意味があると考えています。

研究開発の三本柱である、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network)、ロバストネットワーク、環境エネルギーにおいて、私たちがめざす持続可能なポイントについてお話しします。

1番目のIOWNでは超高速、低遅延、低消費電力なネットワークの実現をめざしています。データドリブン社会の進展や生成AI (人工知能) に代表されるAIの進歩・普及に伴い、今後、ますます通信トラフィッ

クやデータセンタでの情報処理量が増大することは自明です。そうなりますと消費電力が大きな社会問題となってきます。IOWNは通信そのものに要する消費電力を抑えるだけでなく、オールフォトニクス・ネットワーク (APN) でデータセンタ間やエッジ間を超高速・低遅延でつなぐことにより、データや電力の地産地消を可能とします。また、多くのユーザが多様なサービスやソリューションをIOWN上で同時に利用できれば、ユースケースやユーザ数が増加しても、社会的なアディショナルコストをできる限り抑えることができるでしょう。

2番目のロバストなネットワークはどんな状況でも使い続けられるという意味で、サステナブルの実現には非常に重要な要素です。災害や故障に対するネットワークの強靭性を高め、被害や影響を最低限に抑えらるとともに、迅速に復旧することが求められます。そのため、ネットワークの状況やサービス影響範囲の可視化や、ネットワーク運用におけるオペレータの関与を最小化

するゼロタッチオペレーションの研究開発を着々と進めています。これらの技術は、将来的な労働者人口減少への対策としても大変重要です。

そして、3番目の環境エネルギーについては想像に難くないでしょう。私たちは、経済成長と環境負荷ゼロの両立をめざし、創エネや炭素吸収等の攻めのサステナビリティの推進と、環境に適應するための地球環境観測・予測技術の確立に取り組んでいます。例えば、台風や線状降水帯などの極端気象の早期高精度予測ができれば、プロアクティブに対策を打てますので、ロバストネットワークの実現にも大きく役立ちます。

このように、私たちは「サステナブル」を多角的にとらえ、これらの研究開発をとおして、真に持続可能な情報社会基盤の実現をめざしているのです。



サステナブルな情報社会基盤の実現にはさまざまな角度からの研究開発が必要なので、それらの研究を担うNW総研はどのような布陣なのでしょう。

NW総研はミッション遂行のために、3つの研究所、「ネットワークサービスシステム研究所」「アクセスサービスシステム研究所」「宇宙環境エネルギー研究所」から構成されています。

ネットワークサービスシステム研究所は、将来のネットワークサービスを実現するネットワークアーキテクチャやネットワークシステムを支える基盤技術、通信トラフィック制御・品質管理・ネットワークオペレーション技術に関する研究開発を手掛けています。

アクセスサービスシステム研究所は、スマートな社会を実現するための、ワイヤレスアクセス技術、オプティカルファイバアクセス技術、インフラストラクチャ技術、そしてこれらのオペレーション技術の研究開発を展開しています。

最後に、圧倒的にクリーンな次世代エネルギーや環境負荷低減技術、地球環境と社会の未来を予測し環境に適應する技術等を研究開発しているのが宇宙環境エネルギー研究所です。

私はこの3研究所がNW総研に属して

いることが非常に重要であると考えています。前述のとおり、サステナブルな情報社会基盤を構築し、世の中の役に立つものにしていくためには、常にネットワークと環境エネルギーの両面から検討し、相乗効果を得ることが必要であるからです。さらに、従来技術の限界を打破して豊かな社会を創るため、国内外の研究者やビジネスパートナーとも連携しながら、実際に社会実装される道筋を描けるよう、日々の研究開発業務に誇りを持って取り組んでいます。

さまざまな違う味を持つ研究者が相互に呼応する環境づくり

特に重点的に取り組まれている研究開発を伺わせてください。

当面はIOWNをより多くのユーザに使い勝手よく使っていただくための技術確立と事業化が大きな目標になっています。NW総研は、IOWNの構成要素のうち、特にAPNに大きくかかわっています。めざしているのは、さまざまなユースケースに対して、ユーザが使いたいときに必要な分だけ、使い方に適した品質で、光パスを利用できる環境の提供です。そのため、多様なユーザ装置を低遅延で集線するPh-GW (Photonic Gateway) や、ファ

イバ種別の異なるネットワーク間を結ぶことが可能なPh-EX (Photonic Exchange) を実現するとともに、ユーザ要件に基づいてAPNを制御するコントローラの研究開発を推進し、エンド・ツー・エンドで光パスを提供するための技術開発に挑んでいます。さらに、ネットワークアーキテクチャ検討やオペレーションに関する研究開発にも取り組んでいます。例えば、端末とクラウドの情報処理をいつでもどこでもネットワークが協調させ高速化する技術により、ユーザ環境や端末、サービスに制限されないフレキシブルなサービス体験の創出につなげていこうとしています。

また、無線通信においては、大容量化・低遅延化に加えて、無線環境の変化に追従したプロアクティブな無線制御技術や、NTN (Non-Terrestrial Network) の活用等による未踏領域へとカバレッジを拡張する技術の研究開発等に取り組んでいます。

研究開発は順調でしょうか。研究開発を促進するための創意工夫を教えてください。

おかげさまで苦勞しながらも順調に進んでいると思います。当初、IOWN構想は2030年をターゲットにしていたのですが、専用線タイプのIOWN APN1.0はすでに

2023年3月よりサービス開始されました。今後は2025年の大阪・関西万博で最新技術を披露した後、順次、本格的なIOWNのサービスが展開されることになるでしょう。2019年にIOWN構想が発表されてからこれまで、NW総研としては、構想の具体化検討と各種技術の仕込みをしてきましたが、2024年はそれらの技術の事業導入に向けた道筋をつくる重要な年とらえています。あるべき姿とそこに向けたロードマップとして、各々の技術が、いつ、どのようなかたちで導入されるかを明確化していくためには、さまざまなプレイヤーが持つ知見を持ち寄り、総力を結集する必要があります。

そこで、関係する複数の部署や研究所の主要メンバに声をかけて集め、技術や分野を横断して検討する場を設けて、私も自ら参加しています。そこでは、報告に回答するだけでなく、幅広い参加メンバの多角的な意見を聞くことにより、検討に厚みが出て、リアリティも増します。こうした営みにより、組織またがり、皆で協力して検討を進めていこうという意識の変化がみられ、研究の速度と深度が増してきたとい

う実感を持っています。

このようなオープンマインドで協力し合う風土を醸成するため、私は所長として研究者が各自の持ち味を活かせる職場環境づくりにしっかりと取り組んでいきたいと考えています。NW総研には尖った技術で“世界初”や“トップデータ”を出すような研究者もいれば、アーキテクチャを考える研究者、エンジニアリング的な創意工夫が非常に得意な研究者もいます。こうしたさまざまな得意技を持つ研究者が在籍していることが非常に重要な財産だとらえています。1人ひとりが自分の特徴を活かし、自信を持って力を発揮してもらうためには、風通しのいい職場環境が大切です。そこで、まずは私自身を所員に分かってもらうことから始めようと、社内の情報共有ツールに「ゆかりの部屋」というチャットルームを開設しました。日々、感じたこと、思ったことを短い言葉で発信していますが、今回のインタビューについても共有したところ、所員から応援マークが次々と送られてきました。こんな感じで、相互に呼応し合える雰囲気ができつつあります。

「失敗っぽく」みえることは、その方法ではうまくいかないと確認できた「成功への過程」

ところで、NW総研の所長に就任されて1年余りが経とうとしていますが、どのような心境でいらっしゃいますか。

想像していたよりもはるかに毎日楽しいですね。私自身の物事のとらえ方もあると思いますが、おそらく、所員が非常に多岐にわたる技術に対して魂を込めて取り組んでくれていて、日々、さまざまな課題について所員たちとキャッチボールできているからだと思います。正直なところ、着任前は「久々に戻る研究所は活気にあふれているか、私に対して所員が気さくに接してくれるだろうか」と少々心配していたのですが、まるで杞憂でした。

ただ、一方で、非常に優秀な研究者の集まりであるがゆえに、自分自身と自チームの責任を果たしたり、他者や他チームの活動を尊重するがあまり、所掌範囲を真面目に守りすぎているのではないかと思います。

があります。この感覚を払拭するために、繰り返しになりますが、お互いが少しずつ踏み込んで議論できるように、オープンな雰囲気づくりを行い、組織横断の検討体制で取り組めるように働きかけています。所内のみならず、他研究所や事業会社の間もしっかり埋めていけるように進めており、この1年で良い方向に回り始めたのではないかと思います。

次の1年は、まさにIOWN構想の実現フェーズで大きなギアチェンジの年となりますので、IOWNがより多くのお客さまに使っていただけるよう、しっかり検討を進めていきたいと考えています。

最後に技術者や研究者の皆さん、そしてお客さまやパートナーの皆さんへのメッセージをいただけますか。

まず、研究所の皆さん。研究を進めていく中で「失敗っぽい」ことはたくさんあります。もちろん私もそうでした。しかし、それを「失敗」だと思っているのは、自分でそう決めつけているだけではないでしょうか。「失敗っぽく」みえることは、その方法ではうまくいかないと確認できた結果で、別の方法でトライすればうまくいくかもしれません。それはもはや「失敗」ではなく「成功への過程」なのです。そう考えて、チャレンジを怖がらないでください。「ダメなら次の方法でやればいいや」、というくらい、軽くトライする気持ちで研究開発に臨んでほしいですね。

そして、お客さまやパートナーの皆さん。私たちはサステナブルな情報社会基盤をつくりたいと考えています。そのためには私たちの研究開発成果が組み込まれたエコシステムを確立し、お客さま、私たち、社会の「三方よし」となるよう努めていきたいのです。ともに素敵な未来をつくっていきましょう。

さて、トップである私の仕事は方向性を示すことと、都度、的確な判断をすることだと考えます。そのために日頃から自らの心と体をフラットに保てるように努めています。このような姿勢の背景には、幼少期から取り組んできたチームスポーツを通して得た教訓があります。私は幼いころからバスケットボールを続けてきており、お互





得意技を持つ者どうしが、個々の技を磨いたうえで、力を合わせてさらにパワーを発揮するという経験を重ねました。加えて、大学時代に始めた熱気球では、天候や他の気球のように、自分ではどうにもコントロールできないものがあるということ、身をもって学びました。自分でコントロールできないことを深く悩んでも仕方ありません。それならば、コントロールできないことで悩むのはやめて、自分自身がどうでき

るかに注力すればよいではないか、と思うようになりました。

こうしてたどり着いたのが「而今」という言葉です。「而今」は仏教用語です。変えられるのは「今だけ」、「自分だけ」であり、過去を変えることはできないので、今を一生懸命生きようという意味だと解釈しています。「而今」は私の座右の銘でもあります。「今」を精一杯楽しみながら過ごしつつ、社会の役に立てたら最高ですよ！

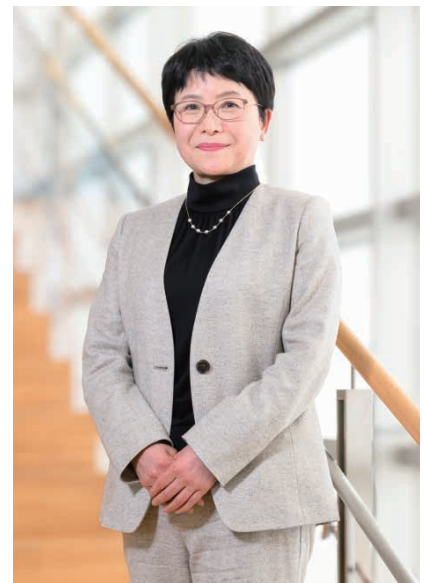
(インタビュー：外川智恵 / 撮影：大野真也)

インタビューを終えて

パッと周囲が照らされるような明るさと温かさ。辻所長にお目にかかった瞬間に抱いた印象です。お話を伺う間も終始笑みを絶やされず、語られる話はすべて、前向きに締めくくられます。「スーツを纏ってスイッチオン」と表現されたトップとしてのお姿は、凛としているのにとてもしなやかな印象です。そんな辻所長が就任以来、毎日のように発信されている「ゆかりの部屋」をのぞかせていただきましたところ、短く簡潔につづられた文章に、フランクに反応する所員の皆様のご様子にNW総研の一体感を感じました。

研究者の道に入られたのは理系のご兄弟

の影響だとか、「4人兄弟の3番目で自由に育てられたせいでしょうか。自分で物事を決めるのに慣れていて、しかも、割と楽観的なんですよね。同じ物事を見ている、考え方1つで、とらえ方は大きく変わってくると思っています」と辻所長。スポーツから芸術鑑賞、お酒まで（「而今」という地酒もあるそうです）非常に幅広いご趣味をお持ちとのこと、どうやって時間のやりくりをしていらっしゃるのかと伺いましたら、「その時、やりたいことをしているだけです」と微笑まれました。とかく大人が陥りがちな「〇〇すべき」という結論から解放されるような、オーセンティックなあり方の大切さを感じたひと時でした。



IOWN/6Gに向けた 光・電波・音波を活用する 大容量・低遅延伝送技術

本特集では、IOWN(Innovative Optical and Wireless Network)/6G(第6世代移動通信システム)の実現に向けて、APN(オールフォトンクス・ネットワーク)サービスのユーザビリティの向上に資する高機能化技術、光・電波・音波を用いた世界最高性能の大容量化・カバレッジ拡張に向けた伝送技術などの既存サービスとは一線を画す新たな価値を提供する情報通信基盤の研究開発に関するNTT未来ねっと研究所の取り組みを紹介する。

IOWN/6Gの実現と

世界一・世界初の新たな価値創出に向けて

10

NTT未来ねっと研究所で取り組んでいるフロンティアコミュニケーション技術、波動伝搬技術、トランスポートイノベーション技術の概要を紹介する。



低遅延トランスポート技術

遠隔ロボット制御技術

OAM 多重伝送技術

海中音響通信技術

1.6 Tbit/s 級
イーサネット光伝送技術

低遅延トランスポート技術と精密バイラテラル制御技術による 触覚を伴った遠隔ロボット制御

14

遠隔地にいる操作者に対して、まるで目の前で物を触っているかのような細やかなフィードバックを遅延なく提供できる低遅延トランスポート技術と遠隔ロボット制御技術について紹介する。

IOWN/6G時代の社会基盤価値を創造する波動伝搬技術の研究開発

19

IOWN/6G時代に向けて、超高速・大容量通信を実現する「サブテラヘルツ帯OAM多重伝送技術」と超カバレッジ拡張を実現する「海中音響通信技術」について紹介する。

大規模データセンタネットワークを支える

1.6 Tbit/s級イーサネット光伝送技術の研究開発

23

送受信回路による波形歪みへの耐性に優れるデジタル信号処理技術、超広帯域ベースバンド増幅器ICモジュール、400 Gbit/sの光強度変調信号を4並列に空間分割多重伝送したフィールド環境での光伝送実験について紹介する。

主役登場 大森 誓治 NTT未来ねっと研究所

28

未踏領域を開拓する無線通信の実現に向けて



IOWN/6Gの実現と世界一・世界初の新たな価値創出に向けて

NTT未来ねっと研究所（未来研）では、世界をリードし続けることで蓄積してきた世界トップレベルの技術力でIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）の実用化に貢献するとともに、社会に変革をもたらす世界一・世界初、新たな価値の創出によりNTTグループの競争力強化に貢献することをミッションとして研究開発を行っています。本稿では、未来研で取り組んでいる技術の概要を紹介します。

キーワード：#オールフォトニクス・ネットワーク（APN）、#光伝送技術、#無線伝送技術

あかばね かずのり^{†1} みずの こうへい^{†2}
赤羽 和徳 / **水野 晃平**
 たかすぎ こういち^{†2} すずき けんじ^{†2}
高杉 耕一 / **鈴木 賢司**
 きさか よしあき^{†2}
木坂 由明

NTT未来ねっと研究所 所長^{†1}
 NTT未来ねっと研究所^{†2}

はじめに

NTT未来ねっと研究所（未来研）は、光・電波・音波等のさまざまな周波数帯の物理的な波動を駆使し、光ファイバ・空中・水中等の通信媒体を含む幅広い領域に対して長距離・高速大容量の情報伝送を可能とする通信技術の確立をめざして、研究開発に取り組んでいます。

未来研の取り組み領域を図1に示します。光ファイバにおける光通信、空中・宇宙空間における無線通信、水中における音響通信の大容量化・長距離化・カバレッジ拡張・低電力化技術を中心としつつ、自由空間光通信などの電波と光の境界領域の通信技術にも取り組んでいます。

未来研は、NTTが推進するIOWN（Innovative Optical and Wireless

Network）の実現に向け、オールフォトニクス・ネットワーク（APN）の研究開発を推進しています。2023年3月にAPN IOWN 1.0サービスが開始され、エンド・ツー・エンドで波長を占有することにより、「高速・大容量」「低遅延・揺らぎゼロ」のサービスが実現されています。このAPN IOWN 1.0サービスにおいて、通信遅延を自在に操る遅延マネージドネットワークを具現化するOTN Anywhereの装置を開発しました。

現在、未来研では図2に示す方向性でIOWNの性能・利便性を向上する研究開発を進めています。2025年以降の実現をめざすIOWN 2.0に向けて、より多様なクライアント信号の収容や、さらに細かい粒度での遅延マネージドを実現するOTN Anywhereの開発に取り組んでいます。また、

デジタルコヒーレント光伝送技術により1.6 Tbit/s級の大容量伝送を実現するDSP（Digital Signal Processor）の開発、光波長パスの自動設定・遠隔制御技術の開発、耐量子計算機暗号を用いた安全なネットワークサービスを実現するセキュア光トランスポート技術の開発、超低遅延かつ確定遅延のデータ伝送を実現するIOWN IPU（Infrastructure Processing Unit）ボードの開発など、IOWNのユーザビリティ向上に資する要素技術の研究開発に取り組んでいます。

2029年以降の実現をめざすIOWN 3.0に向けては、APNにおけるペタビット（Pbit/s）級の伝送スループットを実現する空間多重光伝送技術・スケーラブル光トランスポート技術の開発や、IOWN/6G（第6世代移動通信システム）を支える無線xHaul向け



図1 未来研が取り組む研究開発の領域

のテラビット級無線伝送技術の開発、大容量・多重化・秘匿化を実現する海中音響通信技術の開発など、IOWN APNのさらなる大容量化・長距離化に向けた要素技術開発に取り組んでいます。

2030年代の実現をめざすIOWN 4.0に向けては、量子中継を用いたスケラブル量子ネットワークの研究開発、自由な無線空間を高精度に形成する波動適応制御技術の研究開発など、既存サービスとは一線を画す新たな価値を提供する情報通信基盤の実現に向けた研究開発に取り組んでいます。

以降では、未来研で取り組んでいる最先端技術について、フロンティアコミュニケーション技術、波動伝搬技術、トランスポートイノベーション技術に分けて紹介します。

フロンティアコミュニケーション技術

フロンティアコミュニケーション技術の概略を図3に示します。広域に分散したコンピューティングリソースを活用して、スマートシティ・医療・金融など、ミッションクリティカルなサービスを実現するため、トランスポート・制御技術、さらなるフロンティアとして量子ビットを伝送する量子通信に取り組みます。

■高速データ・メディアトランスポート (IOWN IPU ボード)

IOWN APN上で超低遅延にデータ・メディアを確定的な遅延で伝送する技術確立し、スマートシティ、医療、金融など時間制約があり、リアルタイム性の高いサー

ビスの実現をめざします⁽¹⁾。高速データトランスポートではメモリ間の超低遅延かつ確定遅延によるデータ伝送を実現するIOWN IPUボードおよび高精度時刻同期による遅延制御により、アプリケーションから伝送処理遅延を指定・把握することが可能となるSDK (Software Development Kit) を実装します。また、高速メディアトランスポートにおいては非圧縮映像や3D映像などの超低遅延なメディア伝送を実現します。

■光波長パス自動設定・遠隔制御 (AOPP)

IOWN APNを活用しユーザ要求に応じてデータセンタ間を動的に接続するDCX (データセンタエクステンジ) の実現に向けて、オンデマンドに光波長パスを設定する自動プロビジョニングを実現します。

装置ベンダや伝搬特性など条件の異なる多ユーザ拠点間の伝送路推定をオンデマンドに行い、光波長パスを設定することで、光波長パスの開通時間の短縮・自動化を実現します⁽²⁾。また、ユーザ拠点に設置され

た光伝送装置を、キャリア設備から設定・監視するための遠隔制御エージェント機能を実現し、監視制御インターフェースの標準化を進めることで、オープンで多様な光伝送装置を活用したDCXサービスの実現をめざします。

■セキュア光トランスポート

将来の量子コンピュータによる盗聴・改ざんを想定し、耐量子計算機暗号鍵等により、APNにおける光波長パスの安全性を保証する技術に取り組んでいます。将来のセキュリティ・伝送技術の進展に合わせて機能を拡張できるよう、鍵交換機能、鍵管理機能 (ソフトウェア処理) と暗号機能 (ハードウェア処理) をディスアグリゲーションする機能アーキテクチャを採用するとともに、異なる鍵交換方式を併用して得られた信頼性根拠の異なる複数の鍵の合成により強固な安全性 (マルチファクタセキュリティ) を実現します。

■無線環境把握・予測技術

カメラやセンサ等の非通信デバイスを含

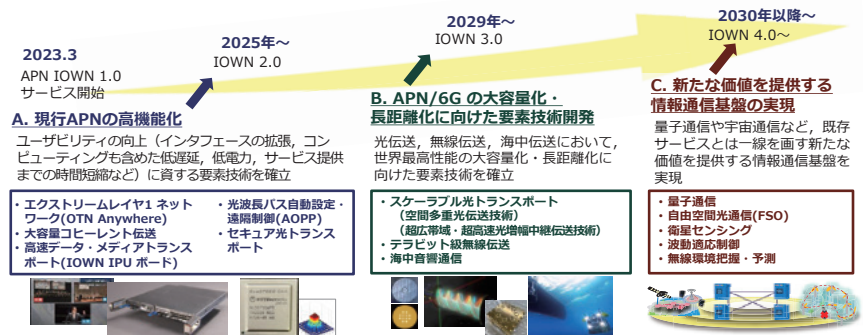


図2 未来研が推進する研究開発の方向性

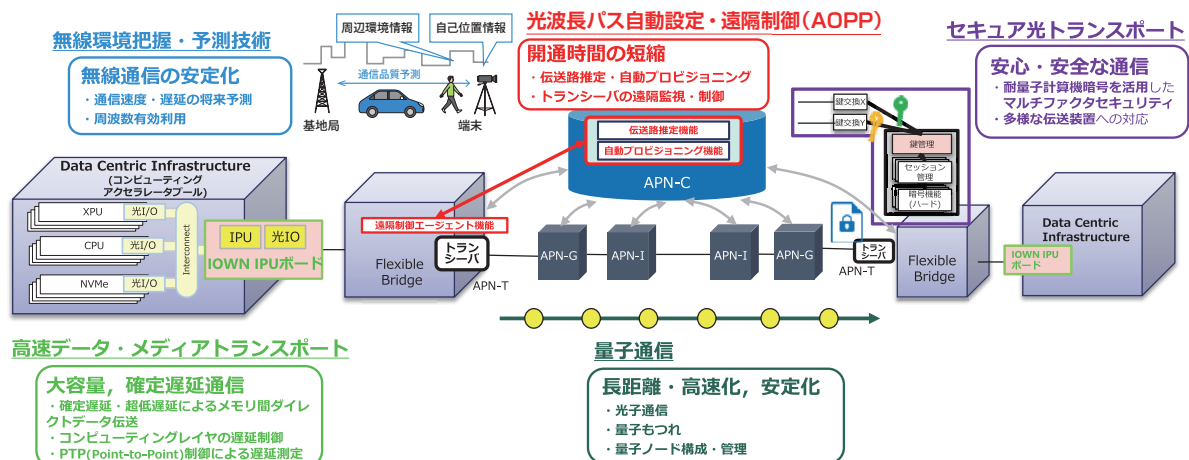


図3 フロンティアコミュニケーション技術の概略

むざまざまなフィジカル空間情報を利用し、数秒先の未来の通信品質を予測し、最適な通信手段により高速・低遅延な通信を常に維持する技術に取り組んでいます。これにより、ミリ波等の高周波数帯の周波数資源の有効活用を推進するとともに、従来、無線環境で難しかったロボット制御などのミッションクリティカルなユースケースへの適用をめざします。

■量子通信技術

多数の量子コンピュータをネットワーク化し、計算能力を指数関数的に向上させるため、量子コンピュータで扱う量子ビットを伝送する量子通信技術に取り組んでいます。安定的な長距離・高速通信を実現する光子通信・量子もつれ通信技術、量子ネットワークを実現するための量子ノード構成技術・量子ノード管理技術の確立をめざします。

波動伝搬技術

IOWN/6G時代の社会基盤となる無線価値創造に向け、波動伝搬技術に取り組んでいます(図4)。海中音響通信技術や衛星センシング技術では、陸上以外の海、宇宙、空といった通信エリアを究極まで拡大する超カバレッジ拡張をめざすとともに、自由空間光通信技術、テラビット級無線伝送技術により、通信速度を飛躍的に向上する究極の高速大容量伝送にも取り組んでいます。さらには、通信エリアを自在に制御し高精度な無線空間形成を可能とする究極の無線通信として波動適応制御技術にも挑戦しています。

■海中音響通信技術

これまで移動通信システムとして未踏領域であった海中への超カバレッジ拡張により、海底資源開発や港湾設備工事、海洋設備点検といった産業分野における通信を活用した業務効率化への期待が高まっています。海中音響通信の高速化・長距離化・安定化を実現する時空間等化技術、環境雑音耐性向上技術の確立により、1 Mbit/s級の高速伝送を達成し、本技術を搭載した世界初となる完全遠隔無線制御型水中ドローンを公開実験にて実証しました⁽³⁾。現在は産業分野の各種パートナーと連携し、より具体的な業務への技術適用性を検討するとともに、水中での音響測位や広域通信ネットワークといった新たな研究開発にも取り組んでいます。

■衛星センシング技術

衛星専用の装置や周波数を用いずに、地上普及している一般的なLPWA (Low Power Wide Area) 端末を用いて、IoT (Internet of Things) データを収集する衛星センシングプラットフォームの基盤技術に取り組んでいます⁽⁴⁾。山間部や海洋など、地上網ではカバーできない超カバレッジの通信プラットフォームにより、地球規模でのセンシング実現をめざしています。

■自由空間光通信技術

光ファイバの敷設が困難な場所や移動体に対して超高速無線回線の提供を可能とする新たな通信インフラ技術の確立をめざし、空間光通信技術の研究に取り組んでいます。大気伝搬に伴い発生する大気揺らぎに対し、波面補償技術による高効率ファイバカップリングにより超高速大容量伝送を実現し、将来的には災害時の迅速なネットワーク

修復などにも適用することをめざしています。

■テラビット級無線伝送技術

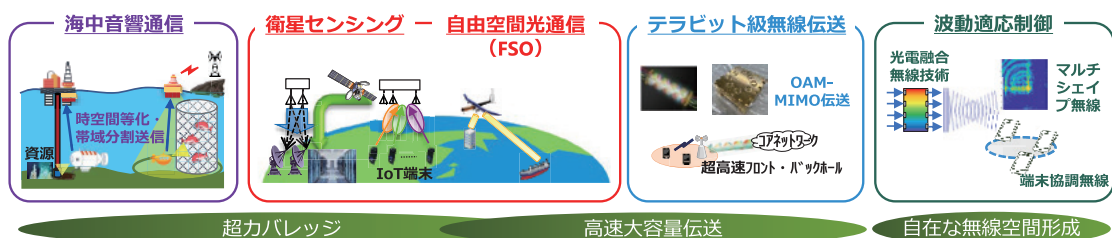
IOWN/6G時代のフロントホール・バックホールにはテラビット (Tbit/s) 級の無線伝送技術が必要になると考えられており、この実現に向けて伝送帯域と空間多重数の拡大による高速大容量無線伝送に取り組んでいます。具体的には、サブテラヘルツ帯の超高帯域幅を利用したOAM (Orbital Angular Momentum: 軌道角運動量) 多重伝送により1.4 Tbit/sもの大容量無線伝送を世界で初めて実証しました⁽⁵⁾。現在は実社会におけるさまざまな用途展開を想定し、100 mを超える長距離の伝送実証をめざしています。

■波動適応制御技術

IOWN/6Gにおける無線システムでは、多種多様な機器が無線接続されると想定されており、さらなるユーザ間干渉の増大や高周波帯活用に伴う電力損失が課題です。これらに資する要素技術として波動制御に基づき伝搬エリアを曲げたり、直進させるマルチシェイプ波動制御技術、端末も連携して適応的に無線空間を形成する端末協調ユーザセントリックRAN技術、そして、光電変換を活用し大規模アレーアンテナにおける無線ビームフォーミングを省回路で実現する光マトリクス無線ビームフォーミング技術などに取り組んでいます。

トランスポートイノベーション技術

IOWN構想の基盤となるAPNの実現に向けて、光ネットワークの付加価値向上と大容量化をもたらすトランスポートイノベ



IOWN/6G時代の社会基盤となる無線価値創造

強みとするコア技術：電波伝搬技術・無線信号処理技術

図4 波動伝搬技術の概略

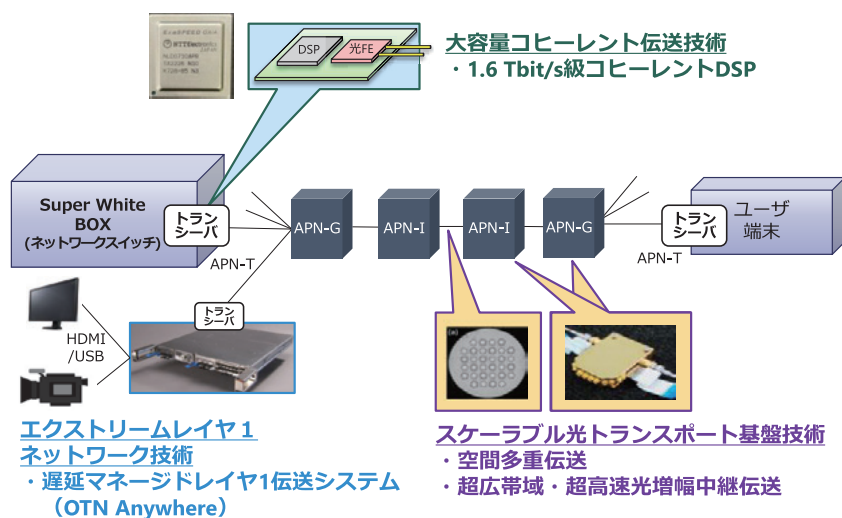


図5 トランスポートイノベーション技術の概略

ション技術の研究開発に取り組んでいます(図5)。APNサービスの高度化とユースケース拡大に向けて、ユーザとオペレータに新たな価値をもたらすエクストリームレイヤ1ネットワーク技術の研究開発を推進しています。また、光パスの大容量化かつ低電力化の実現に向けて、大容量コヒーレント伝送技術の研究開発も進めています。さらに、将来の膨大な通信トラフィックを効率的に収容することを目的に、リンク当りPbit/s級の伝送スループットを実現するスケラブル光トランスポート基盤技術を開拓しています。

■エクストリームレイヤ1ネットワーク技術 (OTN Anywhere)

レイヤ1 ネットワーキングによりユーザとオペレータに価値をもたらす要素技術を創出することで、APNサービスの高度化とユースケース拡大に貢献することをめざしています。大容量・低遅延のレイヤ1通信パスに対して、新しい付加価値機能を実現してユーザエクスペリエンス (UX) に変革をもたらす技術として、ネットワーク遅延の高精度測定・制御を行う伝送システム (OTN Anywhere)、通信データの1ビットの欠落なくネットワーク構成変更を行うレイヤ1無瞬断切替技術などの研究開発に取り組んでいます。OTN Anywhereは実用化され、APN IOWN1.0として商用サービスの提供が開始されています。また、これらの技術を活用した遠隔手術や公平なeスポーツ遠隔対戦などの実証実験を通してユースケース拡大を進めています。

■大容量コヒーレント伝送技術 (コヒーレントDSP)

APN構築に必須となる1波長1 Tbit/s超級の高速大容量光伝送の長延化と低電力化を実現する、デジタルコヒーレント光伝送技術の確立をめざしています。従来のキャリア向け長距離伝送だけでなく、データセンタインターコネクト (DCI) 等の近距離伝送にも適用され、急速に拡大する適用領域に対して、伝送方式・補償処理等を柔軟に変更することで、最適な光パスを実現する技術の研究開発に取り組んでいます。さらに大容量コヒーレント伝送を低電力で実現するためのキーデバイスである1.6 Tbit/s級光通信用デジタル信号処理回路 (コヒーレントDSP) の開発を進めています。

■スケラブル光トランスポート基盤技術

将来的な高速モバイルアクセスの進展やAI (人工知能) サービスの普及などにより、今後急増していく通信トラフィックを収容可能なペタビット級光ネットワークの実現に向けて、革新的な超大容量伝送技術、およびこれを可能とする光信号処理技術を開拓して、リンク当り1 Pbit/s容量級のスケラブル光ネットワーク基盤技術の確立をめざしています。大容量伝送を実現する要素技術として、コア多重やモード多重を駆使した大容量空間多重伝送技術^{(6),(7)}、広帯域パラメトリック光増幅中継による一括光増幅帯域拡張および波長帯一括変換技術⁽⁸⁾などの基盤技術の研究開発に取り組んでいます。

おわりに

本稿では、未来研で取り組んでいるIOWN/6Gに向けた最先端技術に関する取り組みの概要を紹介しました。光・電波・音波を用いて伝送技術や高付加価値化に取り組み、2030年に計画されているIOWN/6Gの実現に向け、今後もさまざまな産業分野のパートナーの方々や専門家の方々とのコラボレーション等も活用し、各要素技術の早期確立をめざしていきます。

■参考文献

- (1) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/11/10/pdf/231110ba.pdf>
- (2) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/10/13/231013a.html>
- (3) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/11/01/221101a.html>
- (4) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/02/10/230210a.html>
- (5) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/03/30/230330a.html>
- (6) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/03/06/230306a.html>
- (7) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/10/05/231005a.html>
- (8) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/06/16/230616c.html>



(上段左から) 赤羽 和徳 / 水野 晃平 / 高杉 耕一

(下段左から) 鈴木 賢司 / 木坂 由明

情報化社会の変革に向け、光・電波・音波等のさまざまな周波数帯の波動伝搬を駆使し、光・無線通信システムの高度化・大容量化や通信可能領域の拡張を可能とする要素技術・システム化技術の確立をめざして、研究開発に取り組んでいます。

◆問い合わせ先

NTT未来ねっと研究所
企画担当
TEL 046-859-3008
FAX 046-859-3727
E-mail kensui-mirai-p@ntt.com



低遅延トランスポート技術と精密バイラテラル制御技術による触覚を伴った遠隔ロボット制御

近年、遠隔ロボット制御技術への期待が高まっています。NTT研究所とソニー株式会社は、低遅延トランスポート技術と精密バイラテラル制御技術を持ち寄り、力覚（物を触る際の圧力や重さを感じる感覚）を伴う新たな遠隔ロボット制御技術を開発・実証しました。この技術により、遠隔地にいる操作者に対して、まるで目の前で物を触っているかのような細やかなフィードバックを提供できます。本稿では、医療や製造業など多岐にわたる分野での応用が期待されている本技術を解説します。

キーワード：#遠隔ロボット制御，#RDMA通信，#精密バイラテラル制御

遠隔協調ロボットへの期待

近年、人間と協調動作するロボット（協調ロボットまたはコボット）の需要が高まっています。これらのロボットは、複雑な認識や知識に基づく意思決定を要する操作や微細な感触に基づく操作を人間によって補完できるため、多岐にわたる産業にて活用が期待されています。例えば、建設業では、人手では困難な重作業を建設ロボットが担当する一方、操作者が品質管理や機械のコントロールを行うことで生産性の向上と労働環境の改善が実現できます。医療分野では手術ロボットが精密な操作を可能にする一方で、医師は手術を執刀しながら臨床的な判断を下すことができます。また、操作者にロボットの力覚（物を触る際の圧力や重さを感じる感覚）をフィードバックすることでより微細な操作を行うこともできます。力覚のフィードバックを可能にする方式はさまざまありますが、操作者側のロボッ

トと動作する側のロボットを協調動作させるバイラテラル制御が有名なため、本稿では本ロボットを「バイラテラル制御ロボット」と呼ぶことにします。

このように協調ロボットのニーズは高まっていますが、パンデミック等の影響による人との接触に対する制限や労働力の不足を補う動きとして協調ロボットをより離れた場所から制御する遠隔ロボット制御も注目されています。例えば、東京にいる医師が地方の患者に対して遠隔手術を行う、というのもその一例です（図1）。この場合、医師と患者の物理的な距離の制約を超えて手術を実施できますが、高品質なネットワークで拠点間を結ぶ必要があります。

ネットワークやアプリケーションに対する要求条件は実施する内容によって大きく異なることが予想されます。上記の建設ロボット、遠隔手術ロボット、バイラテラル制御ロボットの要求条件をまとめました（表）。表より、扱う対象が大きい建設ロボッ

いちかわ じゅんき やまぐち たくろう
市川 潤紀 / 山口 拓郎
もちだ やすひろ ますたに ひとし
持田 康弘 / 益谷 仁士
とのむら よしひで たかはし ひろかず
外村 喜秀 / 高橋 宏和

NTT未来ねっと研究所

トと比較して精密な操作が要求される遠隔手術の要求条件は厳しくなり、さらに、同期を取ることで力覚をフィードバックできるバイラテラル制御ロボットの要求条件が高くなるのが分かります。バイラテラル制御ロボットではマイクロ秒単位でロボットの同期を維持する必要があるためです。

技術概要

遠隔ロボット制御を実現するにはロボット技術と通信技術を融合することが不可欠です。そこで、NTT研究所とソニー株式会社のそれぞれの技術を持ち寄り、触覚を伴った遠隔ロボット制御の実証にチャレンジしました。ここでは、NTT研究所が進めている低遅延トランスポート技術とソニーが進めている精密バイラテラル制御技術について概要を述べます。

■低遅延トランスポート技術

NTT研究所では、次世代の通信技術としてIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) *1の実現に向け、オールフォトリクス・ネットワーク (APN) の研究開発を推進しています。APN IOWN1.0では、ミッションクリティカルなサービスを実現するためにエンド・ツー・エンドで光波長を専有することにより、低遅延で安定した物理的なネットワークを提供できます



図1 遠隔ロボットによる遠隔手術

*1 IOWN: IOWN Global Forumにてオープンにアーキテクチャ策定が行われているフォトリクス技術をベースとした革新的なネットワーク。

表 遠隔ロボットとネットワーク要求条件

		建設ロボット	遠隔手術ロボット	バイラテラル制御ロボット
要求条件	位置精度	cmオーダー	mmオーダー以下	mmオーダー以下
	遅延	数100 msオーダー	100 ms以下 (日本外科学会のガイドライン)	数10 msオーダー
	ジッタ	-	数100 μ sオーダー (日本外科学会のガイドラインの参考値)	100 μ sオーダー

VideoPIUSpecifications

FPGA	type clock logic DRAM	Intel Stratix 10 SX 200 MHz Encap: 237,707 ALM Decap: 193,205 ALM 8GB
Video	resolution frequency color sampling bit depth buffering	7680 x 4320 pixels 59.94 Hz YCbCr 4:2:2 10 bits 33 ms
Audio	channel frequency bit depth	16 ch / SDI 48 kHz 16 bits
IP	version protocol	IPv4 SMPTE ST 2110 SMPTE ST 2022- 7
Power		50W

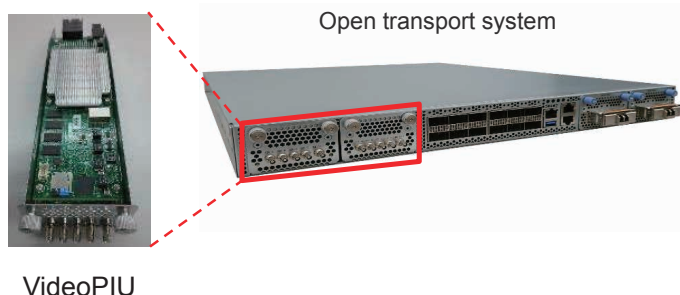


図2 非圧縮映像伝送プラグインユニット (VideoPIU) と仕様

が、ロボット側のアプリケーションにまで低遅延で安定して情報を届ける必要があります。そのため、私たちはIOWN APNの特性を最大限発揮すべく、アプリケーション側にまで高品質にデータを届けられる低遅延トランスポート技術の研究開発に取り組んでいます。

(1) 非圧縮映像伝送技術⁽¹⁾

非圧縮映像伝送技術は、遠隔にあるロボットの視覚情報を低遅延で操作者にフィードバックできる技術です。近年のネットワークの大容量化に伴い、映像フレームをバッファリングした後に圧縮処理を行うよりも伝送帯域は大きくなりますが、低遅延に映像を伝送できることのほうがメリットとなるケースが現実のものとなってきました。

従来の光伝送装置は、ハードウェア・ソフトウェア機能を含めて単独製造者によって一体型で提供されていたため、サービス事業者が映像伝送の付加機能を柔軟に追加

することは困難でした。これに対し、光伝送装置の各種機能を分離し、標準化されたインタフェース制御により、柔軟な構成変更や付加機能追加ができるディスプレイアグリゲーション構成のオープン光伝送装置が始めました。私たちは本潮流をとらえ、ディスプレイアグリゲーション構成のオープン光伝送装置で用いることができる非圧縮映像伝送プラグインユニット (VideoPIU) を開発しました (図2)。

VideoPIUは、SDI (Serial Digital Interface) 信号*2を映像のIP伝送標準規格であるSMPTE ST2110ストリーム⁽²⁾に直接変換することで、オープン光伝送装置にて映像信号を直接伝送することができます。また、VideoPIUはハードウェア実装されており、送信側での映像入力から受信側での映像出力までの遅延を1ms以内に抑えられるほか、1枚当り8K60p映像*3の処理が可能で2枚を連携して動作させることで8K120p伝送を実現できます。また、シー

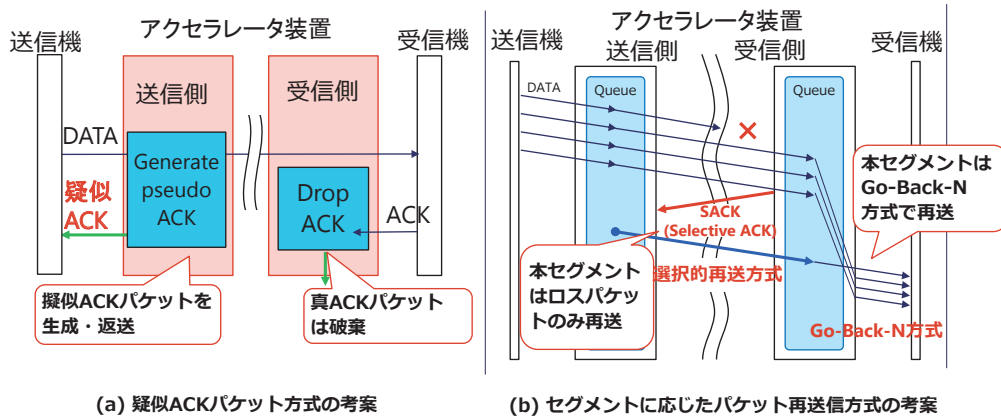
ムレスプロテクション (SMPTE ST2022-7⁽³⁾) にも対応しており、2つの異なる光パスを用いることでネットワークの不具合や一時的な障害が発生しても映像やオーディオの品質を維持しつつ途切れることなく配信を続けることが可能になります。

(2) RDMAアクセラレーション技術

コンピュータ間での高帯域かつ低遅延なデータアクセスを実現する方式としてデータセンタなどのハイパフォーマンスコンピューティング分野でRemote Direct Memory Access (RDMA) 通信が広く使われています。RDMAはCPUの介在なくメモリ上のデータを直接ネットワークへ転送できる特徴を持っているため、時間制約

*2 SDI信号: 放送設備で一般的に使われている同軸ケーブルを利用した映像伝送方式。

*3 8K60P映像: 解像度が7680×4320ピクセルの8K超高分解像度映像を、毎秒60フレームのリフレッシュレートで伝送する映像フォーマットを指します。



(a) 擬似ACKパケット方式の考案

(b) セグメントに応じたパケット再送信方式の考案

図3 RDMA アクセラレータの技術ポイント

があり、リアルタイム性の高いサービスを実現する高速低遅延データ転送方式として有望です。しかし、RDMAにて信頼性のあるデータ転送を行うRDMA RC (Reliable Connection) は、データセンタ内など短距離のデータ転送を想定しているため、中長距離通信に適用しようとするパフォーマンスが出ない問題がありました。

この問題は、ネットワークの長距離化に伴いACK受信が遅延し、Requesterにて送信待ち機状態が長くなることで発生していました。そこで、Requesterの近傍で疑似ACKを生成することでRequesterのWork Queue Element (WQE) を早期に解放し、次のWork Request (WR) を受け入れ可能にすることで性能劣化を防ぐ仕組みを考案しました (図3 (a))。

考案方式は、Requester, Responder近傍において長距離ネットワークを挟み込むかたちでアクセラレータを設置し、コネクション確立フェーズに取得した情報とRequestパケットから疑似ACKを生成して返送することで、Requesterで送信待ちの待機状態を回避しています。しかし、パケットロス検知や再送機構を無効化してしまうという信頼性に対する問題が発生してしまいました。そこで、通信セグメントに適した再送機構も考案しました (図3 (b))。本再送機構はアクセラレータを基点として再送セグメントを定義し、セグメント単位でGo-Back-N方式と選択的再送方式を用いることで、長距離高速性を維持しながらパケットロス時も短時間で再送完了でき

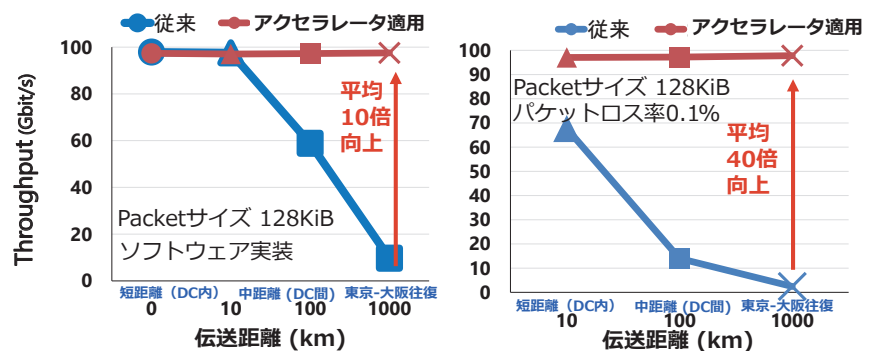


図4 RDMA通信におけるアクセラレータの効果

うにしました。

次に考案方式のシミュレーション評価を行いました。評価では長距離ネットワークにおける伝搬遅延を模擬し、従来のRDMA通信とのスループットの比較を行いました。結果より、メッセージサイズ128 KiBの条件では1000 km相当の遅延挿入条件においてパケットロスあり・なしにて、それぞれ平均10倍・平均40倍のスループット改善を確認できました (図4)。また、パケットロス時の再送完了時間の評価では、パケットロスのない場合の通信完了時間にRTT分の時間増加でパケットロスから回復しデータ通信を完了させることができ、従来のRDMAに比べて再送を含む総処理時間を約82%短縮できました。

■精密バイラテラル制御技術

ロボット技術に関しては精密バイラテラル制御技術を開発しているソニーに協力を求めました。ソニーは、人の操作に応じて外部環境の変化に柔軟に適應でき、さらに

は微細な力を極めて正確に制御できる精密バイラテラル制御技術を有しています。ここでは、精密バイラテラル制御技術の概略を述べます。

精密バイラテラル制御技術は、リーダーロボットとフォロワーロボットという2つのロボットを同じように協調動作させることで実現されます。リーダーロボットの動きに連動してフォロワーロボットが動作し、フォロワーロボットが物に触れた場合に、その反発力がリーダーロボットにも返ってくる仕組みが知られています⁽⁴⁾ (図5 (a))。

(1) 高感度力覚センシング技術⁽⁵⁾

人体の柔らかな組織に触れた感覚を操作者にフィードバックするためには、ツール先端に加わる1 gf (グラム重、ニュートン換算で0.0098N) の微小な力の変化をセンシングする手段が必要になります。しかし、既存の力覚センサをシステムに搭載すると慣性力がノイズとして観測されてしまい、先端力 (tip force) のわずかな変化を検



図5 精密バイラテラル制御技術

出ることができない問題がありました。この問題に対して、ソニーでは光ファイバの一部に回折格子が刻まれたFBGセンサ（光学式歪みセンサ）を応用しています。FBGセンサは超細径なファイバ形状でありながらセンサ部の歪み量を高感度に測定できる特殊なセンサです。超高感度なFBGセンサをツール先端部に搭載し、センサの歪みよりツール先端に加わる3次元の力を推定するアルゴリズムを改善することで動的ノイズを大幅に低減し、1 gfという極めて微小な力の変化さえも正確にとらえることに成功しています（図5(b)）。

(2) 位置と力の精密制御技術

精密バイラテラル制御を実現するためには位置と力の制御も必要となります。従来のアルゴリズムでは、ロボットの姿勢変動に伴うモデル化誤差による影響を受けずまい、操作中の位置追従性能の劣化や外部環境への接触時の振動が問題となっていました。この問題に対しては一般化逆力動学ライブラリ（GID：Generalized Inverse Dynamics）^{*4}と呼ぶソニーの技術アセットをアルゴリズムに組み込むことで、ロボットの姿勢変動によるモデル化誤差の影響を最小限に抑え、反応速度と操作の安定性を大幅に向上させることで1 mm未満の位置精度を実現しました。また、精密バイラテラル制御の信号処理では高速リアルタイム処理が不可欠です。従来、これらの信号処理はホストPCの汎用CPUに実装していましたが、通信遅延や割込処理遅延などの影響により、制御システムの要求仕様を満

たすことができませんでした。そこで、ソニーでは電氣的処理の一部を高速並列処理に適したFPGA（Field Programmable Gate Array）上で論理回路を実装し、併せてホストPCとFPGA間の通信のための独自プロトコルを開発することにより、従来システムよりも50倍の高速化を実現しました。複数のFPGAを光ファイバでカスケード接続することにより、リーダーロボット・フォロワーロボットで構成される精密バイラテラル制御システムのような多自由度システムに対しても遅延の少ない信号伝達が可能となっています。

共同実証実験の結果

100 kmを超えた距離にて力覚を伴う遠隔ロボット制御が機能するのか実証実験を行いました。実験では、APNテスト用環境をNTT 武蔵野研究開発センタ内に構築して評価しました。APNテスト用環境ではIOWN Global Forumで議論されているAPN-G（Gateway）やAPN-I（Interchange）⁽⁶⁾を含んだ構成を用意しており、将来のサービス環境を現時点で想定したものとされています。APNテスト用環境を挟み、光ファイバで約120 kmをつないで実験しました。実験の構成と実際の様子を図6に示します。

実証実験では、リーダーロボットとフォロワーロボットはソニーの精密バイラテラル制御ロボットを接続し、リーダー側およびフォロワー側のロボット制御PCには

RDMA転送機能を実装し、RDMAアクセラレータを通じてバイラテラル制御信号の送受信を行いました。フォロワーロボット側の映像に関しては、サイドバイサイドのステレオ映像をVideoPIUにて伝送し、裸眼立体視ができるソニーの空間再現ディスプレイELF-SR2で表示して操作できるようにしました。なお、今回の実験では力覚フィードバック評価以外の実験も行う必要があったためFBGセンサは用いませんでした。

まず、通信に関する評価結果を述べます。APNを介した120 kmにわたる長距離実証実験では映像はトータル1.6 msの低遅延で伝送することができました。内訳としては、映像処理遅延として1 msと120 kmのAPNの伝送遅延0.6 msでした。RDMAを用いたバイラテラル制御信号の通信ではトータル遅延が1 msで、遅延内訳としてはアクセラレータの処理遅延が0.4 msでAPNの伝送遅延0.6 ms、ジッタは10 μ sでした。RDMA通信では処理遅延も小さくでき、CPUが介在しないために非常に安定した低ジッタでの通信が確認できました。総論として、表に記載したバイラテラル制御ロボットに求められる高い安定性が満たせることが確認できました。

バイラテラル制御ロボットの操作評価で

*4 一般化逆力動学ライブラリ：ある動作を実現するために拘束条件を考慮しながら最適化計算を行いロボットの駆動量を算出するモデルベース制御アルゴリズムとそれを実行するライブラリ。

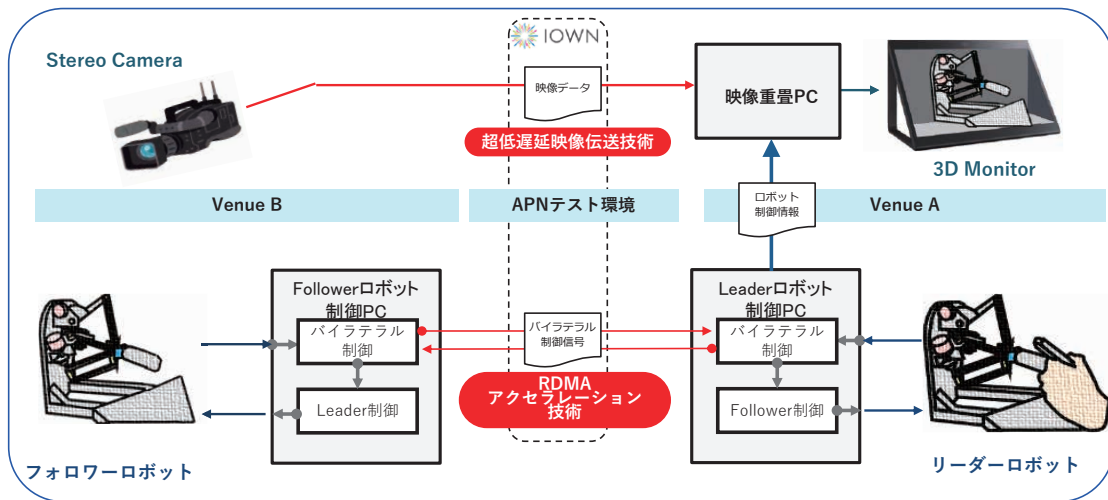
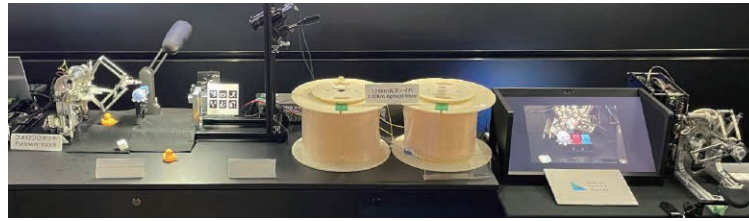


図6 遠隔ロボット制御実証実験の構成と様子

は、フォロワーロボットが遠距離にあるとは全く感じられない操作感を得ることができました。今回、硬さの異なる物体を遠隔側からバイラテラル制御ロボットを通じて触る操作をしましたが、物体表面のべたつき具合をも感じることができました。また、空間再現ディスプレイ ELF-SR2はヘッドトラッキングにより自然な立体視が実現でき、操作者が空間的な奥行きを認識した自然なマニピュレーションができました。

今後の展開

今回、距離を感じさせない触覚を伴った遠隔操作の実現に向けて、NTTの低遅延トランスポート技術とソニーの精密バイラテラル制御技術を融合した共同実証をAPNテスト環境で実施しました。その結果、120 km離れた地点間を結んで遠隔操作した場合も、バイラテラル制御ロボットに求められる高い要求条件をクリアでき、あたかも目の前で触れているかのような操作感が得られることが確認できました。

今後は、具体的なユースケースを想定した実証実験を実施し、場所の制約を超えた

精密遠隔操作の適用範囲を拡大することでより良い社会の実現に寄与していきたいと考えています。

参考文献

- (1) Y. Mochida, D. Shirai, and K. Takasugi : "Ultra-Low-Latency 8K-Video-Transmission System Utilizing Whitebox Transponder with Disaggregation Configuration," IEICE Transactions on Electronics, Vol. E106.C, No. 6, pp. 321-330, 2023.
- (2) SMPTE ST 2110-10 : "Professional Media Over Managed IP Networks: System Timing and Definitions," 2017.
- (3) SMPTE ST 2022-7 : "Seamless Protection Switching of RTP Datagrams," 2019.
- (4) K. Ohnishi, S. Katsura, and T. Shimono: "Motion Control for Real-World Haptics," IEEE IEM, Vol. 4, No. 2, pp.16-19, June 2010.
- (5) H. Suzuki, H. Masuda, K. Hongo, R. Horie, S. Yajima, Y. Itotani, M. Fujita, and K. Nagasaka : "Development and Testing of Force-Sensing Forceps Using FBG for Bilateral Micro-Operation System," IEEE Robot. Autom. Lett., Vol.3, No.4, pp. 4281-4288, Oct. 2018.
- (6) https://iowngf.org/wp-content/uploads/formidable/21/IOWN-GF-RD-Open_APN_Functional_Architecture-2.0.pdf



(上段左から) 市川 潤紀 / 山口 拓郎 / 持田 康弘

(下段左から) 益谷 仁士 / 外村 喜秀 / 高橋 宏和

NTT未来ねっと研究所は、通信の最先端を邁進し、新たなコミュニケーション技術による社会課題の解決を通じて未踏社会の実現をめざしています。

◆問い合わせ先

NTT未来ねっと研究所
 フロンティアコミュニケーション研究部
 TEL 046-859-3021
 FAX 046-855-1284
 E-mail fc-hosa-mirai-p@ntt.com



IOWN/6G時代の社会基盤価値を創造する 波動伝搬技術の研究開発

現在、NTTとNTTドコモが密接に連携し、6G（第6世代移動通信システム）の移動通信ネットワークとIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）の革新的なネットワーク・情報処理技術が融合する「5G Evolution & 6G powered by IOWN」の実現に向けて研究開発に取り組んでいます。本稿では、このIOWN/6G時代に向けたNTT未来ねっと研究所の取り組みとして、超高速・大容量通信を実現する「サブテラヘルツ帯OAM多重伝送技術」と超力バレルジ拡張を実現する「海中音響通信技術」について紹介します。

キーワード：#5G Evolution & 6G powered by IOWN, #サブテラヘルツ帯OAM多重伝送技術, #海中音響通信技術

はじめに

5G（第5世代移動通信システム）の商用サービスが2020年より開始され4年近く経過し、少しずつではありますが、サービス普及が進みつつあります。2023年には全国の5G人口カバー率は96%に達する⁽¹⁾とともに、スマートフォン総出荷に占める5Gスマートフォン比率も95%に拡大し⁽²⁾、日常的に5Gを利用できる環境整備が着実に伸展しているといえるでしょう。情報通信インフラとして欠かせない移動通信システムは、およそ10年周期で世代交代が行われており、現在は2030年代の実現をめざした6G（第6世代移動通信システム）に向けて各国・各機関においてさまざまな取り組み・研究開発が進展しています。NTTグループが推進するIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）は、6Gと同様に2030年ごろの実用化をめざした次世代コミュニケーション基盤の構想であり、6G時代における重要な通信インフラ基盤になると考えられます。6Gの移動通信ネットワークとIOWNの革新的なネットワーク・情報処理技術が融合することで、さまざまな社会問題の解決と多様な価値提供が可能な社会インフラへと進化することが期待されており、6GとIOWNのこの技術融合は「5G Evolution & 6G powered by IOWN」と称し、NTTとNTTドコモが密接に連携して取り組んでいます⁽³⁾。6Gでめざす技術要求条件は6Gホワイトペーパー⁽⁴⁾に詳細記述さ

れていますが、「超高速・大容量通信」「超低遅延」「超力バレルジ拡張」「超高信頼通信」「超低消費電力・低コスト化」「超多接続&センシング」と多岐にわたっており、従来の無線における研究開発領域の枠を超えてチャレンジングな研究開発も推進していく必要があります。

本稿では、このIOWN/6G時代に向けた研究開発の取り組みとして、超高速・大容量通信を実現する「サブテラヘルツ帯OAM多重伝送技術」と超力バレルジ拡張を実現する「海中音響通信技術」について紹介します。

サブテラヘルツ帯OAM多重伝送技術

無線通信需要は年々指数的に増大しており、現在移動通信サービスを提供する5G以降も継続してさらなる大容量化が求められています。このような無線需要に対応するため、5Gでは移動通信向けとして初めてミリ波帯と呼ばれる高周波数帯が導入され、無線信号の広帯域化による高速無線通信サービスが提供されています。

しかし、このような高周波数帯では、電波の直進性が高く、遮蔽や減衰の影響を強く受けることから、従来よりも高密度に基地局設備やアンテナを配置する必要があり、基地局間やコアネットワークをつなぐxHaul^{*1}には、これまでよりさらに柔軟かつ導入の容易なネットワーク構

さきき ひろふみ
笹木 裕文
おおもり せいじ
大森 誓治

NTT未来ねっと研究所

成が求められることとなります。無線伝送技術はこのような需要に対して相性が良く、固定光配線が困難な環境等における基地局の高密度設置や、臨時基地局設備の増強などさまざまなシナリオにおいて、無線であることの柔軟かつ導入の容易な特徴を活かすことができます。一方で、基地局設備間の機能分担や複数設備の従属接続等を考慮すると、xHaulには1 Tbit/s級（テラビット級）の極めて高い伝送能力が求められます。NTTは、このような将来のIOWN/6G時代における大容量ネットワーク・情報処理基盤を支え、増大する将来の無線通信需要に備えるため、テラビット級無線伝送技術の研究開発に取り組んでいます。

無線通信容量を増大させるためには、空間多重^{*2}数の増加、伝送帯域幅の拡大、変調多値数の増加の3つの方向性があります。NTTでは、OAM（Orbital Angular Momentum：軌道角運動量）を持つ電波を用いた新しい原理により空間多重数を増加させるとともに、サブテラヘルツ帯^{*3}を用いて伝送帯域幅を拡大することで、無線伝送の飛躍的な大容量化を図っています。

*1 xHaul：基地局設備間やコアネットワークを接続するフロントホール、ミッドホール、バックホール等の伝送ネットワークの総称。

*2 空間多重：複数のデータ系列を、空間的に独立な複数の電波を用いて、同時刻・同周波数帯において並列に伝送する伝送方法。

*3 サブテラヘルツ帯：おおむね100 GHz～1 THzにある周波数帯のことで、波長が数100マイクロメートルから数ミリメートルと非常に短く、強い直進性を持つことが特徴。

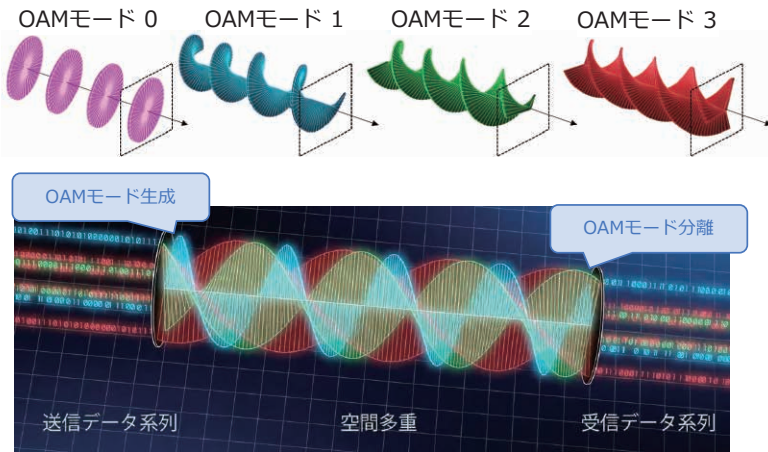


図1 OAM多重伝送技術のイメージ

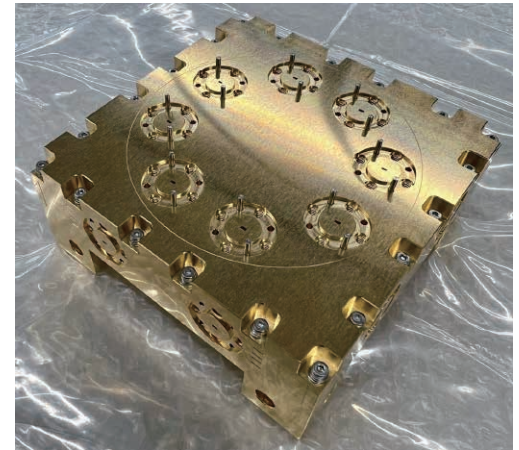


図2 サブテラヘルツ帯で開発されたアンテナ一体型 Butler 回路

OAMとは、電波の性質を表す物理量の1つであり、OAMを持つ電波（OAM波）は、波面の軌跡が進行方向に対して螺旋状になります（図1）。これは電波の位相が伝搬軸対称に回転しながら進んでいくことを示しており、この位相の回転数が異なる整数値となるOAM波は互いに直交しています。そのため、受信側で送信側と逆の位相回転を与えることにより、複数のOAM波を重ねて送信しても、互いに干渉することなく分離することができます。

NTTは、Butler Matrixと呼ばれるアナログ回路（Butler回路）を用いて複数のOAM波を生成・分離する処理を行うことにより、空間多重数を増加させるアプローチをとっています。このアプローチでは、1 Tbit/sを超える大容量通信において、異なるOAM波を同時に生成・分離するための膨大なデジタル信号処理を低減しながら多重数を飛躍的に増大することが可能です。このアプローチにおいて、潤沢な周波数資源を利用する余地のあるサブテラヘルツ帯と呼ばれる高周波数帯で数10 GHzにわたる広帯域化を実現するため、NTTではサブテラヘルツ帯導波路技術の研究開発を推進し、広帯域かつ低損失で動作するアンテナ一体型Butler回路を開発しました（図2）。このアンテナ一体型Butler回路は、135~170 GHzの非常に広い帯域で、8個の異なるOAM波を同時に生成および分離できるように設計されており、これを用いることで8個のデータ信号を多重して伝送

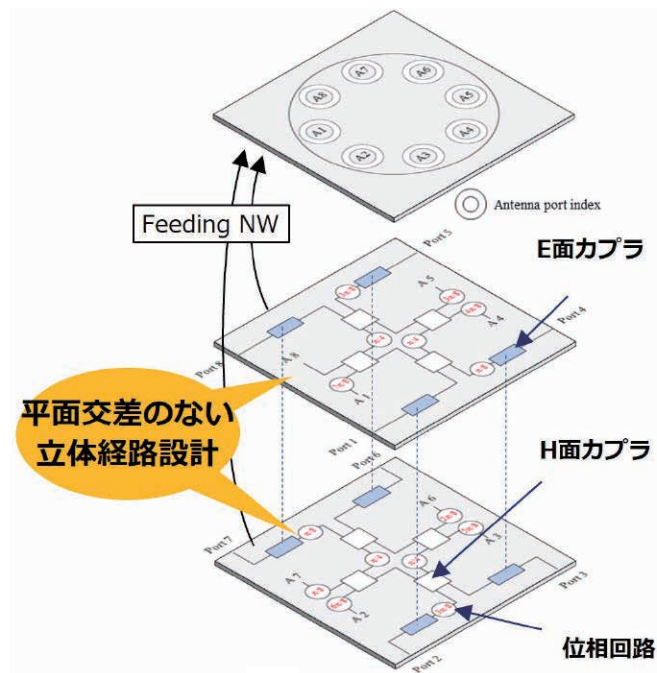


図3 Butler回路の多層立体経路概略図

することができます。また、異なる2つの偏波でそれぞれOAM多重伝送を行うことで、互いに干渉することなく2倍の16個のデータ信号を同時に多重して伝送できます。

Butler回路によって8つのOAM波を同時に伝送するためには、電波の位相を極めて高い精度で制御する必要があります。電波の位相の進み方は周波数によって異なるため、アナログ回路によって広帯域にわたり位相を均一に制御することは非常に困難です。そこでまず本研究では、自由空間と

異なる導波路内の特有の電波伝搬を解析し、理論的に広帯域にわたって位相の進み方を均一にそろえることが可能な位相回路を考案しました。性能劣化要因である回路の平面交差をなくし、すべての経路が電気的に等しい長さになるように、先述の位相回路を含む多層立体経路（図3）を設計することにより、35 GHz幅以上にわたって各OAM波の生成・分離に必要な位相状態を与えることができるButler回路の試作に成功しました。Butler回路は中空導波回路

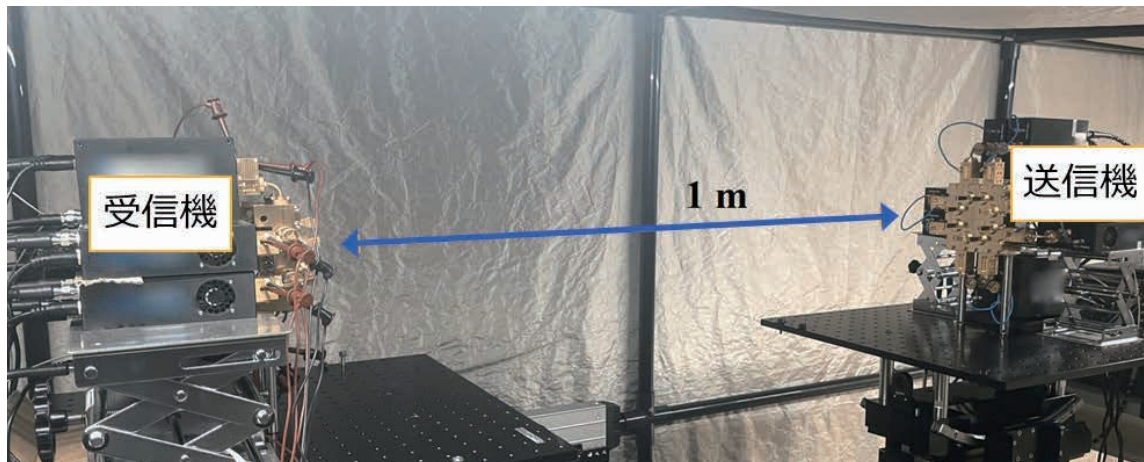


図4 1.58 Tbit/s伝送実験の様子

として設計されており、一般的な誘電体基盤回路などと比較して誘電損失や電波の漏洩を防ぐことができるため、高周波回路であるにもかかわらず低損失を実現したことも特徴の1つです。

2023年3月には、このアンテナ一体型 Butler 回路を用いて伝送試験を実施し、135.5~151.5 GHzと152.5~168.5 GHzのサブテラヘルツ帯を用いて合計1.44 Tbit/sの大容量無線伝送に世界で初めて成功⁽⁵⁾、現在さらなる低損失化により、合計1.58 Tbit/sを実現しています⁽⁶⁾ (図4)。

今後は、実社会におけるxHaulのさまざまな利用シナリオを想定し、100 mを超える長距離におけるテラビット級無線伝送の技術確立と実証実験に取り組んでいきます。

海中音響通信技術

■これまでの取り組み

2030年代の実現をめざして研究開発が進む6Gでは、陸上における移動通信システムの高度化のみならず、これまで移動通信システムとして未踏領域であった空・海・宇宙も含めた通信エリアを展開する、超カバレッジ拡張の実現が期待されています⁽⁴⁾。中でも海中は、海底資源開発や港湾設備工事といった産業分野において通信を利活用した効率化が望まれる一方で、これまで無線通信の利用が難しい領域でした。

NTTでは海中エリアでの無線通信の実

現に向けて、海中音響通信技術の研究開発に取り組んでおり、2022年11月に世界初となる、海中音響通信技術活用による1 Mbit/s・300 m伝送を達成し完全遠隔無線制御型水中ドローンを実現しています⁽⁷⁾、⁽⁸⁾。

■完全遠隔無線制御型水中ドローンを活用した海底通信ケーブル点検作業の効率化実現に向けた実証実験

海底通信ケーブルは大陸間の情報伝送の要であり、現代のインターネット国際通信の大部分はこのケーブルを介して行われています。この重要通信インフラである海底通信ケーブルの保守点検は重要ミッションであり、NTTグループではNTTワールドエンジニアリングマリン (NTT-WEマリン) がその役目を担っています。海底通信ケーブルの保守点検において、故障を未然に防ぐ「予防保全工事」*4は海底通信ケーブル切断などの大規模通信障害の発生を防ぐうえで重要な作業となります。特に水深30 m以内の浅海部は故障リスクが高く、外装や防護管の損傷、さらにはケーブルの切断といった危険にさらされ、点検作業が欠かせません。しかし、その作業はダイバーによる手作業のため危険が伴い、効率も良いとはいえませんが現状です。そこで、NTT-WEマリンをはじめとする多数の企業が水中ドローンを代表とする水中ロボットを活用した海底通信ケーブル点検作業のスマート化に取り組んでいます。

しかしながら、水中ドローンは海中では無線での通信が難しいことから、現状では

有線接続で制御されています。海底通信ケーブルの点検では、その点検範囲が数10 mからときには数100 mにわたる場合も多く、予防保全工事が多数実施される水深30 m以内の浅海部は船やブイなどの海上の構造物だけでなく、海底に存在する岩やサンゴが障害となり、有線制御型の中ドローンではその制御ケーブルの運用が大きな課題となります。

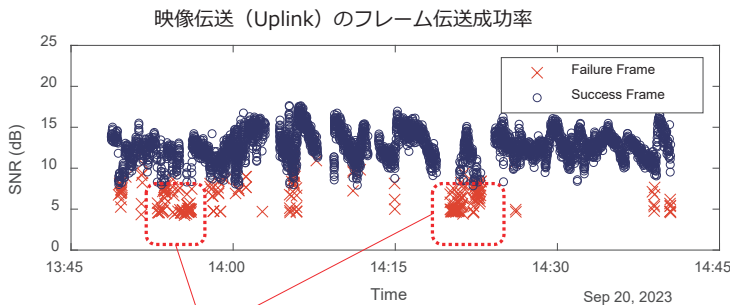
そこで、NTTとNTT-WEマリンは、NTTの海中音響通信技術により実現された完全遠隔無線制御型水中ドローンを使って実際の海底通信ケーブルの点検作業を行う実証実験を2023年9月に実施しました。図5にNTTとNTT-WEマリンが実施した実証実験の全体図を示します。ケーブル敷設船に無線水中ドローンを制御するためのコントローラと海中音響通信装置を設置し、船上より無線水中ドローンを海中音響通信にて無線制御します。無線水中ドローンで撮影した海中映像は海中音響通信にて無線伝送し、船上での海底通信ケーブルの状況確認を実現しました。実証実験にて確認できた通信品質と撮影映像を図6に示しています。無線水中ドローンでの海底通信ケーブル点検作業を約1時間程度実施しましたが、その間の

*4 予防保全工事：定期的に、海底通信ケーブルに磨耗や異常がないかを点検し、必要に応じて補修工事を行うことで、故障を未然に防ぎます。



図5 完全遠隔無線制御型水中ドローンによる海底通信ケーブル点検の実証実験全体図

■ 通信品質



浅海域ではマルチパスの影響を大きく受け、場所により大きく特性劣化するケースが見られたが、水中ドローンが制御不能になるほどの劣化は発生せず、海底通信ケーブル点検作業を遂行可能な通信品質は維持可能。

1時間弱の運用で映像フレーム伝送成功率95.67%を達成

■ 映像品質

無線水中ドローンの海底通信ケーブル撮影映像



海底通信ケーブルの状況を視認可能な画質での映像伝送を確認

図6 実験結果

映像フレーム伝送成功率は約96%を達成し、海底通信ケーブルの状況を視認可能な画質で映像伝送を行えることが確認できました。

今後は海中音響通信技術のさらなる性能向上に加え、GPSが届かない海中において点検箇所が海底のどの場所なのかを判別する海中測位技術などに取り組み、海底通信ケーブル点検作業効率化の実現をめざしていきます。

■ 参考文献

(1) https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban14_02000612.html
 (2) <https://www.m2ri.jp/release/detail.html?id=571>

(3) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/06/06/220606a.html>
 (4) https://www.docomo.ne.jp/corporate/technology/whitepaper_6g/
 (5) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/03/30/230330a.html>
 (6) H. Sasaki, Y. Yagi, R. Kudo, and D. Lee : "1.58 Tbps OAM Multiplexing Wireless Transmission with Wideband Butler Matrix for Sub-THz Band," IEEE JSAC, ESIT.
 (7) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/11/01/221101a.html>
 (8) 奥村・福本・藤野・大森・伊藤: "完全遠隔無線制御型水中ドローンを実現する海中音響通信技術," NTT技術ジャーナル, Vol. 35, No. 6, pp.10-13, 2023.



(左から) 笹木 裕文 / 大森 誓治

次世代の社会インフラとして期待される6G/IOWN実現に向け、パートナーの皆様とともに先端無線技術の検討、実証を進めていきます。

◆ 問い合わせ先

NTT未来ねっと研究所
 波動伝搬研究部
 TEL 046-859-3261
 FAX 046-859-3351
 E-mail wp-hosa-mirai-p@ntt.com



大規模データセンタネットワークを支える 1.6 Tbit/s 級イーサネット光伝送技術の研究開発

大規模データセンタネットワークのスケラビリティ向上において、従来の実用レベルの4倍以上となる1ファイバ当たり1.6 Tbit/s光信号の10 km伝送を実現する必要があります。本稿では、NTTが開発した送受信回路による波形歪みへの耐性に優れたデジタル信号処理技術、超広帯域ベースバンド増幅器ICモジュール、NTT研究所内に敷設されたマルチコアファイバケーブルを用いて400 Gbit/sの光強度変調信号を4並列に空間分割多重伝送した、現場環境光伝送実験を紹介いたします。

キーワード：#光伝送技術、#データセンタネットワーク、#強度変調直接検波方式

谷口 寛樹¹ / 濱岡 福太郎¹
 芝原 光樹¹ / 森 崇嘉²
 菊池 雅² / 徐 照男³

NTT未来ねっと研究所¹

NTTアクセスサービスシステム研究所²

NTT先端集積デバイス研究所³

大規模データセンタネットワーク と高速イーサネット

映像データ流通の爆発的な増加やクラウドサービスの拡大、5G（第5世代移动通信システム）サービスの普及などにより、通信トラフィックは今後も増え続けることが予測されています。これに伴い、多数のユーザからのデータセンタへの膨大なアクセスにより、データセンタ内およびデータセンタ間におけるトラフィックの増大が見込まれます。

データセンタネットワークではデータ信号の伝送方式としてイーサネット規格が適用されており、IEEE802.3規格として400 Gbit/sまでの標準化が完了しています。また、次期標準化規格として800 Gbit/sおよび1.6 Tbit/sのイーサネット規格の議論が開始されています⁽¹⁾。図1には標準化が完了したイーサネット規格（緑色）と次期標準化予定のイーサネット規格（黒色）の具体的な構成を示しています。多くのイーサネット規格ではマルチレーン分配方式により並列伝送を行い、イーサネットの高速化を実現しています。例えば400 Gbit/sのイーサネット信号の伝送では、1レーン当たり100 Gbit/sの信号を4つ並列に伝送します。並列化の方法として、複数波長を用いる波長分割多重（WDM：Wavelength Division Multiplexing^{*1}）方式、または複数の光ファイバを用いる（PSM：Parallel Single Mode Fiber^{*2}）方式が用いられます。現在議論されている

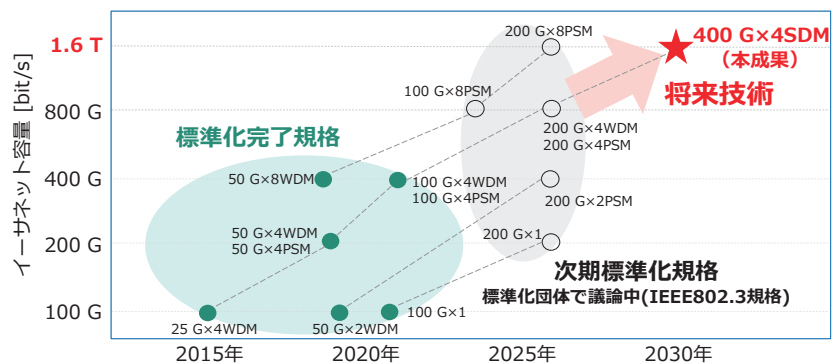


図1 イーサネット規格の標準化動向と本成果の位置付け

1.6 Tbit/sのイーサネット規格は、200 Gbit/sの信号を8レーンのPSMで多重化する構成です。

データセンタネットワークのトラフィック増大に伴い、イーサネットスイッチの設置数、スイッチング容量やイーサネットモジュールを接続するポート数の莫大な増加は不可避となります。そのため、将来の大規模データセンタネットワークには経済的な1.6 Tbit/sの大容量イーサネットモジュールによるポート当りの大容量化、敷設数の削減が求められており、これを実現するためには、1レーン当たり400 Gbit/sへ高速化し、1つのファイバかつ少ないレーン数（4レーン）で並列伝送する必要があります。また、簡易な送受信機構成でイーサネットのデータ信号を伝送する強度変調直接検波（IM-DD：Intensity Modulation and Direct Detection^{*3}）方式を用いることが経済化の有効な手段となります。さらに、イーサネットでは伝送距離として2 km、

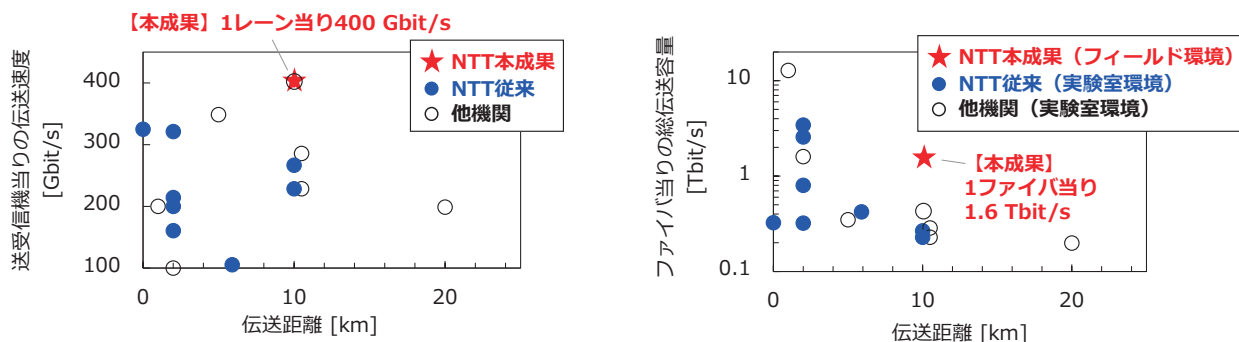
10 km、および40 kmごとに規格が定められていますが、将来の大規模データセンタネットワークにおいては、データセンタ内およびデータセンタ間のイーサネット接続を広くサポートする10 kmの伝送距離が重要となります。最新のイーサネット標準規格では、1レーン当たり100 Gbit/sの信号を、シンボルレート^{*4}約53 GBaudで4値のパルス振幅変調（PAM：Pulse Amplitude Modulation）^{*5}方式（PAM4）を用いて、

*1 WDM：複数の波長チャネルを用いて信号を並列伝送する方式。

*2 PSM：複数の光ファイバを用いて信号を並列伝送する方式。

*3 IM-DD：伝送波長に対して光強度に情報を乗せる方式。IM-DD方式は、半導体レーザー、外部光変調器、ドライバアンプ、光検出器のみで構成可能であるため、シンプルで低コストな光送受信機を実現できます。

*4 シンボルレート：1秒間に光波形が切り替わる回数で、単位はパー（Baud）を用います。本実験で実現した155 GBaudの光信号は、光波形を1秒間に1550億回切り替えて情報を伝送しています。



(a) 光送受信回路の歪み耐性に優れるデジタル信号処理技術と、超広帯域ベースバンド増幅器ICモジュールにより、400 Gbit/sの超高速光強度変調信号の送受信を実現

(b) フィールド敷設マルチコアファイバを用いて1ファイバ当たり1.6 Tbit/sを超える超高速IMDD信号の10 km伝送実験に成功

※ 2024年2月現在 (NTT調べ)。強度変調直接検波方式 (IM-DD) *3が用いられるイーサネット標準の波長帯域 (O帯) における実験結果

図2 本成果と従来技術

IM-DD方式で実現しています。これを従来と同じPAM4を用いて1レーン当たり400 Gbit/sに高速化するためには、信号のシンボルレートを200 GBaud以上に高速化する必要があります。このような超高速信号を高品質に送信するには、光送受信機内の電気の増幅器（光変調器駆動用のドライバンプ）の広帯域化が必要となります。また、信号の高速化に伴い、光送受信機内で歪んだ信号を、受信側で極めて高精度に補償するデジタル信号処理技術も必要であり、従来技術で1レーン当たり400 Gbit/sの信号を送受信することは困難でした。さらに、このような超高速信号では、光ファイバ伝送路で生じる波形歪みの影響がシンボルレート（変調速度）の2乗に比例して極めて顕著に現れ、信号品質が著しく劣化します。そのため、既存の光ファイバ1本に従来方式（WDM方式）のように4つの異なる波長を多重した場合、ゼロ分散波長から離れた波長チャンネルの仕様が必須であり、その波長チャンネルの10 km伝送を実現することは困難でした。

高速IM-DD信号送受信技術開発動向

図2にイーサネット標準の波長帯域（O帯）におけるIM-DD信号伝送の研究結果をまとめています^{(2)~(6)}。図2(a)には、1レーン当たり100 Gbit/s以上の伝送速度の実証結果、図2(b)には、1ファイバ当たり0.1

Tbit/s以上の総容量の伝送実験の結果を示しています。1レーン当たりの伝送速度が比較的高速な（最大400 Gbit/s⁽³⁾）伝送実験は波長分散^{*6}の影響が大きいため単一レーンで実施されています^{(2), (3)}（図2(a)）。一方、複数のレーンを使用することで、レーン当たりの伝送速度が比較的低速でも、単一レーンで報告されている伝送容量を上回る伝送容量が得られることが実証されています^{(4), (5)}（図2(b)）。また、多重するレーン数が非常に多い（16以上）伝送の報告では、O帯においても波長分散の影響が懸念されるため、WDM方式で使用する波長範囲が広がりすぎないように空間分割多重（SDM：Space Division Multiplexing）^{*7}方式を組み合わせています⁽⁵⁾。

上記のような複数レーンで構成される光送受信機において、レーン数の増大は構成デバイス数の増加、送受信機の高価格化に直結します。そのため、大容量イーサネットモジュールの経済的な実現には、波長分散耐力の低い高速光信号を複数レーンで多重化し、必要となるレーン数を削減することが重要となります。

そこで本実験では、NTT独自の超広帯域ベースバンド増幅器ICモジュールと、超高精度なデジタル信号処理技術により、1レーン当たり400 Gbit/sを超えるIM-DD光信号の送受信を実現すると同時に（図2(a)）、マルチコアファイバを用いた空間分割多重伝送技術による波長分散マネジメントを行うことで、4レーンという比

較的に少ないレーン数で1ファイバ当たり1.6 Tbit/sの超高速IM-DD信号の10 km伝送実験を実証しました⁽⁶⁾（図1赤色および図2(b)）。

NTT独自技術詳細：1レーン当たり400 Gbit/s超高速IM-DD信号の送受信技術

これまでNTTで研究開発を進めてきたInP系ヘテロ接合バイポーラトランジスタ（InP-HBT）技術^{*8}による110 GHzまでの周波数に対応する超広帯域ベースバンド増幅器ICモジュール^{(7), (8)*9}を、光送受信回路内の光変調器駆動用ドライバンプとして適用しました。また、従来のPAM4方式よ

*5 パルス振幅変調：信号光の複数の強度に情報を載せる変調方式で、それぞれ、PAM4方式は4つの異なる光強度レベル、PAM8方式は8つの異なる光強度レベルを用いて信号を送受信します。

*6 波長分散：波長分散とは、光ファイバを伝搬する光の速度が波長ごとに異なる現象のことです。超高速信号では伝送する信号帯域が広く、その波長成分ごとの伝搬速度が異なるため、波長分散による信号歪みの影響が顕著となります。

*7 空間分割多重：1本の光ファイバに複数のコア（光信号の通路）を有するマルチコアファイバや、複数のモードを伝搬する数モードファイバ等を用いることで、1本の光ファイバ内で空間的に信号を並列伝送する方式で、通信容量の飛躍的な大容量化を実現することができます。

*8 InP系ヘテロ接合バイポーラトランジスタ（InP-HBT）：III-V族半導体のリン化インジウムを用いたヘテロ接合バイポーラトランジスタ。高速性と耐圧に優れたトランジスタです。

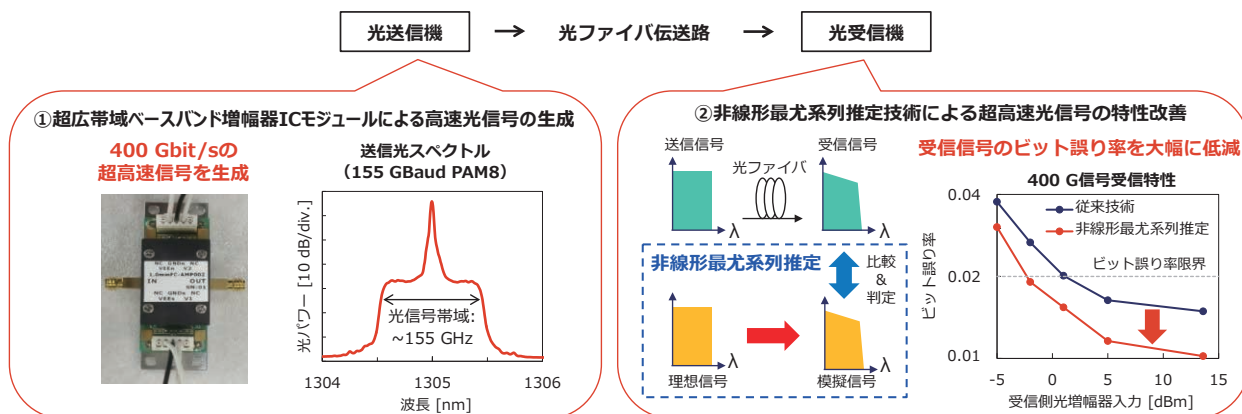


図3 1レーン当り400 Gbit/s超高速IMDD信号の送受信技術

リシンボル速度を3分の2倍に低減できるPAM8方式を新たに適用することで、1レーン当り400 Gbit/sの超高速IM-DD信号(155 GBaud PAM8)の安定な光信号生成を可能としました(図3①)。受信側では、NTT独自のデジタル信号処理技術により、非線形最尤系列推定^{(6)*10}を用いてデジタル信号処理で光送受信機内および伝送路で歪んだ信号を高精度に模擬します。この模擬信号と受信信号とを比較することにより、受信信号のビット誤り率を大幅に低減し、1レーン当り400 Gbit/sの超高速PAM8信号の高品質な受信を可能としました(図3②)。

NTT独自技術詳細：1ファイバ当り1.6 Tbit/s超高速IM-DD信号の10 kmマルチコアファイバ伝送実証

NTTが開発したInP-HBT技術による超広帯域ベースバンド増幅器ICモジュールと非線形最尤系列推定により、1レーン当り400 Gbit/sの超高速IM-DD信号の送受信が可能となりました。これを1.6 Tbit/sの信号とするためには、400 Gbit/sの超高速IM-DD信号を4並列に伝送する必要があります。光ファイバ伝送路中では、波長分散等による信号波形歪みが生じ、高速な信号ほどその影響が顕著に現れます。

1レーン当り400 Gbit/sの超高速・高多値(155 GBaud PAM8)信号を既存の光ファイバ1本で従来のデータセンタネットワークで用いられるWDM方式により4

並列10 km伝送を実現するには、シビアな分散マネジメント、すなわち具体的な波長分散量の検証が必要となります。そこで考慮しなければならない具体的な分散量の範囲は、想定するシステムが従来のイーサネット規格を踏襲すると仮定した場合、従来のイーサネット規格で定められている波長チャンネルの波長範囲と、スタンダードシングルモードファイバ(SSMF)のゼロ分散波長の範囲、および分散スロープから求めることができます⁽⁹⁾。ゼロ分散波長からもっとも離れた波長チャンネルが、ゼロ分散波長から離れば離れるほど波長分散の影響をより顕著に受けるため、波長分散の影響を抑えるということのみを考慮した場合、各波長チャンネルの波長間隔は狭いほど良いと考えられます。そして、これまでのイーサネット規格で定められた波長チャンネルでもっとも波長間隔が狭いものは、周波数間隔が800 GHz間隔のLAN-WDMになります。求める波長分散はLAN-WDMの波長範囲(1294.5~1310.2 nm)を考慮します。上記の前提の下、2 kmと10 kmの伝送における波長分散は図4の赤色の領域に示されるように、それぞれ-5.7~1.9 ps/nmと-28.1~9.3 ps/nmと求められます。そして、次期イーサネット標準化予定の200 Gbit/s(106 GBaud PAM4)がWDM方式で4レーン多重し、10 kmの伝送が可能であると仮定した場合、ポーレートと変調フォーマットの違いを考慮することで、400 Gbit/s(155 GBaud PAM8)伝送時の波長分散量の許容範囲が求まり、図4の緑色

の領域に示されます(-5.6~5.6 ps/nm)。これらのことから、2 km伝送ではゼロ分散波長が最長となる波長分散特性のファイバを除けば、LAN-WDMによる4並列の1.6 Tbit/s信号の伝送が可能ですが(図4(a))、10 km伝送では考慮しなければならない波長分散量の範囲が非常に広く、400 Gbit/s許容波長分散量の範囲を大きく超えてしまうため、WDM方式による並列化は現実的ではないことが分かります(図4(b))。さらに、ゼロ分散波長付近で等間隔に波長チャンネルを並べる場合、その波長チャンネルの間隔が狭くなるほど非線形光学効果による、レーン間クロストークが大きくなってしまいう課題も懸念されます。

そこで本実験では、マルチコアファイバを用いた空間分割多重方式を採用すること

*9 超広帯域ベースバンド増幅器ICモジュール：NTTが開発した世界でもっとも広い帯域を有する超広帯域ベースバンド増幅器IC(Integrated Circuit：集積回路)を、110 GHzまでの周波数に対応する1 mm同軸コネクタ付きのパッケージに実装したモジュールです。独自の高精度回路設計技術と、広帯域化を可能とする新しい回路アーキテクチャ技術を適用した増幅器ICをInP-HBT^{**}技術で実現しています。

*10 非線形最尤系列推定：最尤系列推定とは、受信した複数の信号(信号系列)と、受信した信号を模擬した複数の候補系列とを比較することで、受信側で行う信号判定の精度を高める技術です。NTT独自の非線形最尤系列推定では、光送受信機や光ファイバ伝送路にて生じる、入力強度に応じて波形歪みが複雑に変化する非線形歪みを、最尤系列推定における候補信号系列に反映することで、信号判定精度をさらに高めることが可能となります。

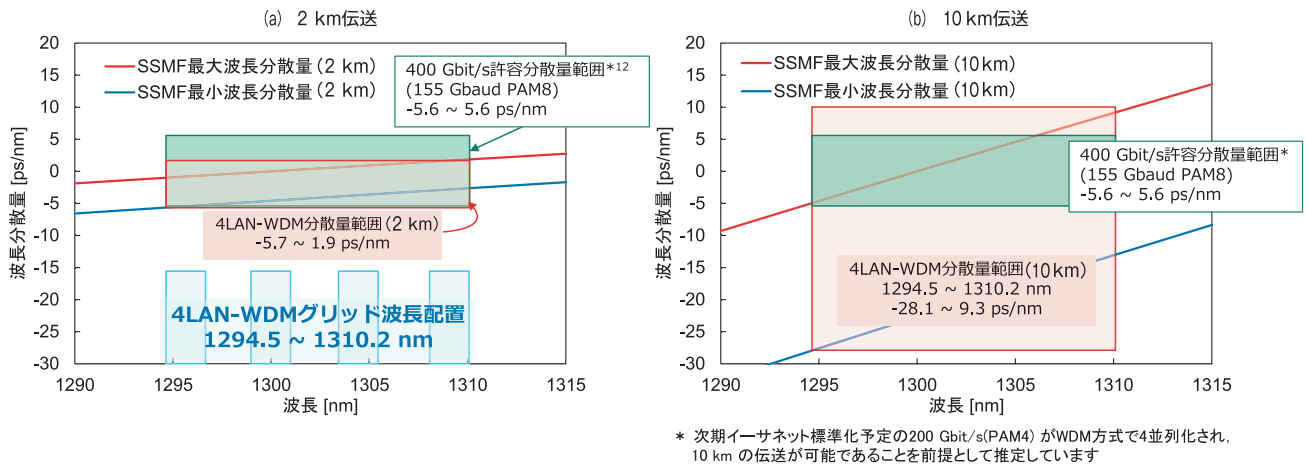


図4 伝送波長と伝送距離による波長分散特性

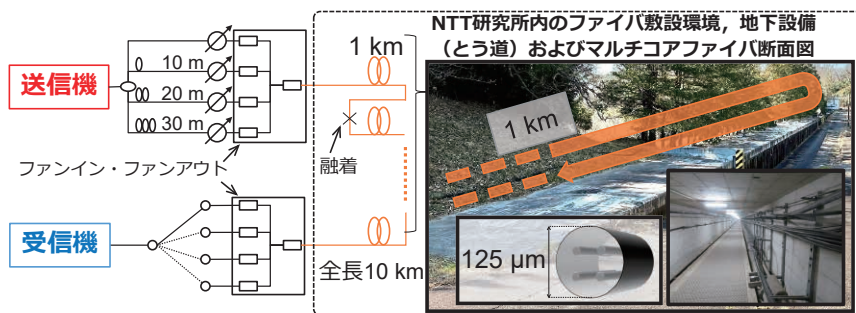


図5 1ファイバ当たり1.6 Tbit/s超高速IMDD信号の10 km伝送実験系

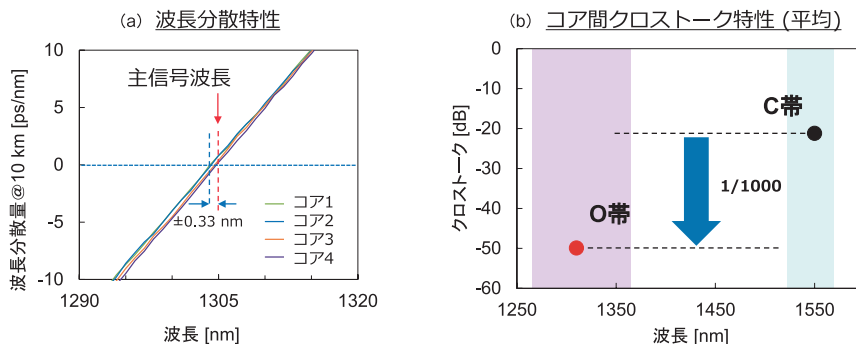


図6 マルチコアファイバ特性測定結果

により、これらの課題を解決しました。具体的には、各コアに1波長を割り当てることで、4コアの各コアに波長分散の影響を受けにくい波長に設定し、非線形光学効果の発生を抑制することを可能としました(図5)。さらに、光信号形式を従来の4値(PAM4)から8値(PAM8)に高度化することでシンボル速度を3分の2倍に低減し、併せて非線形最尤系列推定信号処理を適用

することで、波長分散等による信号波形歪みを大幅に低減しました。

本実験では図3で示した送受信機を1つずつ使用し、送信機から出力された光信号を4分岐することで400 Gbit/s信号を4並列化しました。4並列化された信号はすべて同じランダムなシンボル系列で変調されているため、実際の導入環境と同様にレーン間クロストークが伝送性能劣化要因とし

て働くようにマルチコアファイバの各コアへ入射される前に長さの異なるファイバに接続され、シンボル系列が各コア、各レーンで時間的にずらされています。

また、本実験で用いたマルチコアファイバは、NTT研究所内の往復1 kmの地下設備に4コアファイバケーブルを敷設し、10往復で融着された状態にすることで、実際の10 kmケーブル敷設環境を模擬しています⁽¹⁰⁾(図5)。本4コアファイバは、既存のファイバと同じクラッド外径(125 μm)^{*11}を採用し、各コアは既存のファイバと同じ簡易なステップインデックス型の屈折率構造としているため、一般的に長距離伝送で用いられる1.5 μm波長帯域(C帯)においてコア間クロストークが課題となりますが、量産化に適した構造としています。各コアの光学的な特性は、現在の光ファイバの国際規格と同等の光学特性を有し、個別のファイバを用いたPSM方式に比べて各コアの特性ばらつきを低減できました。そのため、各コアのゼロ分散波長は±0.33 nm以内にそろっており、送信機における光源波長を同一にでき、4並列構成において光源を1つに抑えることができました(図6

*11 国際規格に準拠したクラッド外径：現在の光通信で使用されている光ファイバは、量産化に優れ相互接続性を担保するため光ファイバ直径(クラッド外径)が125±0.7 μmで、光ファイバを保護する被覆層を含む直径が235~265 μmとなるよう、国際規格により定められています。

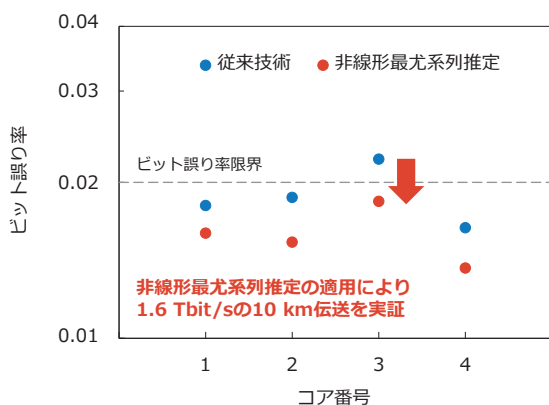


図7 1ファイバ当たり1.6 Tbit/sの超高速IM-DD信号の10 km伝送結果

(a). さらに、10 km伝送時における各コア間のクロストーク（隣接コアからの光の漏れ込み量）は、IM-DD方式が用いられるイーサネット標準の1.3 μm波長帯域（O帯）において、1.5 μm波長帯域（C帯）と比較して約1000分の1であり、光信号伝送に全く影響が出ないレベルに低減できました（図6(b)）。したがって、標準クラッド外径、ステップインデックス型のマルチコアファイバを使用し、O帯の光信号を1コアに1レーン伝送するという本実験の構成は、これまで紹介した波長分散や非線形光学効果、コア間クロストークの課題を直接的に解決することができ、かつ経済的に実現できるため、敷設数が非常に多くなるデータセンタネットワークとの親和性が高いといえます。

結果、1レーン当たり400 Gbit/sの超高速信号を、フィールド敷設マルチコアファイバを用いて4並列に空間分割多重伝送し、PAM8方式に非線形最尤系列推定を適用してビット誤り率を低減することにより、1ファイバ当たり1.6 Tbit/sを超える超高速IM-DD信号の10 kmにわたる現場環境光伝送実験に成功しました（図7）。

まとめ

本技術を用いることで、従来の実用レベルの4倍以上となる大容量化を実現し、将来の大規模データセンタネットワークで利用される1ファイバ当たり1.6 Tbit/sを超えるイーサネット信号を高信頼に伝送することが期待されます。

本研究結果の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）の委託研究「高度通信・放送研究開発委託研究（採択番号20301）」により得られたものです。

参考文献

- (1) <http://www.ieee802.org/3/df/>
- (2) O. Ozolins, T. Salgals, H. Louchet, M. Joharifar, R. Schatz, D. Che, Y. Matsui, M. Gruen, T. Dippon, F. Pittala, B. Krüger, Y. Fan, A. Udalcovs, U. Westergren, L. Zhang, X. Yu, S. Spolitis, V. Bobrovs, S. Popov, and X. Pang: "High Baudrate Short-Reach Communication," 2022 27th OECC and 2022 PSC, pp. 1-3, 2022. DOI: 10.23919/OECC/PSC53152.2022.9850148
- (3) E. Berikaa, M. S. Alam, W. Li, S. Bernal, B. Krueger, F. Pittala, and D. V. Plant: "TFLN MZMs and Next-Gen DACs: Enabling Beyond 400 Gbps IMDD O-Band and C-Band Transmission," IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 35, No. 15, pp. 850-853, August 2023. DOI: 10.1109/LPT.2023.3285881
- (4) N. -P. Diamantopoulos, H. Nishi, T. Fujii, K. Shikama, T. Matsui, K. Takeda, T. Kakitsuka, K. Nakajima, and S. Matsuo: "4 × 56-GBaud PAM-4 SDM Transmission over 5.9-km 125-μm-Cladding MCF using III-V-on-Si DMLs," 2020 OFC, pp. 1-3, 2020.
- (5) R. S. Luis, B. J. Puttnam, G. Rademacher, S. Shinada, T. Hayashi, T. Nakanishi, Y. Saito, T. Morishima, and H. Furukawa: "12.8 Tb/s SDM Optical Interconnect for a Spine-Leaf Datacenter Network with Spatial Channel Connectivity," 2022 ECOC, pp. 1-4, 2022.
- (6) H. Taniguchi, M. Nakamura, F. Hamaoka, T. Mori, K. Shibahara, T. Matsui, Y. Yamada, T. Jyo, M.

Nagatani, M. Mutou, Y. Shiratori, H. Wakita, T. Kobayashi, S. Yamamoto, H. Takahashi, K. Nakajima, Y. Kisaka, and Y. Miyamoto: "1.6-Tb/s (4 SDM × 400 Gb/s/lane) O-band Transmission over 10 km of Installed Multicore Fibre," 2023 ECOC, pp. 1-3, 2023.

- (7) T. Jyo, M. Nagatani, M. Mutoh, Y. Shiratori, H. Wakita, and H. Takahashi: "An Over 130-GHz-Bandwidth InP-DHBT Baseband Amplifier Module," IEEE BCICTS, 1b.1, 2021. DOI: 10.1109/BCICTS50416.2021.9682479
- (8) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2019/06/03/190603b.html>
- (9) IEEE: "IEEE Standard for Ethernet," in IEEE Std 802.3-2022 (Revision of IEEE Std 802.3-2018), July 2022. DOI: 10.1109/IEEESTD.2022.9844436
- (10) T. Matsui, Y. Sagae, T. Sakamoto, and K. Nakajima: "Design and Applicability of Multi-Core Fibers With Standard Cladding Diameter," J. Light. Technol., Vol. 38, No. 21, pp. 6065-6070, Nov. 2020. DOI: 10.1109/JLT.2020.3004824



(上段左から) 谷口 寛樹 / 濱岡 福太郎 / 芝原 光樹

(下段左から) 森 崇嘉 / 菊池 雅 / 徐 照男

IOWN/6Gにおけるオールフォトニクス・ネットワークの実現に向けて、独自のデバイス技術、デジタル信号処理技術、光伝送技術の融合を深化させ、研究開発を進めています。

◆問い合わせ先

NTT未来ねっと研究所
トランスポートイノベーション研究部
TEL 046-859-3011
FAX 046-859-5541
E-mail ti-hosa-mirai-p@ntt.com



主役登場

未踏領域を開拓する無線通信の
実現に向けて

大森 誓治 Seiji Ohmori

NTT未来ねっと研究所
主任研究員

今や無線通信は水や電気に次ぐ、私たちの生活にはなくてはならない重要なインフラの1つといっても過言でないほど現代社会に深く浸透していると思います。その無線通信は1895年にイタリアのマルコーニによって発明され、以来約130年の間、さまざまな無線研究の先人たちの業績により私たちの生活を大きく変えてきました。ちょうど私が小・中学生のころにポケットベルが日本でブームとなり、高校生のときに携帯電話が登場し、大学生のときにスマートフォンが爆発的にヒットして世の中を変えてきました。このように無線通信で社会が劇的に変化していく様子を目の当たりにして無線通信に興味を持ち、同じように世の中を変えるような無線技術に取り組んでみたいと考えNTTに入社しました。

私の入社時の無線のトレンドはIoT (Internet of Things) 通信でした。世の中のいたるところにコンピュータが遍在する「ユビキタスコンピューティング」という概念が1988年に米国のマーク・ワイザーにより提唱され、その後2000年代後半のスマートフォンの爆発的な普及が後押しとなり、ヒト・モノ含めた「ユビキタスネットワーク技術」として検討が活発化し、私もその研究開発に携わりました。以降、M2M (Machine to Machine) 通信やIoT通信など、その時流に合わせて技術の総称は変わっていきながら発展を遂げ、現在では無線インフラのカバレッジは人間の生活圏のほぼすべてのエリアを網羅できるところまで来ています。

そして今、NTTグループでは5G (第5世代移動通信システム) Evolution & 6G (第6世代移動通信システム) powered by IOWN (Innovative Optical and

Wireless Network) の1つの取り組みとして、今まで電波が届かなかったエリアへカバレッジを拡張する「超カバレッジ拡張」の実現をめざしています。先述のとおり、人間の生活圏、つまり陸上はほぼすべてカバーできるところまで実現できているので、超カバレッジ拡張がめざす世界は宇宙や空、海や川の中といった人間の生活圏の外を無線エリア化するという非常にチャレンジングなテーマになります。このような未踏領域を無線エリア化することで、新たなビジネスの創出が期待できるだけでなく、今まで危険を伴いながら人間が行っていた作業をロボットの遠隔操作により代替するなど、安心・安全な世の中の実現に貢献できると私は信じています。

私は現在、電波の未踏領域の1つである海中の無線エリア化に向けた研究開発に取り組んでいます。地上では電磁波が空中を伝搬する性質を利用し、電磁波に情報を載せて遠くまで通信ができます。しかし、海中では水が電磁波のエネルギーを吸収してしまい数cm程度しか通信ができません。そこで、海中では光を使った可視光通信か音を使った音響通信が主に用いられます。海中で未踏領域というと水深数100 kmから数1000 kmといった深海を思い浮かべる人が多いと思います。ここで面白いのが、無線通信に限っていえば水深が深いエリアよりも浅いエリアこそ難易度が高いのです。確かに水深が深いエリアは水圧が大きく太陽光も届かず、一部の深海に適した生物を除き生存が難しく、ダイバーや潜水艇が活動するには過酷な環境です。しかしながら光も届かず生物もほとんどいない、ということは裏を返せば海中環境の変動は大きくなく安定しているといえます。無線通信で

は周辺環境の変動の大きさが通信品質に大きく影響するため、環境変動の小さい深海だと光でも音でも安定した通信が比較的容易に実現できるのです。一方で水深10~30 m程度の浅い海域では魚やエビといった多種多様な生物が生息しているだけでなく、船舶の往来や海流の影響で大きな環境変動が生じるため、昔から長距離高速無線通信が難しいといわれてきた領域になります。また、市場面でも、確かに深海には海底資源という魅力的な市場はありますが、それよりも水深が浅い海域で展開される漁業や港湾工事等の海洋事業では、DX (デジタルトランスフォーメーション) 化が喫緊の課題であり、さまざまな企業が海洋DXに向けた取り組みを行っています。しかし、先述のとおり浅海域では安定した無線通信の提供が難しく、通信はもっぱら有線接続で行われており、海中無線機・ロボットの運用面で大きな制約を受けます。

そのように海中無線通信のブレイクスルーが望まれる中、私たちは2022年11月に海中音響通信技術により世界初となる浅海域での伝送速度1 Mbit/s・300 m無線伝送実験に成功しました。また同年12月には、本技術を搭載した完全無線制御型的水中ドローンをを用いた公開実証実験を静岡県で行い成功させました。これらの結果は国内外から非常に注目され、多数の海洋関係者より問い合わせを受け反響の大きさを実感しました。海洋DXを実現するには社会実装が必要で、そのためには解決すべき課題がたくさん残されています。今後はパートナーの皆様と連携し、真の海洋DX実現に向けて研究開発を進めていきたいと思っています。



期待高まる国産生成AI（後編） —— LLMとAIガバナンス

生成AI（人工知能）の社会実装は、世界的に民主主義やプライバシーといった人権など基本的諸価値・原理への再考を迫られています。大規模言語モデル(LLM: Large Language Model)特集の後編では、法的・倫理的課題の概要とそれに対する国内外の動向について、ユーザーとサービス・システム提供事業者側の双方から検討します。特にLLM開発事業者のような提供側の企業においては、広く人口に膾炙するほど、企業としての社会的責任を果たすことが求められることから、法的・倫理的配慮を踏まえた「AIガバナンス」の考え方も紹介します。



生成AIの登場で高まる規制議論

前編ではAI（人工知能）の誕生から大規模言語モデル(LLM: Large Language Model)開発動向を概観しましたが、生成AIの利便性に注目が集まる一方で、国内外では、クリエイティブ産業を中心に、危機感の表明とともに、AIに対する規制が求められています。例えば、米国では、AIによるスキル収奪への抵抗として、ハリウッド俳優によるストライキが4カ月にわたって続きました。日本でも、大手出版社が、AI生成画像を使ったグラビア写真集を発売したものの、批判を受け、発売中止となりました。また、TVドラマ『相棒 season22』の最終回では、生成AIによりつくられた主人公の杉下右京のなりすまし動画が全世界に拡散された設定⁽¹⁾でしたが、現実でもこうしたフェイク動画を容易につくることができるようになりました。

加えて、一見してもっともらしい情報や答えを出力するハルシネーション(Hallucination)^{*1}があり、偽情報・誤情報の拡散も深刻な問題となっています。

このような背景から、2023年5月に開催されたG7広島サミットの最後に出されたG7広島首脳コミュニケ(同月20日)では、議論すべきテーマとして「著作権を含む知的財産権の保護、透明性の促進、偽情報を含む外国からの情報操作への対応」などが挙げられました⁽²⁾。

本稿では、以上のような現状を踏まえ、国内外の規制動向を概観した後、日本における生成AIサービスの利活用シーンとLLMの研究開発のシーン、それぞれで生じる法的な問題・議論を紹介します。その後、最近話題になっている「AIガバナンス」の概要を説明し、最後に前後編を通した今後を展望します(本稿は2024年3月14日時点の情報に基づいています)。

国内外の動向の概観

2024年3月13日、欧州議会は、世界初となる、包括的にAIを規制する法案を承認しました。この法案は罰則付きのため、厳しい規制といえます。また、その他の地域においても、表1のとおり、生成AIに焦点を当てた規制が始まっています。他方で、日本では、生成AIの登場を踏まえ、これまで複数あったAI関連のガイドラインを統合した、「AI事業者ガイドライン」が作成されています。

生成AIサービスの利活用における法的問題

生成AIサービスを利用してイラストを生成し資料に掲載する、顧客の氏名や生年月日等を入力しリストやグラフを生成させる、あるいは業務効率化のため自組織に生成AIサービスを導入するといった場面では、

①知的財産権、②個人情報の保護、③組織内の利用ルールに気を付ける必要があります。

■知的財産権(著作権を中心に)

生成AIの法的問題は、開発・学習段階と利用段階(プロンプトの入力から生成、その後の生成物の利用も含む)の2段階に分かれて検討されることが一般的です。ここでは、利用段階を取り上げます。

まず、著作権との関係では、生成AIにより生成されたイラスト等が、すでに存在している、人によって描かれたイラスト等(既存著作物)に関する権利の侵害となるかが問題となります。これについては、生成AIによる生成物が否かを問わず、「類似性」(他人の著作物と同一か・類似するか)と「依拠性」(他人の著作物をもとに作成されたか)によって判断されることとなります⁽⁶⁾。これまでも類似性は、裁判の結果の予測がしづらく問題となっていますが(図1)、生成AIは、開発時に、すでに存在する作品を利用することから、依拠性が特に問題となります。

すなわち、ある作品が生成AI開発時の学習データに含まれているのであれば、その作品に「依拠している」といってよいとも思えるのですが、生成AIに指示を出し

*1 ハルシネーション: LLMが統計的手法、すなわち、確率論に基づいて文章を生成していることから、結果的に、作成された文章の内容が虚偽となること。



表1 諸外国の生成AI規制の概要

地域	表題	概要	罰則
米国	AI権利章典の青写真	米国国民の権利、機会または重要な資源やサービスへのアクセスに重大な影響を与え得る自動化システムを対象に、5つの原則（①安全で効果的なシステム、②アルゴリズム由来の差別からの保護、③データプライバシー、④ユーザへの通知と説明、⑤人による代替手段、配慮、フォールバック）とこれらに対応する問題点、実践方法・事例をまとめた文書	なし
	AIリスクマネジメントフレームワーク(AI RMF)(国立標準技術研究所(NIST))	NISTサイバーセキュリティフレームワークを参考に、AIに関連するリスクを効果的に管理することを目的としたガイダンス(拘束力なし)。「コア」として、統治、マッピング、測定、管理の4つの対応策を挙げる	なし
	AIの安全、安心、信頼できる開発と利用に関する大統領令(2023年10月)	AI安全保障のための新基準のセクションでは、国家安全保障の観点から、潜在的なデュアルユース大規模基盤モデルを開発する企業等への報告の義務付けや国防および情報機関によるAIの安全かつ倫理的・効果的な使用の保証等により、AIシステムの潜在的リスクから国民を保護する	なし
EU	AI規則	AIの安全規制として、リスクベースで分類し、それぞれに対応した規制を義務付ける。汎用目的AI(顕著な汎用性を示し、広範囲異なるタスクを有能に遂行することができ、多様な下流のシステムやアプリケーションに統合可能なもの等)の提供者には、①AI規制委員会に通知し、②そのモデルの技術文書の策定・更新、③所定の情報提供義務等、④著作権法を尊重するポリシーの実施、⑤テンプレートに基づき汎用AIモデルの訓練に用いたコンテンツに関する十分に詳細なサマリーの策定・公表等の義務が課される	あり
	AI責任指令案	AIシステムによって引き起こされた損害に対する契約外の民事上の請求に適用。既存の措置に加え、①因果関係の推定による被害者の立証責任の軽減、②上記AI規則における高リスクのAIシステムのプロバイダに対し、関連情報の開示を命じる権限を裁判所に付与する	なし
英国	AI法案	AI規制庁を設立し、AIに関する当局間調整や検討事項の対応等を所掌させる。また、AIの開発、導入、利用をする企業に対し、AI責任者選任の義務付け(貴族院で審議中)	なし
カナダ	生成AIのガイダンス(ITSPAP. 00. 041)	サイバーセキュリティセンタが発行したガイダンス。生成AIがもたらすリスクを特定し、その軽減するための手段を提示	なし
	生成AIの使用に関するガイドライン	連邦政府機関の職員向けに、連邦機関が生成的AIツールを使用する際の予備的ガイダンスを提供	—
	AI・データ法案	AIの開発事業者に対し、評価、リスク管理、データの匿名化、透明性確保、記録保存の義務を課す(現在、検討中)	あり
中国	生成系人工知能サービス管理暫定規則	生成AIサービス提供事業者に対し、提供前に安全評価の実施、アルゴリズムの事前届出等の義務、提供後に学習に使用されるデータの適法性やユーザの適正使用のモニタリング等の義務を課す	あり
日本	AI事業者ガイドライン	AI開発者、提供者、利用者の遵守事項を記したガイドラインであり、総務省、経産省が作成	なし

出典：各種文献^{(3)~(5)}より情報通信総合研究所作成

た利用者はその作品の存在を知らない可能性もあり、このような場合にまで著作権侵害となるとすると、安心して生成AIを利用できなくなってしまいます。そこで、文化庁の文化審議会著作権分科会法制度小委員会が公表した「AIと著作権に関する考え方について」(以下「考え方」と略します)⁽⁶⁾では、①AI利用者が既存の著作物を認識している場合、②認識していない場合でも、AI学習用データに当該著作物が含まれている場合において、一定の場合に依拠性を認めています(pp.33-35)。

このほか、著作権との関係では、生成物に著作物性が認められるか、すなわち、生

別紙1



別紙2



左を右のイラスト化(赤枠部分)にあたり類似性が否定(なお、赤枠は筆者加筆)。

出典：上記判決(LEX/DB文獻番号25449379)別紙1、2⁽⁷⁾より情報通信総合研究所作成

図1 東京地判平成30年3月29日(平成29年(ワ)第672号等)

成AIが生成したイラスト等に「著作権」が認められるかについても、現在、議論と検討が進んでいます。

著作権以外の知的財産について目を向けると、現在、内閣府のAI時代の知的財産権検討会において、著作権以外の産業財産権や不正競争との関係、肖像権・パブリシティ権の問題⁹⁾のほか、声優など実演家の権利に関して、生成動画の実演との関係で権利が及ぶのか¹⁰⁾、声優の「声」にも権利を認め保護すべきではないかなど、これまで議論されなかった問題が提起されるようになっていきます¹¹⁾。

■個人情報の保護

個人情報保護法は、個人情報取扱事業者（取扱事業者）に対する規制であるため、一般ユーザが生成AIを利用する際には適用されません。他方で、企業が生成AIをユーザとして使う場合は、自社が保有する個人情報の取扱いに注意が必要です。

取扱事業者が注意すべきポイントについては、個人情報保護委員会が2023年6月2日に公表した、「生成AIサービスの利用に関する注意喚起等」¹²⁾が参考になります。この注意喚起の中では、取扱事業者に対して、①生成AIサービスに個人情報を含むプロンプトを入力する場合に、利用目的の範囲内であることを十分に確認すること、②本人の事前同意を得ずに生成AIサービスに個人データを含むプロンプトを入力し、個人データがプロンプトに対する応答結果の出力以外の目的で取り扱われる場合には、個人情報保護法の規定に違反する可能性があるため、このようなプロンプトの入力を行う場合には、当該生成AIサービスの提供事業者が、当該個人データを機械学習に利用しないこと等を十分に確認することが要請されています。

なお、上記注意喚起には、取扱事業者と行政機関等だけでなく、個人情報保護法が適用されない一般ユーザにおける留意点も記載されているため、業務ではAIを使用しないとしても、内容を確認しておく価値があるといえます。

■組織内の利用ルール

企業内で他社が提供する生成AIサービ

スを活用する場合、組織内のルールを定めることが権利侵害のリスク回避につながります。

利用に際して、重要となるのが、締結される利用契約です。サービスを提供する事業者と交渉し個別に契約をする場合はその契約に、事前に用意されている定型な利用規約に同意してサービスを利用する場合にはその規約に、それぞれ従うことが原則です。いずれも、特に問題となるのが、①入力したデータの取扱い、②AI生成物に関する権利、利用関係、法的責任（免責条項）の有無です。①については、入力した情報も学習データとして用いることが明記されている場合、前述の個人情報の取扱いに関する問題が生じるほか、企業秘密を入力した場合には、企業秘密の漏洩となる可能性もあります。また、②についても、前述のとおり、第三者の知的財産権を侵害する生成物が生成される可能性があります。この点、AdobeのFireflyのように、権利侵害が生じた場合の補償を定めている場合があります¹³⁾。

組織内ルールの策定にあたっては、日本ディープラーニング協会（JDLA）が、民間企業向けに公表している、「生成AIの利用ガイドライン」¹⁴⁾が参考になります。また、東京都¹⁵⁾や福岡県¹⁶⁾が生成AIのルールを独自に定めており、これらの内容も参考になります。

LLM 研究開発における法的問題

LLMの研究開発においては、生成AIサービスの研究開発や利活用とはまた異なった注意が必要です。そこで、以下では、LLM研究開発における法的問題を2つの視点、すなわち、①ユーザの使用により生じ得る権利利益（知的財産、個人情報、偽・誤情報との関係における信用や名誉など）の侵害に対して、研究開発段階でどのような対応が求められるのか、②独占禁止法を中心とする、いわゆる競争法分野におけるLLM研究開発の問題について解説します。

■知的財産関連法規（著作権法を中心に）

著作権者の許諾なく、他人の著作物を複製等する行為は、原則、違法となります。しかし、AI開発のための情報解析のような著作物に表現された思想または感情の享受を目的としない利用行為は、例外的に、著作権者の許諾なく行うことが可能です。ただし、利用態様などから、「著作権者の利益を不当に害することとなる場合」は原則どおり違法になります。このルールによれば、基本的に、著作権者の個別の許諾を得ることなく、他人の著作物を学習用データとして収集・複製し、データセットを学習に利用して、AI（学習済みモデル）を開発することができます。この場合、さらに別途、著作権法47条の5の適用の可能性があります（考え方p.10）。

前述の「考え方」によれば、AIによって生成された著作物に既存の著作物への依拠性が推認された場合、被疑侵害者（著作権を侵害していると疑われている者）の側で依拠性がないことの主張を要するとされています（p.35）。具体的には、AI学習段階において、ログの記録やデータ利用に際しての制約条件の確認（クリアランス）が必要になります。「考え方」では、表2のとおり、かなり踏み込んだ記載もされており、法的責任の有無を決する考慮要素が明記されています（プラスは、責任が肯定される方向の要素、マイナスは、責任が否定される方向の要素）。

ただし、利用者側が上記のような主張立証をするには、LLM開発側が、透明性の観点から情報を公開する必要があり、そうでない場合は利用者がリスクを負いながら使用することになります。これに関して、欧州AI法では、LLMの研究開発において、汎用目的AIモデルの訓練に使われたコンテンツについて、フォーマットに基づき十分かつ詳細な概要を記載して公開する義務が課されています。このような規制のない日本において、利用者のリスクにどう配慮するか（あるいは配慮しないか）は、後述するAIガバナンス*²を考えるうえでのヒントになります。



表2 生成AIサービス提供者が侵害主体として責任を負う場合の考慮要素

- (+) ある特定の生成AIを用いた場合、侵害物が高頻度で生成される場合
 (+) 事業者が、生成AIの開発・提供にあたり、当該生成AIが既存の著作物の類似物を生成する蓋然性の高さを認識しているにもかかわらず、当該類似物の生成を抑制する技術的手段を施していない場合
- (-) 事業者が、生成AIの開発・提供にあたり、当該生成AIが既存の著作物の類似物を生成することを防止する技術的手段を施している場合
 (-) 当該生成AIが、事業者により生成AIの開発・提供にあたり、当該生成AIが既存の著作物の類似物を生成することを防止する技術的手段を施すなどして、侵害物が高頻度で生成されない場合（仮に、AI利用者が既存の著作物の類似物の生成を意図して生成AIにプロンプト入力するなどの指示を行い、侵害物が生成されたとしても、事業者が侵害主体と評価される可能性は低くなる）

出典：考え方p.37より情報通信総合研究所作成

■個人情報の保護

個人情報保護委員会は、2023年6月2日、「OpenAIに対する注意喚起の概要」と題する文書を公表し、OpenAIに対して行政指導をしました⁽¹⁷⁾。そこでは、大まかに、①法令が定める場合を除き、要配慮個人情報^{*3}の取得に関し、本人の同意を得ずに取得しないこと（サービス利用者以外も含む）、②日本語で利用目的の通知・公表をすべきことを明らかにしました。①については、機械学習による個人情報の収集に関し、なすべき技術的対応が示されています。

なお、プロンプトとして同意を得ていない第三者の個人情報を入力する場合、個人データの提供制限（個人情報保護法27条、海外の場合の同法28条）に抵触する可能性が指摘されています。この点については、前述の個人情報保護委員会の注意喚起の内容からすると、入力した内容について、生成AIサービス提供事業者が学習用データとして利用しないよう対応すれば、原則として個人データの第三者提供とはならないと、現時点では解釈できます⁽¹⁸⁾。なぜなら、（個人データでなく）個人情報であれば、同法27条の文言上は規制にかからず、仮に個人データとなっても、同法27条、28条との関係で上記個人情報保護委員会の注意喚起が要求しているのは、「生成AIサービスを提供する事業者が、当該個人データを機械学習に利用しないこと等を十分に確認すること」のみと考えられるからです^{*4}。海外では、イタリアのデータ保護機関が

個人データの取扱いに問題があるとして、2023年3月にChatGPTのサービスが一時的停止をして話題になりました⁽¹⁹⁾。プライバシー保護の国際動向は、GDPR（欧州一般データ保護規則）がデファクトスタンダードとなっており⁽²⁰⁾、これは日本企業においてもAIガバナンスを考えるうえで重要です。

■偽情報・誤情報対応

偽情報や誤情報に関する規制は、利活用の際に、違法情報の拡散に当たる場合や名誉毀損・信用毀損など法令に反する行為以外は特に禁止されていません。違法情報以外の偽情報・誤情報対策は、表現の自由との関係で、慎重な議論が必要です。

表3は海外の偽情報規制の概要ですが、規制対象は主に選挙に関する情報です。これは民主主義の根幹にかかわる問題であるため、実際に、制度・技術的対応が加速するのが選挙時です。DSA（Digital Services Act）については、成立前の2019年のEU議会議員選挙前には、ENISA（欧州連合サイバーセキュリティ機関）が虚偽情報流布活動とその対策について技術的要素と人的要素の両面から分析を行い、フェイクニュース流布・拡散の土壌となっているプラットフォーム事業者に対し、2018年7月までに共通の行動規範を策定して遵守するよう求めました⁽²¹⁾。

また、2020年の米大統領選挙の前には、Microsoftの“Video Authenticator”⁽²²⁾が公表されました。もっとも、ディープフェイク（DF）検出技術は、いまだ発展途上であり、Metaが2019年に立ち上げたDF

競技大会“Deepfake Detection Challenge”⁽²³⁾では、トップの技術ですら識別精度65%でした。

こうしたDF検出技術等に限界はあるとしても、研究開発段階における対策、例えば、データポイズニング（学習用データを操作・改ざんすることにより、このデータを学習した機械学習モデルを攻撃する手法）や敵対的入力（AIを騙すような入力を行うこと）を防止する対策などは、企業の社会的責任の観点から、求められているといえます。

■競争法分野における問題

近年、GoogleやAmazonなどがデータ取得行為を基軸として市場支配的な地位を有し、それを濫用する行為が問題となっています。同様のことが、LLMに関するビジネスについても懸念されています。

(1) レイヤ構造と競争環境

生成AI関連ビジネスのレイヤ構造は、大きく3層に大別することができます⁽²⁴⁾（図2）。1番目は生成AIを支えるインフラです。例えば、クラウドサービスやチャ

*2 AIガバナンス：本論では、AIの利活用によって生じるリスクをステークホルダーにとって受容可能な水準で管理しつつ、そこからもたらされる正のインパクト（便益）を最大化することを目的とする、ステークホルダーによる技術的、組織的、および社会的システムの設計並びに運用を指します（総務省、経済産業省「AI事業者ガイドライン案第1.0版」令和6年3月p.12参照）。

*3 要配慮個人情報：本人に対する不当な差別や偏見、その他不利益が生じないようにその取扱いに特に配慮を要するものとして政令で定める記述等が含まれる個人情報（個人情報保護法2条3項）。具体的には、人種、信条、社会的身分、病歴、前科、犯罪被害情報、身体・知的・精神障害等、健康診断結果などがあります。

*4 個人情報と個人データの違い：個人情報とは、生存する個人に関する情報であって、①当該情報に含まれる氏名、生年月日その他の記述等に記載等されることにより特定の個人を識別することができるもの（他の情報と容易に照合することができ、それにより特定の個人を識別することができることとなるものを含む）または②個人識別符号が含まれるものと定義されています。他方、個人データとは、「個人情報」を容易に検索することができるように体系的にまとめた「個人情報データベース等」を構成する個人情報と定義されています。なお、体系的に検索しやすくなっている分、個人データの方が法律上の規制が多くなっています。

表3 海外における偽情報規制の概要

地域	表題	概要	罰則
米国	保健社会福祉省による啓発策の実施	健康に関する偽・誤情報に関する報告書、対策に向けた専用ページの開設	なし
	ディープフェイク (DF) 規制法 (州法)	相手方の同意なく、DFを作成、頒布することを禁止 (カリフォルニア・テキサス・イリノイ・ニューヨーク等9州で同様の規制あり)	あり
EU	デジタルサービス法 (DSA)	大規模なオンラインプラットフォームや検索エンジンに対し、偽情報を含む違法で有害なコンテンツを拡散する際に生じる重大な社会的リスクを特定・分析・査定し、その軽減措置を講ずること等の義務を負う	あり
英国	オンライン安全法	オンラインサービスの提供者に、違法または子どもに有害なコンテンツや活動によるリスクを特定・軽減・管理する義務を課す	あり
カナダ	タスクフォース「SITE」 (Security and Intelligence Threats to Elections)	選挙プロセスを妨害する試みを阻止し選挙を保護するため、警察、安全情報局、外務省等が連携する「SITE」が外国からの干渉の脅威に対する監視と評価を強化 (一貫した包括的な政策はない)	なし
中国	インターネット情報サービスアルゴリズム推奨管理規定 (DF規制法)	音声変換、画像生成や置換などの特定の情報提供サービスの提供者に対し、利用者にその提供元を確認できるようにし、DFによって生成された内容を合理的に示し、大衆に「混同」をもたらさないようにする義務を課す	あり

出典：各種文献より情報通信総合研究所作成

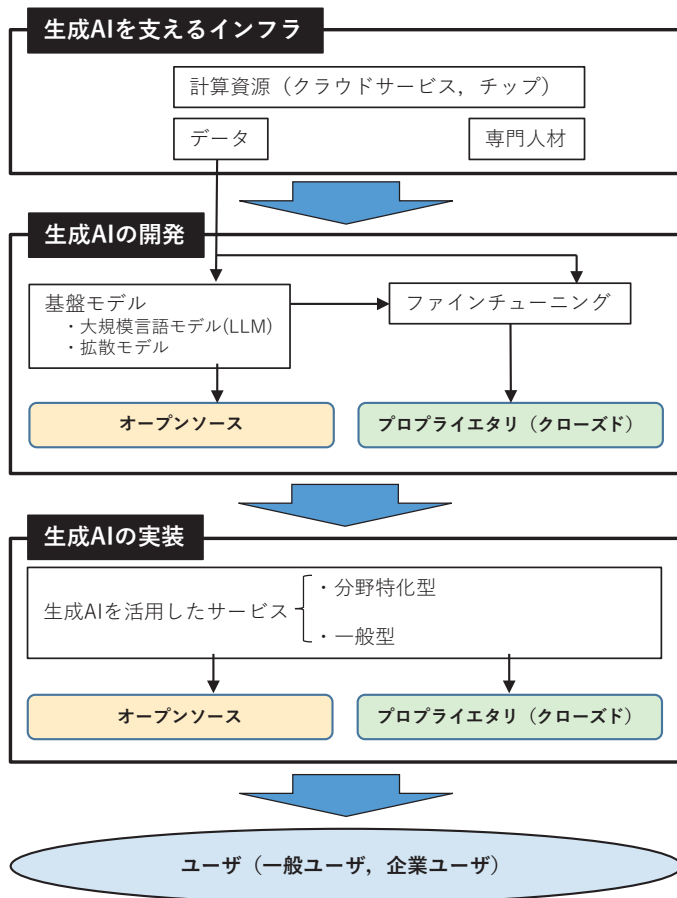


図2 生成AI関連ビジネスのレイヤ構造

プなどの計算資源や、エンジニアや研究者などの専門人材、データなどが該当します。2番目は生成AIの開発です。例えば、LLMなどの基盤モデルが該当します。またファインチューニングもこのレイヤに分類されます。3番目は生成AIの実装です。ここでは具体的にユーザが操作するアプリに生成AIを実装することが該当します。

以上の各レイヤにおいて、あるいは複数のレイヤにまたがって、競争が生じます。例えば基盤モデルの開発や提供の活発化は、サービス段階での多様なコンテンツの提供を可能とするため、基盤モデル開発段階の競争だけでなく、サービス提供段階の競争も活発化します。

また、特定用途向けにファインチューニングされたモデルを提供する事業形態もあり得ますが、その場合には基盤モデルをどのように調達するかが問題となります。基盤モデルの調達方法には、①資本投入して独自に開発する、②有力な基盤モデル開発事業者と業務提携する、③オープンソースの基盤モデルを活用するなどの方向性が考えられます。

このうち、①は、専門人材やデータセット、計算資源などのインフラが希少であり、それらの利用に関して高額なコストがかかるため、相当程度資本力のある事業者にし



か取り得ない選択肢といえます。他方で、③の方向性は新規参入事業者も選択可能であると考えられます。そのため、オープンソースの基盤モデルの存在は、生成AIの開発・利用に関する参入障壁を下げ、競争を活発化させる重要なファクターになります。

(2) 想定される競争と反競争的行為

以上の競争の機会や特徴を前提とした場合、競争法違反となる可能性がある事業者の行為や問題となる場面がいくつか想定できます。第1に、基盤モデルやデータセットへのアクセスについてです。例えば、基盤モデルの調達方法として上記②のように有力な基盤モデル開発事業者と業務提携する場合を想定してみましょう。この場合に、基盤モデルを提供し、かつ生成AIを活用したサービスを提供する事業者が、新規参入者や競合他社による当該基盤モデルへのアクセスを制限すると、ユーザへのサービス提供にかかる競争の機会が損なわれることとなります。このような事象は、基盤モデルの事前学習やファインチューニングの際に必須となるデータセットについても同様に起こり得ます。

第2に、自己優遇です。基盤モデル提供事業者が、自社の商品・サービスが他社のものよりも有利に出現するように基盤モデルを開発したり、基盤モデルを利用したサービス提供事業者が当該サービス提供時に自社商品・サービスを優遇したりすることがあり得ます。自己優遇が競争法違反となる理由については、講学上も議論の途上にあります。イノベーション阻害などの悪影響が生じ得るとされています⁽²⁵⁾。少なくとも近年では巨大デジタル・プラットフォームによる類似行為は規制対象とされつつあり、EUでは競争法違反を認めた事例も登場しています⁽²⁶⁾。

第3に、抱き合わせや囲い込みです。例えば、クラウドサービス市場で有力な地位にある事業者が同サービスの提供条件として、自社製生成AIの基盤モデルの使用を抱き合わせる場合などが想定されます。この場合には基盤モデルの製造・提供段階での競争が阻害される可能性があります。

このほかにも、人材獲得競争との関係で、事業者間で引き抜き防止や賃金水準について合意することがカルテルに該当するかという問題や、合併等のかたちで異なるレイ

ヤの事業者の統合が企業結合規制に抵触するかという問題も想定されます。

企業におけるAIガバナンス

■ AIガバナンスとは

現在、日本にはAIを直接規制する法制度はなく、ソフトローアプローチを採用するといわれています。もっとも、個別法令では、AI技術の進展に伴い、法改正を伴うハードローで規制している側面もあります。企業は、これまで取り上げた法令に限らず、倫理的な配慮から、業界のガイドラインなどソフトローに配慮することが必要です。また、経済産業省等が策定したAI事業者ガイドライン案⁽²⁷⁾では、企業に、ステークホルダーの一員として、AIガバナンスの構築が求められています。ここでは、AIガバナンスについて、「AIの利活用によって生じるリスクをステークホルダーにとって受容可能な水準で管理しつつ、そこからもたらされる正のインパクト（便益）を最大化することを目的とする、ステークホルダーによる技術的、組織的、及び社会的システ

表4 「高度なAIシステムを開発する組織向けの広島プロセス国際行動規範」の概要

	遵守すべき行動規範	具体例
1	リスクの特定、評価、軽減のための適切な措置	レッドチーミング等の評価方法の組合せや多様な内部テスト手段や独立した外部テスト手段の採用
2	導入後の脆弱性・インシデント等への対応	インセンティブ型の脆弱性報告制度
3	アカウントビリティ向上	重要な新規公表事項全てを含む透明性報告書の公表義務
4	ステークホルダーとの情報共有とインシデント報告	AIのライフサイクル全体にわたる他組織との協力と関連情報の共有と公表、公的機関との連携・情報共有
5	AIガバナンスとリスク管理方針の策定	リスク管理のガバナンス方針の策定・開示、実施のための組織的メカニズムの導入
6	セキュリティ対策	アクセス制御、リスク評価、技術的・制度的解決策の実施や脆弱性管理プロセスの導入
7	電子透かしやコンテンツ認証、来歴メカニズム開発・導入	ユーザがAI生成物と判断できるツールやAPIの開発や当該技術への研究開発投資、ラベリングや免責事項の表示
8	リスク軽減策への研究とその投資	社会的弱者や知的財産権やプライバシーの保護、偽・誤情報への対策のための研究とその投資等
9	重大な社会課題を解決するAIの開発の優先	SDGsを支援し、グローバルな利益をもたらすAI開発をし、市民社会やコミュニティ・グループとの協力とし、優先課題を特定し、重大な社会課題（特に気候危機等）の解決策を開発
10	国際的技術規格の開発推進	行動規範7の技術に関し、国際的技術標準の開発をめざす
11	個人データ・知的財産の保護	データの質の管理をするための適切な措置を講じる

出典：上記文書より情報通信総合研究所作成

ム的设计及び運用」であると定義されています。

■広島AIプロセスから見る企業に求められるAIガバナンス

「AI事業者ガイドライン案」はこれまであったガイドラインを統合・見直したものです。これにより、AIガバナンスは、原則から実践へ向け、より具体化したといえます。この傾向は、2023年の広島AIプロセスにおいても同様であり、例えば、広島AIプロセスの成果文書の1つである「高度なAIシステムを開発する組織向けの広島プロセス国際行動規範」では、これまでよりも企業や公的機関に求められるものが具体化されています(表4)。

展 望

本稿前編のとおり、生成AIは、①スケールリング則の発見、自己教師あり学習などの技術的要因と、②研究開発への大規模投資といった経済的要因によって、言語モデルの大規模化が加速し、特に2020年代以降、競争が激化しました。そして、生成AIの急速な普及の背景には、利便性もさることながら、③RLHF(Reinforcement Learning from Human Feedback: 人間のフィードバックからの強化学習)などにより出力制御を行うといった、開発側の法的・倫理的な配慮があります。ただし、本稿後編で述べてきたように、法的・倫理的課題への対応はいまだ発展途上であり、それを規制するルールもまた同様です。それゆえに、規制面では、今まさに世界中で議論されているAIガバナンスの議論が重要になります。

他方で、研究開発の技術的側面においては、パラメータ数千億超の大規模モデルの開発は計算量の膨大化や電力の大量消費を伴い、サステナブルでないことが指摘されていることから、超軽量モデルの需要増が見込まれ、小規模モデルの高性能化が急務であるといえます。小規模モデルの研究開発は、モデルの大規模化と投資規模の拡大による一部の企業の寡占という懸念を回避することにもつながります。

今後、小規模モデルが複数登場し普及した場合には、それらの相互運用性(オープン性)の確保やその一手段である標準化が重要になります⁽²⁸⁾。これまで、標準化は、世界市場のシェアを獲得し、自国の規格を世界の標準規格として普及させるという技術覇権競争としてとらえられることが多かったのですが、AI技術の分野では、むしろ国際協調が強調されています。これは、日本企業においても、小規模モデルの研究開発の際に市場を拡大できるメリットとなり得る一方、その利益を十分に享受するためには、著作権や個人データの保護に関する国際的な制度的調和を含めた相互運用性のあるAIガバナンスの構築という課題を乗り越えることが必要になります。

■参考文献

- (1) <https://post.tv-asahi.co.jp/post-245124/>
- (2) https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01tsushin06_02000277.html
- (3) 新保：“AI規制の国際動向,” 都市問題, Vol. 115, No. 2, p. 18, 2024.
- (4) 松尾：“成立間近のEU「AI法」で留意すべきAI利用者への影響,” 週刊金融財政事情, No. 3532, p. 34, 2024.
- (5) 栗原：“カナダ、欧米におけるAI規制法案の動向からみるAIガバナンス,” InfoCom T&S World Trend Report, No. 401, p. 20, 2022.
- (6) https://www.bunka.go.jp/seisaku/chosakuken/pdf/93903601_01.pdf
- (7) 判例データベース: LEX/DBインターネット, 文献番号 25449379.
- (8) https://www.bunka.go.jp/seisaku/bunkashingikai/chosakuken/bunkakai/69/pdf/94022801_01.pdf
- (9) https://www.kantei.go.jp/jp/singi/titeki2/ai_kentoukai/gijisidai/dai4/index.html
- (10) 栗原：“メタバースを中心とするバーチャルリアリティにおける著作権法の「実演」に関する一考察,” 情報通信政策研究, Vol. 6, No. 2, p.15, 2022.
- (11) 荒岡・篠田・藤村・成原：“声の人格権に関する検討,” 情報ネットワーク・ローレビュー, Vol. 22, p. 24, 2023.
- (12) https://www.ppc.go.jp/files/pdf/230602_alert_generative_AI_service.pdf
- (13) 岡田・羽深・佐久間：“連載AIガバナンス相談室 第2回AIガバナンス「AI利用事業者編」,” ビジネス法務, Vol. 24, No.3, p. 66, 2024.
- (14) https://aismiley.co.jp/ai_news/jdla-

chatgpt-llm-generativeai/

- (15) <https://www.metro.tokyo.lg.jp/tosei/hodohappyo/press/2023/08/23/14.html>
- (16) <https://www.pref.fukuoka.lg.jp/press-release/generative-ai-fukuoka-guideline.html>
- (17) https://www.ppc.go.jp/files/pdf/230602_alert_AI_utilize.pdf
- (18) 岡田・堺：“文書要約または文書作成に関する社内ルールの整備,” ビジネス法務, Vol. 23, No. 11, p. 25, 2023.
- (19) <https://www.garanteprivacy.it/web/guest/home/docweb/-/docweb-display/docweb/9870847#english>
- (20) <https://yuhikaku.com/articles/-/18653>
- (21) 湯浅：“EUにおけるフェイクニュース対策,” 日本セキュリティ・マネジメント学会誌, Vol. 32, No. 3, p. 45, 2019.
- (22) <https://blogs.microsoft.com/on-the-issues/2020/09/01/disinformation-deepfakes-newsguard-video-authenticator/>
- (23) <https://www.kaggle.com/c/deepfake-detection-challenge>
- (24) https://assets.publishing.service.gov.uk/media/65081d3aa41cc300145612c0/Full_report.pdf
- (25) 林：“デジタル・プラットフォーム事業者による自己優遇行為と反トラスト法,” 法律時報, Vol. 94, No. 8, p.75, 2022.
- (26) 千葉：“デジタル化社会の進展と法のデザイン,” 商事法務, p. 246, 2023.
- (27) https://www.soumu.go.jp/main_content/000935246.pdf
- (28) https://www.meti.go.jp/medi_lib/report/2022FY/000802.pdf



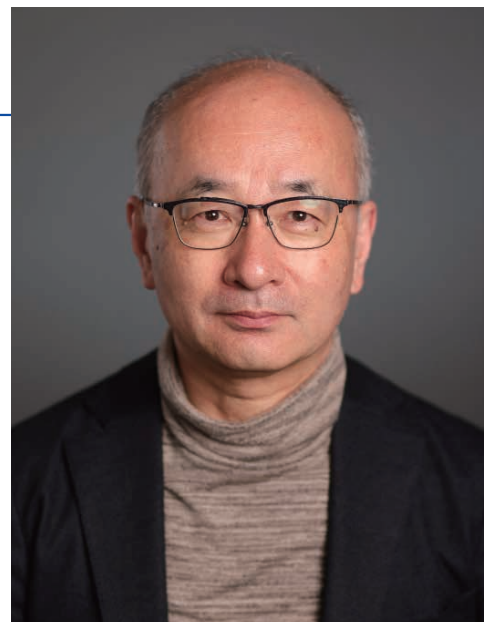
株式会社情報通信総合研究所
 研究員 酒井基樹(写真左)
 研究員 成富守登(写真なし)
 主任研究員 栗原佑介(写真右)

NTT先端集積デバイス研究所/NTT物性科学基礎研究所
フェロー

松尾 慎治 Shinji Matsuo

光デバイス・光電融合デバイスで世界をリード。自分たちの技術を宣伝して、仲間を増やしていく

2023年3月にオールフォトンクス・ネットワーク (APN) IOWN1.0がサービスを開始し、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想実現に向けた、記念すべき商用サービス第一歩となりました。IOWNではラック間・ボード間・ボード内・パッケージ内・チップ内を順次光インターコネクションにしていくのですが、これを実現するには光デバイス・光電融合デバイスがキーエレメントとなります。そして商用のネットワークに実装していくためには、半導体における「ムーアの法則」を光デバイス・光電デバイスで実現することが重要になります。NTT先端集積デバイス研究所 松尾慎治フェローに、シリコンフォトンクス回路上に化合物半導体を異種材料集積した「メンブレン光デバイス」の開発と、若手・中堅の育成に向けた思いについて伺いました。



光版ムーアの法則を実現する「メンブレン光デバイス」

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。

1988年のNTT入社以来、異種材料集積技術を中心とした、光電融合デバイスの研究に取り組んできました。

2019年にNTTがIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想を発表しましたが、光電融合デバイスは、その構成要素の1つであるオールフォトンクス・ネットワーク (APN) を実現するための重要な技術であり、さらに、消費電力低減にも大きく貢献します。IOWNにおける光電融合については、2024年段階ではラック間、ボード間の電気をベースとした接続を光によるインターコネクションとするまで実現されており (第1世代、第2世代)、この先第3世代、第4世代、第5世代と呼ばれているボード内、パッケージ内、チップ内の光インターコネクションの実現・実用化に向けて研究開発を進めています。実用化に向けては、デバイス数の爆発的増加への対応と、コスト低廉化、低消費電力化を実現する集積回路 (ICチップ) の開発が課題となってきます。この課題解決は、半導体において、1つのICチップに実装されるトランジスタ等のデバイスの数が18カ月ごとに倍増するという経験則である「ムーアの法則」を、光インターコネクショ

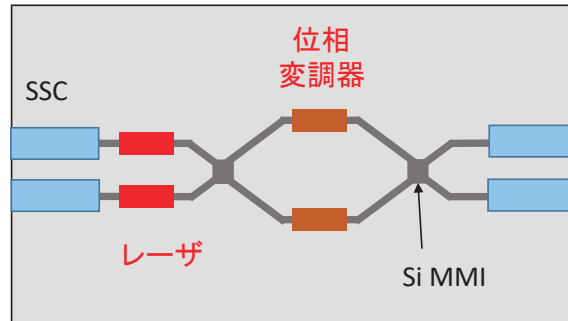
ンに必須なレーザダイオード (LD) のような発光デバイスをはじめとする、光デバイスの世界で実現することそのものです。

半導体のムーアの法則は、シリコンCMOS等の大面積・微細加工技術を利用して実現されています。これを光デバイスの世界において実現するためには、シリコン (Si) を用いて光導波路等を利用したシリコンフォトンクス技術の利用が重要になりますが、Siではレーザや高効率な光変調器のような光デバイスが作製できないため、化合物半導体であるInP (インジウムリン) 系化合物半導体を用いて作製し、その大規模集積化に向けては異種材料集積により実現します。一方、Siと化合物半導体の集積は、結晶格子の単位格子の大きさを表す定数である格子定数や、温度変化による長さや体積の変化の関係を示す係数である熱膨張係数が異なるため困難です。

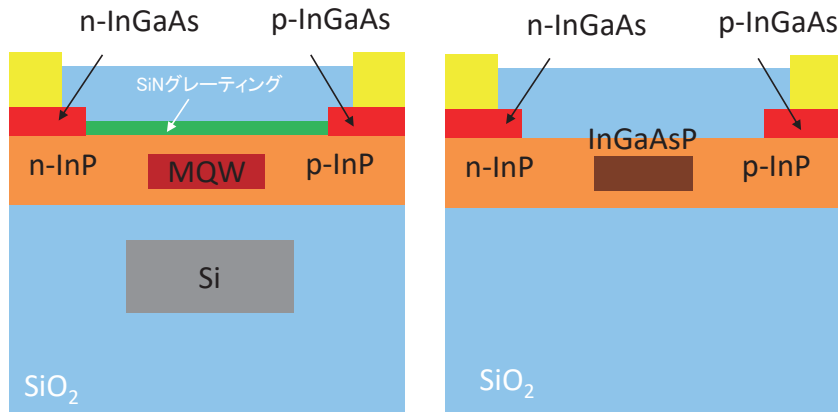
そこで、NTT独自の薄膜化技術を直接接合技術と組み合わせ、シリコンフォトンクス技術により、ボード内光インターコネクション用の光源として、Si基板上に作製した薄膜 (メンブレン) 直接変調LDを開発しました。これについては、前回のインタビュー (2021年7月号) の中で紹介しました。

メンブレン光デバイスの研究はどのように進んでいるのでしょうか。

メンブレン直接変調LDについては、チャンネル数の増大、安定性・



(a) シリコンフォトニクス回路上のInP系化合物半導体レーザ位相変調器の集積チップの概略図



(b) メンブレンレーザ部分の断面構造図

(c) 位相変調器部分の断面構造図

※ レーザコア層にはMQW(multiple quantum well)層, 変調器コア層にはInGaAsP層を用いています。

図1 シリコン導波路上に集積したInP系化合物半導体レーザおよび位相変調器の集積チップ

信頼性向上等実用化に向けた研究開発を継続的に進めています。これとは別に、レーザを直接変調するわけではなく、レーザは単なるバイアス光源として使い、光源とは別の変調器で、より高速に、より高温範囲で使えるようにするメンブレン光変調器の研究開発も進めています。

光変調器は、屈折率を主に変調する位相変調器と吸収係数を変調する強度変調器の2種類に分類できます。位相変調器は、1つの光源から分けた2つの平行光の間の位相差を測定する、マッハツェンダ干渉計と組み合わせたマッハツェンダ(MZ)変調器として用いられ、複数のMZ変調器を組み合わせて、位相、強度、偏波を変調することにより一対の波長に対して1 Tbit/sを超えるような大容量化と長距離伝送が可能です。代表的な使用材料はLiNbO₃(ニオブ酸リチウム)、Si、InP系化合物半導体が挙げられます。トラフィックの増大から将来的にはデータセンタ内のような2 km以

下の短距離においても利用が必要になってくると考えられますが、その際には、素子サイズを小さくして大規模集積した低コスト化が重要となります。そのためにはLiNbO₃、Siと比較して一桁程度効率の良いInP系化合物半導体がキーデバイスと考えられます。

一方、強度変調器として代表的な材料はInP系化合物半導体とGeSi(ゲルマニウムシリコン)が用いられています。強度変調器は強度変化のみを信号として用いるためMZ変調器と比較すると一般的には伝送容量は小さくなりますが、構成がシンプルかつコンパクトであるため、より短い距離で大量の送信素子が必要となるときには重要となります。データセンタで用いられる1.3 μm帯のレーザ光での利用を考えると、現状ではGeSiは製造工程における結晶の成長に課題があり、InP系化合物半導体の方が有利となります。

図1(a)は、私たちが作製したSiマッハツェンダ干渉計とInP位相変調器を用いたMZ変調器とメンブレンレーザを異種材料集積

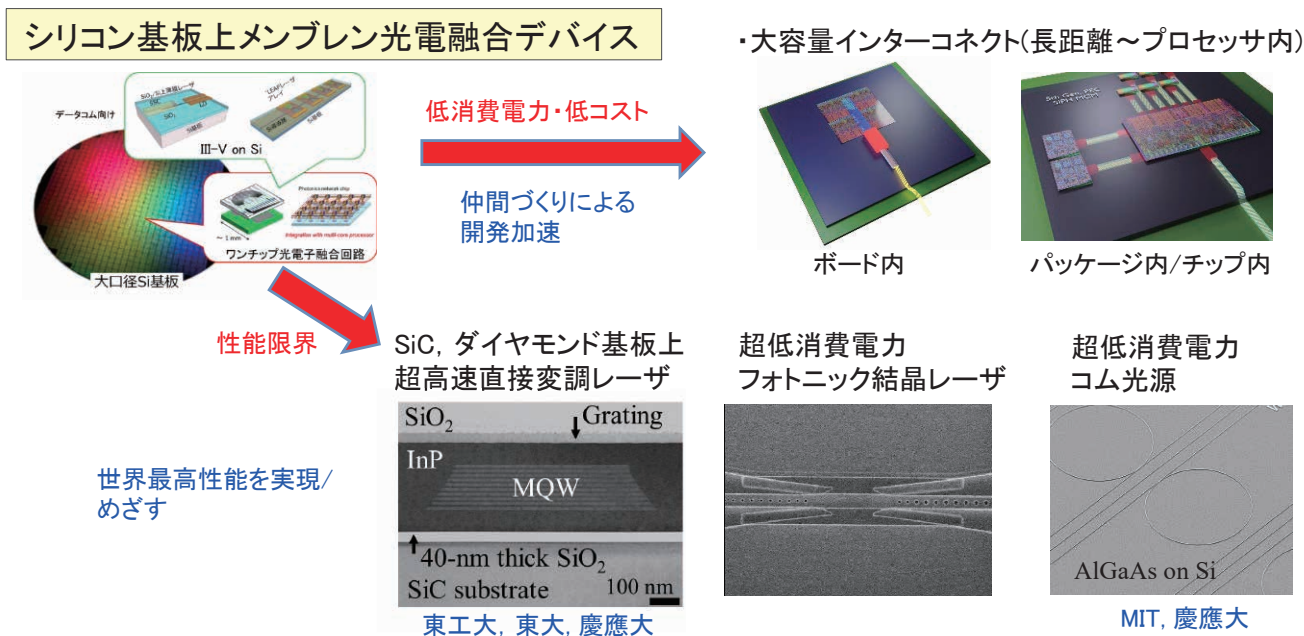


図2 今後の技術展開

した光集積回路の構成を示しています。Si フォトニクス技術の特長である、光のスポットの大きさをSi導波路からSiOx導波路の大きさに変換する素子であるSSC（スポットサイズ変換器）を集積し、レンズを用いることなくデバイスを光ファイバと直接密着させることにより高効率にファイバとのアセンブリが可能となります。図1(b)および(c)は、メンブレンレーザ、メンブレン位相変調器の断面構造です。変調器のバイアス用のレーザは連続光で高出力と安定したシングルモード性が求められるため、レーザコア層への光閉じ込めを小さくすることが重要となります。そのため、レーザコア層の下にSi導波路を配置しています。

また、私たちは、InP系半導体を用いた強度変調器も作製しました。強度変調器としては電界吸収型変調器（EAM）が用いられますが、これは動作波長付近にバンドギャップを持つ半導体に電界を印加することにより、バンドギャップが長波長側にシフトして吸収係数が変化する現象を用いています。吸収量を直接変化させるためMZ変調器のように干渉計を用いる必要がなく非常にシンプルな構成となります。これらのデバイスは、第3世代以降の短距離・高スループットの光インターコネクションのキーデバイスとなります。

こうした成果が認められ、2022年には“For pioneering contributions to ultra-high-speed and low power consumption membrane lasers”として、「Optica Fellow」に推挙され、2023年には、“For contributions to ultra-high speed, low power

consumption membrane lasers and their heterogeneous integration”として「IEEE Photonics Society William Streifer Scientific Achievement Award」をいただきました。

私たちのチームでは実用化も手掛けており、今後の技術展開としては、IOWNステップ3～5に向け、低消費電力・低コストをめざして、古河電気工業等のパートナーとの共同研究を加速しています。また、世界最高性能の実現をめざして、「SiC基板上超高速直接変調レーザ」の共同研究を東京工業大学、東京大学、慶應義塾大学と進めており、NTT物性基礎科学研究所と協力して「超低消費電力PhCレーザ」の開発を引き続き進めています。さらに、これらとは別に、コンピューティング分野や安価で高性能なセンシング分野等へのマーケットの拡大をめざし、エコシステムを構築していきたいと考えています（図2）。

何事にもバランス感覚が必要

研究者として心掛けていることを教えてください。

前回のインタビューで「情報収集と自分の研究を理解していただくこと」を心掛けているとお話しましたが、基本的にこれは変わっていません。そのうえで、2023年4月にフェローになり、IOWNへの貢献が期待されているのでそれにこたえること、そして、若手・中堅の育成に関する意識が強くなりました。

育成面について、基礎研究と応用研究・実用化では少し考え方が異なります。基礎研究では、長期的視点を持つこととそれに向けた積極的チャレンジを促すことを意識しています。企業の中で自身の評価を気にしだすと、どうしても短期的な成果を追い求める傾向になり、そのため、どうしても視野が短期的なものとなります。特に若手はこの傾向が強いように思えます。私自身の経験も含め、基礎研究は成果が出るまでにどうしても時間がかかり、場合によっては20年、30年かかるものがあります。このような中で、短期的な成果を求めている、そこに研究としての大きな発展は望めませんし、基礎研究としての真の成果も出ません。だからこそ、長期的視点が必要なのです。とはいえ、長期的に考えると逆に最初の構想どおりの決められたルールを歩くようなことにもなりかねません。ところが、周囲の環境変化もあり、そのルールが常に正しい方向を向いているわけではないので、軌道修正をしなければならず、場合によっては大きく軌道修正をする必要もあります。その局面において、積極的なチャレンジをすることで、新たな発見や大きな進展が期待できるのです。

一方、応用研究・実用化では、スケジュールを意識しながら目の前にある課題を1つずつ、チームで解決していく必要があります。スケジュールと、チーム内の自身の役割認識と相互補完のチームワーク、そして実行力が重要になります。

私のチームでは基礎研究から応用研究・実用化まですべてのプロセスを行っているので、長期的視野、スケジュール感どちらも必要なのです。それぞれのメンバーの役割に応じて、この2つの観点を意識していくように育成していきたいと思えます。

国際会議・学会の役員を数多く歴任されていますね。こうした経験は人材育成につながっていくのでしょうか。

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) では、“Si Photonics Conference 2024”の運営委員長と2023~2025年の任期で“Photonic Society”の Board of Governorを、OFC (Optical Fiber Conference) では2020年に Program Chairと2022年に General Chairを、CSW Compound Semiconductor Week 2019では運営委員長を歴任しました。

特にOFCでは、会議の運営に携わる中で、外国の方々の考え方・行動が、日本人の意識していることとは異なることに気付きました。例えばジェンダーバランスにおける女性に対するサポートの仕方が、日本と比べて欧米のほうが積極的かつ明示的に行っています。そのうえで、南アメリカ、アフリカ、アジアといった地域ごとのバランス等を非常に気にかけて運営しています。日本では、男女比ぐらいは考えますが、そのほかのことは、それほどバランスを意識する必要がありません。これは、日本においては味わうこと

できない感覚です。

若い人には、日本だけではなく世界中の人が何を大切に思っているかを知ることが、非常に大切なことであると話をしています。そのためにも、若いころから海外の国際会議運営の手伝い等をしていくことが非常に役に立つので、それに積極的に参加していくように話しています。これらを通して、技術だけではなく、海外の人の考え方や文化的な側面も理解できます。

さて、光デバイスや光電融合デバイスの分野は世界的に先端的な分野です。研究者の数もまだ少ないのですが、逆に世界をリードしていくことができるチャンスでもあります。それをめざして学会発表に積極的に参加して、自分たちの技術を宣伝して、仲間を増やすことを心掛けています。これにより、私たちの分野に近いことをやっている人が徐々に増えてきて、技術の流れをつくることができます。あまりに先端すぎて他の人がついてくることができなければ、仲間づくりはできず孤立してしまうし、相手に寄りすぎても抜かれる可能性が高くなります。つまり、ほどよいバランスでやっていかなければならないのですが、このときに海外の人の考え方や文化的な側面を知っていることで、このバランスをうまくとっていくことができると思っています。

後進の研究者へのメッセージをお願いします。

基礎研究に関してはとにかく、長期的視点で研究してください。

NTTの研究所は企業の研究所でありながら基礎研究もやっている、非常に特異な研究所です。その強みでもある基礎研究は、10年以上の単位のサイクルにおける成果になります。もちろん、その途中段階の成果もありますが、長期的視点でゴールを見据えたうえで、マイルストーンとして中期・短期的な成果になります。評価につながる成果は、この中期・短期的なマイルストーンとしての成果でいいのです。中期・短期的な視点を積み重ねていると、ゴールを見失うことにもつながります。

逆に応用研究、実用化研究の場合は、目先のゴールに向けて成果を出していくことが必要になります。したがって、自分がおかれている立場により、これら視点を使い分けていくことになります。人によってはこの両者を異動するパターンもあります。また、私たちのチームのように、両者が直接接点を持っている場合もあります。このような場合は、それぞれの視点、立場を理解して、バランスをとった対応が必要になってきますので、それぞれの立場を理解することが大切だと思います。

■参考文献

- (1) 開・相原・藤井・武田・瀬川・松尾：“IOWNの実現に向けたメンブレン光変調器の開発,” NTT技術ジャーナル, Vol.34, No.8, p p. 15-19, 2022.



NTT西日本
技術革新部 IOWN推進室

仲宗根 慎 Makoto Nakasone




NTTフィールドテクノ
サービスエンジニアリング部 アクセス設備部門

古谷 陽平 Yohei Furuya



光ファイバセンシング技術で 設備エンジニアリングにDXを

光ファイバの中を通るレーザー光は、無中継で20~30 km以上の距離においても、通信に支障を及ぼさないレベルで伝搬します。その途中には光ファイバの材料であるSiO₂（二酸化ケイ素）分子等により、レーザー光が反射・散乱しています。この散乱光を測定することで光ファイバをセンサとして活用し、離れた場所のケーブルの状態を推定する、光ファイバ環境モニタリングを開発している、NTT西日本 仲宗根慎氏とNTTフィールドテクノ 古谷陽平氏に、光ファイバセンシング技術と光ファイバ環境モニタリングのPoC（Proof of Concept）、そしてフィールドへの導入を通してDXをめざす思いを伺いました。

 **光ファイバセンシング技術を活用して、
光ファイバケーブル等の遠隔モニタ
リング環境を開発**

現在、手掛けている技術の概要をお聞かせいただけますか。

光ファイバセンシング技術を活用した、光ファイバ環境モニタリングに関する開発からフィールド実証に取り組んでいます。光ファイバセンシングとは、光ファイバをセンサとして活用し、温度・歪・振動などを測定する技術です。レーザー光を光ファイバに入射すると、光ファイバを構成するSiO₂（二酸化ケイ素）分子等に光が衝突・反射することで、光が散乱します。この光ファイバにおける散乱は、大きく3種類あります。

まず、SiO₂の分子はレーザー光の波長より十分に小さく、この分子や分子の組成揺らぎにより発生するのが「レイリー散乱」と呼ばれるもので、光ファイバ中で発生する散乱光の中でもっとも強い散乱光であり、入射光と反射光は同じ周波数です。光ファイバの光損失測定や振動・破断点検出に利用されています。

次に、SiO₂分子の振動に起因して散乱される光で、「ラマン散乱」と呼ばれています。光のエネルギーが、分子の振動に対して補給・放出されることにより発生し、エネルギー補給の場合は反射光の

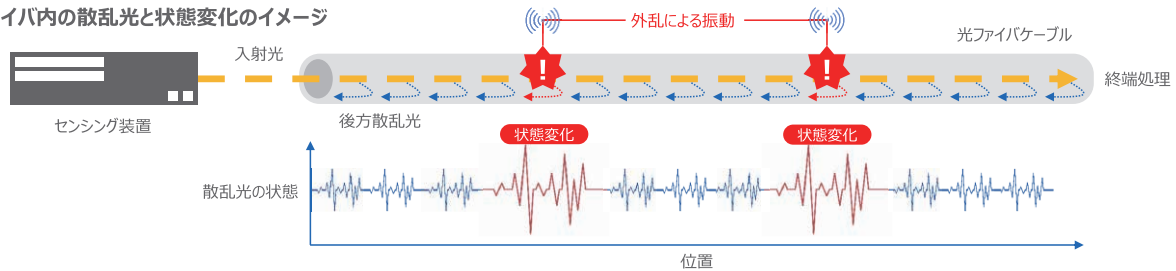
周波数が低くなり、エネルギー放出の場合は反射光の周波数が高くなります。この現象は温度の影響を敏感に受けるため、温度計測に利用されます。

そして、ラマン散乱同様SiO₂分子振動に起因して散乱される光ですが、ラマン散乱と異なり、分子の振動による疎密波である音響波（媒質中を伝搬する圧力波）により発生する屈折率の濃淡に起因する散乱で、「ブリルアン散乱」と呼ばれています。この濃淡の周期と光の半波長が一致すると、光は進行方向とは逆方向に反射されますが、音響波は移動しているので、そのスピードに応じて、反射光はドップラー効果を受け散乱光の周波数は上方あるいは下方にシフトします。このシフト量は光ファイバの温度や歪に依存して変化するので、歪や温度の計測に利用されます。

こうした散乱光のうち、試験光の入射方向に戻ってくるもの（後方散乱光）を受光し、光の強度や周波数の変化等から、温度、歪、振動などを測定します（図1）。

さて、NTT西日本は膨大な通信設備を保有しており、特に所外設備系では日々の設備パトロールをはじめ、個々の保守・点検作業も人手に頼る部分もあります。これらに多くの稼働を要しており、そのコスト削減が課題となっているほか、設備メンテナンスを中心とした設備関連業務のデジタルトランスフォーメーション（DX）推進も急務となっています。そこで、既設のアセットであ

● 光ファイバ内の散乱光と状態変化のイメージ



● 光ファイバ内で発生する散乱光の種類

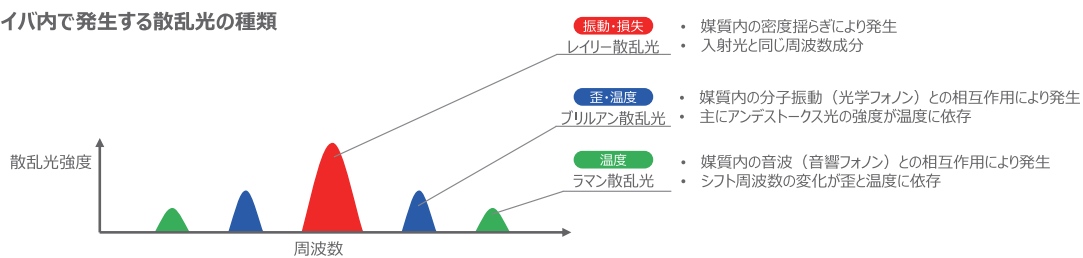


図1 光ファイバセンシング技術

る光ファイバをセンサとして活用する光ファイバセンシング技術に着目し、これにより課題解決に貢献できるのではないかと考え、光ファイバ環境モニタリングの開発に着手しました。もちろん光ファイバセンシング技術のビジネス展開やIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 普及への寄与も視野に入れて開発を進めています。

光ファイバ環境モニタリングは、光ファイバセンシングから得られる、損失、振動、歪、温度等の測定データをAI（人工知能）により解析し、設備の腐食、ひび割れ、摩耗、漏水、破断等の故障予兆データとして検知することをめざすものです。通常のセンサを利用した測定では、センサ等への給電、屋外環境におけるセンサの耐久性・安定性等の課題がありますが、光ファイバセンシングでは、センサ側は無給電、光ファイバは耐久性・耐食性に優れている、過酷な環境下（電磁両立性・防爆性が高い）でも高信頼で計測可能、既設の光ケーブル網の活用による面的計測可能といった特長から、導入も容易になるというメリットがあります。

一方、「特定の測定データの特性と設備状況との合致性の明確化」「取得した測定データの特性から、光ファイバの変化状態の推定および明確化」「状態検知の精度向上につながるAI解析手法とそれを実現するデータ蓄積環境・方法の明確化」といった課題があり、現在これらを現場における設備の故障・予兆をユースケースとしてPoC (Proof of Concept) 等により1つひとつクリアしているところです。

どのようなユースケースでPoCを行ってきたのでしょうか。

まず、電柱に添架されたケーブルに取り付けられた箱であるクロージャが、気候条件による劣化で割れが発生すると、カラス等がそこに巣づくり・産卵をし、そのときに中の光ファイバを切ってしまうような事象が頻発していることから、蓋割れ検知をユースケースにしました。

過去の検証では、ひび割れの有無を周波数や振動強度の違いを発見できず、特徴量を一般化して分析に活用する精度までには至りませんでした。これについては2023年度で、さまざまな架渉形態や設置環境での再現性を確認するため、自然環境に近いモデル実験設備を構築することでサンプル数を増やして検証しました。蓋割れによる微小な振動特性を統計処理によって明らかにすることができ、過去検証で課題であった蓋のひび割れ検知の可能性を見出しました。

また、電柱にケーブルを添架する際に、電柱間でケーブルを支持するワイヤ（支持線）の、台風による破断や倒木等で樹木がケーブルに接触することで発生するケーブル損傷への対応のために、ケーブル支持線破断・倒木接触の検知をユースケースとしました（図2）。過去の検証では実環境において、振動強度分布と、破断した個所における支持線修繕前後、および倒木個所における倒木伐採前後の振動強度の変化を測定し、ケーブルの架渉形態・気候条件に応じた振動応答特性を確認することで、ケーブル支持線破断・倒木接触の検知の可能性を評価しました。

当時の検証結果としては、支持線破断については、支持線が切れた個所においては低周波数帯の振動強度が強く出ていることが

確認できました。倒木がケーブルにもたれている個所については、想定外なことに振動強度として微小な変化をとらえましたが、架渉形態・気候条件に応じた振動応答特性による可能性が高く、特徴量の明確化・定量化が課題でした。2023年度は自然環境に近いモデル実験設備を構築することで、架渉形態による振動応答特性を固定化し、気候条件も一定となるようにデータを取得・分析を行いました。その結果、異なる系の2スパン(合計4ケーブル)において、同様の結果が得られ、当初想定していた仮説のとおり、倒木接触では光ケーブルと支持線を含めて圧迫することで振動を抑制し、振動強度では変化をとらえられないことを確認しました。支持線破断については過去の実験で破断が確認された個所の振動

強度変化が見られたものの、再現性が得られませんでした。これは、環境雑音(交通量、風雨)により精度が劣化すると想定されることから雑音耐性の確認が課題となります。2023年度は、自然環境に近いモデル実験設備にて支持線破断を再現してデータを取得・分析したところ、異なる系の2スパン(合計4ケーブル)において、同様の結果が得られました。支持線が破断した個所での振動強度をピークとして、遠端に近づくにつれて振動強度が減衰していくことを確認し、過去検証で課題であった再現性をクリアしました。今後はフィールドでの検証サンプルを増やすとともに、各種特徴量の定量化により精度向上をめざします(図3)。

今後は、ユースケースを増やす中で検知精度を向上させながら、



図2 本研究施策でターゲットとするユースケース

■ 検証概要

台風被災時のパトロール・復旧の効率化を想定し、以下の検知可否についてモデル実験を実施

- ① SSケーブルの支持線破断
- ② 劣化や鳥害によるクロージャ蓋割れ
- ③ 架空ケーブルへの倒木接触

<ユースケース選定観点>

- ・台風等の被災の影響度
- ・保守拠点より遠方or離島(即時駆け付け困難)
- ・お客さま影響大, 点検稼働大



■ 実験結果と技術課題(統計量計算による検定・評価)

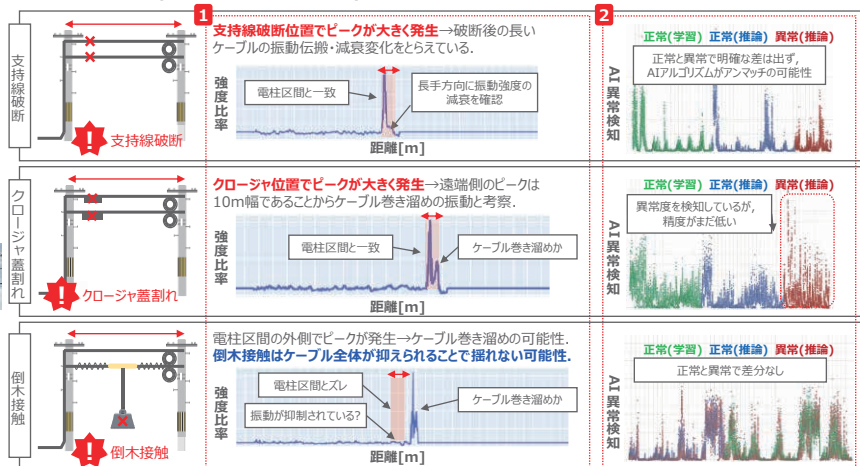


図3 ケーブル支持線破断・クロージャ蓋割れ・倒木接触の実験結果

1つでも成功事例を増やして事業導入に結び付けていきたいと思
います。また、単に光ファイバセンシングだけではなく、ユースケー
スにより得られた知見やパトロールで得られたデータ等を組み合
わせて活用しながらビジネス展開につなげていきたいと思います。

○ 双方向のコミュニケーションで、いい アイデアが次々と出てくる

技術者としてスキルの維持、スキルアップはどのようにしていますか。

仲宗根：2015年のNTT西日本入社以来、法人関係のビジネス開発・
事業開発を中心とした業務を行う中で、一時期研究開発センターで、
サーバ・ネットワーク系のエンジニアをしていました。そのため、
スキルセットとしてはセキュリティ、データ分析、プログラム言
語Pythonによるプログラミングがメインです。光ファイバセン
シング技術の中では特にデータ分析に関するスキルが必要となっ
てきます。そのため光ファイバ環境モニタリングの開発にあたっては、
光ファイバセンシングとその測定データの分析、AIへの学
習とチューニングを担当しています。

スキルの中で、データ分析はセキュリティにおいても、法人関
係のビジネスにおいても重要であり、各種ツールを使いながらデー
タ分析を行い、それを可視化していくプロセスの中でスキルをブ
ラッシュアップしてきました。可視化を実現していくうえで、
Pythonによるプログラミングを意識してきました。光ファイバ
センシング技術については、現職になって初めて触れたものであり、
業務をとおして少しずつ勉強してきました。

開発を進める中では成果報告を行う場合がありますが、そこで
まとまった知見やデータをサーバに蓄積して、それを活用してチ
ーム内で、光ファイバセンシングでどのような現象が確認でき、そ
れに対してどのような処理をしたらいいのかといったポイントや、
蓄積されたデータをPythonによるプログラミングの中で活用し
ていく等を図ることで、チームや社内の技術者育成等のスキル向
上施策につなげていきたいと考えています。

古谷：2011年のNTT西日本グループ入社以来、アクセス系の設
備に関する業務を担当してきました。その意味では、基礎的なア
クセス系設備に関するスキルはこれまで習得してきましたし、現
在の業務の中でもそれが活かされています。昨今は、事業環境の
変化もあり、効率化やDXといった点が注目されており、これら
に関するスキルを常に磨いていく必要があると考えています。そ
のためにも、しっかりと業務実態を把握したうえで、現場と対話
していくことが重要であり、現在それに注力しています。また、
新たなタイプの設備不具合事象が発生すると、研究所やNTT東
日本 技術協力センターがそのメカニズムや要因分析を行うので、

その対処も含めて情報収集を行い、自分の知識として蓄えること
を意識しています。

こうしたスキルのバックグラウンドを活かして、光ファイバ環
境モニタリングの開発においては、光ファイバセンシング技術の
アクセス系設備への適用に関する部分とPoCを担当しています。

設備系のスキル一般については、NTTとしてほとんどの設備建
設・保守業務が委託されている中で、スキル継承が大きな課題と
なっています。NTT西日本では、一部の工事で設計・施工・検査・
保守を直営業務として行い、西日本各地域のメンバをそのチ
ームに派遣して、さまざまな経験を積ませることでスキル継承を図
る仕組みがあり、私もそこに参加したことがあります。

開発において大切にしていることは何でしょうか。

仲宗根：現在開発中の技術が、事業導入されて人の役に立てるよ
うに仕上げていくことが、一番意識しているところです。幸いにも
光ファイバ環境モニタリングは、NTTフィールドテクノにおけ
る事業導入が視野に入っているため、高いモチベーションで取り
組むことができ、うれしく思います。

これに限らず実際に開発を進めていくためには、技術者目線と
して、出口をしっかりと見定めたいと、楽しく知的好奇心の赴く
ままに、というのが重要と考えています。私は2023年7月に現職
に異動し、このテーマはそこからのスタートですが、目の前のこ
とに対して知的好奇心がなければ長続きしないし、ゴールも見定
めることができないと思います。新しいところに取り組んでいる
ので、分からないことが多いのは当然です。それに対して、しっ
かり仮説を立てたいと、最後までとことん手を動かす、という
ことを私の中では大切にしています。

さて、ユースケースのPoCにおいて、沖縄本島、石垣島、京都
の3カ所に装置を取り付けに行きました。現場の方々の協力をい
ただく中で多くの気づきがありました。これを通して、現場の人
のスキルセット、彼らが大事にしているモットー、信条を知るこ
とも大事ですし、それらを踏まえて、意識をしっかりと合わせて
取り組まなければいけない、という思いを強く持ちました。

古谷：NTT西日本グループは、固定回線収入の減少が続いており、
それを補うために新しいビジネスの開拓を積極的に進めています。
こうした背景のもと、設備部門に所属する私としては、既存業務
を抜本的に見直し、効率化を図るとともにそれをDXにつなげ
て推進し、新ビジネスにつなげていくことで貢献していきたいと思
っています。光ファイバセンシング技術は、その流れにうまく乗る
ことができる可能性が高いので、現場にも喜ばれる技術をなんと
しても導入にこぎつきたい、という思いで開発に取り組んでいます。
そのためにも、研究所・技術部門と運用部門・現場との意識の分

断を招かないよう、技術部門の方に現場への適用方法をお伝えしながら、検証の観点も一緒に整理しながら取り組んでいくことが重要だと考えています。

さて、2023年11月に「マイスターズカップ」というNTT西日本主催の展示イベントがあり、そこに光ファイバセンシングを展示しました。その中で私たちが思い描いていなかった、活用方法に関するアイデアが現場の意見としていくつかありました。現場との間で、一方通行ではない、双方向のコミュニケーションにより、いいアイデアにつながることを実感し、今後の活動の中でこのコミュニケーションをどのように展開していこうかと考えています。

尖った技術で強みをアピール。 アピールで理解を深め、仲間を増やす

将来的に何をめざして開発を続けるのでしょうか。

仲宗根：私は、事業開発・サービス開発に取り組んできており、現在のNTT西日本の経営環境を考えると、事業やサービスの種をつくっていくことが大切であり、その思いが強いほど新しい種が出てくるのではないかと思います。現在私は、IOWN推進室に所属していますが、そこの業務としてこれに精力的に取り組んでいきたいと思っています。

まず、IOWNは、2023年3月にオールフォトニクス・ネットワーク（APN）IOWN 1.0というサービスをリリースしましたが、これに適するユースケースをつくっていききたいと思います。これと同様にデジタルツインコンピューティング（DTC）のユースケース・アプリケーションもつくっていききたいと思います。この2つが普及してくると、高性能な分散データセンターも普及し、[tsuzumi]のようなLLM（大規模言語モデル）やAI環境も整ってきます。ここまで来ると、私のスキルの軸であるデータ分析もハイスペックで超高速な環境で行うことが可能となります。そこをにらんでデータ分析サービスとそのユースケースを考えていきたいと思っています。

古谷：短期的には、光ファイバ環境モニタリングを現場へ導入できるような仕上げ、導入後はこれを現場のオペレーションに落とし込む中でDXにつなげ、インフラビジネスとして自治体等への展開を図っていきたくと思っています。

その先の話として、アクセス系の光ファイバケーブルを遠隔自動で試験・監視することを可能にするシステムである「AURORA」への光ファイバセンシング技術のビルトインをはじめとした、光アクセス系設備業務の高度化をめざしたいと思います。これと並行してインフラビジネスの観点から、ビジネスの種を増やしていくために、ファイバセンシングの技術に限らず、新たな技術探索

にチャレンジしていきたいと思っています。

社内外の技術者、パートナーへのメッセージをお願いします。

仲宗根：これから新しいビジネスをつくっていくうえでは、技術力でさらに尖っていく必要があると考えています。特にITやAIのように、流行っている技術や誰もができるような技術だと、早い段階でコモディティ化してしまい、ビジネスとしても拡大性がないものとなるのではないのでしょうか。これを考えると、これからは尖った技術をもって、他社には真似できないようなスキルとしてNTTの強みにしていくことと、その良さを活かせるユースケースの開拓を行ってほしいと思います。そして何よりも大切なことが、そのアピールです。ぜひ尖った技術を社内外にアピールしてください。

また、この研究施策ではNTTアクセスサービスシステム研究所・NTTフィールドテクノの皆様には多大なご支援をいただきました。モデル実験設備の設計から構築、実フィールドでの局舎への測定装置の設置・キャリブレーションなど、私だけではスムーズに進めることができなかったと思います。この場を借りて感謝申し上げます。

古谷：今回の取り組みの経験から、新たな技術を導入するのにあたり、技術シーズ目線と運用側のニーズ目線両方のバランスが非常に重要であると思いました。これをメッセージとしてぜひ伝えたいと思います。

また、新しいものを導入していく際には、導入先や周囲からさまざまな抵抗にあうことがあります。新しいものに対しては、それに関する知識がほとんどないので身構えてしまい、それが抵抗につながるのだと思います。このハードルがいったん取り除かれれば、逆により良い使い方や新たなニーズや課題等が出てくるとともに、抵抗していた人たちが仲間にもなります。新しいこと・ものに取り組むときには、うまくアピールとコミュニケーションをしていくことで、それに対する好奇心を持ってもらい、仲間を増やすような努力をしていくことが大切だと思います。



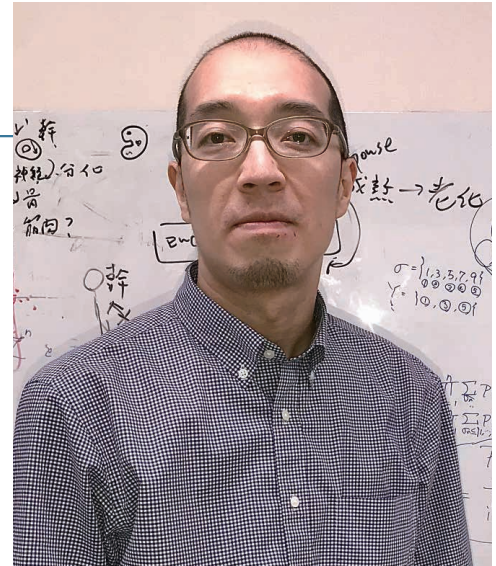
NTTコミュニケーション科学基礎研究所
NTT物性科学基礎研究所
特別研究員

中野 允裕 Masahiro Nakano

増え続ける無限のデータを解析するための「ノンパラメトリックベイズ法」

現在注目を集めている研究の1つが、解析データを実社会の応用課題へ活用する「統計的機械学習」です。従来の解析では、統計モデル・学習モデルの規模やパラメータを与えられたデータに応じて人手で設定するか、高コストなチューニングを行う方法が主に用いられていました。しかしこれらの方法では膨大な時間と労力がかかり、今後も肥大を続けるデータを分析することは困難です。そこでこうした課題を解決するため、モデルの規模やパラメータをデータの質や量に応じて自動的に調整する新たな手法が強く求められています。今回は中野允裕特別研究員に、現代データ社会が抱える課題解決に向けた「ノンパラメトリックベイズ法」の研究についてお話を伺いました。

◆PROFILE：2011年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。NTTコミュニケーション科学基礎研究所配属。2020年よりNTTバイオメディカル情報科学研究センタ兼務。確率過程（無限次元のパラメータ空間を持つ確率モデル）や極値組合せ論的普遍対象を用いた統計的機械学習法とその生体情報処理への応用に従事。



無限サイズの関係データを解析するための新たな手法を確立

■はじめに、「ノンパラメトリックベイズ関係データ解析」とはどのような技術でしょうか。

現在の社会におけるデータの容量・規模は年々増大し続けており、データの種類も多様多種となっています。こうした環境の中で、従来では人手によってモデルのパラメータを都度適切に設定して、各種の処理を行っていました。しかしこの手法では膨大な時間と労力を要してしまい、データ社会のさらなる発展に対応することは困難です。そこで、これらの諸問題を解決するのが、今回紹介する「ノンパラメトリックベイズ法」です。この技術は、統計モデル・学習モデルがモデルの規模やパラメータをデータ駆動的に（データの質や量に応じて自動的に）調整することで、従来課題であった人手による膨大な時間と労力を削減しています。

「ノンパラメトリックベイズ法」が活躍する1つの応用事例として、「関係データ解析」という技術を挙げることができます。ここでは、現代における不定愁訴の問題を例にその活用事例を考えていきます。不定愁訴とは、心身不調に対する自覚症状を訴えて検査しても原因となる病気が特定されず、有効な治療法が分からない状態のことです。その症状は多岐にわたり、さらに「体が

だるい」「疲れが取れない」「腕が重い」など複合的に現れることもあるため、患者個人単位で病気の特定は困難で社会課題になっています。しかし、もしこのような多くの患者と多くの症状の間関係データを集めてデータ分析を行えば、それぞれのデータの相関が明らかになり、データサイエンス的に何らかの共通の特徴を見て取ることができるのです。

しかしこの解析を行うにあたって大きな問題がありました。それは収集できるデータの数が無限（に近い）の場合に対処が難しいことです。例えば自覚症状の項目数は、人によってそれぞれ異なるものも含めるとかなりの数になります。また潜在的に不定愁訴となり得る患者の数も計りしれません。このように、患者と症状の関係データは、表形式の行方向と列方向に無限に大きくなっていく可能性があり、データを解析することは困難を極めます。

そこでこうしたデータを潜在的に解析するため、データ背後に潜む無限の可能性への「不確かさ」をデータ駆動的に行う技術が、2000年に創出された機械学習法の一分野である「ノンパラメトリックベイズ法」です。この技術の具体的な成果として、「遺伝子と病気の関係性の発見」というようなデータをクラスタリング（データ間の類似度に基づいてデータをグループ分け）解析する際に、データを長方形に分割し、その分割候補のあらゆる組合せパターンを生成できる新しい確率的生成モデルを構築しました（図1）。

例：遺伝子と病気の関係性の発見

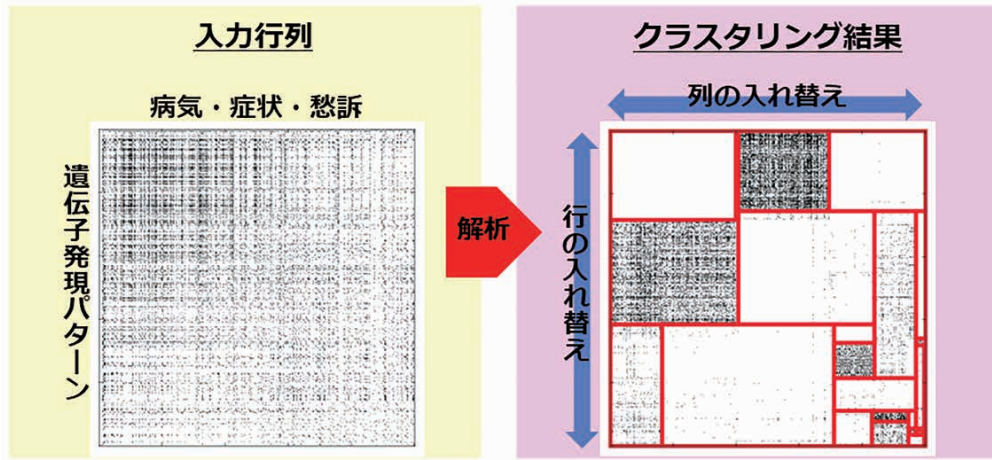


図1 ノンパラメトリックベイズ関係データ解析の概要

さらに最適な長方形分割をデータに合わせて調整しクラスタリングすることで、効率的なデータ解析方法を実現しました。これによって、従来では解析不可能だった「無限に近い」あらゆるデータを、データの質と量に合わせて解析可能にしています。

■そのほか、どのような技術をご研究に取り組まれているのでしょうか。

前述の技術と並行して、2022年から「スーパーベイズ関係データ解析」という研究を進めています。この技術を簡単に説明すると、ノンパラメトリックベイズ関係データ解析の「無限を扱う」という特徴を緩和したものです。

実はノンパラメトリックベイズ関係データ解析の実現に向けた最大の障壁は、推論アルゴリズムの構築でした。なぜなら「無限」を計算機上で積極的に活用することによって、データ解析に用いられる推論アルゴリズムの構築には「無限」が付きまとうことになり、それによりある種の無限ループの可能性を回避しなければならず、解析を行うモデルの設計難度が高くなってしまいます。これはノンパラメトリックベイズ関係データ解析における推論アルゴリズムで、確率的操作を用いることに起因する問題です。一般的に確率は、候補となる事象の発生確率を合計して常に100%とならなければなりません。しかし「無限の場合」の数では、合計が確率100%であったとしても、それぞれの場合の数そのものの確率は0%となります。つまり全体の「無限の場合の数」の中から、部分的な「無限の場合の数」を集めることで正の確率を持っているのです。そのため「確率0%の事象だから無視できる」と油断していると、知らず知らずのうちに無視した事象の確率が正となっていき、合計が100%とならずに破綻してしまうおそれが出てきてしまいます。

私は研究の道に進み始めてからすぐに、「無限を仮想的に扱う

ことができる」というノンパラメトリックベイズ関係データ解析の魔法のような売り文句に魅力を感じて惹かれていました。当時2000年代はちょうどノンパラメトリックベイズ法の第一次ブームのような時期でもあり、毎日のように新しい技術が出てきてとても刺激でした。しかし2012年ごろにAI（人工知能）が盛り上がりを見せ、第三次ニューラルネットワークブームが起これ、それとともにノンパラメトリックベイズの盛り上がりは相対的に落ち着いてきてしまったように思います。個人的な想像としてその原因は、「実用化に耐え得る技術ではなかった」の一言に尽きると 생각합니다。ノンパラメトリックベイズ法は、その最大の特徴である「無限を仮想的に扱う」能力のために、計算機上かなり取り扱いが難しいモデルになってしまったのです。このように実応用の観点で見たときに、ノンパラメトリックベイズ関係データ解析の構築はしばしば難度が高く、まずはすでに確立されている深層学習に基づいた方法を試してみるのが一番有望であるといっても過言ではありません。

しかし一方で、当時2012年ごろから第三次ニューラルネットワークで興隆を極めていた深層学習のように、何か構築度の容易さと実応用性が両立できる方法がないかを模索していました。そのブレークスルーのきっかけとなったのは、2021～2022年に出会った「極値組合せ論」です。

極値組合せ論とは、ある種の冗長さの中に生まれる秩序を扱う学問です。例えばとてつもなく長い数字の列（より正確に言えば、一様ランダムな順列）を考えると、その部分系列としてありとあらゆる短い順列（例：14523, 8245361）が高い確率で現れることが知られています。この極値組合せ論から得られた重要な洞察は、「十分に冗長で巨大なものを用意すれば、それは十分すぎるほどいろいろなものが表現できる」ということです。つまりノンパラメトリックベイズ関係データ解析においては「無限」が必要だと

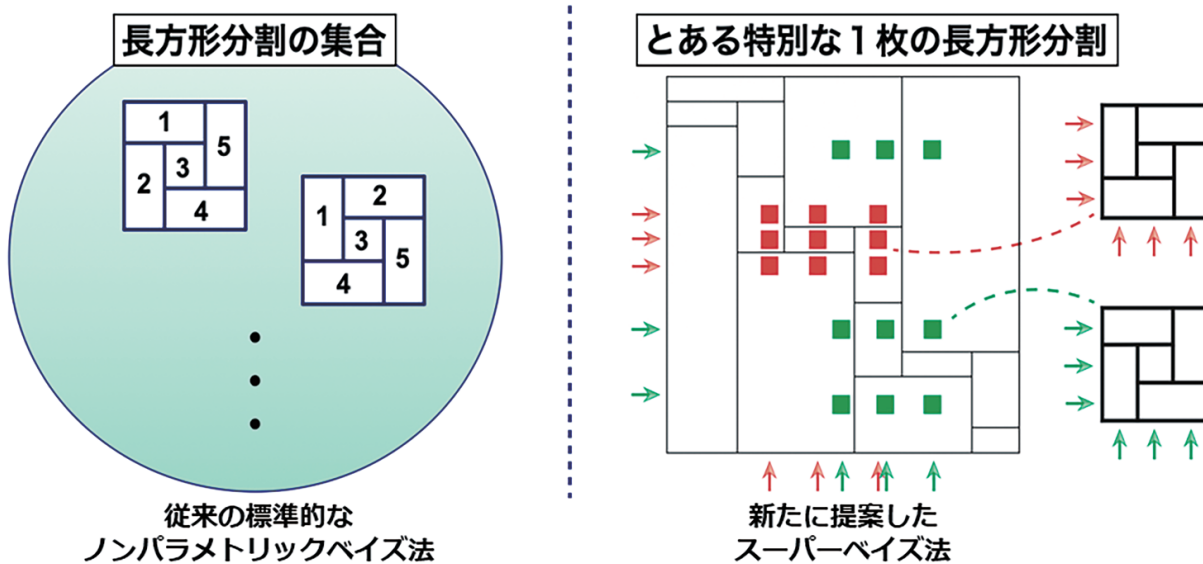


図2 ノンパラメトリックベイズ関係データ解析とスーパーベイズ法の比較

思われていたものを、もしかすると「十分に冗長で大きなもの」に置き換えることで代替できるのではないかと気が付きました（図2）。そしてこの「十分に冗長で大きなもの」というのは無限が絡むわけではないため、推論アルゴリズムの構築がずっと簡単なものになってくれる可能性を秘めています。このようにスーパーベイズ法は、「冗長性」という洞察を得たことによって、ノンパラメトリックベイズ関係データ解析の強みを持ちながら実応用に適した技術になり、これからの発展を導いてくれるのではないかと期待しています。

ノンパラメトリックベイズ関係データ解析の新しいブランチとして可能性を見出しました「スーパーベイズ法」の研究は、当該分野の重要国際会議 AISTATS2022にて Oral発表 (Top約4%) の機会をいただいたことをきっかけに、それ以降も力を入れて取り組んでいます。このような極値組合せ論を積極的に活用する機械学習法は未開拓の領域であったため、査読者や聴衆から肯定的な反応がいただけたことで、研究継続の励みになりました。現在では機械学習・AI分野全体の盛り上がりに対して、ノンパラメトリックベイズ法に力を入れている研究所は相対的にかなり少ないといえます。しかし研究はある種、人類全体の大海戦術によって発展していくものです。そのため今後もこのような取り組みを続けて当該分野で注目してもらうことにより、一緒に発展をめざす研究チームをさらに増やしていきたいと考えています。

知見を活かしてNTTが掲げる医療健康ビジョンに貢献

■これからの研究の展望を教えてください。

これからの展望として、NTTが掲げる「医療健康ビジョン」に

貢献したいと考えています。この目標は、人々が健康で希望を持ち続けられる未来のために掲げられたものです。NTTでは IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) の構成要素の1つであるデジタルツインコンピューティングによって、人の身体および心理の精緻な写像 (バイオデジタルツイン) を実現します。そしてこれを通じて心身の状態の未来を予測することで、医療の未来ビジョンに貢献します。私自身としては、これまでノンパラメトリックベイズ関係データ解析やスーパーベイズ法で集めた知見を活かして、NTTのビジョン実現に貢献できるように考えています。

さらに具体的な取り組みとして、現在私が所属する生体情報処理研究グループでは「テレ聴診器」という研究も進めています（図3）。コンセプトを「着る・見える聴診器」としたこの技術は、聴診器をつけた患者のデータを遠隔地に送信することで、コロナ禍での遠隔感染リスクのない聴診や、遠隔の患者に対する緊急性の判断で異常の早期発見、患者自身による生体への理解促進・意識向上を可能にしました。

もちろん、バイオデジタルツインに向けた研究はこれだけにとどまりません。私が所属しているNTTコミュニケーション科学基礎研究所 (CS研) では、大阪大学との共創プロジェクト「PRIME」を通じて、生体の臓器をデジタル上に計算機モデルとして構築する長期的な研究目標に取り組んでいます。このようにテレ聴診器だけでなくさまざまな応用先を模索・実装していくことによって、NTTの医療健康ビジョンに貢献し、多くの人々がより豊かに生きられる世界を実現していきたいと考えて研究を進めています。

コンセプト：着る聴診器・見える聴診器



図3 「テレ聴診器」の取り組み

■最後に研究者・学生・ビジネスパートナーの方々へ向けてメッセージをお願いします。

私はNTT入社前から多くのつながりに恵まれ、もともと大学院所属研究室の指導教員・嵯峨山茂樹教授がNTT出身、また大学院生時代にはNTTとの共同研究の中で亀岡弘和上席特別研究員にもご指導いただく機会がありました。当時からノンパラメトリックベイズ関係データ解析の分野では世界的に見てトップの研究機関の1つで、CS研（特に上田修功客員フェロー、山田武士前CS研所長）がその黎明期に重大な貢献をされていたこともあり、学生時代から魅力的な研究所でした。

そして入社してから感じたことは、NTT研究所では短期的な選択と集中だけに縛られることがなく、当人の熱意に応じた多様なテーマ選定・挑戦を歓迎してもらえる土壌があるということです。例えば私がNTTに入社した2011年ごろには、世界のコンピュータ科学が第三次ニューラルネットワークブームの影響を強く受けていました。しかしNTTはその潮流にとらわれることなく、私自身もノンパラメトリックベイズ関係データ解析の研究を続けることができました。もちろん世界の時流や研究のトレンドをとらえることは重要ですが、一方で研究はさまざまな分野の多様性と幅を持つことで思わぬ結果を得ることもあります。こうした中長期的な投資として多様なテーマを受け入れてもらえるNTTの環境は、研究者としてとても魅力を感じています。

そして現在私は、幸いにも後輩を指導する役割に立つことが多くなりました。さまざまな指導を行う中で実際に後輩が研究テーマを立ち上げる姿を間近で見た経験から、この記事を読んでいる若手の研究者の方にぜひアドバイスしたいことがあります。それは、研究において「無駄かもしれないと思うようなこと」をたくさん試してみることが大事だということです。お断りをしておくと、もちろん研究の進め方・モチベーションの高め方は人それぞれで

正解があるわけではありません。近年ではコストパフォーマンスやタイムパフォーマンスが強く叫ばれることも多く、これはそうした考え方とは逆の発想だと思います。

しかし例えば真っさらなキャンパスに新しく絵を描こうとしたとき、真っ白で汚れ1つない紙を前にして筆が全く進まなくなってしまうことがあります。そのとき何でも良いので一度思い切って紙を汚してしまえば、途端に心が軽くなりどんどん手が進む、と考えています。これは研究でも同じです。そしてもし最初に汚れてしまったとしても、絵が上書きされていくうちにその汚れは気にならなくなっていくものです。またよく言われる「サンクコスト効果」のように、人は何かにコストをかければ後付けで価値を見出そうという心理が働きます。もし何も研究が進まなくて困っているという状況に置かれた方がいらっしゃれば、「まず塊より始めよ」。身近に自分ができることから手を付けることで可能性を拡げ、これから新たな未来を切り拓いていってほしいと思っています。



(今回はリモートにてインタビューを実施しました)

株式会社ドコモビジネスソリューションズ

<https://www.docomobs.com/>



モバイルとソリューションを組み合わせ、 お客さま、地域社会の課題解決のため 社会・産業DXを推進していく会社



ドコモビジネスソリューションズ
坪内恒治社長

ドコモビジネスソリューションズは、NTTコム マーケティングを母体としてNTTドコモグループ再編により、法人事業ブランド「ドコモビジネス」を冠して、2022年7月に設立されました。NTTドコモ、NTT コミュニケーションズ、そしてNTTグループ各社の技術とサービス・ソリューションを組み合わせ、地域のお客さまの課題解決や地域協創に貢献していく思いを、事例を交えながら坪内恒治社長に伺いました。

全都道府県への営業拠点と正確かつ丁寧な法人サポート

■設立の背景と会社の概要について教えてください。

ドコモビジネスソリューションズは、中堅・中小企業向けの営業、フリーダイヤルやナビダイヤル等の提案営業支援・バックヤード処理支援、代理店等の販売支援の各業務を主要業務として2012年に設立されたNTTコム マーケティングにNTTドコモグループが加わり、法人事業ブランド「ドコモビジネス」を冠して、2022年7月にNTTコミュニケーションズ (NTT Com) の100%子会社として設立されました。

ミッションステートメントとして、「モバイル・クラウドファーストでの先進ソリューションやパートナーとの協創により、Smart X / B2B2Xビジネスを拡大させ、社会・産業の構造改革の実現」をビジョンに、「社会・産業の構造変革と新たなライフスタイル創出により、「あなたと世界を変えていく。」の実現」をミッションに、「DX活用を支援し、お客様、そして地域の課題解決への貢献」をバリューに掲げ、NTT Comとともに中堅・中小企業や地域社会のデジタルトランスフォーメーション (DX) や課題解決の支援をしています。

ドコモビジネスソリューションズ設立により、5G (第5世代移動通信システム)・IoT (Internet of Things) に代表されるNTTドコモのモバイル商材と、ネットワーク、クラウド、セキュリティなどのNTT Comの各種サービスをワンストップで提供することにより、お客さまの期待におこたえすることになり、事業のケイパビリティを高めています。

■具体的にどのような事業展開をしているのでしょうか。

「コンサルティングから、プランニング、ソリューション、サポートまでワンストップで、お客さまに寄り添うDX支援」「ドコモビジネスの総合力で課題解決」「本社および8支社・44支店網による地域密着」の3つの強みを活かして、主として法人営業と事業サポートの2つの領域で事業展開しています。

法人営業については、本社のソリューション営業部、北海道、東北、東海、北陸、関西、中国、四国、九州の8支社および各都道府県に配置された支店が、NTT Comで中堅・中小企業・地域の営業を担当するソリューション&マーケティング本部、および各支社と連携し、一体となって全国地方自治体や法人顧客へ、モバイルやクラウドを活用したソリューションの提案、パートナー企業のお客さまへの支援などの営業活動を展開しています。これまでのNTTドコモ、NTT Comの顧客層へのクロスセルによる収益拡大に加え、未リーチ層へのアプローチによる顧客拡大を図っています。

事業サポートについては、本社の営業推進部を中心に、法人モバイルサービスの開通、端末キitting、問い合わせ対応、ネットワークや音声系サービスの営業支援、5G・IoTサービスの提案支援、インサイドセールスなど多岐にわたり、すべての顧客とNTT Com法人事業全体のサポート業務を行っています。

お客さまとともに、社会・産業にイノベーションの創出と、地域社会でのウェルビーイングへの実現

■事業を取り巻く環境はどのような状況でしょうか。

私たちの営業展開の対象である中堅・中小企業においては、人

手不足が深刻化しており、それに伴う後継者不足や市場の縮小等により、事業継承も大きな課題となっています。こうした諸課題への対応や地域活性化を視野に入れて、自治体や企業が連携した地域社会のDXに関する取り組みが注目されていますが、DXを行うためのノウハウ不足、有スキル人材の不在、特に利用者側のICT環境の整備が進んでいない等の課題があります。

そこで私たちは、「お客さまとともに、社会・産業にイノベーションの創出と、地域社会でのウェルビーイングへの実現」を掲げ、特に、自治体、医療・病院、地方銀行・信用金庫・金融、文教・学校を軸に業界別ソリューションを展開することで、中堅・中小企業や地域のDXを支援しています。

■どのような取り組み事例があるのでしょうか。

代表的な事例として群馬県長野原町の「Local Government Platform」と聖マリアンナ医科大学病院救命救急センターの「ローカル5Gを活用した地域医療の高度化」があります。

(1) 長野原町の事例⁽¹⁾

長野原町では、ローカルコミュニティにおいて人と人との関係性がかなり希薄化しているため、コミュニティ再構築のために、「つなぐ」「育てる」を町のスローガンに掲げて取り組んでおり、これを推進する中で、地域による情報格差が課題となっていました。

そこで、すべての機能をモバイルファースト・クラウドファーストで提供する、行政と地域事業者向けの運用管理システム「Local Government Platform」を開発し、住民や観光客向けに町の行政情報・観光情報・災害情報を一元化して配信する「長野原町公式アプリ」をリリースしました（図1）。これにより、従来よりも迅速かつ効率的な情報配信が実現され、スマートフォンの無料貸与やスマホ教室などの実施で高齢者のリテラシーが向上しました。2022年度には体重や血圧などの管理サービスで歩いた歩数に応じて地域の独自特典と交換できる「ながのはらまちウォーキングポイント」の付与、2023年度にスマートウォッチと紐付け等、ヘルスケア分野への展開を推進しています。なお、この取り組みは、デジタル田園都市国家構想にも採択されています。

(2) 聖マリアンナ医科大学病院救命救急センターの取り組み⁽²⁾

一次・二次救急では対応できない重篤患者や特殊疾病患者を受け入れ、より高度な救急医療を提供する、三次救急医療機関である聖マリアンナ医科大学病院救命救急センターでは、「音声に頼

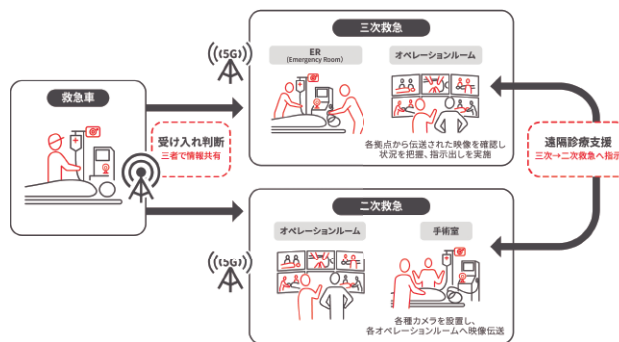


図2 実証実験の概要

た情報のみでは、患者の現状と齟齬が生じることがあり、適切な搬送先・転送先の選定においては不十分である」「複数の専門医を院内に常駐させる体制の維持は、医師の働き方改革との両立が困難であるため、救急医療の質の維持と向上の障害となる」が課題となっています。

これに対応するために、NTT Comとドコモビジネスソリューションズは、学校法人聖マリアンナ医科大学、トランスコスモス、川崎市と共同で、ローカル5Gを活用した救急医療の強化をめざした実証実験を行いました（図2）。ローカル5Gネットワークを構築し、救急車と聖マリアンナ医科大学病院救命救急センター（三次救急）、地域医療機関（二次救急）をつなぎ、救急車内で活動中の救急救命士がウェアラブルカメラを使って音声と映像で患者の映像情報を共有しました。三次救急である聖マリアンナ医科大学病院では、より正確な患者の情報を得ながら、過不足のない効率的な受け入れの準備を開始でき、専門医が不在である二次救急へ搬送された後の診療における専門医への相談や、専門的医療が必要な病態と診断され、救急車を用いて三次救急へ転送する場合にも、三次救急の専門医が救急車で移動中の患者の映像を共有しながら、遠隔支援によって救急車内での急変時対応の質を担保できる可能性を確認することができました。

■今後の展望についてお聞かせください。

地域に根差した営業活動により、ドコモグループの中期計画に掲げている2025年度法人セグメント売上高2兆円以上達成への貢献、およびNTTドコモ、NTT Com、そしてNTTグループ各社の技術とサービス・ソリューションを組み合わせ、お客さまや自治体のDXを支援し、地域社会のウェルビーイングの実現に貢献していきます。

■参考文献

- (1) <https://www.docomobs.com/case/gunmanaganoharamachi/>
- (2) <https://www.docomobs.com/case/marianna-u/>

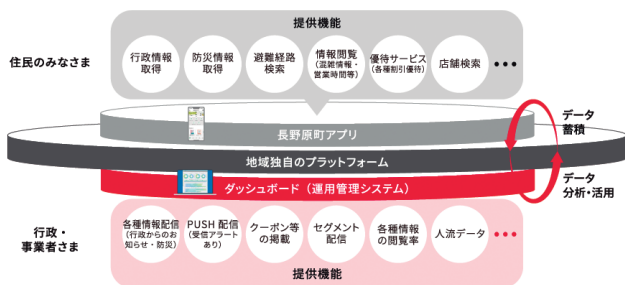


図1 「Local Government Platform」と長野原町アプリを活用した取り組み

Data Driven Salesで新たな価値の提供と 地域社会・経済への貢献

ソリューション営業部
営業戦略部門 担当課長

明時 達也 さん



■担当されている業務について教えてください。

当社のソリューション営業部では、2023年2月、Data Driven Sales 推進チームを立ち上げ、SFA (Sales Force Automation)

などの社内に蓄積したデータを収集・活用し、データを基にインサイトと価値の提供を通じてセールスの高度化を実現する取り組みを開始しました。組織横断のData Driven Salesプロジェクトを開始、ソリューション営業部の全支店・部門からプロジェクトに参画してもらい、メンバー全員で2023年度以降の成長飛躍に向けた基盤作りやデータの蓄積、To Beの構想を策定しました。私はそのプロジェクトリーダーとして、策定したもののアウトライン構築から、戦略、業務への反映、システムの設計を行いました。

システムの構築にはNTT Comのデジタル改革推進部にも協力していただき一緒に取り組み、並行して、分析に必要な営業現場でのデータ入力の定着化を推進しています。現場と一体となった取り組みを行うため、「Data Driven Sales 推進チームと支店の推進リーダーを介した意見集約」、営業活動データの量と質の向上のため、「モニタリング状況の共有」により、データ入力の定着化を実現しました。

私が所属するData Driven Sales推進チームでは、入力・収集したデータを基に、可視化・分析に取り組みました。SFAでのパイプライン (PPL) マネジメントを行うダッシュボードに加え、BI (Business Intelligence) ツールを活用して、受注・PPLデータがさまざまなセグメントで分析できるダッシュボードを展開しました。マネジメント層やセールス担当によるタイムリーなKPI・モニタリング指標の確認など、これらのデータを基にさまざまな切り口でデータを分析し営業戦略の策定に活用しています。

■今後の展望について教えてください。

データドリブなアプローチを通じて、受注データから今後の収益予測、分析結果に基づく営業活動への示唆、業界に合わせた

ソリューションの展開などセールスの高度化を推進していきます。

当社の生産性のさらなる向上を進めながら、顧客へ新たな価値の提供を行い、企業の成長を支援していきたいと考えています。収集したデータを分析し、効果的に社内展開することで、「地域・社会全体にICT・DXを提供し続ける」、「ICT・DXによる地域社会・経済へ貢献し寄り添い続けること」、その発展につながる重要な一翼を担ってまいります。

内製開発ツール「RPAka」でキッティング業務の大幅稼働削減を実現

営業推進部

ソリューションサポート部門
プレミアムサービスセンター

池田 智之 さん



■担当されている業務について教えてください。

プレミアムサービスセンターは、法人のお客さまが利用するスマートフォン端末・タブレット端末等の紛失対応や故障対応、問い合わせ業務などの運用管理業務を、一元窓口で代行する「モバイル管理サービス (モバ管)」を提供しています。私はその中で、お客さまから受領した故障端末をメーカーへ発送し、修理完了後の故障端末に「キッティング」を行いお客さまにお返りする業務を担当しています。

中でも、端末に各種設定やアプリのインストールなどを行いお客さまがすぐに利用できる状態にする「キッティング」業務については、1台当たり約45分かけて月間で約4000台対応する等、多くの稼働を要していました。数10桁に及び英数字を入力していたので、誤入力やチェックミスも起こりやすく、発送の遅れや修理遅延につながることもあり、課題解決に向けたDXを推進するためのプロジェクトが立ち上がりました。

当初はQRコードリーダーやRPA (Robotic Process Automation) ツール等、市販の製品を試してみましたが、モバ管業務の要望をカバーできるツールが見当たらなかったため、スキル保有者を中心とした開発チームを編成し、内製にてツールを開発・運用することに方向転換しました。キッティング業務における設定・インストール工程の自動化ツールを開発し、特に多くの稼働を要して

いたキッティング業務については、「RPAka (RPA kitting assistant : アルパカ)」というツールを実業務の中でチューニングし、キッティング作業が約10分で行えるようになり、年間約42500時間の稼働削減が実現されました。さらに、ツールに起因するオペレーションミスもなくなり、お客さまへのサービス向上につながっています。

を行う他の大規模センターにも導入もされました。このような事例を積み重ねる中で、将来的にはRPAkaのパッケージ化も検討し、モバイル管理サービスの新収益モデルとなるツールとして育てていきたいと考えています。現在、特許も出願中であり、今後に向けて、内製化を充実させ、業務のさらなる自動化を行い、生産性向上や業務効率化に貢献していきたいと思っています。

■今後の展望について教えてください。

RPAkaが社内で周知されてきたことにより、端末キッティング

ドコモビジネスソリューションズ ア・ラ・カ・ル・ト

■第32回地球環境大賞 奨励賞受賞

「離島発×全国初、「持続可能な」スマート棚田農法の実証」の取り組みが、第32回地球環境大賞 奨励賞を受賞したそうです（2024年4月4日授賞式）。地球環境大賞は、地球温暖化の防止、循環型社会の実現に寄与する新技術・新製品の開発、環境保全活動・事業の促進、持続可能な社会システムの探求、地球環境に対する保全意識の一段の向上を目的に、1992年（平成4年）「産業の発展と地球環境との共生」をめざして創設されました。

この取り組みは、生産者、自治体、教育機関、研究機関、パートナー企業などと協創して推進しており、「ドローン空撮による測量」「高度水管理システム」「水田除草ロボット」の3つのICTソリューションからなる「スマート棚田農法」により、減農薬栽培、無農薬・無化学肥料栽培の推進に向けたコスト低減、労力軽減、収益向上などを検証しているものです。

新潟支店では対応しましたが、農業経験者はおらず自分たちなりに必死で勉強するものの、分からないことは、気負わず素直に質問し指南いただき、生産者の「声」に積極的に耳を傾けました。そうしているうちに信頼関係が築け、40人という大所帯でも良好なチームワークが構築され推進力を高められたように思うとのことです。

「受賞は農業の知見を高めていただいた生産者をはじめ、自治体やパートナー企業、専門家の方々のおかげです。目的達成に向けて、皆で試行錯誤することが非常に多かったため、プロジェクトメンバーにもうれしい報告ができました。実証は続いているので、受賞を糧にさらなる成果を出せるよう邁進していきたいと思っています」との受賞の弁をいただきました。



写真 授賞式の様子

NTTアーバンソリューションズが推進する「街づくり×デジタル」の取り組み

NTTアーバンソリューションズ発足から5年、街づくりにデジタルの支えを付加して価値を高めていく「街づくり×デジタル」の取り組みを進めてきました。ここでは「街づくり×デジタル」を実装した第1号物件であるアーバンネット名古屋ネクスタビルでの取り組みや、NTTグループと連携した将来の街づくりに向けた実証について紹介するとともに、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) も活用した今後の日比谷や品川に向けた取り組みについて述べます。

はじめに

NTTアーバンソリューションズ (NTT-US) は、「街づくりに関するNTTグループの窓口」であり、「あなたと、まちと、みらいをつなぐ。」をグループスローガンに掲げ、全国で街づくり事業に取り組んでいます。

私たちは、NTT-USの設立当初から不動産にICTを取り入れる取り組みをスタートしました。その後、いくつかの案件を経て「街づくり×デジタル」として①～③をコンセプト設定し取り組んできました。

- ① ひと中心：どんな人にどんな価値を提供するかデザインして実装する
- ② 成長し続ける街区：竣工後も運営・デジタルを通じて成長し続ける
- ③ 「その街ならではの」をデジタルがナチュラルに支える：デジタルは主役ではなく街の支え

NTT-USは、街に集う人、働く人、住まう人に、常に新たな価値を提供すること、生き生きワクワクと暮らす体験の提供をめざしており、ここではNTT-USグループならではの「街づくり×デジタル」の取り組みについて紹介します。

NTT-USがめざす「街づくり×デジタル」の実現に向けて

不動産・街区の開発は企画～竣工・開業まで10～20年と非常に長いスパンにわたる営みです。NTT-US設立当初、「不動産開発」に「ICT」をいかに活用するかを手探りで進めてきましたが、アーバンネット名古屋ネクスタビルや内幸町一丁目街区 (日比谷) など実案件に取り組む中で、人や街の営みを含めた「街づくり」の世界を「デジタル」がナチュラルに支える「街づくり×デジタル」を提唱し、さらにその羅針盤となる「めざす将来」を設定しました。その内容をまとめたものが「Future City Forecast」[日比谷・品川におけるUX (User eXperience)]「わがまちみらい」になります⁽¹⁾ (図1)。

「Future City Forecast」は、NTT-US設立以降にグループ各社から集まった各分野で経験を持つ社員、NTT都市開発やNTTファシリティーズの不動産事業を牽引する若手社員が、クリエイ

ターやSF作家等とともに、2035年 (Vol.1)、2040年 (Vol.2) の理想の未来の「街づくり」を、NTT研究所の研究員へのインタビューを踏まえて、具体の街づくり案件も想定しながらまとめました。ここでは「コミュニティ」「イノベーション」「ダイバーシティ」「レジリエンス」という4つの価値と「グリーン」「モビリティ」「ナチュラル」という3つの領域における変革から見える未来を提起しており、これらをまとめて「Future City Forecast Vol. 1, 2」として冊子化し、「わがまちみらい」のWebサイトでもPDF公開しています。

日比谷では開発を推進する10事業者で、他の街区にはない「比類なき街」をコンセプトに設定し、それを支えていく5つのUXの実現をめざしています。また、同様に品川港南エリアを大きく活かすための8つのUXを設定しています。「日比谷・品川におけるUX」は、将来必要となる技術やサービスを具体化し、NTT研究所やNTTグループ各社との実証につなげています。

「わがまちみらい」は、鉄腕アトムをキャラクターに、「Future City Forecast Vol. 1, 2」や「日比谷・品川におけるUX」をまとめて、めざす未来の姿とその取り組みをWebで公開しているものです。

この「めざす将来」の実現に向けて、私たちは、かつて電電公社・NTTの本社等があり、NTTグループを象徴する日比谷・品



図1 わがまちみらい

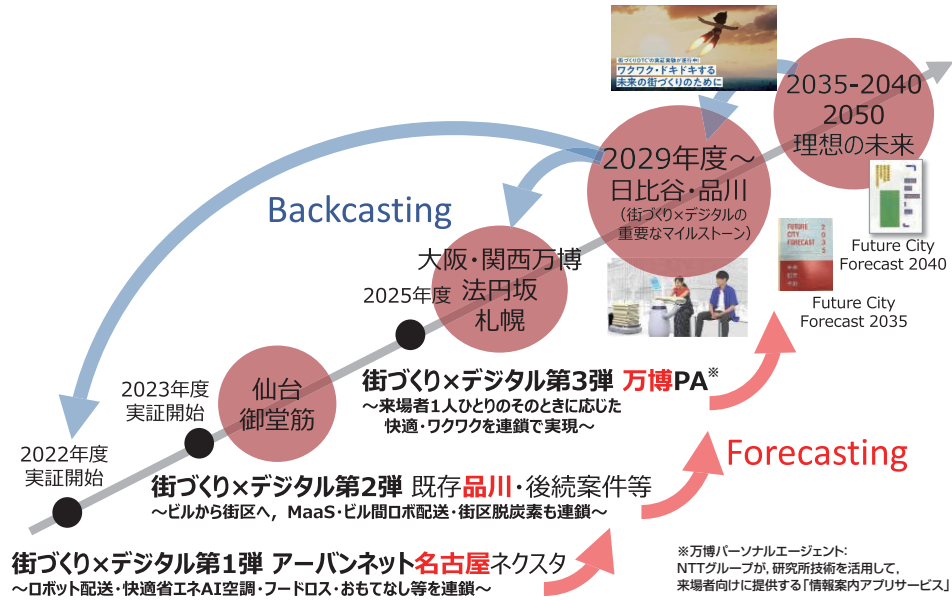


図2 「街づくり×デジタル」ロードマップ



撮影/フォワードストローク

図3 アーバンネット名古屋ネクスタを含む東桜街区の概観

川を重要なマイルストーンと位置付けました。そして、2035、2040年の「めざす将来」を今にバックキャストし、NTT-USの次世代型オフィスビル第1号物件であるアーバンネット名古屋ネクスタビルの開発に取り組みました。この開発では「めざす将来」からのバックキャストを常に意識しつつ、現在の技術で実現できる価値提供と、その世界を実現するには不足する技術・経験・価値の獲得への実証を盛り込んでいます。その後も、2024年3月に開業したアーバンネット仙台中央ビル、続いて6月に開業するアー

バンネット御堂筋ビル、さらには2025年の大阪・関西万博等に対しても、それまでの成果と新たなチャレンジを次々にフォアキャスト（展開）することで、実益に通じるデジタルを創出していきます（図2）。

次に、具体的な街づくり案件におけるフォアキャストの取り組み、バックキャストでチャレンジしている取り組みを紹介します。

「街づくり×デジタル」のこれまでの取り組み ——アーバンネット名古屋ネクスタビル

アーバンネット名古屋ネクスタビル（名古屋市中区東桜）では「時間と空間からの解放（ABW）」をコンセプトの1つとして、街区開発を進めてきました。このコンセプトをナチュラルにデジタルが支えられるように、「ひと中心」をモットーに、テナントをはじめとする利用者の皆様とともに「成長し続ける街区」の実現をめざし、NTTグループの次世代型オフィスビル第1号物件として取り組んできました（図3）。

「ひと中心」の世界を提供するには、利用者にどのような価値を提供するのかを日々の生活・カスタマージャーニーにまとめて検討を進めました。これを空間（建物）・デジタル（ICT）・運営がどう実現するかをジャーニーとして描きデザインするという方法です。

また、「時間と空間からの解放」では、朝の混雑時でもエレベーターでストレスなくタッチレスでオフィスフロアまで行けて、日中時間帯は仕事の内容や気分に応じてラウンジや屋上テラスで働ける、夕方は帰りに夕食を買って帰ろうというときにお店からクーポンが届いてお得に買い物して帰る、といったジャーニーを空間・デジタル・運営で実現していく、といった具合です。

実際に竣工、開業した際には、ビジョンに共感いただいたテナ

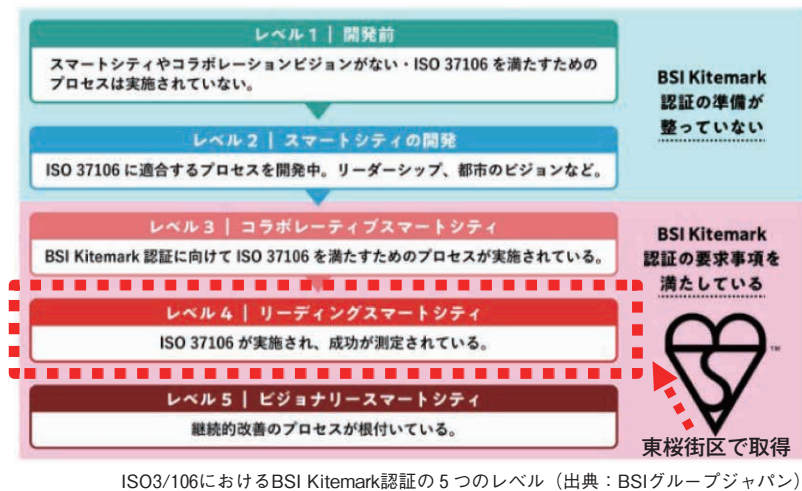


図4 アーバンネット名古屋ネクスタビル(東桜街区)で取得したスマートシティISO(ISO37106)の認証の5つのレベル

ント様にご入居いただき、おかげさまでほぼ満床と好調に滑り出しました。さまざまな種類のセンサを多数設置し、人流把握、混雑予測等実施しています。一方で一部正確に計測できないセンサが見つかり、代替手段を講じたり、顧客接点の1つであるアプリ「tocoto」も当初はなかなか認知、利用が進まなかったりと課題が発生し、街区の運営を担当するNTTアーバンバリューサポートとともにイベントの企画や機能追加などの対応策を実行し利便性の向上を図りました。

その結果、アプリの利用数では1年で3倍程度増加、満足度も9割を超える等の改善につながりました。それらは、あとに続くアーバンネット仙台中央ビル・アーバンネット御堂筋ビル等の物件においてノウハウとして展開し、今後のプロジェクトにも標準化したうえで、知見・武器としてフォアキャストしていきます。

「成長し続ける街区」の実現については、竣工後もデジタルと運営が当初企図したビジョンの実現に貢献できているかをしっかり把握、改善し続けることが重要だと考えて取り組みました。ここでは、国際標準として規定しているスマートシティISO(ISO37106)の取得にもNTT持株会社・NTTデータ経営研究所とともにトライし、私たちが取り組んでいる内容に抜けや漏れがないか、改善できないかを確認しました。

その結果、日本初、世界2例目となるスマートシティISO(Level4)の取得ができました²⁾。私たちはそのフレームをしっかり活用することにより、「成長し続ける街区」を実現するためのノウハウの標準化に取り組んでいます。実際に利用いただいて価値を実感いただくこと、実際にどう感じるかのフィードバックを獲得し、運営の改善や新たな価値創出につなげていくことは、当たり前のようになかなか難しいことだと実感していますが、「街づくり×デジタル」によって、価値を創出し続ける運営のプロセスは非常に重要で、それを標準化、展開して、NTT-USグループの武器にしていくこと、これも将来にフォアキャストしていくべきものと考えています(図4)。

NTTグループと連携した将来の街づくりに向けた実証の取り組み

NTT-USでは、前述の「めざす将来」で描いた2035、2040年の未来像を今にバックキャストすることによって、現時点で実証すべきサービスや技術を見極め、NTT研究所を含めたNTTグループ各社と連携した実証に取り組んでいます。各実証においては、NTT-USグループが保有するアセット(不動産等)を実証の場とし、NTT研究所のIOWN(Innovative Optical and Wireless Network)技術を活用した「街づくりDTC[®]」や、NTTグループ各社が有するサービス・プロダクトを活用して推進しています。ビルや街区の空間に、いかにデジタルを掛け合わせてナチュラルに「ひと中心」の価値を創出できるかについて、NTT-USと実証企画各社で議論を重ね、企画、実施、評価のサイクルを回しています。

これらの実証は、現在、品川シーズンテラスをはじめNTTグループの不動産アセットが集積する品川港南エリアを中心に実施しています。本実証の取り組みによって「街づくり×デジタル」が認知され、ここが情報発信の拠点となるよう、引き続きグループと連携して「めざす将来」への取り組みを推進していきたいと考えています。

以下に最近の実証の取り組み事例を3点紹介します。

(1) 屋内環境予測AIを用いた空調制御

一般的なオフィスビルにおいてはエネルギー消費の約5割を空調が占めています。NTTグループが掲げる2040年のカーボンニュートラルを実現するうえで、空調の省エネ化が非常に重要です。そこでNTT-USグループでは、NTT研究所、NTTコミュニケーションズとともに、アーバンネット名古屋ネクスタビルの共用部空調を対象に、「街づくりDTC[®]」技術による人流予測に基づく快適性を担保した空調の自動制御実証を実施しました。その結果、エネルギー消費の約3割削減を達成しました。AIを用いた空調制御は、NTTコミュニケーションズおよびNTTデータによって商用サービス化され、現在、NTT-USグループが所有する複数のビルへの



図5 ロボット最適制御技術を用いた、複数メーカー・複数台のロボット配送実証



《セミクジラの出現》



《水と光の共創》

図6 XRを活用した新たな体験創出（品川イルミネーション2023 with XR City）

導入を進めています。また、共用部だけでなく専有部の空調制御についても検討を進め、ビル全体の空調制御にも取り組んでいます。

(2) オフィスビルにおけるロボット活用

近年の減少する労働人口へ対応したビルや街区マネジメントが求められる中、NTT-USグループでは、警備、清掃、配送といったビル内業務へのロボット活用について、実証や商用導入を積極的に推進しています。こうしたロボット活用の流れは今後一層高まると想定しており、ビルや街区で、複数用途のロボットが自由に移動し、活動できる環境を実現していくことが必要であると考えています。そこでNTT-USでは、NTT研究所、NTTコミュニケーションズ、NTTドコモとともに、ロボットのより効率的かつ安全な運用制御についての実証を進めています。2023年度は、NTT研究所が研究開発を進めるロボット最適制御技術（「街づくりDTC[®]」技術の1つ）やマルチ無線プロアクティブ制御技術（Cradio[®]）を、NTTコミュニケーションズが提供するSmart Data Platform for City/マルチロボット最適化ソリューションに適用することで、異なるロボットプラットフォームを統合的に

管理し、複数・異種の配送ロボットに対して、到着時間の正確性向上、配送時間の短縮、安定した無線通信環境内でのロボット走行経路制御の実現を検証しました⁽³⁾（図5）。

(3) 街区におけるXRを活用した回遊性向上・賑わい創出

「街づくり」においては、街区内の回遊性を向上し、エリア内の魅力の再発見や賑わいの創出によりエリアの価値を高めるための取り組みも重要となってきます。そこでNTT-USでは、NTTコミュニケーションズ、NTTコムウェア、NTTコノキューとともに、XR（eXtended Reality）を活用した新たな体験創出および飲食可能なポイントを組み合わせた回遊性向上に向けた取り組みを、2023年12月に品川港南エリアで開催されたイベント（品川イルミネーション2023 with XR City）⁽⁴⁾にて実施しました。同エリアの魅力となる高浜運河の水辺空間や品川シーズンテラスをはじめとした緑地などのスポットを中心に、品川港南エリアにゆかりのあるXRコンテンツを配置するとともに（全6カ所）、夜はイルミネーションとXRがコラボした体験型のXRコンテンツをお楽しみいただきました。さらに、各スポットに隠されたコンテンツを見つけるとポイントが付与され、品川シーズンテラス内の一部飲食店舗にて利用可能とすることで、ポイントのインセンティブ効果を含めて、XRを活用した回遊性向上の効果を確認しました（図6）。

おわりに

NTT-US発足から5年間はチャレンジの連続でした。アーバンネット名古屋ネクスタビルに始まった「街づくり×デジタル」の取り組みを通じて、①街にいかにかデジタルをナチュラルに組み入れていくのか、②未来に向けていかにかグループの総力を結集した取り組みができるのか、③街に組み入れたデジタルをいかにかにしっかり利用して利用者の利便や街区を支える方々の力となるかができるようになるか、などをめざし、IOWNでつくられていく世界の技術も活用しつつ、追求してきたところです。

品川港南エリアにおける「街づくり×デジタル」の実証のチャレンジにも、引き続きNTT研究所やグループ各社と連携して取り組んでいくとともに、その過程で得られた技術、サービス、プロダクト、知見を活用し、自社だけでなくNTTグループを通じて各社の事業にも貢献することによって、NTTの価値創出を拡大していきたいと考えています。

■参考文献

- (1) <https://www.ntt-us.com/waga-machi-mirai/>
- (2) <https://www.ntt-us.com/news/2023/06/news-230626-01.html>
- (3) https://www.ntt-us.com/news/pdf/news_us240326_001.pdf
- (4) <https://www.ntt-us.com/news/2023/11/news-231128-01.html>

◆問い合わせ先

NTTアーバンソリューションズ
デジタルイノベーション推進部
E-mail info-digital@ntt-us.com