

NTT 技術ジャーナル

ISSN 0915-2318 平成2年3月5日第三種郵便物認可
令和3年8月1日発行 毎月1回1日発行 第33巻第8号(通巻389号)

8 AUGUST
2021
Vol.33 No.8

特集

IOWN

——APNで実現するネットワークサービス技術

NTT Technology Report for Smart World

トップインタビュー

立元 慎也

NTT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・インサイトマーケティング

from NTTコミュニケーションズ

教育現場のDX推進に寄り添う「まなびポケット」「虎の巻」を産んだデザインの力

特別連載

ムーンショット・エフェクト

——NTT研究所の技術レガシー



NTT 技術ジャーナル

8 AUGUST
2021
Vol. 33 No. 8

CONTENTS

4 トップインタビュー

技術目線, 社会目線,
そしてひらめきを鍛えよう
立元 慎也

NTT情報ネットワーク総合研究所 所長



8 特集

IOWN——APNで実現する ネットワークサービス技術

- 10 APNで実現するネットワークサービス技術
- 15 高臨場コミュニケーションサービスを支える「オンデマンド光多地点接続技術」
- 19 エクストリームNaaSに向けた無線技術
——マルチ無線プロアクティブ制御技術Cradio®
- 24 エクストリームNaaSに向けた無線技術
——アナログRoFを用いた高周波数帯無線システムにおける
遠隔ビームフォーミング技術
- 29 ミッションクリティカルなサービス提供を可能とする協調型インフラ基盤

特集

NTT Technology Report for Smart World

- 38 「NTT Technology Report for Smart World 2021」の公開について
- 34 特別連載 ムーンショット・エフェクト
——NTT研究所の技術レガシー
第12回 超高臨場感通信Kirari!

65 **from ★NTT DOCOMO**
テクニカル・ジャーナル
クラウドコスト最適化の取組み

73 **挑戦する研究者たち**

William J. Munro
NTT物性科学基礎研究所
上席特別研究員



研究で最先端を走り続ける
失敗を恐れることなくオープンな気持ちで研究活動を

78 **明日のトップランナー**

井上 武
NTT未来ねっと研究所 特別研究員
少し未来の情報通信ネットワーク像を提示。
大規模計算基盤のための光パス設計技術の研究



82 **グループ企業探訪**

株式会社ドコモ・インサイトマーケティング
リサーチとプロモーションを
相互連携させた高度なソリューションで
企業のマーケティング活動を支援する



86 **from NTTコミュニケーションズ**
教育現場のDX推進に寄り添う「まなびポケット」
“虎の巻”を産んだデザインの力

Webサイト オリジナル記事の紹介 90

9月号予定

編集後記

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



本誌掲載内容についての
ご意見、ご要望、お問い合わせ先

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

本誌ご購入のお申し込み、
お問い合わせ先

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

企画編集

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

発行

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

©日本電信電話株式会社2021

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます●

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

View from the Top



NTT情報ネットワーク総合研究所
所長

立元 慎也

PROFILE :

1990年日本電信電話株式会社交換システム研究所入社。2000年NTT持株会社第二部門担当課長、2003年NTTネットワークサービスシステム研究所主幹研究員、2009年NTTドコモネットワーク開発部担当部長、2014年NTTネットワークサービスシステム研究所プロジェクトマネージャ、2018年NTTネットワークサービスシステム研究所所長を経て、2020年7月より現職。

技術目線、

社会目線、

そしてひらめきを鍛えよ

あらゆるモノに「寄り添い」「しなやか」な情報ネットワーク社会基盤の実現をめざすNTT情報ネットワーク総合研究所。来るべき新しい社会を自らの手で切り拓く責任を自覚し、社会実装される技術を創出する誇りと喜び、研究開発者としての大きな夢を持ちながら、日々の業務に取り組んでいます。立元慎也所長に研究者のトップに求められる力、研究開発における備えておくべき力について伺いました。

研究と開発の 連続性

NTT情報ネットワーク総合研究所について
教えていただけますでしょうか。

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」情報ネットワーク社会基盤の発展に貢献するため、「Simple」「Smart」「Sustainable」なネットワークを実現する技術の研究開発を推進しています。

さらに、未来のコミュニケーション基盤であるIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想の実現に向け、トランスポートネット

ワークのオールフォトリクス化を進めてポテンシャルを最大化すると同時に、迅速なサービス提供とバリューチェーン最適化を図る「コグニティブ・ファウンデーション」による柔軟なネットワークの研究開発、および環境負荷ゼロに資する革新的な環境エネルギー技術の研究開発という新たな取り組みに注力しています。

NW総研では3つの研究所にてこうした研究開発に取り組んでいます。1つは、将来の情報ネットワーク基盤、およびその上で提供されるネットワークサービスの研究開発を行うネットワークサービスシステム研究所、2番目は、光と無線の連携によってエリアをカバーするアクセスネットワーク、

およびその上で提供されるアクセスサービスの研究開発を行うアクセスサービスシステム研究所、3番目は、環境負荷ゼロに向けた次世代エネルギー技術、サステナブル技術、および地球規模の危機に対する環境適応技術やレジリエントな社会の実現をめざした研究開発を行う宇宙環境エネルギー研究所です。この3つの研究所におよそ500人の研究者が在籍し、日本の情報通信技術の研究開発の中核として、エネルギーを含む要素技術の研究をはじめ、ネットワーク全体のアーキテクチャからオペレーションにいたる、幅広い研究成果によって世の中に貢献していきたいと考えています。

さて、NW総研のある武蔵野地区は、

通信省の電気通信研究所に端を発して、電電公社、そしてNTTへと、日本における通信ネットワークの研究開発拠点として脈々とつながっています。当初は電話を中心とした研究開発で、研究成果によりネットワークを構築し、ネットワーク内の装置やシステムの多くは研究所にて考案された仕様により構成されていました。ネットワークが電話からインターネットの時代を迎え、ネットワークを構成する装置やシステムも世の中の汎用製品やオープンプラットフォーム等が使われるようになり、それを利用したさまざまなネットワーク機能やサービス、オペレーションへと研究開発を拡大してきました。今後IOWNに向けては電気から光へと通信や情報処理の主軸が変化していきます。これを機に、再び私たちの研究成果をネットワークやシステムに活かし、今度はそれを世界にも展開していきたいと考えています。まさに、電気通信の研究開発発祥から現在、そして未来に向けて、過去の成果やノウハウを継承しつつ、研究開発や世の中への貢献のスタイルを時代に柔

軟に適応させながら新しい技術にチャレンジしてきています。

時代の変化を踏まえて、研究活動における重要なポイントを教えていただけますでしょうか。

私は研究開発には次の3つの形態、アプローチがあると考えています。

1番目はまさに研究者として技術目線で技術そのものを極めていく手法です。昨日の技術よりも今日の技術は、例えば、性能が10%上がったとかコストが下がるといった着実に技術を積み上げていくという技術評価による研究開発です。

2番目は社会目線の研究開発です。将来、社会をこう変化させたい、なってほしい、もしくは社会のこんな課題を解決したい・貢献したいという思いを基に自分の研究開発のテーマを設定するという目線で研究開発を進めるものです。

3番目は、ひらめきです。ある日、ふと思いついたことが世の中に非常に大きな役に立つ、もしくは全く異なる分野のAという仕組みとBという仕組みをなぜか組み合わせたら全く新しいCという仕組みが出来上がったというひらめき型です。

技術目線と社会目線は、ある程度は学習的な方法で養えると考えています。例えば、技術目線については大学時代から続けてきている研究開発のスタイルだと思いますから、論文を読んで、もしくは、自らの実験結果から明示された欠点や課題を改良する手段を繰り返し検討して次の新しい技術を生み出していきます。社会目線は日ごろの生活や世の中の情報から自分の技術の活かし方を検討することです。全く違う分野の課題であっても、自分の技術はここで

使えるのではないかといった発想につながることがあります。ただ、3番目のひらめきについては、ふとしたきっかけによることが多く、学習によって確実に身に付けていくようなものでもないと思います。ひらめきに備えて知識の引き出しを増やすとともに、常に「もしも～だったら」の問いかけを自らし続けることでしょうか。

これまでのネットワークやそれを構成するシステムは、特定のサービスに向けて一度構築すると長期にわたっての運用が前提となることから、研究成果をタイムリーに導入することが難しいケースも多くありました。しかし、これから世の中の変化はますます速く激しくなっていくので、研究の初期段階からそれをどう使っていくかといったビジョンをもって研究を進め、開発につなげていくことが重要だと考えています。まさにIOWN構想がそれにあたるもので、オールフォトニクス・ネットワークをはじめとするビジョンの実現に向けて、さまざまな研究を連携させて、ネットワークの開発につなげていくことが重要になっています。また、これからはネットワークも仮想化をベースとしたシステムに変わっていきます。その柔軟性を活かし、研究成果を部分的・一時的に組み込んで、運用しながらタイムリーに磨き上げていくといったこれまでは難しかった導入方法も可能になると考えます。

しっかり議論して、ステークホルダーが納得する判断、決断を下す

開発者としてのご経験を踏まえて、研究者のマネジメントについてお聞かせください。

私は開発畑を結構長く歩いてきました。大学では機械工学を専攻し、ロボットの研究開発をしてきましたが、NTT入社後は電話やシステム開発を中心に1990年代にはATM (Asynchronous Transfer Mode)、2000年代にNGN (Next Generation Network) の開発を担当してきました。

開発者だったころ、自分が研究開発した成果が世に出て皆様に使っていたただけのことに、大きな喜びとやりがい



を感じました。また、研究所長として社会貢献の意識・姿勢は変わらないまま、私たちの技術の活かし方を多くの研究者とともに考え、今までよりは広い視野に立って、将来を描きながら検討できることはありがたいと感じています。

研究者の皆さんと議論できるのは本当に楽しいことです。特に、私たちの研究開発を良い方向へ導いていくプロセスをドライブできることには大いにやりがいを感じます。もちろん、それに伴う責任はあるので、自分が言ったことが本当に正しいのかと自問自答することもある。情報や反応、議論等を通して必要であれば自分の方向性を変えることもあります。こうした方向性を定めるプロセスすべてが私の仕事だと考えています。

私はこうした決断・判断をするポイントは3つあると考えています。1つは情報の正確性です。次は議論が十分にできたか、特定の意見だけではなく、さまざまな視点による見解を踏まえて議論ができたか。そして最後はそれが実際に実現し、成果につながる見通し

があるかどうか。中には即座に白黒つけてくれといわれることもありますが、常にこれらを踏まえて判断、決断をしています。研究開発を取り巻く環境は刻々と変化しているので、その時々状況に合った最適解についてしっかり議論して、ステークホルダーが納得した判断、決断を下すことを心掛けています。

忙しい中でも議論の場を頻繁に設けられているのですね。

議論といっても、大きな会議の場ばかりでなく、案件ごとに個別のかたちでの議論もしています。ニュアンスを理解して、視点を変えた検討を促すことはよくあります。先ほどお話ししたひらめき型のような議論もしています。全く予想もしてないところから、こんなことも考えられるんじゃないかと話したことが発展につながることもありますし、逆に首を傾げられることもあります。こうした日常を顧みると、研究者としては、思いつきであっても互いの意見やアイデアを言ってみて議論すること、その意見を受けて異なる視点で考えてみるのが大事であると感じます。

新型コロナウイルスの感染拡大防止でリモートワークが中心となり、なかなか対面でのディスカッションの機会が持てない状況の中、多くはWeb会議等での議論となっていますが、ひらめきの会話はPCを通して聞こえてくると目の前で行われるのでは異なる伝わり方をします。ましてや目の前でお互いの目を見つつホワイトボード等を使って絵を描きながら、「じゃあこれはどうなんだ」等と議論するのは、だいぶ伝わり方、共鳴の仕方が変わります。見方を変えれば、これも1つの検討課題で

す。実感としての伝わり方の違いやフラストレーションの解消法など、リモート社会での円滑なコミュニケーション促進はこれからの大きなテーマです。

その技術が実現する 世の中を語る

納得したうえでの判断、決断を下す、つまり、研究成果だけでなく、情熱も大切にしているのですね。

しっかり議論し、判断、決断する中で、一番辛いのは自らの判断の結果として悲しい結論を研究者に伝えることです。例えば、これまで進めてきた研究やテーマを環境の変化などによって中断せざるを得なくなった場合などです。物事の大小はあっても、それを担当してきた人はこれまで一生懸命に取り組んできたテーマだからです。ただ、特定の研究テーマに一生懸命に取り組んできたからこそ、そこから伸びる枝葉は必ずあります。手掛けてきた技術や検討してきた材料は新しい分野でも何らかのかたちで生きてくるので、ぜひそこへつなげてほしいと激励しています。

基本的に、個性が強く、さまざまな意思・意義を持つ研究者を上から強制的に押し付けるとか、特定の方向を無理に向かせるとか、そういうことは絶対にしたくないです。むしろ、さまざまな方向を向いて、それぞれに尖っていくというか、これからの時代はそれが大事だと思いますし、それなりに将来に向けたルールは敷きますが、そのルールから外れることがダメではないのです。外れたほうが将来的にそれが正しい方向になるかもしれないからです。だからこそ、それぞれをしっかり伸ばして、温めていきたいですし、研究者の皆さんには今すべきことはしっかりやりつつ、そこから将来に向けた枝葉を大切にしていきたいと思っています。

社内外の研究者・技術者の皆さんにメッセージをお願いいたします。

自分のスタイルを大切にしつつも、世の中の変化やその時々環境に合わせて、さまざまなスタイルや情報を取り入れて自分の研究の先に次々と枝葉





をつけていくことで、研究の幅を広げていただきたいと思います。それが将来的には自分の人生の幅をも広げることにつながると思います。

私はインターネットにあふれているニュースに対するさまざまなコメントに学ぶことがあります。かつてはマスメディアによって整理された模範解答

以外にはあまり触れる機会がありませんでしたが、今は良くも悪くも多くの人がネット上で自由に発言することができるようになり、模範的な共通解に収まることは少なくなりました。膨大かつ多方面に好き勝手に向いているコメントからどこに自分が位置しているかを理解することが、先行き不透明な

世の中では重要ではないかと思いますが、真偽が定かではない情報が発散したり、混在したりする中で、精査や見極めをすることは非常に難しいと思いますが、ここから学ぶことはたくさんあります。私たちが情報通信キャリア・プロバイダとして解決すべき課題もみえてくるのではないのでしょうか。

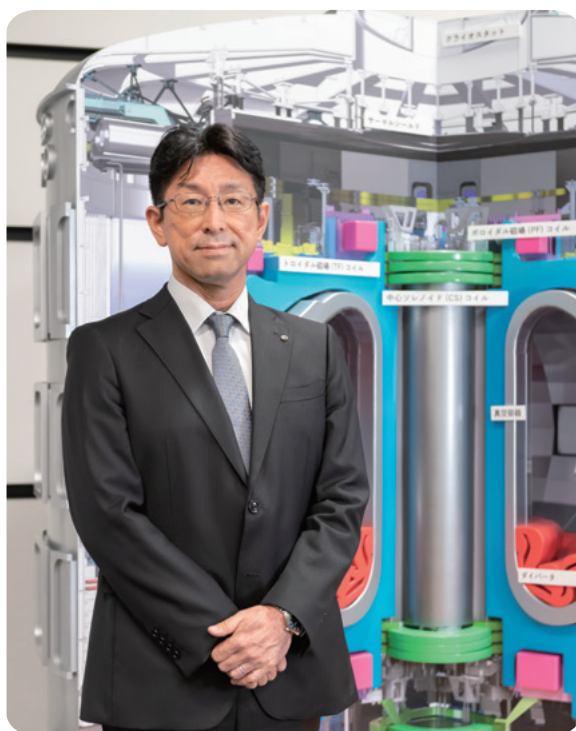
さらに、自分の成果が技術的に優れていることは研究者として世界に認められる大きな条件の1つですが、自分の手掛けている技術のすばらしさを学会や論文でアピールしていくという研究者の基本スタイルに加え、常に社会への貢献についても意識していきたいと思います。専門家には技術で認められつつ、一般の人にはその技術が実現する世の中を語るのです。「私の技術は将来こんな世の中をつくれるんですよ」と。

(インタビュー：外川智恵/撮影：大野真也)

※インタビューは距離を取りながら、アクリル板越しに行いました。

インタビューを終えて

緑豊かな武蔵野の地に立つ研究所の長として、連日、ミーティングに参加して議論を交わす日々を過ごされているという立元所長。息抜きといえばお茶を飲む程度で、ご趣味のドライブにも昨今の状況から出かけられていないとおっしゃいます。しかし、その面持ちはとても穏やかです。聞けば立元所長の座右の銘はメリハリと柔軟性で、学生時代からのご趣味のバンド活動からの教訓だということです。「音楽も抑揚で生きてくるように、OFFモードのときにしっかり充電してタメをつくり、ONモードへの切り替えで一気に集中して盛り上げるのです。また、この先のことは誰も分らないからこそ、環境の変化に柔軟に対応しつつも流されることなく自らの道を見極める力が大事なのではないのでしょうか」とまたニッコリ。残念ながらバンド活動のお写真は拝見できませんでしたが、紡がれた言葉や笑顔にギターを情熱的に弾き、全力で開発に臨まれる若かりし頃のお姿を想像したひと時でした。



IOWN —— APNで実現する ネットワークサービス技術

IOWN(Innovative Optical and Wireless Network)の実現のためには、

従来のインターネットと比較にならない大量のデータを効率良く処理できる高度なネットワークが求められる。

NTTでは、この要求にこたえるために、光電融合技術を最大限活用した

画期的なオールフォトンクス・ネットワーク(APN: All Photonics Network)の研究開発を行っている。

本特集では、この新たなAPNの全体概要、およびその上で実現するネットワークサービス技術について紹介する。

I O W N

光 オンデマンド

無 線 通 信

ア ナ ログ RoF

協調型インフラ基盤

All Photonics Network

APNで実現するネットワークサービス技術

10

APNでさまざまなサービスを実現するための機能別専用ネットワーク（FDN: Function Dedicated Network）技術とその上で実現するネットワークサービス技術について紹介する。

高臨場コミュニケーションサービスを支える「オンデマンド光多地点接続技術」

15

APNの多様なユーザインタフェースや通信帯域、低遅延やローカルの高精度時刻把握等の技術要素を常時監視・連携制御することで、用途ごとや要件ごとのユーザ専用光通信網をオンデマンドで提供する多地点接続技術を紹介する。

エクストリームNaaSに向けた無線技術

——マルチ無線プロアクティブ制御技術Cradio®——

19

先鋭化した個々のサービス要件に適した無線アクセスを、必要な場所に柔軟に届ける「エクストリームNaaS（Network as a Service）」が描く世界像と、マルチ無線プロアクティブ制御技術Cradio®を紹介する。

エクストリームNaaSに向けた無線技術

——アナログRoFを用いた高周波数帯無線システムにおける

遠隔ビームフォーミング技術——

24

高周波数帯無線システムで通信に必要な受信感度向上のために必須となるビームフォーミングを、簡易化した張出局で実現する遠隔ビームフォーミング技術について紹介する。

ミッションクリティカルなサービス提供を可能とする協調型インフラ基盤

29

IOWN構想においてCPS（Cyber-Physical System）などのミッションクリティカルなサービスの提供に向けて取り組んでいる協調型インフラ基盤の技術概要、およびスマート農業への適用を行ったフィールド実証について紹介する。

APNで実現する ネットワークサービス技術

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) の実現のためには、従来のインターネットとは比較にならない大量のデータを効率的に処理できる高度なネットワークが求められます。NTTでは、この要求にこたえるために、光電融合技術を最大限活用した画期的なオールフォトンクス・ネットワーク (APN: All Photonics Network) の研究開発を行っています。本稿では、このAPNでさまざまなサービスを実現するための機能別専用ネットワーク (FDN: Function Dedicated Network) 技術とその上で実現するネットワークサービス技術について説明します。

かわばた
川端

あきお
明生^{†1}

あおやぎ
青柳

ゆうじ
雄二^{†2}

NTTネットワークサービスシステム研究所 所長^{†1}

NTTアクセスサービスシステム研究所 所長^{†2}

オールフォトンクス・ネットワーク

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) ⁽¹⁾のオールフォトンクス・ネットワーク (APN: All Photonics Network) ⁽²⁾では、「DX/デジタル流通時代のさまざまなICT基盤のインフラ・オブ・インフラ」となることをめざしています。このためにAPNでは、通信ビルだけでなくユーザ施設 (工場、病院等) やデータセンタ間をエンド・ツー・エンド (E2E) で広帯域な光ネットワークや無線アクセスでつないで誰でも超高速の光伝送や無線伝送を利用できる共用のネットワークを構築し、さまざまな産業のICT基盤として提供されるサービスでシェアリング (インフラ・オブ・インフラ) することをめざしています。APNで実現されるさまざまなサービスイメージを図1に示します。

図1に示すように、APNでは、大容量・低遅延の光マルチキャストパスをオンデマンドで任意の対地間で提供

することで映像配信事業者とユーザに4K/8K等の「高臨場映像配信サービス」を提供したり、ユーザ近傍に配置されたMEC (Multi-access Edge Computing) から無線アクセスを経由した端末までのミッションクリティカルな遠隔制御メッセージ転送を保証する閉域パスを提供したり、自動運転車や工場内制御システム等のさまざまな利用シーンで「ミッションクリティカルな遠隔監視/制御サービス」を支えるインフラとなります。また大規模なデータセンタ間の光伝送サービスや5G (第5世代移動通信システム) /6G (第6世代移動通信システム) の基地局・無線制御システムとモバイルコア間をつなぐ伝送サービスを提供し、さまざまな「ICT・ネットワークのインフラ基盤」となります。

機能別専用ネットワーク

APNという同一のネットワークで、さまざまなネットワーク要件を持つサービスを実現し、共存させるために、

機能別専用ネットワーク (FDN: Function Dedicated Network) アーキテクチャ⁽³⁾を採用しています。FDN種別とユースケースを図2に示します。

FDNでは、デジタル信号を光パスに直接マッピングする①デジタル信号転送 (Straight Digital)、アナログ信号を光パスに直接マッピングする②アナログ信号転送 (Natural)、データをパケット等にフレーム化してフレームデータを光パスに転送する③パケットフレーム転送 (Framed Digital) の3種の転送サービスを提供します。①、②がAPNで新たに提供される特徴的なサービスです。①の例では、低遅延の映像伝送のためのHDMI信号等を光パスで伝送するサービス、②の例では超セキュア通信を実現するための量子暗号を用いた暗号鍵伝送サービス等が実現されます。また③においても光の超大容量性を活かして、E2Eで制御メッセージを確定周期で周波数同期して伝送するE2E確定

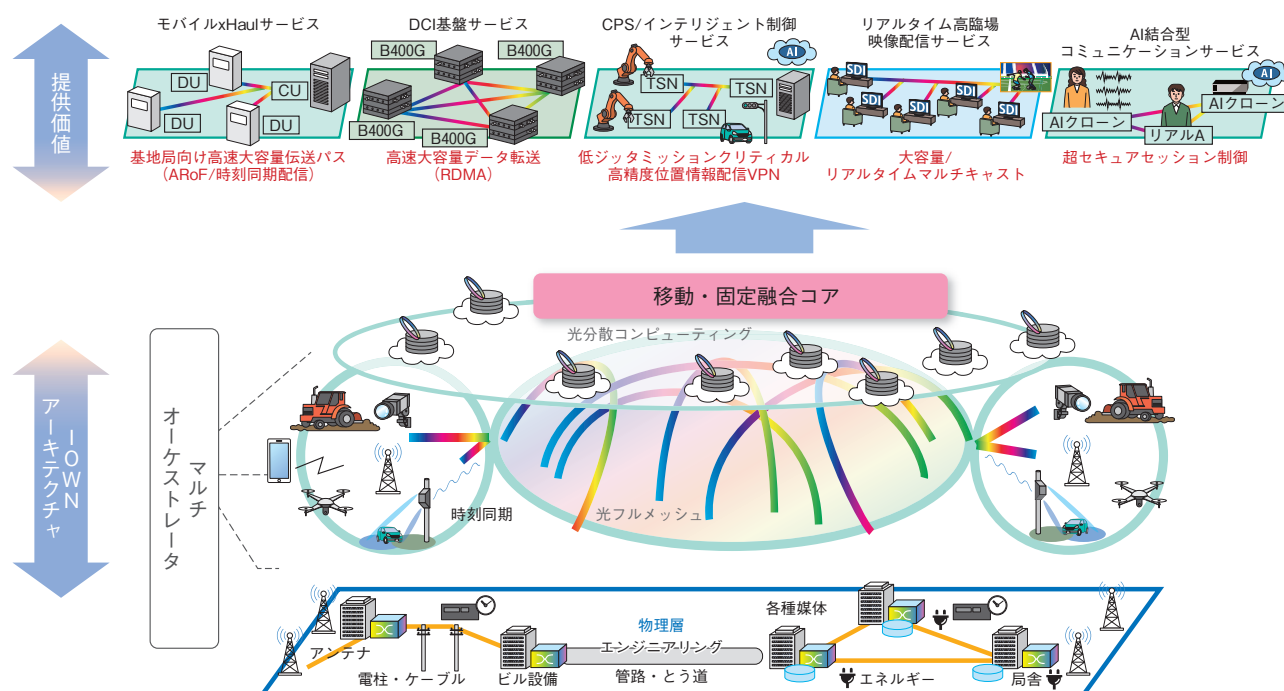


図1 APNと実現サービスイメージ

FDNコンセプト	ユースケース
①	デジタル信号転送 【Straight Digital】
	リアルタイム高臨場映像配信（HDMI伝送） 端末/デバイスの入出カインタフェース/内部バス伝送 DRoF（CPRI） 専用線（波長貸し）サービス
②	アナログ信号転送 （非デジタル） 【Natural】
	量子暗号通信 光給電 ファイバセンシング 光周波数同期 A-RoF
③	パケット・ フレーム転送 【Framed Digital】
	DataCenter間接続 DataCenterアクセス モバイル/D-RoF（eCPRI） IoT CPS/インテリジェンス制御（Smart factory等） AI結合型コミュニケーションサービス E2Eの確定周期保証

図2 FDN種別とユースケース事例

周期保障サービスを提供できることがFDNの特徴となっています。

このようなFDNを実現するアーキテクチャモデルを図3に示します。

FDNは、APNの伝送・無線基盤、コンピュータ基盤であるDCI（Data Center Infrastructure）と端末間の接続制御やデータ流通の制御等を行う

ネットワーク機能の組合せで構成されます。図3に示すように、マルチオーケストレータの指示に従い、FDNコントローラが、APN/無線基盤/DCI/ネットワーク機能のドメイン間を連携させる設定制御とそれぞれのリソース割り当てを行うことで、さまざまなサービス要件に応じたE2Eの専用転送機能を提供します。

高臨場コミュニケーションサービスを支える「オンデマンド光多点接続技術」

1つの場所に大勢が集い、空間を共有することが常識だった会合やイベントも、今日では多様な場所からリモートで集まるようになってきて、便利さを感じる一方で、よりリアリティのあるコミュニケーションや高精細なビジュアルを期待していることも多いと思います。それは多くの人が利用できるサービスを支えるネットワーク技術の制約によるものであり、これは、新

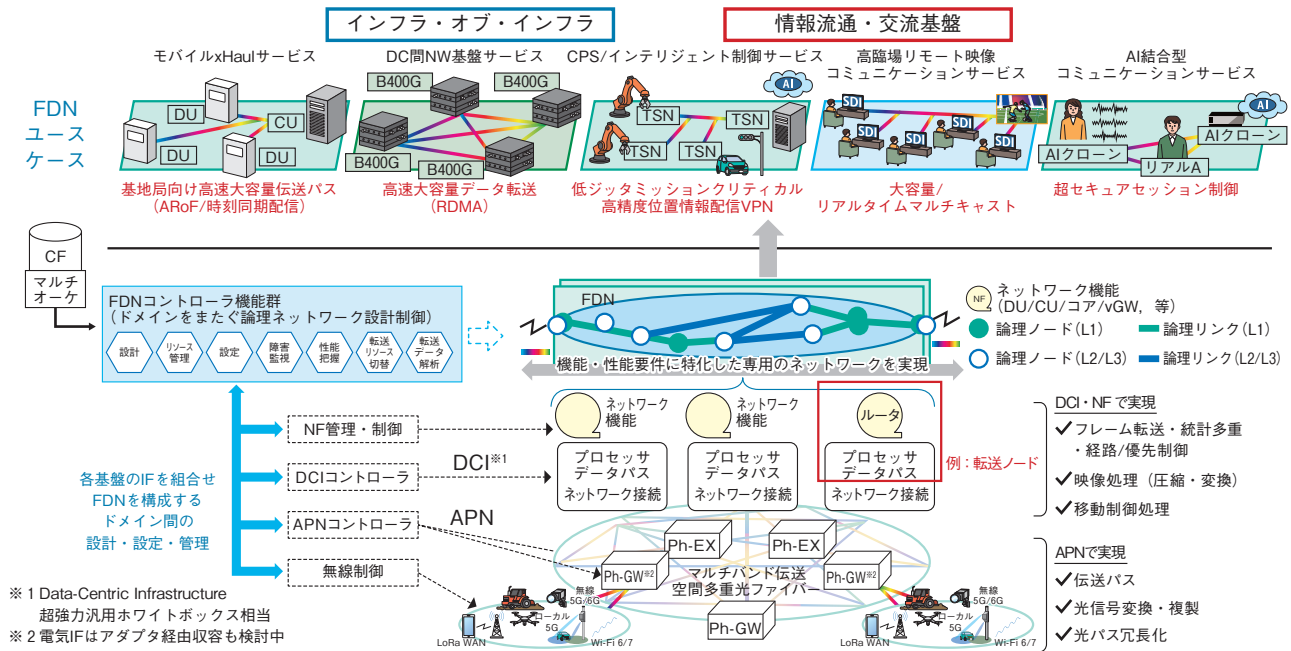


図3 FDNアーキテクチャモデル

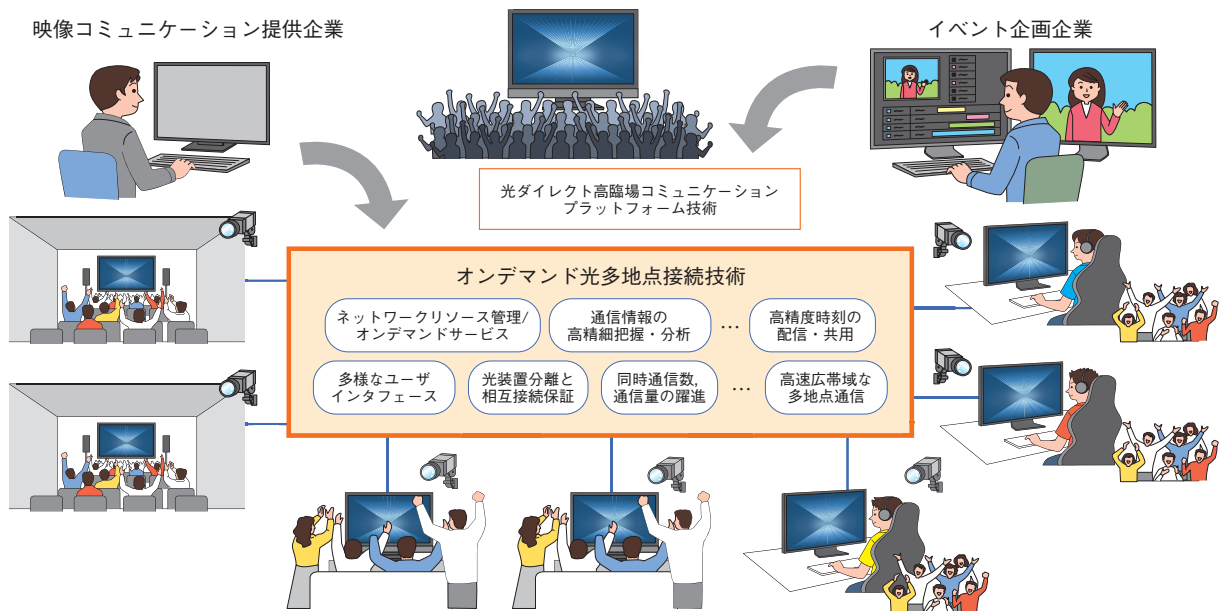


図4 高臨場コミュニケーションサービス提供イメージ

たなネットワーク技術の創造と普及により「高臨場」なコミュニケーションサービスに生まれ変わります。このような技術を実現するべく、私たちは、この技術を「オンデマンド光多地点接続技術（光オンデマンド）」と呼び、

FDNの1つとして提案し研究を推進しています。この実現において、IOWNのAPNには、既存技術を大幅に上回るスケールの光通信コネクション数を同一ネットワークで実現することが求められます。このとき、従来の

専用線サービスのような提供形態では、光パスが張りっぱなしになるためユーザのコスト負担が大きく、また光パス開通のための設計・設定期間を要するためにサービスの利用開始に時間が掛かる問題がありました。このため

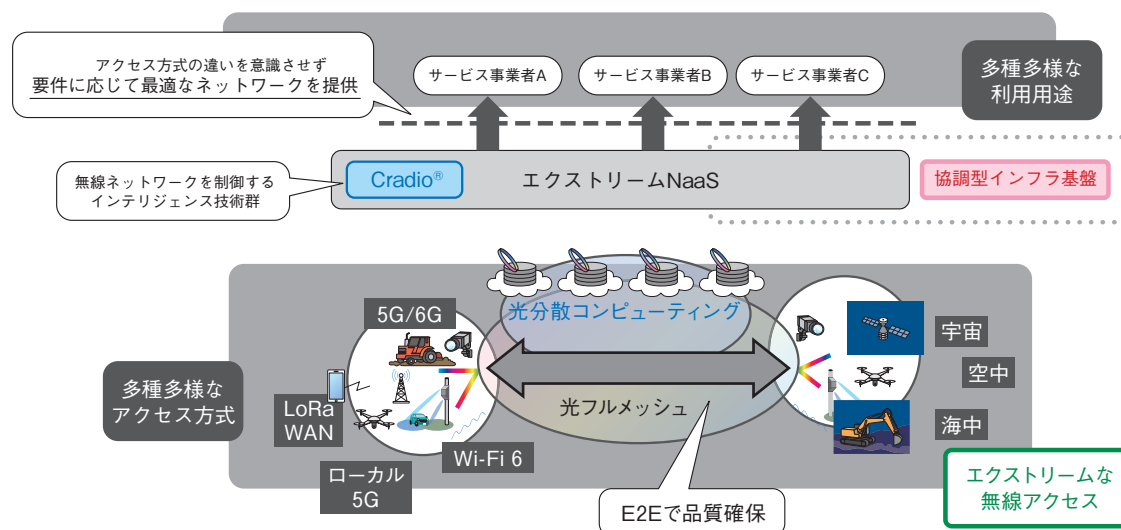


図5 エクストリーム NaaS のコンセプト

FDNでは、コントローラとして自動設定制御ソフトウェアを導入しユーザとAPNを仲介することで、ユーザが欲しいときに欲しい品質の光通信パスを提供できる仕組みを導入しています。このような仕組みにより、リモートワールドの映像イベントに低遅延で広帯域な光パスを安価に提供することが可能となります。また、要件の異なる各イベントの光コネクションをお互いが干渉することなく提供できるため、イベントを多数、同時に提供でき、サービスがより安価となります。またこの技術は光ネットワークの領域でありませんが、後述する次世代無線制御技術と結合し連携することにより、無線ユーザへの「高臨場」なサービス提供にも貢献します（図4）。

エクストリーム NaaS

FDNによって多様なユースケースをカバーしていくためには、無線アクセスを含めたサービス提供も必要となります。FDNの対象領域を無線アクセスに拡張させるため、多種多様なアクセス手段を用いて、超低遅延・超高

信頼・超大容量といったエクストリームな要件を満たす品質をE2Eで維持し続けるネットワークサービスをエクストリーム NaaS（Network as a Service）と呼び、研究開発に取り組んでいます（図5）。

エクストリーム NaaSでは3つの革新をめざしています。第1は、ユーザが指定したアクセスの提供から、ユーザのやりたいことが可能なアクセス環境の提供に変えていくことです。これによりユーザは多様なアクセス手段を意識することなく、利用したいサービスを利用することが可能になります。第2は、制御情報の拡張です。カメラなどのセンサ情報や人の行動などのあらゆる情報を制御信号として活用することで、高精度な予測と新たな付加価値の創出をめざします。第3は、アクセスそのものの拡大です。宇宙や海中といったエクストリームなサービスエリアを実現するとともに、無線空間の持つポテンシャルを最大化させます。

エクストリーム NaaSの実現には、さまざまな無線技術およびその周辺技

術を高度化し組み合わせしていく必要があります。その中でも重要な役割を担う2つの技術が、マルチ無線プロアクティブ制御技術（Cradio®）と、アナログRoF（Radio over Fiber）を用いたビームフォーミング技術です。

Cradio®では、自営・公衆を含む複数の無線ネットワークにおけるさまざまな情報の把握・可視化、通信品質の予測・推定、動的設計・制御技術という無線技術群を高度に組み合わせ、時々刻々と変化するユーザ要求や電波状況に追従します。また、さまざまな社会システムやアプリケーションと協調することで、無線ネットワークを意識させないナチュラルな通信環境の創造を可能にします。

アナログRoFを用いたビームフォーミング技術では、無線のアナログ信号をデジタル変換せずにそのままファイバにのせて伝送することで、エリアに多数展開していくアンテナ部を小型化・低コスト化することができます。さらに、遠隔でのビームフォーミングを行うことで効率的なエリア展開も可能になります。

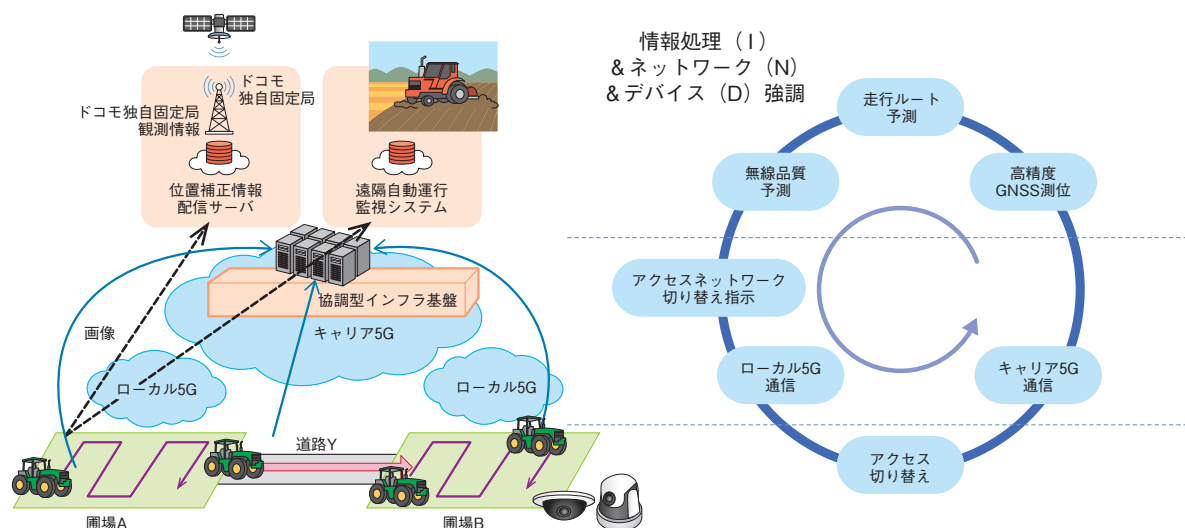


図6 協調型インフラ基盤と情報処理・ネットワーク・デバイス協調動作

協調型インフラ基盤サービス

APNを活用して農業ICTやMaaS (Mobility as a Service) 等のサービスを実現するためには、端末、クラウド基盤、ネットワークを連携させてE2Eでサービス要件を満足する必要があります。ここでは、FDNの重要な要素技術で、この連携を可能にするために研究開発している協調型インフラ基盤アーキテクチャ⁽⁴⁾の概要を解説します。

図6では、農業ICT分野で圃場間や圃場内でロボット農機を用いて農作業の自動化を行い、遠隔監視・制御を実施する場合の協調型インフラ基盤の協調動作の例を示しています。この例では、圃場Aから圃場Bにロボット農機が移動するとき、ローカル5Gからキャリア5Gにモバイル網が切り替わり、トラクタと協調型インフラ基盤がプロアクティブにトラクタの移動位置とその場における通信品質を予測して通信品質が劣化する前に最適なモバイル通信網に切り替えるシナリオを示しています。

この例では、クラウド基盤上の遠隔制御・監視機能がGNSS (Global Navigation Satellite System) 測位により現在の位置を把握して、今後の走行ルートと無線品質を予測します。ローカル5Gの品質が劣化することが予測されると、品質が劣化する前にキャリア5Gへのネットワークへの切り替え指示を行います。このような仕組みにより、E2Eでアプリケーションレイヤからみて通信断がないような切り替えを行うことが可能になります。このため農業トラクタのレベル3自動走行のようなミッションクリティカルなサービスの遠隔監視制御を実現することができるようになります。

今後の展望について

本稿では、APNとFDNで実現される代表的なネットワークサービスとその実現例を解説しました。今後もこれらのネットワークサービスを実現するアーキテクチャの詳細検討を行うとともに、ユースケースごとにPoC (Proof of Concept) を行うことでシステム実装を進め、APNの社会実装を進め

ていく予定です。

参考文献

- (1) <https://www.rd.ntt/iown/>
- (2) <https://www.rd.ntt/iown/0008.html>
- (3) <https://www.ietf.org/lib/dt/documents/LIAISON/liaison-2021-05-28-iown-global-forum-iesg-iab-iown-global-forum-to-ietf-attachment-1.pdf>
- (4) <https://www.bcm.co.jp/site/2021/03/nt/2103-nt-01-02.pdf>



(左から) 川端 明生 / 青柳 雄二

IOWNのAPNで実現される代表的なネットワークサービスとその実現例を解説しました。今後もこれらのネットワークサービスを実現するアーキテクチャの詳細検討を行い、APNの社会実装を進めていきます。

◆問い合わせ先

NTT ネットワークサービスシステム研究所
TEL 0422-59-2684
E-mail nea-mgr-ml@hco.ntt.co.jp

高臨場コミュニケーションサービスを支える「オンデマンド光多地点接続技術」

本稿では、次世代の高臨場コミュニケーションサービスの実現をめざす、オールフォトンクス・ネットワーク（APN: All Photonics Network）の多様なユーザインタフェースや通信帯域、低遅延やローカルの高精度時刻把握等の技術要素を常時監視・連携制御することで、用途ごとや要件ごとのユーザ専用光通信網をオンデマンドで提供する多地点接続技術を紹介します。

よしおか 吉岡	ひろたか 弘高	なるみ 鳴海	たかみつ 貴允
なかがわ 中川	まさひろ 雅弘	まつもと 松本	けんいちろう 健一郎

NTTネットワークサービスシステム研究所

実現する世界「高臨場な体感を多くの人へ」

人と人が会い、大勢が集まり、その場の会話やイベントを楽しむのが当たり前だった世の中も、お互いが離れたさまざまな場所からリモートで集合し、会合やイベントを楽しむ世界に変わりつつあります。むしろ、遠く離れた人たちが画面越しで簡単に顔を合わせたがり、今まで収容人数制限で容易には体験できなかったイベントは参加しやすくなったりと、新たな楽しみが増えてきたかと思います。それでも、人はこの現状のコミュニケーションに「臨場感」の欠如という物足りなさを感じつつも、諦めているのではないのでしょうか。これは今、多くの人がインターネットのような不安定で品質が大きく変動する通信に起因するものであり、友人と会話をしても、アーティストに声援を送っても、頻繁に反応が悪くなるなどの違和感があるからでしょう。一方、高品質の通信は非常に高額で、また、サービス開通には数カ月といった期間が必要であり、限られた人たちの特権となっています。

これは、現状の通信ネットワーク技術の限界に起因するものです（図1）。NTTはこの「高速広帯域」と「低価格・即時利用」の双方を実現するべく、多くのパートナーとのコラボレーションとオールフォトンクス・ネットワーク（APN: All Photonics Network）技術の活用による、「オンデマンド光多地点接続技術（光オンデマンド）」の研究開発に取り組んでいます。この通信技術に、高度な次世代映像系サービスプラットフォーム（光ダイレクト多地点接続サービスPF）のような「リモートワールド」を提供するサービス技術をアドオンすることで、「リ

モートでも高臨場」なコミュニケーションを多くのお客さまに届けます。

サービス概要「オンデマンドで世界をつなぐリモートコミュニケーションネットワーク」

「光オンデマンド」が実現する、リモートコミュニケーションにおける現状のネットワーク課題を解く鍵は、高速ながらも高価で利用用途が限定される光通信路の最小単位（1つの光の波長、通称λ）をいかに安価に多くの人に使っていただけるかということです。そのためには、1本の光ファイバで使えるλの数を増やすこと、また必要となるときだけ極力必要な時間だけ使う

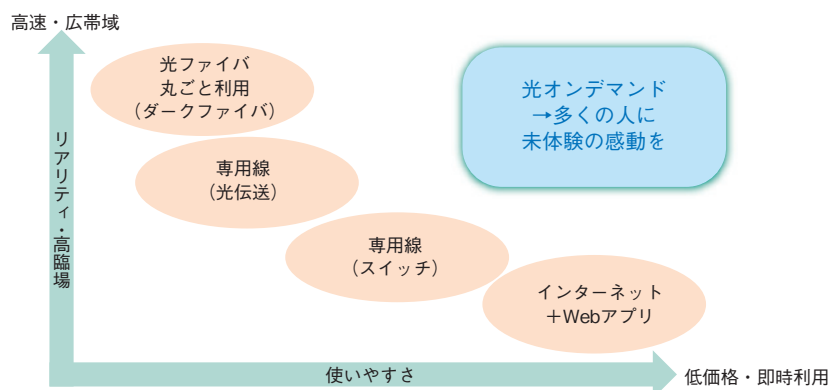


図1 現状サービスポジションと新技術のめざす領域

「オンデマンド」の実現がキーとなります。

さらに、現在バリエーションの少ないサービスメニューを大幅に拡大し、同一のネットワークで多種多様なユーザニーズにこたえ、ユーザごとに提供するネットワークの重量が重要となります。サービスイメージを図2に示します。

サービスを支える要素技術「革新的技術とトータルコーディネート」

ここでは「光オンデマンド技術」を支えるキー技術を紹介します。

■多様なインタフェース種別：「多様なプロトコル対応、柔軟な帯域選択」

利用者が自身所有の資産を活用し、自由にネットワークを使うには、機器を接続するインタフェースの多様性が重要です。従来のEthernetやTCP/IP等のプロトコルを必須とせず、非圧縮の映像転送（SDI）等や、アナログ光信号まで多様な通信をめざします。また光の単位入を時間軸や空間軸

等の分割技術を活用し常に最適な品質と速度の通信を提供します。

■ベンダ非依存な光装置接続：「光装置のディスアグリゲーション・マルチベンダ接続」

ユーザに多様なインタフェースをご利用いただくには、接続するユーザの装置の選択肢を広げ、ネットワークの多様な組合せを保証する必要がありますが、従来の光伝送装置はエンド・ツー・エンド（E2E）で1ベンダがすべて提供するため、これを機能ごとに分離する装置のディスアグリゲーションと、これらの自由な異ベンダ相互接続が必要です。このようなハードウェア（H/W）機能間のディスアグリゲーションを「水平方向のディスアグリゲーション」とも呼び、NTTは、MEF（Metro Ethernet Forum）^{*1}やONF（Open Networking Foundation）、TIP（Telecom Infra Project）、OpenROADMといったグローバルコミュニティにてこれを推進しています⁽¹⁾。IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）ではさらに

この相互接続を加速していきます。

■ネットワーク利用効率の向上：「ネットワークの容量・波長数の拡大」

高臨場サービスを安価に提供する鍵は、ネットワーク利用ユーザ数の飛躍的な増加であると述べましたが、そのポテンシャルとなる中継装置は転送容量125倍をめざします。これは光通信の物理層である光ファイバを安定的かつ長距離伝送できる波長の束（波長帯）の拡大（マルチバンド伝送技術^{*2(2)}）、1波長当りの容量の拡大、および1ファイバ内での面的な多重（空間多重伝送^{*3}）により実現します。また多様なユーザニーズにこたえ、大容量の波長のみでなく、同一波長を時間軸で分割し長距離伝送する技術確立し、

- *1 MEF：米国のネットワーク技術標準化団体。
- *2 マルチバンド伝送：複数の波長帯を用いた波長多重信号伝送。波長帯の増加に起因して発生する光信号の品質劣化を補償・回避します。
- *3 空間多重伝送：マルチコアファイバ等の新規光ファイバ上での波長多重信号伝送。新たな多重方式を適用する影響を把握し、性能を担保します。

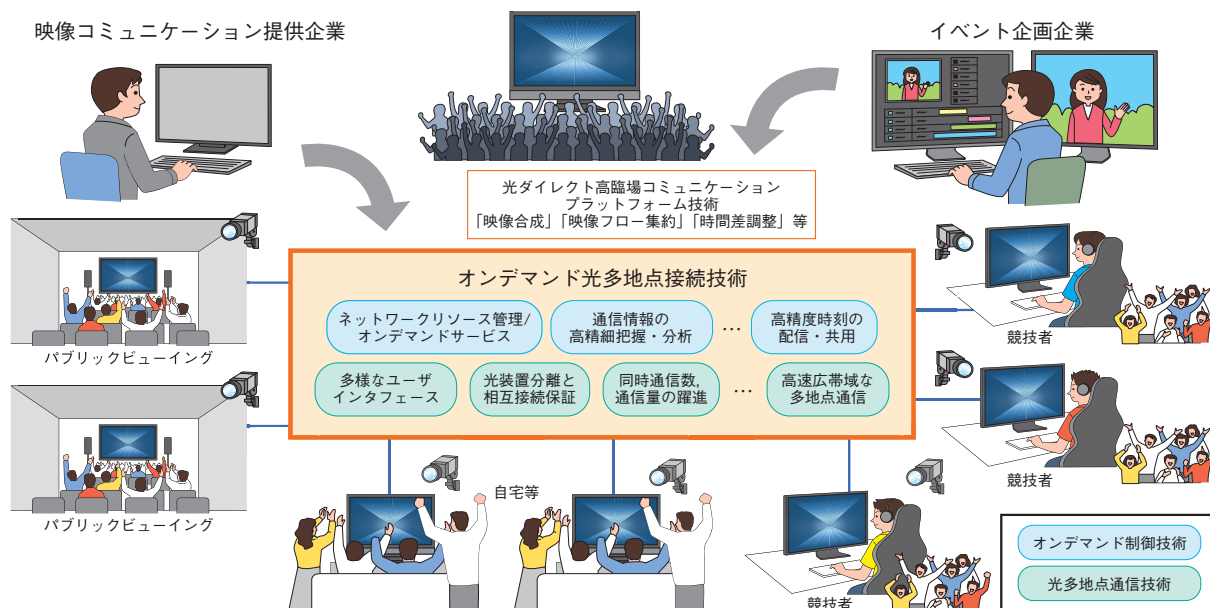


図2 サービスイメージと技術要素

サービスをさらに多くのユーザに提供します⁽³⁾。

■同一大容量コンテンツの多拠点 高速配信：「多地点同時接続・ 光マルチキャスト」

光技術のみでのE2E通信は一般的にポイント・ツー・ポイント（P2P）である1対1接続ですが、これを複数グルーピングして、さらにユーザ要件に必要なフレーム多重等を併せて提供することで多地点のユーザ同時接続をFDN（Function Dedicated Network）として実現します。これはユーザごとに独立した専用の論理ネットワークであり、互いのサービスレベルを干渉することなく分離し、多数つくることをめざします。現在、5G（第5世代移動通信システム）を中心に加速するスライス技術に対して、光レイヤを核にしたネットワークスライスといえるでしょう。またP2P接続のみではサービスを提供するサーバや常に大量の光波長をハンドリングしないといけません。そこで同一データをAPNの光装置にて品質を保ちながら複数にコピーして分岐し、多拠点に高速で届ける「光マルチキャスト」も実現します。

次にユーザ要件に合わせてオンデマンドにサービス提供する幹となる技術を紹介します。

■オンデマンド接続：FDNコントローラ

光オンデマンド技術、およびすべてのFDNサービスでもっとも重要な技術が、「FDNコントローラ」です。これまでキャリアが主としてきたネットワークの設計技術とマクロ情報からの利用予想による「設備計画」は、光パスを固定的に使うことを前提としており、工事には長時間要し、また利用しない時間帯もリソースを占有するなど

ネットワークリソースの利用効率が悪いという課題があります。光オンデマンドでは、膨大な物理・論理のネットワークリソースを、ユーザの必要なときだけ正確に割り当てることで、ネットワークリソースの高い利用効率を実現し、安価な高臨場サービスの提供に貢献します。キーポイントはネットワークリソースの管理と、要求サービスレベルに最適な論理ネットワークの生成・開放およびサービスレベルの提供・維持です。NTT研究所は既存や最新の転送伝送装置を対象に、前述のグローバルコミュニティにて技術実証と普及に努めています。

IOWNが提供する革新技術群をコーディネートし、従来数カ月の工事期間を要してきた光通信路の提供スピードを、APN技術の発展に合わせて数十分、将来には数分というオーダーに短縮するワークフローの実証確立とFDNコントローラの実用化に取り組みます。ネットワークリソースをユーザごとに安全に確実に管理することで、1つのネットワークで膨大なサービス数の提供（1サービス接続地点数：数百～数万、サービス同時提供数：数万、等）を実現します。

■ネットワークのリアルタイム& 詳細な把握と調整：ネットワー クモニタリング・遅延調整

オンデマンドでのリソース利用には、ディスアグリゲーションした膨大なネットワークリソースの状態をリアルタイムに正確に把握することが重要です。これは装置の故障状態のみでなく、各リソースを連携させた際の、多様なネットワーク条件とその厳密なサービスレベルの保証が重要で、ネットワークのE2Eでの高精細なサービスモニタリングおよびその制御が必要となります。NTTは転送レイヤでの

モニタリング技術に取り組んできましたが、さらにIOWNが基本とする光装置に光レベルでのリソース管理、通信速度測定把握、そしてサービス要件に応じて遅延時間を調整する技術にも取り組みます。

■ネットワークワイドな高精度時刻同期

IOWN/APNがもたらす低遅延ネットワークは、より高精度な時刻マネージメントと装置間の同期が本領を発揮します。例えば、株取引やプロの遠隔eスポーツではその厳密な公平性がカギとなりますが、より高精度な時刻をその精度を落とすことなく全国へ届け、また装置間でのタイミングを正確に合わせる「高精度時刻同期」技術に取り組んでいます。通信データに各通信口ケーションの高精度な時刻を埋め込むことで、サービス側で精度の高い公平なデータタイミング補正なども可能とします。また周波数源の高精度化により、将来はさらに精度の高い時刻提供が実現できます。

■ユーザビリティ向上：光ダイレ クト高臨場コミュニケーション プラットフォーム

このような光オンデマンド技術により多くのサービスに使うため、さらに利便性の高いユーザインタフェースを提供する映像系プラットフォーム、「光ダイレクト高臨場コミュニケーションプラットフォーム」の検討も開始しています。映像コミュニケーションには、「レンダリング」「映像合成」「映像フロー集約」「圧縮解凍」「時間差調整」等の機能がありますが、これらの技術をコントローラで一括制御することでプラットフォームとして提供します。ユーザはこれらの機能を、実際に行いたい処理の順番で組み合わせ、各機能で使いたい撮影映像や音

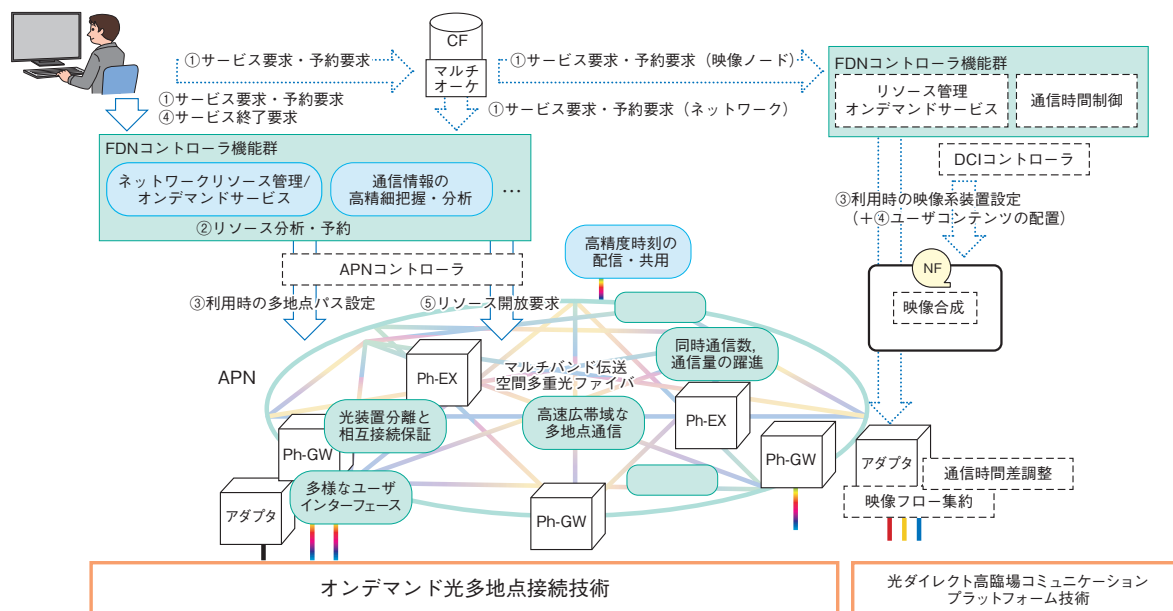


図3 オンデマンド光多地点接続技術のワークフローイメージ

声等のコンテンツを追加します。サービスや映像機能の拠点間通信は光オンデマンドのFDNと組み合わせ、最低限の映像機器と接続すれば、好きなときに好きな地点を接続する、高臨場映像コミュニケーションが提供できるようになります。

現時点でのサービス提供時のワークフローイメージを図3に示します。多くの技術がコグニティブ・ファウンデーション(CF: Cognitive Foundation)およびFDNコントローラによる高度な管理制御によりオンデマンドで実現します。

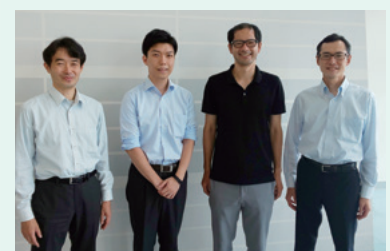
将来への展望「使える技術から市場へ展開、継続的なサービス発展」

オンデマンド光多地点接続技術の完成にはAPNの革新技術が必要ですが、その集大成は2030年をターゲットとしていますが、キー技術となる「オンデマンド」接続は既存の光ネットワークでも活用できます。早期には上位の制御機能、およびネットワークの監視機能の活用に取り組み、よりコストリーズナ

ブルな光パスの提供をめざします。2025年の大阪・関西万博では、その会場にて最新の技術をご覧いただくべく、パートナーの皆さんとともにリモートワールドの実現をめざし、その基盤技術の研究開発に取り組みます。将来はサービス提供のリアルタイム性と同時利用性のスケールを向上させ、より安価なサービスを多くの人々に届けます。またこの技術はIOWNの無線新技術との併用により、「エクストリームNaaS」の効果拡大にも貢献します。

参考文献

- (1) <https://telecominfraproject.com/tip-oopt-project-group-completes-successful-proof-of-concept-open-optical-networks/>
- (2) M. Nakagawa, H. Kawahara, T. Seki, and T. Miyamura: "Adaptive link-by-link band allocation: A novel adaptation scheme in multi-band optical networks," Proc. of ONDM 2021, Gothenburg, Sweden, July 2021.
- (3) M. Nakagawa, K. Masumoto, H. Onda, and K. Matsumura: "Experimental demonstration of a PON technology-based optical transport solution over field installed DSF," Proc. of ECOC 2019, Dublin, Sept. 2019,



(左から) 吉岡 弘高 / 中川 雅弘 / 鳴海 貴允 / 松本 健一郎

本技術はIOWN/APNの利点を最大限に活用し、多くの技術を高度に連携するため国内外の多くのパートナーとで実現していきます。早期の実現と大勢のお客さまに使ってもらうことでより良く安価なサービスを実現できれば幸いです。

◆問い合わせ先

NTTネットワークサービスシステム研究所
ネットワーク基盤技術研究プロジェクト
TEL 0422-59-4266

エクストリーム NaaS に向けた無線技術 ——マルチ無線プロアクティブ制御技術 Cradio®

無線通信が収容するサービスは、超大容量、超低遅延や、超多数接続といった基本的な性能向上だけでなく、これらを高度に組み合わせた要求条件が求められるようになって考えられます。先鋭化した個々のサービス要件に適した無線アクセスを、必要な場所に柔軟に届けるサービスをエクストリーム NaaS (Network as a Service) と名付け、必要な技術開発を推進しています。その要素技術として、さまざまな無線の状態を把握し、無線アクセスをプロアクティブに制御する Cradio® 技術群の研究開発を進めています。本稿では、エクストリーム NaaS が描く世界像と、マルチ無線プロアクティブ制御技術 Cradio® を紹介します。

かわむら
河村けんいち
憲一もりやま
守山たかつね
貴庸おがわ
小川ともあき
智明あさい
浅井ゆうすけ
裕介たかとり
鷹取やすし
泰司

NTT アクセスサービスシステム研究所

さまざまな無線アクセスを 組み合わせたエクストリーム NaaS の実現

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) によって実現される超高速、超低遅延な通信サービスをユーザの端末までエンド・ツー・エンド (E2E) で届けるためには、無線通信の活用が不可欠です。近年の無線通信の目覚ましい発展により、高速、大容量な通信がさまざまな場所で利用できるようになり、また、センサなどの広域、省電力通信向けの無線通信の利用も進んでいます。今後人もモノの通信の拡大やサイバー・フィジカル融合による新たなサービスの出現により無線通信に求められる要件は拡大すると考えられます。移動通信では、6G (第6世代移動通信システム) に向けた研究開発が開始されており、100 Gbit/s 以上の高速通信、前世代に比べ100倍の大容量化、超低遅延、超多数接続などの性能の向上や、これまで未到達の領域である、航空機内、

海中、宇宙などの領域へのカバレッジ拡大が目標に掲げられています⁽¹⁾。一方で、免許不要帯域を用い、ユーザが自律的に設置可能で柔軟に使用できる、無線 LAN や、LPWA (Low Power Wide Area) と呼ばれる広域、低消費電力な無線アクセスなども次世代の無線規格へと発展が期待できます。これら特性の異なるさまざまな無線規格を要件に応じて適切に利用していくことが今後も重要となると考えています。

現在、これらの無線アクセスは、提供できるスループット、距離、消費電力、品質の安定性など、それぞれの特徴に応じて必要なものをネットワーク事業者などが選択し、構築、サービス提供しています。IOWNの世界では、これらの無線方式の違いをユーザが意識することなく、自然につながり、必要な無線通信の性能を得ることができるとをめざしています。このようなサービスのコンセプトを、エクストリーム NaaS (Network as a Service) と名付け、その提供基盤の実現に向けて研究開発を進めています。エクスト

リーム NaaS のサービス像を図1に示します。IOWNの光フルメッシュのネットワークと、光分散コンピューティングを基礎として、多種多様な光・無線アクセスを組み合わせ、エクストリーム NaaS は提供されます。

Cradio® によるナチュラルな 無線アクセス使用感の実現

エクストリーム NaaS を実現するための技術として、複数の無線アクセスを対象とし、それらを組み合わせた場合でもナチュラルな使用感を実現する制御技術群を Cradio® (クレイディオ)⁽²⁾ と名付け、研究開発を進めています。

無線通信では、使用する電波の周波数や通信方式によって、通信速度、遅延、信頼性、広域性、端末の消費電力といった特性が異なります。また、電波の法制度により、免許を取得した通信事業者が運用可能な無線システムから、免許不要でユーザが自由に設置できるもの、他のシステムと周波数を共有して使用するものなどの多様性もあ

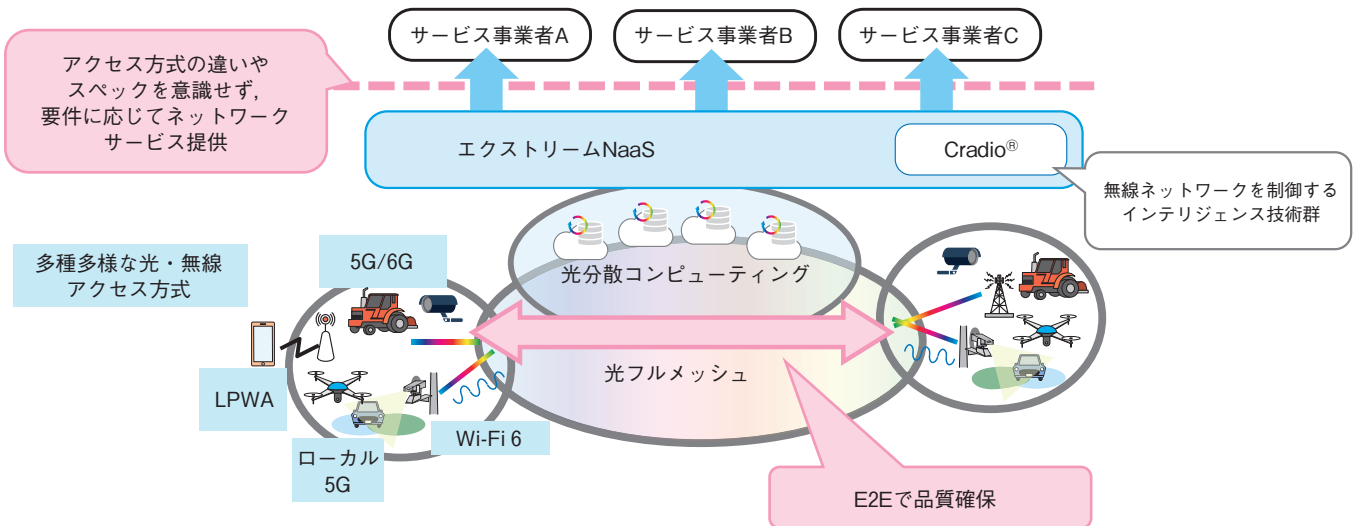


図1 エクストリーム NaaS のコンセプト

さまざまなアプリケーション・システム

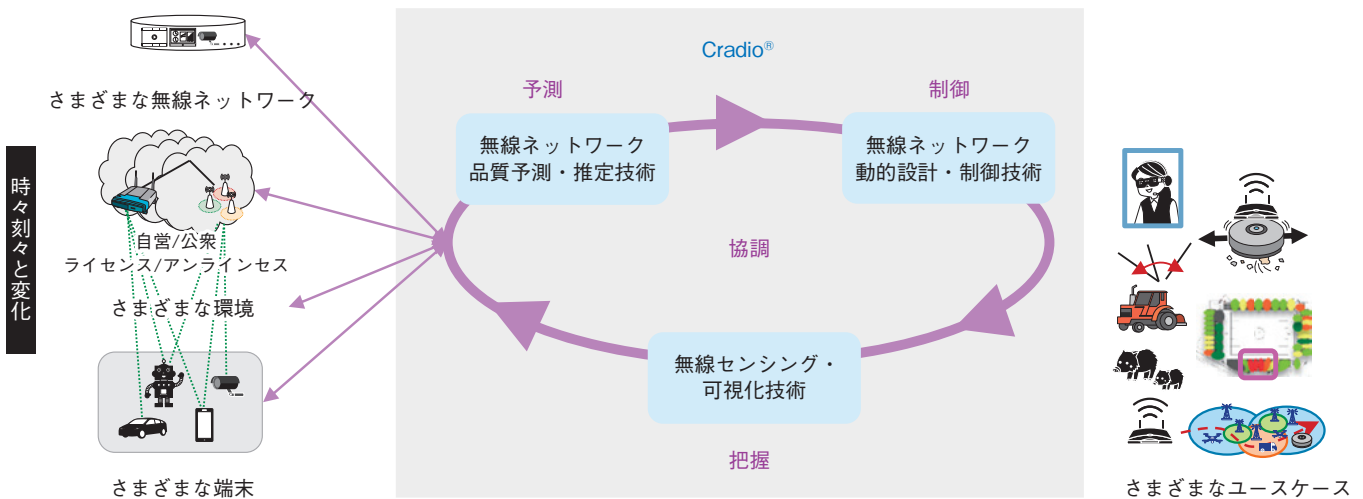


図2 マルチ無線プロアクティブ制御技術 Cradio®

ります。さらに無線通信の品質は周囲の構造物や移動する物体による影響、周囲からの干渉など環境により刻々と変化するため、安定的な通信品質の提供には困難が伴います。これらの特徴の異なる周波数、システムを使いこなし、動的に変化する電波環境へ追従し、これまでにない超大容量、超高信頼、超多数収容、低消費電力などの多

様化かつ先鋭化する要件に対応していくには、電波の物理特性と、各無線アクセスのシステム特性を熟知し、最適に選択し、設計・運用していくことが課題となります。そのような複雑かつ専門知識を必要とするマルチ無線アクセスの利用環境を、より高度かつ自動的に運用することを Cradio® により実現します。

Cradio® のコンセプトを図2に示します。Cradio® の技術群は、大きく「把握」「予測」「制御」の3つの領域に分類されます。Cradio® は、これら3つの領域の技術を高度に実現し、相互に連動させ、さまざまなアプリケーションと協調することで、时时刻刻と変化する無線品質の中で、多様なアプリケーション要件に適した無線アクセ

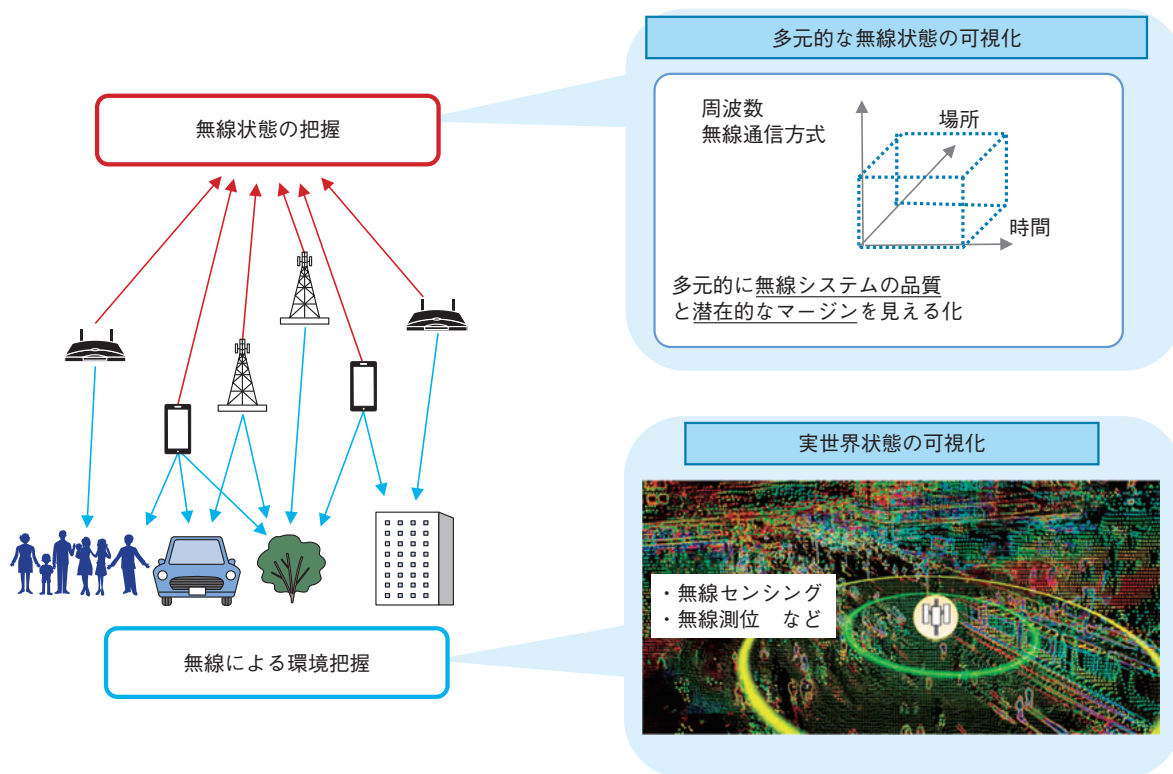


図3 無線センシング・可視化技術

スネットワークをつくり出します。

次の章ではCradio[®]の各領域で現在実用化をめざして開発中の技術を例に挙げ、その概要を紹介します。

Cradio[®]を構成する技術

■把握：無線センシング・可視化技術

「把握」の領域は、さまざまな無線情報をセンシング、分析し、電波と通信の品質、混み具合、端末ごとの利用状況、干渉状態などを可視化します(図3)。また、電波環境に影響を与える構造物の変動の把握や、端末の位置を精度高く取得する技術により、得られる品質の推定を高精度に行うことを可能とします⁽³⁾。

現在開発を進めている技術の例とし

て、建物などの構造物の高精度な三次元データと、さまざまな無線アクセスの種別、周波数種別を考慮した各種電波伝搬モデルやレイトレーシングにより、得られる電波品質を高度に推定、可視化できる技術を開発しています。従来の置局設計ツールでは、基本的に個別システムごとに専用の設計ツールを用いて、無線ネットワークの設計を行うことが一般的でしたが、無線ネットワークを有機的に統合したマルチ無線ネットワークを設計するためには、システム横断での統合的な品質の可視化が必要となります。開発する可視化・把握技術により、無線ネットワークの設計者が、複数の無線アクセスを組み合わせた場合の通信品質を仮想空間上で統一的操作感でシミュレート

し、周波数の特性やシステム特性を最適に考慮された品質の把握が可能となります。

■予測：無線ネットワーク品質予測・推定技術

「予測」の領域では、電波環境を把握し明らかにした無線情報と、端末の位置や周辺環境などの情報を基に、各端末の通信品質が、今後どのように変化していくのか、未来を予測・推定する技術になります。それにより、不安定な無線通信の品質劣化を未然に検知し、より良い品質のネットワークに切り替えたり、送信する映像の伝送レートを事前に調整するなど、アプリケーションのプロアクティブな制御が可能となります。

開発を進めている技術の例として、

過去の品質情報を用いた無線品質予測技術⁽⁴⁾があり、その概要を図4に示します。これは収集した品質の実績データを基に、その基地局で得られる電波強度やスループットなどの通信品質を、AI（人工知能）技術の活用などにより、予測・推定するものです。さまざまな端末で測定された電波強度やスループットなどの品質情報を、位置情報や無線環境のスキャン情報、時間帯の情報などと合わせて学習することで、使用したい無線基地局の品質を場所、時間に応じた推定値を算出し、予測を実現します。AIを用いた予測技術においては、ニューラルネットをベースとして、転移学習技術も活用し、学習のためのデータ収集が容易である電波強度のデータにおける学習結果を、データ収集数が少ないスループットなどの学習に転移させることにより、推定精度を高める技術を適用しています。

す。本技術の活用の例として、スマート農業分野において、トラクターの自動運転を行う際に、複数の無線アクセスを予測品質に応じて安定的に切り替える実証実験⁽⁵⁾を行っており、品質劣化前に、より良い無線アクセスに切り替えることで、監視映像を安定的に伝送できるなど有効性を確認しています。

■制御：無線ネットワーク動的設計・制御技術

「制御」の領域では、把握や予測した結果に基づいて、無線アクセスネットワークのパラメータの制御や、さまざまな無線ネットワークを連携・協調させる制御を行います。「制御」の領域での開発技術の例を図5に示します。可動基地局・可動反射板技術では、従来固定的に使用することが一般的である無線基地局を自動的に移動させることで、環境の変化に応じて無線のカバレッジを最適化する技術を開発

しています。ドローンや自動搬送車に搭載した基地局を自動的にトラフィックが集中する場所に移動させ、端末をそちらに誘導することで、局所的に生じる輻輳を回避します⁽⁶⁾。本技術の特徴としては、無線基地局と端末の位置関係をクラスタリング技術により分析することで、最適な配置を自動的に割り出す点になります。また、可動反射板による動的なエリア形成技術についても研究を行っています。別の制御技術として、IoT（Internet of Things）向けの広域、低消費電力が必要な無線アクセスにおいても、伝送の安定化やエリア拡大のための制御技術を開発しています⁽⁷⁾。この技術では、IEEE 802.11ahの無線システムに対して、IoT無線特有の要件であるエリアの拡大や伝送の安定化のためのパラメータ制御を行います。

ここで示した制御技術以外にも、さ

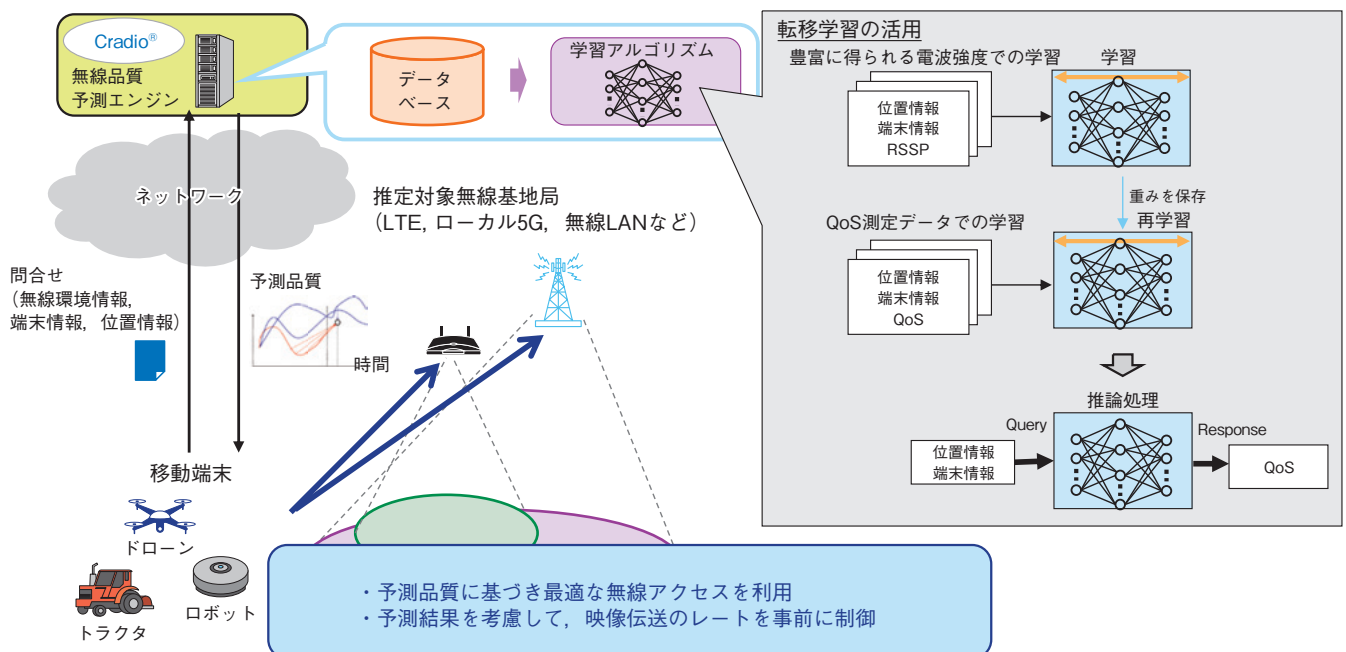
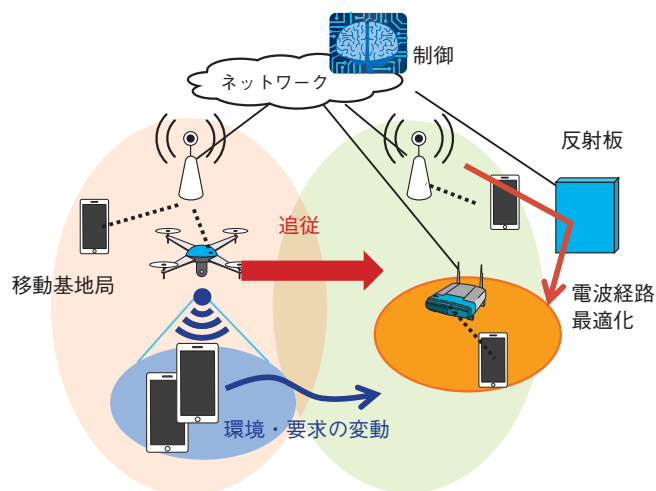


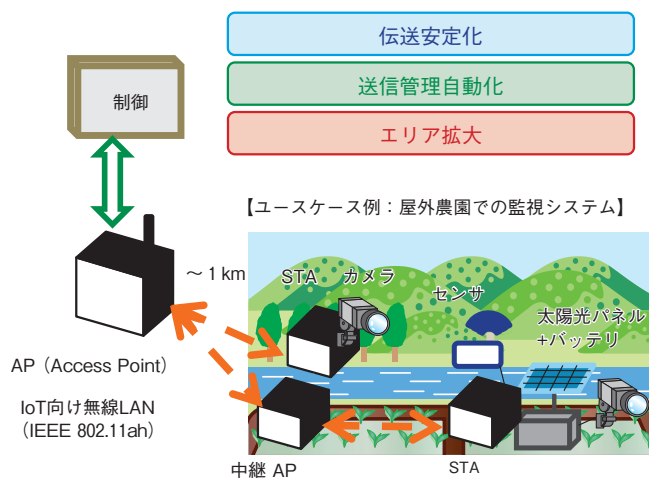
図4 無線ネットワーク品質予測・推定技術

(a) 可動基地局・可動反射板

(b) IoT向け無線パラメータ制御



環境の変動に応じた無線環境の制御



IoT無線特有の要件のための制御

図5 無線ネットワーク動的設計・制御技術

さまざまな制御技術を研究開発しています。それらの制御技術によって、最適な無線ネットワークを必要に応じて自動的に構築・運用する技術をめざしています。

今後の展望

NTTでは、多様かつエクストリームな領域に拡大するアプリケーション要件を満たし、使用する無線アクセス種別を意識させずナチュラルな使用感を実現するため、Cradio[®]のマルチ無線制御技術の開発を進めており、2030年ごろのIOWNの実用化に合わせて提供できるようにする目標です。その第一歩として、Cradio[®]を構成する技術のいくつかを実装したプラットフォームの開発を進めています。

参考文献

- (1) https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_6g/DOCOMO_6G_White_PaperJP_20210203.pdf

- (2) <https://journal.ntt.co.jp/article/13100>
- (3) <https://www.rd.ntt/as/times/108/02/top.html>
- (4) 若尾・河村・守山：“複数無線アクセス最適利用のための品質予測技術,” NTT技術ジャーナル, Vol. 32, No. 4, pp.11-13, 2020.
- (5) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2020/11/16/201116b.html>
- (6) 中平・佐々木・守山・鷹取：“マルチ無線プロアクティブ制御技術 (Cradio) における可動基地局を用いた無線動的制御,” 信学技報, Vol. 120, No. 314, CQ2020-62, pp. 11-16, Jan. 2021.
- (7) 篠原・井上・浅井・鷹取：“IoT向け広域無線LAN IEEE 802.11ahにおけるチャネル選択技術,” 信学技報, Vol. 121, No. 43, RCS2021-23, pp. 41-46, May 2021.



(上段左から) 河村 憲一/ 守山 貴庸/
小川 智明

(下段左から) 浅井 裕介/ 鷹取 泰司

エクストリームNaaSによるナチュラルな通信環境を実現するため、さまざまな無線アクセスの制御技術に取り組んでいます。

◆問い合わせ先

NTTアクセスサービスシステム研究所
無線アクセスプロジェクト
TEL 046-859-3135
FAX 046-859-3145
E-mail kenichi.kawamura.dn@hco.ntt.co.jp

エクストリーム NaaS に向けた無線技術 ——アナログ RoF を用いた高周波数帯無線 システムにおける遠隔ビームフォーミング技術

エクストリーム NaaS (Network as a Service) に向けた無線技術の 1 つとして、NTT アクセスサービスシステム研究所ではアナログ RoF (Radio over Fiber) を活用して無線基地局の機能を分離、削減した簡易な張出局を用いて高周波数帯無線エリアを効率的に展開するシステム構成を提案しています。本稿では、高周波数帯無線システムで通信に必要な受信感度向上のために必須となるビームフォーミングを、簡易化した張出局で実現する遠隔ビームフォーミング技術について紹介します。

すが 菅	みずき 瑞紀	いとう 伊藤	こうた 耕大
あらい 新井	たくと 拓人	しらと 白戸	ゆうし 裕史
きた 北	なおき 直樹	おにざわ 鬼沢	たけし 武

NTT アクセスサービスシステム研究所

アナログ RoF を用いた 高周波数帯無線システム

エクストリーム NaaS (Network as a Service) で提供する多種多様な光・無線アクセスの 1 つに、ミリ波*¹などの高周波数帯の電波を利用した無線システムがあります。高周波数帯無線システムは、広い帯域幅を利用し大容量な無線通信を実現できます。しかし、周波数が高くなるほど伝搬損失が大きくなるという電波の特徴から、広いエリアをカバーするには多数の無線基地局が高密度に必要なという課題があります。そこで、アナログ RoF (Radio over Fiber)*²を活用して無線基地局の機能を集約局 (信号処理部) と張出局 (アンテナ部) に分離するシステム構成を提案しています⁽¹⁾。無線基地局の機能を分離することで、高密度に設置しなければならない張出局を簡易化し、効率的なエリア展開が可能となります。また、集約局と張出局の間をアナログ RoF で接続することにより、張出局からは信号処理部だけでなく

A/D (Analog to Digital), D/A (Digital to Analog) 変換器を削減することができます。アナログ RoF を活用して無線基地局の機能を分離する構成は、6G (第 6 世代移動通信システム) のエリア展開技術の 1 つとしても期待されています⁽²⁾。

伝搬損失が大きい高周波数帯無線システムでは、通信に必要な受信感度を向上させるためのビームフォーミング*³が必須となります。従来の無線基地局では、信号処理部がビームフォーミングの制御を行っていました。しかし、機能分離、削減により、張出局の簡易化を行った場合、信号処理部を持たない張出局のビームフォーミングを実現するためには、信号処理部を有する集約局からアナログ RoF を介して遠隔で制御を行う必要があります。そこで、張出局が形成するビームを集約局で遠隔制御する 2 つの遠隔ビームフォーミング技術を提案し^{(3), (4)}、検討を進めています。

提案する 2 つの遠隔ビームフォーミング技術はそれぞれメリット・デメリット

があるため、ユースケースごとに適切な遠隔ビームフォーミング技術を採用することが重要です。本稿では 2 つの遠隔ビームフォーミング技術を説明するとともに、それぞれの技術に適したユースケース例を紹介します。

従来の遠隔ビームフォーミング技術の課題

従来の遠隔ビームフォーミング技術として、光ファイバの波長分散*⁴を利用して各アンテナ素子に割り当てる

*1 ミリ波：波長が 1~10 mm と非常に短い電波のことです。周波数は 30~300 GHz になります。

*2 RoF：無線信号の波形情報を光ファイバ伝送する技術です。アナログ RoF は波形をそのままアナログ信号として、デジタル RoF は波形をデジタル信号に変換してから光ファイバ伝送します。アナログ RoF は、デジタル RoF に比べ、A/D、D/A 変換が不要で、必要な光伝送帯域も狭くて済むというメリットがあります。

*3 ビームフォーミング：複数のアンテナ素子を並べたアレイアンテナを利用し、指向性を電氣的に制御する技術です。各アンテナ素子が送受信する電波の位相を制御することで、特定方向に向かう電波を強めて送信したり (送信ビーム)、特定方向から到来する電波を強めて受信したり (受信ビーム) することができます。

波長を変えることでビーム方向を切り替える方法^{(5), (6)}があります。しかしこれらの方法は①光ファイバの距離情報が必要、②張出局で光フィルタの制御が必要、③高周波数帯・長距離光ファイバを適用する際に無線信号の形式に制約がある、といった課題があります。そのため、高周波数帯無線基地局の機能分離にそのまま適用することは困難です。

提案技術 1：波長固定割り当てによる遠隔ビームフォーミング技術

提案技術 1 は、波長固定割り当てによる遠隔ビームフォーミング技術です。この技術について送信側を例に説明します（図 1）。集約局では各アン

テナ素子にそれぞれ固定的に波長を割り当て、波長多重（WDM: Wavelength Division Multiplexing）によって張出局まで伝送します。光ファイバには波長分散があるため、波長と光ファイバの長さに応じて各アンテナ素子に入力される信号にはそれぞれ異なる遅延が発生します。そこで、各アンテナ素子に割り当てる波長を狭く等間隔に配置すると、波長分散によって引き起こされる遅延も等間隔になります。そのため、各アンテナ素子には等間隔の位相差を持った信号が入力されます。等間隔の位相差を持った信号が各アンテナ素子から送信されると、ある方向で送信信号が同相合成された状態になり送信ビームが形成されます。形成されるビームの方向はアンテナ素子間の位相差で決まります。そのため、集約局であらかじめ各素子に対応する信号に等間隔の位相差を与えるよう位相調整を

行い、光ファイバを伝送した際に生じる位相回転量と足し合わされて任意の等間隔の位相差を与えることによりビーム方向を制御することが可能となります。

提案技術 1 について、シミュレーションおよび実験で、適用条件の検討および有効性の確認を進めています⁽⁷⁾。検証実験は、信号周波数を 10 GHz、張出局のアンテナを 4 素子リニアアレイ、光ファイバを 10 km のシングルモードファイバ、使用する波長を 1500 nm 帯に設定して実施しました。集約局で位相調整を行うときの隣接波長間の位相間隔（ α ）を変化させることでビーム方向を制御します。図 2 は波長間隔を 50 GHz として集約局で α を変化させることでビーム方向を走査した実験の結果です。 α の変化に伴いビーム方向が変化していることが確認できます。また、実験結果とシミュレーショ

*4 波長分散：光ファイバ中を伝搬する光の速度が波長によって異なるため、伝搬時間に差が生じる現象です。光ファイバの屈折率が波長依存性を持つために起こります。

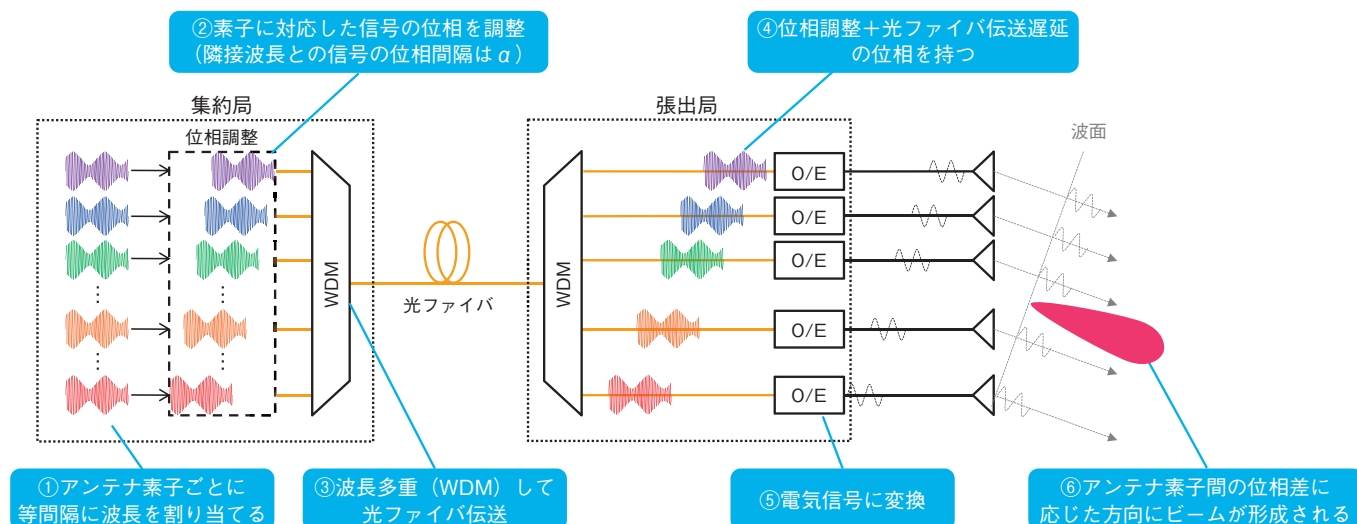


図 1 波長固定割り当てによる遠隔ビームフォーミング技術

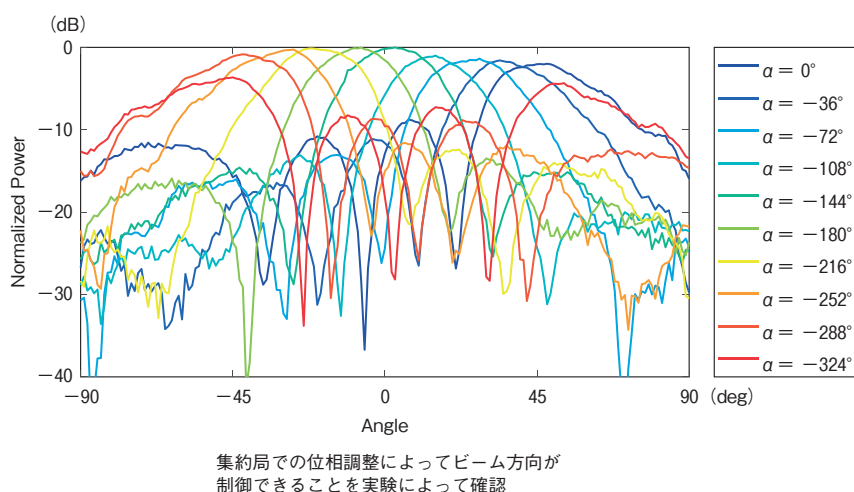


図2 波長固定割り当てによる遠隔ビームフォーミング技術の検証

ンによる理想的な4素子アレイアンテナのビームパターンを比較し、おおむね一致していることも確認しています。波長間隔50 GHzはDWDM (Dense WDM) 規格で規定されている波長間隔の1つで、汎用のデバイスで構成することができます。この結果から、規格準拠の汎用デバイスを用いた構成に提案技術1を適用した場合でも理想ビームと同等のビームフォーミングが可能であること、集約局での位相調整によって連続的なビーム走査が可能であることが実験的に確認できました。

提案技術1では、波長を狭く等間隔で割り当てる必要があるため、波長配置に制約があります。また、アンテナ素子数と同じ数だけの波長を使用するため、アンテナ素子数が制限され大口径アレイアンテナへの適用は難しいという課題があります。一方で、張出局は集約局から伝送された信号のO/E (Optical to Electrical) 変換〔受

信の場合は受信信号のE/O (Electrical to Optical) 変換〕機能とアンテナのみの最小限の構成にすること、任意の方向にビームを形成することができるというメリットがあります。そのため、提案技術1は1つの張出局がカバーするエリアが比較的狭く、大口径アレイアンテナを必要としないようなケースでの利用が適しています。例えば、ビルの各階に張出局を設置し、それらを1つの集約局で収容することでビル全体をエリア化するようなユースケースが考えられます。

提案技術2：パッシブビームフォーミングを用いた遠隔ビームフォーミング技術

提案技術2は、パッシブビームフォーミング*⁵を用いた遠隔ビームフォーミング技術です。この技術について、送信側を例にビーム制御の原理を説明します(図3)。張出局はパッシブビー

ムフォーミングを備え、その入力ポートに対してそれぞれ異なる波長を割り当てておきます。集約局では入力ポートに対応する波長の光キャリアを用意しておき、E/O変換の際に所望のビームに対応した入力ポートに割り当てられた光キャリアを選択して使用します。すると、集約局から伝送された信号は、張出局のWDMフィルタとO/Eを介して所望のビームに対応した入力ポートのみに入力されます。このように、集約局で光キャリアを切り替えることでパッシブビームフォーミングの入力ポートを切り替えることができ、ビームを遠隔で切り替えることが可能となります。

提案技術2についても試作装置を用いた実験検証を進めています⁽⁸⁾。この実験は、伝送する無線信号の周波数を28.25 GHz、光ファイバは20 kmのシングルモードファイバ、使用する波長を1500 nm帯、として実施しました。また、張出局が備えるパッシブビームフォーミングの一例としてリフレクトアレイを用いました。リフレクトアレイは、電波を放射するフィードアンテナとメタマテリアル*⁶で形成された反射板

*5 パッシブビームフォーミング：半導体等の能動デバイスを用いずにビームフォーミングを実現する仕組みです。信号を入力するポートを切り替えることでビームを切り替えることができます。パッシブビームフォーミングとして、バトラーマトリクスやロッドマンレンズなどのビーム形成回路、パラボラアンテナやリフレクトアレイなどのリフレクタ、レンズアンテナやトランスミットアレイなどのレンズがあります。

*6 メタマテリアル：電磁波の波長より細かな構造体を利用することで、電磁波の振る舞いを操作する人工物質です。

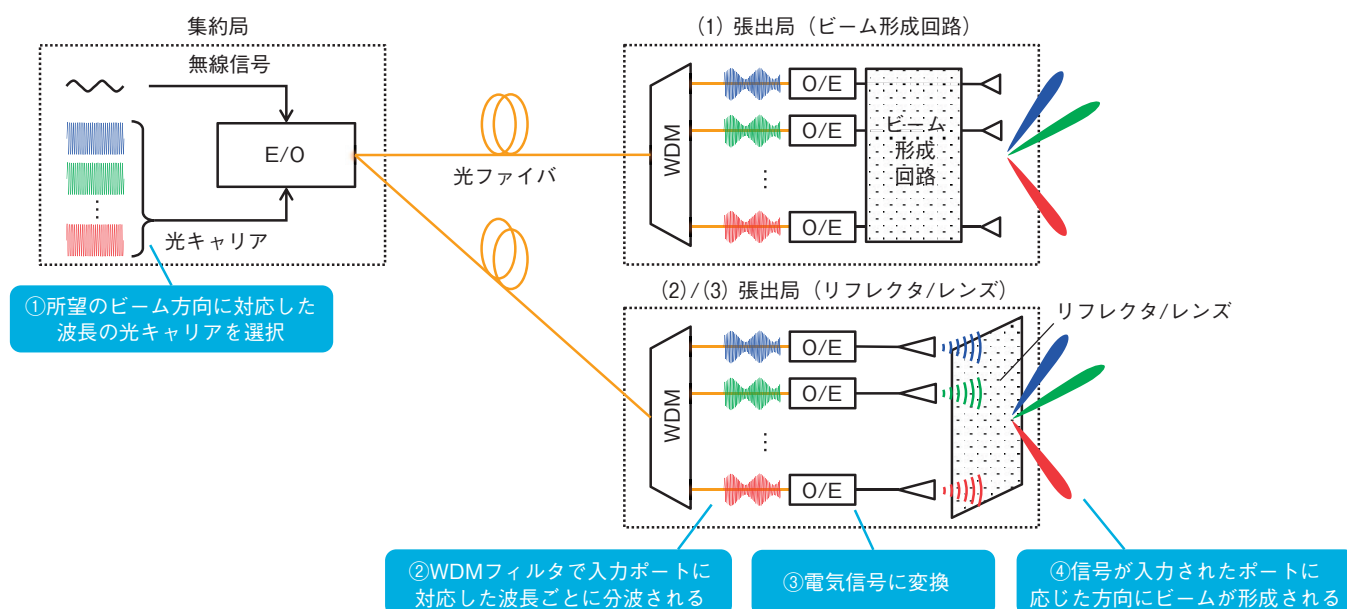


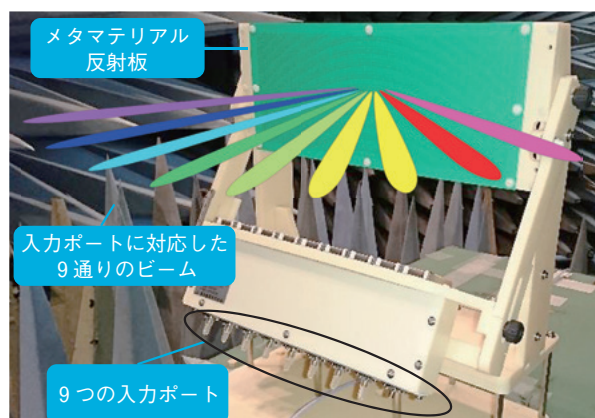
図3 パッシブビームフォーマを用いた遠隔ビームフォーミング技術

から構成されています。メタマテリアル反射板は、フィードアンテナと反射板との位置関係によって、フィードアンテナから放射された電波がメタマテリアル反射板によって反射される方向が変わるように設計されています。このとき、特定の方向で電波が強め合うように反射するため、反射された電波はビームを形成します。フィードアンテナと反射板との位置関係によって形成されるビームの方向が変わるため、フィードアンテナの位置を変えることでビーム方向を変えることができます。実験では図4左側に示す9個のフィードアンテナを備えた9ビームを形成可能なリフレクタレイを用いています。信号を入力するフィードアンテナを切り替えることで、ビーム方向を切り替えることができます。リフレ

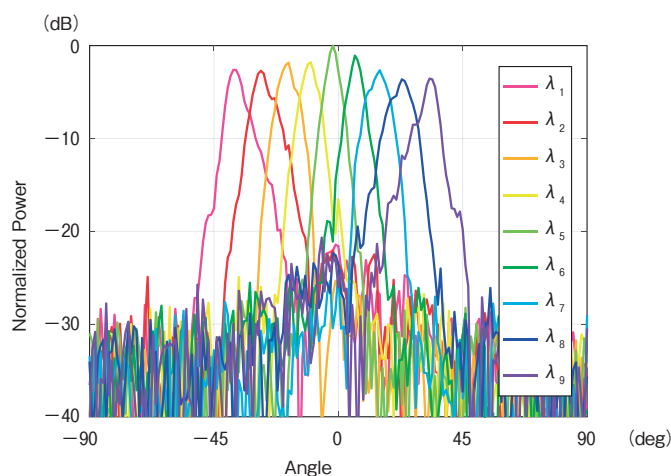
クタレイの各フィードアンテナの入力ポートには1500 nm帯の波長を100 GHz間隔で割り当て、集約局でE/O変換に用いる波長を切り替えながら信号を送信しビームパターンを測定しました。図4右側から、使用する波長に応じてビーム方向が変化し、集約局での波長切替によってビーム方向が制御できることが確認できます。ビーム利得が正面から離れるほど低下しているのは、リフレクタレイの反射特性によるものです。

提案技術2では、張出局にビームフォーマを備える必要があります。そのため、提案技術1と比較すると張出局の機能は増え、サイズも大きくなってしまいが想定されます。また、ビームフォーマの設計によってビーム方向が決まってしまうため、入力ポー

ト切替による離散的なビーム制御しかできないという課題があります。一方で、高利得が必要な場合に提案技術1と比較して必要な波長数を削減することができます。なぜなら、高利得を得るための大口径アレイアンテナを用いる場合には、アンテナ素子数に対してビーム数のほうが少なくなることが想定されるからです。また、複数の入力ポートに信号を入力するだけでマルチビームの形成が可能となります。さらに、1つのビームに対して1波長しか使用しないため、波長の配置に制約がないというメリットもあります。そのため、提案技術2は1つの張出局がカバーするエリアが広く、高利得を確保する必要があるケースでの利用が適しています。ユースケースとしては、屋外で広範囲にわたって面的にエリア展



実験に使用した9ポートのリフレクトアレイ



リフレクトアレイの入力ポートに応じて集約局で光キャリアの波長を切り替えることでビーム方向が切り替わることを実験によって確認

図4 パッシブビームフォーマを用いた遠隔ビームフォーミング技術の検証

開をする場合などが考えられます。

今後の展望

今後は、さらに使用波長数の削減・高利得の確保・任意の方向へのビーム制御が可能となるよう、遠隔ビームフォーミング技術の特性向上を図ります。また、アナログRoFを用いた高周波数帯無線システムの実現に向けて、分散アンテナシステムとの融合や6Gへの展開をめざします。

参考文献

- (1) 伊藤・菅・白戸・北・鬼沢：“アナログRoFを活用した多様な高周波数帯無線システムの効率的収容,” NTT技術ジャーナル, Vol. 32, No. 3, pp. 15-17, 2020.
- (2) https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper_6g/
- (3) K. Ito, M. Suga, Y. Shirato, N. Kita, and T. Onizawa: “A novel centralized beamforming scheme for radio-over-fiber systems with fixed wavelength allocation,” IEICE Communications Express, Vol. 8, No. 12, pp. 584-589, 2019.
- (4) 伊藤・菅・新井・白戸・北：“高周波数帯RoFシステムのための遠隔ビーム制御手法,”

信学総大, CI-7-5, 2021.

- (5) S. Akiba, M. Oishi, Y. Nishikawa, K. Minoguchi, J. Hirokawa and M. Ando: “Photonic architecture for beam forming of RF phased array antenna,” OFC 2014, San Francisco, U.S.A., March 2014.
- (6) M. Tadokoro, T. Taniguchi, and N. Sakurai: “Optically-controlled beam forming technique for 60 GHz-ROF system using dispersion of optical fiber and DFWM,” OFC/NFOEC 2007, Anaheim, U. S. A., March 2007.
- (7) K. Ito, M. Suga, Y. Shirato, N. Kita, and T. Onizawa: “Experimental evaluation of remote beamforming scheme with fixed wavelength allocation for radio-over-fiber systems,” Proc. ECOC 2020, Brussels, Belgium, Sept. 2020.
- (8) 伊藤・菅・新井・白戸・北・岸山・須山・永田・浅井：“高周波数帯RoFシステムのためのパッシブビームフォーマを用いた遠隔ビーム制御手法,” 信学総大, B-5-8, 2021.



(上段左から) 菅 瑞紀/ 伊藤 耕大/
新井 拓人

(下段左から) 白戸 裕史/ 北 直樹/
鬼沢 武

高周波数帯を用いた大容量無線通信を迅速かつ低コストにご提供できるよう、さらなる研究開発に取り組んでいきます。

◆問い合わせ先

NTTアクセスサービスシステム研究所
無線エントランスグループ
TEL 046-859-3366
FAX 046-849-4311
E-mail ekig-p-ml@hco.ntt.co.jp

ミッションクリティカルなサービス提供を可能とする協調型インフラ基盤

さまざまな社会問題を解決するため、社会インフラとしてのネットワーク技術とコンピューティング技術の融合に取り組んでいます。本稿では、自動走行農機の遠隔監視制御、高度コネクテッドカー、スマートシティ等の分野で情報処理、ネットワーク、デバイスの3つのドメイン間で協調制御を用いることで、エンド・ツー・エンド（E2E）でサービス要件を満足しミッションクリティカルなサービスの提供を可能とすることをめざし、研究開発を進めている協調型インフラ基盤について紹介します。

くわはら
桑原たけし
健いしばし
石橋りょうた
亮太かわかみ
川上けんた
健太ますたに
益谷ひとし
仁士やまもと
山本ひろし
浩司やすかわ
安川せいしょう
正祥

NTTネットワークサービスシステム研究所

背景

近年、CPS（Cyber-Physical System）の概念の下、現実世界（フィジカルシステム）におけるさまざまなセンサ情報などをネットワークを介して収集し、情報処理基盤上で構成されるサイバー空間において収集した情報を分析し、現実世界のシステム制御やシステム間のデータ流通に活用する取り組みが進められています。IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想においても、CPSのユースケース⁽¹⁾として、スマートシティにおける監視カメラなどのエリアマネージメント、コネクテッドカーなどのモビリティマネージメント、インダストリーマネージメントを高度化し、新たな社会インフラの実現をめざした検討が進められています。

CPSにおいては、従来のインターネットやクラウドとは異なり、カメラやセンサなど超多数のデバイスから大量の情報を収集する必要があり、膨大な上り方向のトラフィックをネット

ワークを介して効率的に収集する仕組みが必要となります。また、自動運転バスや自動搬送システムにおいて、フィジカルシステムの映像ストリームや位置情報などのセンシング情報を用いて、サイバー空間上からフィジカルシステムへフィードバック制御（アクチュエイト）を行うリアルタイム性の高いユースケースでは、ネットワークだけではなく、サイバー空間を構成するコンピューティング基盤やフィジカルシステムであるデバイス側のシステムも含めて、エンド・ツー・エンド（E2E）での低遅延性や安定的なデータ処理が求められると考えています。

本稿では、IOWN構想においてCPSなどのミッションクリティカルなサービスの提供に向けて取り組んでいる協調型インフラ基盤の技術概要、およびスマート農業への適用を行ったフィールド実証について紹介します。

協調型インフラ基盤の技術概要

■コンセプトと基本アーキテクチャ

協調型インフラ基盤は、オールフォ

トリクス・ネットワーク（APN）や種々の無線ネットワークを活用しつつ、情報処理基盤やデバイス機能と機能連携させることで、従来のインターネットやクラウドでは実現できない高度なサービスを提供することをめざした基盤技術です。協調型インフラ基盤の基本アーキテクチャを図1に示します。情報処理(I)、ネットワーク(N)、デバイス(D)の各ドメインの要素機能群と制御機能から構成され、それらが協調制御されることで、E2Eでミッションクリティカルなサービス要件をサポートします。各ドメインの要素機能は、提供サービスに応じて機能を組み合わせて構成可能とすることを志向しており、これによりMEC（Multi-access Edge Computing）やエッジDCの基盤として柔軟に機能配備することをめざしています。

■ドメイン間協調制御

具体的なユースケースに基づき、協調型インフラ基盤のドメイン間協調制御について説明します。図2はトラクタの自動走行のユースケースと協調制

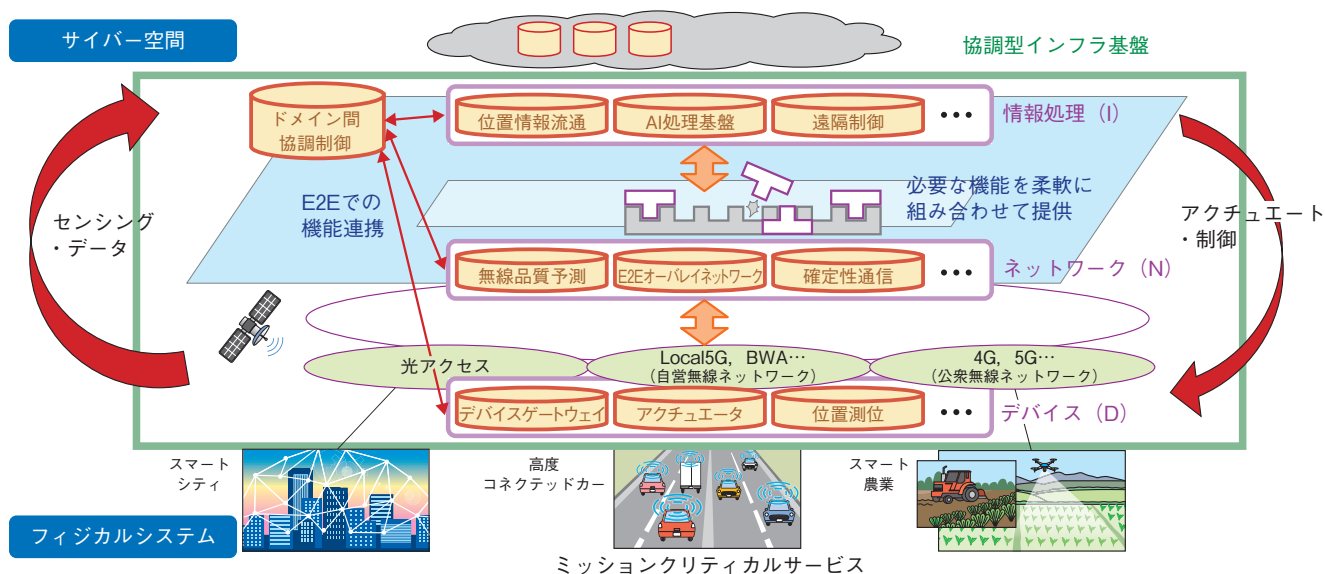


図1 協調型インフラ基盤の概要

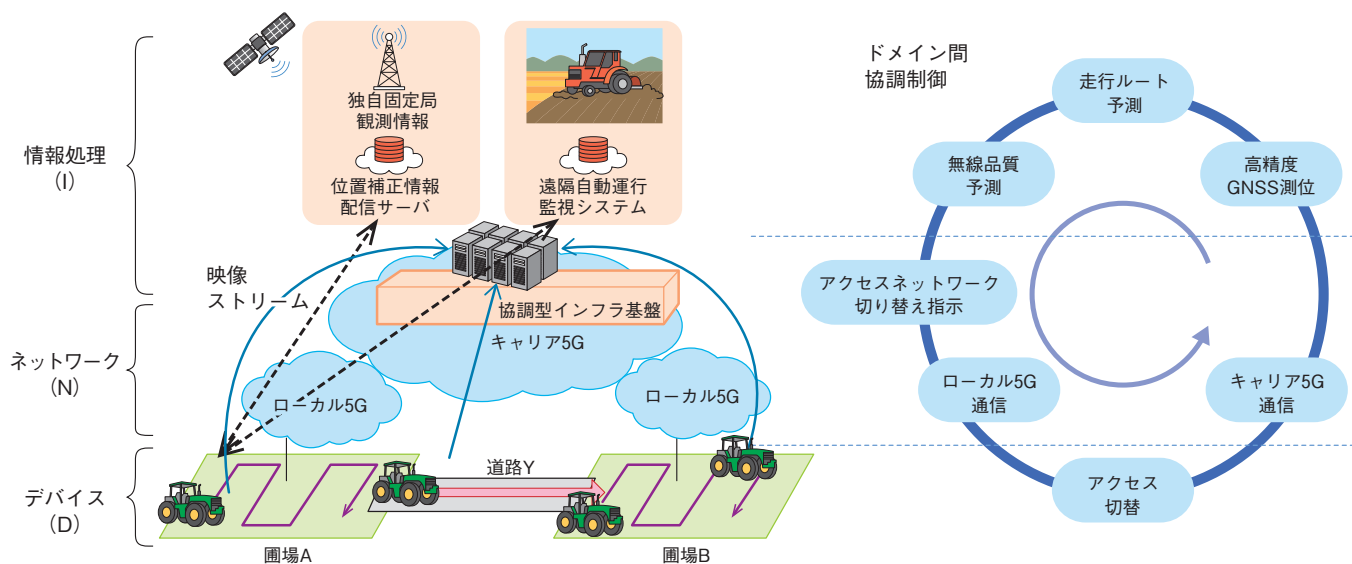


図2 ドメイン間協調制御

御の動作概要を示しています。このユースケースでは、自動走行するロボットトラクタが圃場Aから圃場Bへ

移動する際に、ローカル5G（第5世代移動通信システム）とキャリア5Gによる複数の無線アクセスを経由しな

がら、遠隔監視用の映像ストリームを監視センタへ送り、緊急時には遠隔から停止操作を実施する必要があるま

す。この際、オペレータが遠隔から常時、トラクタの監視や緊急停止制御を行う必要があるため、監視映像や制御信号が無線ネットワークの切り替えに影響を受けることなく、伝送されることが重要となります。

協調型インフラ基盤による動作概要は、次のとおりです。まず、デバイス上での高精度GNSS（全球測位衛星システム）測位により、トラクタの位置を測定します。次に得られた位置情報から、走行ルートの予測を行い、未来位置における無線ネットワークの品質予測を行います。その結果、監視映像や制御信号の伝送に影響が出る程度にネットワーク品質が劣化することを予測した場合、実際に品質劣化が起こる前に、例えば、ローカル5Gからキャリア5Gへ無線ネットワークの切替制御を行います。このように情報処理(I)、ネットワーク(N)、デバイス(D)を協調動作させることで、複数の無線ネットワーク間でシームレスな切替が可能となります。

協調型インフラ基盤のスマート農業への適用に関する取り組み

NTTネットワークサービスシステム研究所では、協調型インフラ基盤の適用先として、少子化、高齢化による労働力不足が社会課題となっている農業への取り組みを進めています。これまで、北海道大学、北海道岩見沢市、NTT、NTT東日本、NTTドコモの間で産学官連携協定を提携し、最先端のロボット技術と、IOWNによる情報通

信技術の活用による世界トップレベルのスマート農業の実現に向けた研究、技術開発に取り組んできました。2020年11月には、岩見沢市にて実証実験⁽²⁾を行っており、以下、その内容を中心に協調型インフラ基盤により実現される効用について紹介します。

■農機レベル3自動走行における課題

農業分野において注目度が高い課題の1つに、「レベル3農機自動走行の実現」が挙げられます。自動車と同様に農機においても、自動化のレベルが定められており、現時点ではレベル2と呼ばれる、使用者の有視界監視下での無人状態の自動運転が可能な農機が市販されています。レベル2では、使用者が圃場周囲から直接の目視、または無線LANなどのローカルの通信ネットワークを介したタブレット端末等を用いて、対象農機の監視と、危険発生時の停止等の緊急操作を行います。なお、市販の自動走行対応農機では、カメラや距離センサなどを備え、自律的に危険を検知し自動停止を行う機能を有しています。

これに対し、レベル3の自動走行では、監視センタなどの圃場から離れた場所から監視と制御を行うため、5G/LTEなどの通信ネットワークを介して監視映像や制御情報を遠隔地と農機の間で伝送する必要があります。圃場内の作業時だけではなく、格納庫や圃場間を結ぶ道路の走行が含まれることに加えて、遠隔の監視センタなどで多数の農機に対する遠隔監視制御を可能

とすることで、農機を用いた農作業全体のさらなる省力化やシェアリングモデルへの新たなビジネス展開が期待されています。一方で遠隔から監視制御を行ううえでは、トラクタからの映像を高品質で転送することに加えて、緊急時にはオペレータが監視映像を元に緊急停止の操作を行う必要があり、ネットワークを含めたシステム全体として低遅延でかつ安定的に遠隔監視を実現することが技術的な課題となっています。

■協調型インフラ基盤を活用した農機自動走行のフィールド実証

協調型インフラ基盤は、前述のとおり、複数の要素技術を協調的に動作させることでネットワークに社会インフラとして必要な付加価値を提供することをめざしています。岩見沢市で実証した内容の全体構成とシナリオごとの動作概要を図3、4に示します。

まず、シナリオAでは、協調型インフラ基盤技術の構成要素として、E2Eオーバレイネットワーク技術、マルチ無線品質予測技術（Cradio[®]）⁽³⁾を用いて、複数のネットワークをまたがって農機が自動走行する中で、通信品質の変動をAI（人工知能）が予測をして通信品質が劣化する前に、適切なネットワークに自動的に切り替えることで、「途切れないネットワーク」を実現し、安定的な自動走行の遠隔監視制御を実現しました。岩見沢市の農道で実際に農機を自動走行させ、同技術を用いて通信を中断させず自動でネットワーク切替に成功した実証結果を

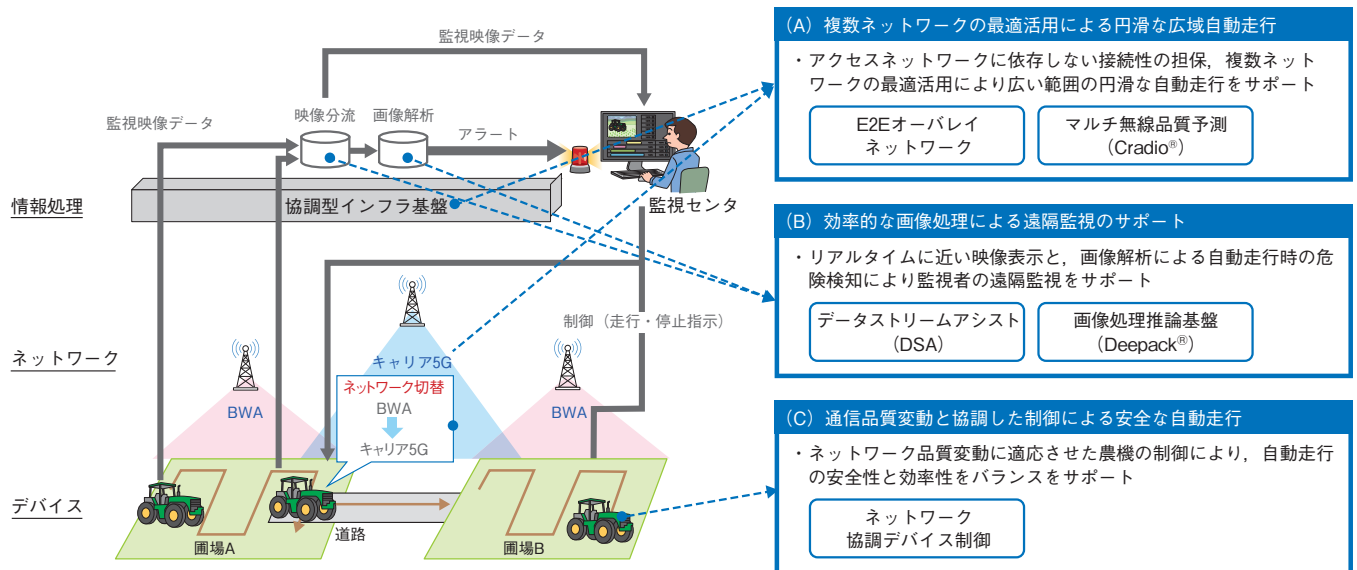
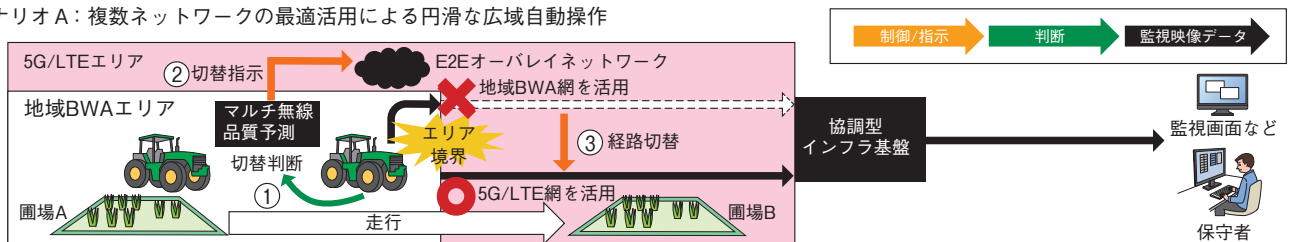
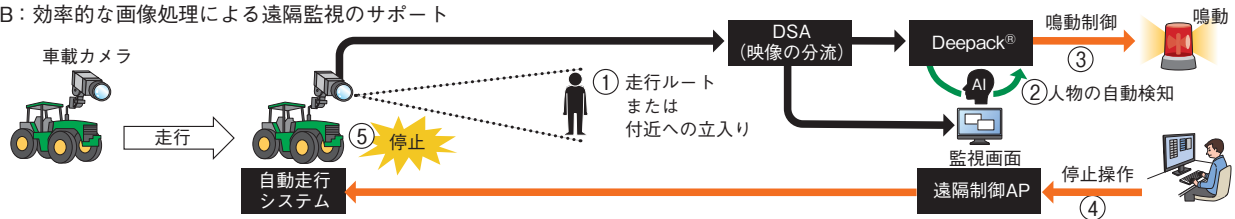


図3 農機自動走行におけるフィールド実証の全体像

シナリオA：複数ネットワークの最適活用による円滑な広域自動操作



シナリオB：効率的な画像処理による遠隔監視のサポート



シナリオC：通信品質変動と協調した制御による安全な自動走行

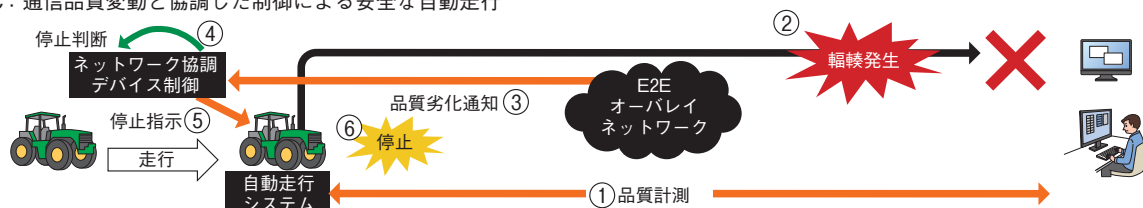


図4 実証シナリオの動作概要

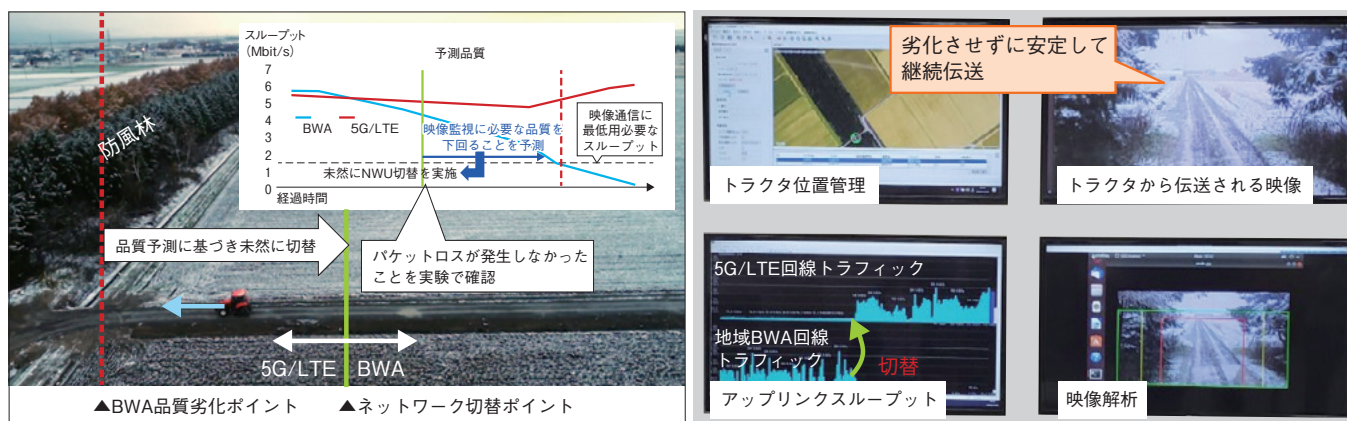


図5 マルチネットワークにおけるシームレス切替の実証結果

図5に示します。

また、シナリオBでは、遠隔監視において映像ストリームをパケットレベルで低遅延に複製することで、ネットワーク負荷を低減しながら、遠隔監視と画像解析などの複数の用途でのリアルタイム映像の同時利用を可能とするデータストリームアシスト技術⁽⁴⁾を適用し、深層学習ではサーバ収容率を高めるために、複数の映像ストリームを効率的に処理するストリームマージ機能やCPU/GPUなどさまざまなリソースを最適化する推論処理基盤技術により、監視用の映像ストリームの処理を効率化しています。さらに、シナリオCでは、ネットワーク協調デバイス制御技術を用いて、ネットワークの品質変化に応じた農機の制御支持を実現し、監視映像が伝送できないレベルにネットワーク品質が劣化した際に、自動でトラクタを安全に停止させるなど、その有効性を確認しました。

今後の展開

本稿では、IOWN構想においてミッションクリティカルなサービスの提供に向けて取り組んでいる協調型インフラ基盤の概要、および岩見沢市で実施したトラクタ自動走行の遠隔監視制御のフィールド実証について紹介しました。今後は、スマート農業に加えて、高度コネクテッドカーなどの高速移動体のユースケースへの検討を通じて、協調型インフラ基盤の適用性の拡大と統合アーキテクチャならびに要素技術の確立を進めていきます。

参考文献

- (1) https://iowngf.org/wp-content/uploads/formidable/21/IOWN-GF-RD-CPS_Use_Case_Interim_Report_2.0-1.pdf
- (2) <https://www.ntt.co.jp/news2020/2011/pdf/201116b.pdf>
- (3) 若尾・河村・守山：“複数無線アクセス最適利のための品質予測技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.32, No.4, pp.11-13, 2020.
- (4) 肥後・鏑木・越地・椿・桑原：“IoTサービスを支えるデータストリームアシスト技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.30, No.7, pp.19-24, 2018.



(左から) 川上 健太/ 石橋 亮太/
益谷 仁士/ 山本 浩司/
桑原 健/ 安川 正祥

IOWN構想の具現化に向けて、協調型インフラ基盤の研究開発を進めています。ネットワークと情報処理基盤、デバイスらが協調制御されることで、これまで実現が困難であったミッションクリティカルなサービスをサポートする社会インフラを実現し、さまざまな社会問題の解決に貢献することをめざしていきます。

◆問い合わせ先

NTTネットワークサービスシステム研究所
ネットワーク基盤技術研究プロジェクト
TEL 0422-59-3333
E-mail ns-cip-ml@hco.ntt.co.jp

特別連載

ムーンショット・エフェクト ——NTT 研究所の技術レガシー——

第12回 超高臨場感通信 Kirari!

ノンフィクション作家の野地秩嘉（のじつねよし）氏より「ムーンショット・エフェクト——NTT研究所の技術レガシー」と題するNTT研究所の技術をテーマとした原稿をいただきました。連載第12回目の最終回は「超高臨場感通信Kirari!」です。本連載に掲載された記事は、中学生向けに新書として出版予定です（NTT技術ジャーナル事務局）。

■超高臨場感通信Kirari!

超高臨場感通信、Kirari!については『IOWN構想—インターネットの先へ—』に次のように載っている。

「遠隔地にネットワークを介して、リアルタイムに競技空間やライブ空間を『丸ごと』伝送し、遠隔地においてもあたかも本会場にいるかのような体験を可能にする技術」。

これだけ読んでも何のことかまったくわからない。そこで、私は2年近くの間、数回にわたって、同技術の試演を見に出かけた。

大画面で空間を再現する技術、背景から人物だけを浮き出し、目の前の空間に転送する技術、現場にある音を再現する技術が達成されている。

開発したのは常務執行役員、研究企画部門長の川添雄彦、現場は木下真吾とそのチームである。

まず、川添がKirari!を構想したのは、現地へ行って見るライブでなく、自宅で見えるテレビ放送でもない、第3の楽しみ方があるのではないかと、ふと思いついたからだ。

「圧倒的多数の方はスポーツを見る時はテレビを利用します。テレビの画面は決まったサイズです。縦と横の比率は9対16。そして、テレビのスポーツ中継はライブのそれとは違うものです。感動を呼ぶための演出、工夫があるのです」。

たとえば、野球中継の場合、ピッチャーやバッター、フライを追う選手の姿や顔がアップになる。だが、スタジアムの観客席にいたら、どの席でもアップになった選手の表情は見えないのである。また、スローモーション

でもう一度、ホームランを見ることはもちろんできない。スタジアムの大画面ビジョンに映ることはある。しかし、ライブの映像をそのままスローモーションで見せることは、今のところ、まだできない技術なのである。

つまり、テレビのスポーツ中継には演出がある。テレビのスポーツ中継とは劇場中継を下敷きにして生まれた演出された動画表現なのである。

川添は演出のないスポーツ現場をそのまま持ってきたと考えた。

「テレビ中継の分野の映像ではプロにはかないません。ですから、僕らはまるごとウインドサーフィンが走る海、野球をやる球場を再現しようと思ったのです」。

現場に行ったら、観客はいろいろなところを見えています。つねに何かを発見しています。テレビ放送は見るだけです。発見はありません。たとえば野球場へ行ったら、選手だけでなく、三塁コーチのサインの出し方を見たりしています。アンパイヤーがストライクとかボールとコールしている様子を真剣に見ていたりします。あるいはビールが飲みたいからと売り子さんを探していたりします。ライブの面白さは発見です。自分が主体的に何かを発見することなんです」。

川添は技術者だ。発見することが仕事だから、ただ、映像を与えられるだけのテレビ中継には不満があったのだろう。彼はどこへ行っても何かを発見したかったのである。

現場を丸ごと持ってくることで、つまり、臨場感を出すには現場にいるのと変わらない環境を作らなければならない。

現場の空気感がある。音もまた単なるステレオ再生ではまったく足りない。現場に漂うかすかな音もすべて拾ってこなくては現場そのものにはならない。球場であればビールの売り子の声、隣の観客が叫ぶ声も必要だ。こういう音声はテレビ、ネットのスポーツ中継では絶対に入らない。しかし、Kirari!では再現されている。

なお、彼自身がウインドサーフィンの選手だったこともKirari!を開発するための大きな動機ともなった。

ウインドサーフィンやヨットの競技はそもそもすぐそばで見ることができない。間近で見ようと思えばお金を払って船を出さなくてはならない。それに、船酔いする人は乗船すらできないのである。ウインドサーフィンだけではない。冬季の登山、スキーといったエクストリームスポーツは現場に行くことが不可能だ。しかし、この技術があればリアルタイムに臨場した気分になることができる。

川添は「コロナ禍でも通用する技術です」と言った。

「Kirari!はライブとテレビ視聴の中間にあるものです。二極化された世界におけるもうひとつの解答ともいうべきでしょうか。今回のコロナ禍で、私たちは二極化された状態にいます。リモートもしくはリアル、安全かそれとも経済か。しかし、私たちが望んでいるのはどちらかではなく、ふたつとも、もしくは2極が融合した場だと思うのです。スポーツやエンタテインメントにおける融合ポイントがまさにKirari!なんです。Kirari!の実験は中村獅童さんが出た歌舞伎、Perfumeが出演したコンサートでも行いました。コロナ禍でミュージシャンが困っている今こそ、もっと役立てたいと思っています」。

■映像ではなく通信の技術

Kirari!は大画面のスクリーン、スピーカーを使う。だが、技術の根幹は光ファイバ、中継網、無線技術といった通信技術であり、その運用技術だ。それこそ日本の通信技術のすべてがKirari!を支えている。

明治維新後に電線を引いて、電信を始め、電話が登場し、やがてインターネットが始まる。NTTの前身の通信省、電電公社が日本の津々浦々に電柱を立て、電線を引いた。それを光ファイバに引き換えたからこそ可能と

なった技術である。開発したのは川添、木下たちが中心だけれど、電柱を立てた明治期の人々の努力がなければこの技術は生まれなかった。もっと簡単に言えば全国に張り巡らされているのが電線だったら、超高臨場感の実現できなかった。

さて、木下が数十名のチームとともに開発しなくてはならない具体的な技術は4つあった。

ひとつは「超ワイド映像合成技術」だ。4Kカメラでスポーツの現場全体を分割して撮影し、それをリアルタイムでつなぎ合わせる。すると、高精細な180度のパノラマ映像ができる。

木下は「海の上を映したウインドサーフィンの映像を例に取り上げます」と説明を始めた。場所は何度目かの横須賀研究開発センタである。

「カメラ自体は4Kのカメラで、扇形に4台から5台を並べて撮影します。対象はどんなスポーツでもいいでしょう。問題は画像のつなぎ目なんです。映像自体をAIで処理しています。つなぎ目のところの形、色、照度をすべて補正して、つながっているように映像を作り直しているわけです。

録画した映像でしたら、時間をかけてコンピュータで補正すればいい。リアルタイムで自動的に行う技術を開発するには時間がかかりました。我々は通信会社なので、カメラの性能を上げたわけではありません。複数台の4Kカメラであれば原理的にはOKです。通信とシステムの技術です」。

2番目は「任意背景被写体抽出技術」だ。競技場を映した場合、選手の背景には観客席が映る。その映像から選手の姿だけを切り出すことができる技術である。

映像からの被写体抽出技術といえば、クロマキー撮影が一般的だ。バックにブルーやグリーンของスクリーンを張り、その前に人物を立たせて撮影する、いわゆるブルーバック合成である。

だが、Kirari!の技術は観客席をブルーバックにしなくとも、選手だけを切り出すことができる。それが任意背景からの抽出だ。

木下はこう説明する。

「雑多な背景から人物だけを抽出して、あたかもそこにいるかのような像にすることもできます。たとえば、バドミントンの試合です。選手の背後には観客席があります。リアルタイムで背景から選手だけを取り出すのです」。

選手だけを抽出した映像を作る場合、現場の設備を再現すると、さらにリアルに感じる。わたしは本物の卓球台が置かれた場所で、抽出技術を見た。部屋のなかに薄い膜のようなスクリーンがあり、その向こうには本物の卓球台があった。遠隔地で行われていた卓球の試合から選手ふたりだけが転送されてきて、目の前で卓球の試合をするのである。選手は立体的に映っていた。

しかし、ピンポン球が卓球台に当たる音、スマッシュの音などがリアルだったのが印象に残る。

卓球に限らず、バドミントン、ボクシングといった競技をKirari!を使ったパブリックビューイングで見るとは本物と同じ卓球台、ネット、リングを用意するだけで臨場感がぐっと増すのである。

■音 響

3番目は画像を同期する技術、「超高臨場感メディア同期技術」である。

この技術は映像や音声など複数のデータを絶対時刻を基に同期して伝送する技術だ。

撮影対象の大きさや位置関係、音声の方向などの三次元情報、そして照明などの環境情報を同期する。すなわち、撮影した瞬間に照明の明るさなどをすべて均一にってしまうから、複数のカメラで撮影しても、つなぎ目が現れないのである。コンピュータで編集しているのだが、録画ではなく、撮影と同時に自動的に同期してしまうところが画期的なのである。

4番目の技術は音響だ。

「スピーカーを置いていない客席近くにまで音が飛び出したり、実際には映っていない観客の声を再現するなど、音響効果だけで競技会場との一体感を感じる演出を可能にしてある。

直線状の2次音源（スピーカアレイ）を制御して、会場中に任意の音場を作り出す高度な音響再生技術」。

音響技術もNTT横須賀研究開発センタの一室で試験した。野球の試合を超ワイド映像で映したもので、撮影カメラがあった位置は監督や選手たちがいる3塁側のダッグアウト横だった。わたしはダッグアウトのすぐ横にいます。こんな錯覚を覚えた。

選手の目線で試合を見ていた。バットでボールを打つ、カーンという音も観客席ではなく、ダッグアウトで聞く音だった。自分自身が選手のひとりになったのと同じなのである。

驚いたのは選手の話し声だ。マイクをカメラの位置に置いておくと、ダッグアウトにいる選手がバッテリーを応援する声もちゃんと聞こえてくるのである。

「超高臨場」とはそういうことだ。

しかし、この技術は追求していくと、きりがいいのではない。たとえば、野球場をKirari!で映し出すとする。映像、音声はこのままでいい。ただ、さらに臨場感を出そうとするならば、美術、大道具、小道具も設営してしめるべきではないか。ビールの売り子も用意して、ビールを飲めるようにする。清涼飲料、ピーナッツなども用意する。客席もスタジアムのような傾斜をつけた席に座る。キャラクターグッズの売店もある…。野球場へ行った時と同じようにしてほしい。

木下は苦笑しながら「いいですね、そのアイデア」とうなずいた。

「スポーツもいいけれど、エンタテインメントの可能性も十分あります。コロナ禍ですから、どこの会場も客席を減らしているでしょう。ミュージシャンのみなさんはさぞ困っていることと思います。ライブ会場の他に、いくつかの場所でKirari!を使ったパブリックビューイングをやればミュージシャンの方々も助かると思います。演劇やミュージカルも可能です。

また、超ワイド映像ですけれど、床にLEDパネルを貼ればプールを再現することもできます。水泳の競技をパブリックビューイングすることもできます」。

木下の話は続いた。

「超ワイドの場合だと、野球、サッカーのように広がりがあるスポーツがいいでしょうね。テレビ画面ですっ



図 Kirari!の画面

と引いた映像だと視聴者は面白く感じないと思います。ただ、ライブスポーツの醍醐味は面白くない時間もあるということなんです。球場の客席に座って、ぼーっと空を眺めたりして、広い空間をそのまま感じることも発見の楽しみです。特にメジャーリーグの球場へ行くと私はそう感じます。ホットドッグの売り子さんを見たり、周りを眺めたり…」。

■誰も見たことのない映像

木下は言った。

「ウインドサーフィンの映像なんて、これまで誰も撮ったことはないと思います。漁船の舳先に小型の4Kカメラを4台、扇形に並べます。そのまま撮ったものを5Gの無線通信で船から伝送して、陸上にある編集基地のところで受けて、それを光ファイバ網で送る。高速で低遅延、高品質だからできることです。また、スクリーンにプロジェクターで映す場合は光の重なりがある部分が画像の切れ目のように見えてしまいますけれど、LEDのモジュールを並べたものであれば、すべてきれいにつながった映像が画面上に流れます（図）。

江ノ島の海岸でテストをやった時は60メートル級の台船を海に浮かべました。実際の競技会場では横50メートル、縦5メートルのLEDモジュール(50 cm×50 cm)で作ったスクリーンを置きます。海の上にスクリーンがある感じです。等身大もしくはそれ以上の大きさのウイン

ドサーフィンが海を疾走するから、見ている人たちは感激するでしょう」。

木下は付け加えた。

「いずれは家庭でもKirari!の映像がそのまま見られるようにしたいのですが、その場合は光ファイバや5G、6Gの無線通信が普及していることが前提です」。

特別連載は今回が最終回ですが、超高臨場感通信Kirari!の続編を企画中です。

野地秩嘉（のじつねよし）

1957年東京都生まれ。早稲田大学商学部卒業後、出版社勤務を経てノンフィクション作家に。日本文藝家協会会員。人物ルポルタージュをはじめ、食や美術、海外文化などの分野で活躍中。著書は



『高倉健インタビューズ』『キャンティ物語』『サービスの達人たち』『ニューヨーク美術案内』など多数。『トヨタ物語』『トヨタに学ぶカイゼンのヒント』がベストセラーに。『TOKYOオリンピック物語』でミズノスポーツライター賞優秀賞受賞。近著は『日本人とインド人』（翻訳 プレジデント社）。新刊3冊好評発売中、『あなたの心に火をつける超一流たちの「決断の瞬間」ストーリー』（ワニブックス）、『新 TOKYO オリンピック・パラリンピック物語』（KADOKAWA）、『京味物語』（光文社）。

「NTT Technology Report for Smart World 2021」の公開について

NTT研究企画部門では、2019年に始動したIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想とともに、より人々が豊かに生きていく世界を実現するためのテクノロジーについてまとめた「NTT Technology Report for Smart World」を発表しています。このたび、新たに2021年度版を公開しましたので、その概要と更新のポイントについてご紹介します。

かねきよ

兼清

むらもと

村元

ともゆき

知之

あつゆき

厚之

おおにし

大西

たかゆき

隆之

NTT研究企画部門

社会の変容に対する限界打破のイノベーションとテクノロジー

今、大きく変わる世の中（新型コロナウイルス感染症、環境破壊や気候変動）にあって、人類が今までどおりの活動を続けていくのみでは、持続的な発展すら困難であることが明らかになってきました。ビッグデータのAI（人工知能）処理や仮想通貨の拡大など、情報処理に伴うデータ量は爆発し、消費電力もますます増えてきています。この新たな変化に対して、わたしたちのテクノロジーは、人々が豊かに生きていく世界の基盤につながることをめざしています。今回、現状を打破し、豊かな未来に向けて歩んでいくために必要と考えている複合的なテクノロジーとその構成（相互の関わり）について、わたしたちが取り組んでいるIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想を軸として解説をしていきます。

IOWN構想の3つの要素、3つのプラットフォーム、5つの価値

ネットワークから端末まで、すべてにフォトニクスベースの技術を導入した「オールフォトニクス・ネットワーク (APN)」、あらゆるものをつなぎその制御を実現する「コグニティブ・ファウンデーション (CF)」、実世界とデジタル世界の掛け合わせによる未来予測などを実現する「デジタルツインコンピューティング (DTC)」、IOWNはこの3つの要素から成り立っています。

IOWNの起源は2019年4月に発表した光トランジスタであり、こうした光技術を活用したデバイスの開発の進展に伴い、IOWN構想の中では「光ダイレクト多地点接続技術」「エクストリームNaaS」「データセントリックコンピューティング基盤」という3つの共通プラットフォームが設定されています。そこから生み出される社会課題の解決と人々を豊かにする5つの価値が、「4Dデジタル基盤®」「リモートワ-

ールド」「Well-being」「環境負荷ゼロ」「新たなTrustを構築するバリューチェーン」です。その3つの共通プラットフォームと5つの価値について解説していきます。

3つの共通プラットフォーム

■データセントリックコンピューティング基盤

多種多様なデータから新たな価値を創出していくデータ中心の社会の実現が求められています。IOWNが実現するプラットフォームの「データセントリックコンピューティング基盤」では、さまざまな分野・業界のデータオーナーやミドルサービスプロバイダーに新たな価値を提供し、持続可能な社会の創出を支援するものです。特に「データハブサービス」「AIサービスプラットフォーム」「ディスアグリゲテッドコンピューティング基盤」の3つの機能でこの基盤は確立されていきます。

■エクストリームNaaS (Network as a Service)

5G（第5世代移動通信システム）のサービスエリアが拡大し、次の6G（第6世代移動通信システム）の展開を見据えている中、さらなる高速な無線ネットワークが求められています。また、大容量だけでなく、つながりつづけるネットワークが必要とされています。エクストリームNaaSの実現には3つの革新、「ネットワークサービス提供の概念の革新」「制御情報の概念の革新」「アクセスネットワークの革新」が必要となるとわたしたちは考えています。

■光ダイレクト多地点接続

IOWNのオールフォトニクス・ネットワークを使いこなし、十全に活用するために、多様な帯域に即応し、ユーザストレスのない多地点接続技術や高臨場感通信技術が必要だとわたしたちは考え、「光ダイレクト多地点接続サービス」の確立をめざしています。その実現には「ネットワーク情報の取得と提供」「リアルタイム多地点接続」の2つの技術が重要となります。このサービスが実現すると、異なる場所にいる人どうしがあたかも同じ場所にいるかのようにコミュニケーションがで

き、また、スポーツやエンターテインメントの新しいあり方を見出せるかもしれません。

5つの価値

■4D デジタル基盤®

IOWNを通じて提供する「4D デジタル基盤®」は、正確な位置（三次元情報）に時刻情報を加えた四次元的情報をリアルタイムに高精度な地理空間上に統合したデジタル基盤であり、「道路交通の整流化」「都市アセットの活用」「社会インフラの協調保全」「環境・防災にむけた地球理解」という4つの価値がポイントとなります。多様な社会活動の現状分析、未来予測を産業横断で行い、さまざまな産業基盤に提供することで、交通・スマートシティにおける人々の快適さと全体最適化の両立、社会インフラの運用・維持コストの低減、社会と自然環境の調和する社会が実現されます。

■リモートワールド

新型コロナウイルス感染症の世界的な流行を経て、多くの産業でリモート化が進められています。そのため、リモートワークやオンライン教育など、実際に集まらなくてもリアルと同じような価値を提供する仕組みが求められ

ています。わたしたちはIOWNを通じて、リモートワールドという価値を提供していきたいと思っています。ここでは「遠隔地の環境条件を融合・同一化」「人の意思・意図を伝達し能力を合成」「文化・価値観の壁の超越」「近接した活動との連携」がポイントとなるでしょう。

■Well-being

近年注目されている「Well-being」という概念は、身体だけでなく精神的、社会的に良好な状態にあることを意味しており、医学的・快楽主義的・持続的といった分類、個人的要因・社会的要因・超越的要因などいくつもの見地から人間の幸福をとらえる試みがなされています。その中で、1人ひとりが自分のWell-beingを実現できる基盤をわたしたちはつくっていきます。ここでは「Well-being 要因の見える化」「個々人に合わせた選択肢の提示」「自身の動機づけに基づく実践」「産業を超えた補完的なエコシステム」がポイントとなります。

■環境負荷ゼロ

気候変動や大規模災害、パンデミックなど地球環境の変化に対応する社会の実現は、現代を生きるわれわれにとって急務となっています。環境負荷

ゼロの価値を提供するために、ここでは「環境変化を受容する社会の実現」「次世代エネルギー流通ネットワーク」「核融合炉の最適オペレーション」「超高精度な気象予測」がポイントとなるでしょう。新たな次世代エネルギー技術の活用やエネルギーの最適な流通のためにも新たな通信基盤は必要不可欠となってくるでしょう。

■新たなTrustを構築するバリューチェーン

社会のデジタル化が進み、人はより利便性の高いサービスを受けられるようになったと同時に新たなサイバー犯罪のリスクも高まっています。情報処理がより人間社会に密接になるにつれ、サイバー世界の被害が直接的に人間に影響を及ぼすものになってしまいます。わたしたちは安心・安全な社会を下支えできる基盤をつくりたいと考えています。そこでは「より安心かつシンプルなセキュリティの確立」「信頼できる組織との連携によるグローバル化の実践」「産業を超えるコネクテッドバリューチェーン」「データを源泉とした価値創出の加速」といったことがポイントとなるでしょう。

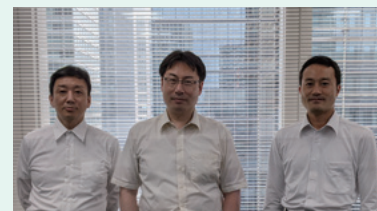
おわりに

NTT 研究企画部門では今後もテク

ノロジーの動向とNTT R&Dの取り組みについて発表していきます。今回発表した資料はNTT 持株会社HP⁽¹⁾よりダウンロードしていただくことが可能ですので是非ご覧ください。

■参考文献

(1) <https://www.rd.ntt/techreport/>



(左から) 兼清 知之/ 大西 隆之/
村元 厚之

テクノロジーとNTT R&Dの動向をまとめた「Technology Report for Smart World 2021」の冊子とオンラインPDFを発行しています。お客さまとのコミュニケーションへご活用いただければと思います。

◆問い合わせ先

NTT 研究企画部門

R&D ビジョン担当

E-mail technology_report-ml@hco.ntt.co.jp

挑 戦 す る 研 究 者 た ち CHALLENGERS



William J. Munro

NTT 物性科学基礎研究所
上席特別研究員



研究で最先端を走り続ける 失敗を恐れることなく オープンな気持ちで 研究活動を

新しい量子テクノロジーの創出をめざすNTT 物性科学基礎研究所。2020年11月米国科学誌Physical Review Xに、量子計算の高速化、量子コンピュータの小型化を可能にする量子コンピュータ回路圧縮方法の提案、2021年2月には英国科学誌Nature Communicationsに世界初の現実的な光学装置を用いた高い安全性を達成する高速な量子乱数生成器の実証がオンラインで掲載されました。広大な量子ICT分野にわたる、世界的に意義深い取り組みで量子ICTの分野をリードするWilliam J. Munro上席特別研究員に研究活動の進捗と研究者としての姿勢を伺いました



量子コンピュータから安全な通信まで、 量子ICTに広くまたがる研究活動

現在手掛けている研究について教えてください。

量子コンピュータや量子情報処理は、これまで継続的に力を入れてきた研究テーマの1つです。今現在、NISQプロセッサ（NISQ: Noisy Intermediate Scale Quantum）と呼ばれるノイズのある中規模の量子コンピュータが実現していますが、ここから量子スーパーコンピュータともいえる将来の量子コンピュータの実現へ向けて、どのように開発できるのかを研究しています。例えば、昨年、私たちは量子計算回路を圧縮することで、量子コン

ピュータが問題を解くのに必要とする時間とサイズの両方を大幅に低減することに成功しました（図1）。また、NISQプロセッサ上でどのようなアプリケーションを実行できるかも検討しています。これは今年の研究成果ですが、世界最大級となる62量子ビットの量子プロセッサを用いて、量子ウォーク*を実装することができました（図2）。量子ウォークの実証は、これら量子プロセッサのこれまでとは違った使い方を示した点でも注目されている研究成果で

* 量子ウォーク：ある粒子等が次に現れる位置が確率的にランダムに決定される運動であるランダムウォークの量子版。重要な量子アルゴリズムの1つで、拡散現象、ノイズを含む問題など、さまざまな分野での現象を記述し解析するために期待されています。



す。

最近はまだ、量子インターネットの研究にも取り組んでいます。量子インターネットとは、現在のインターネット

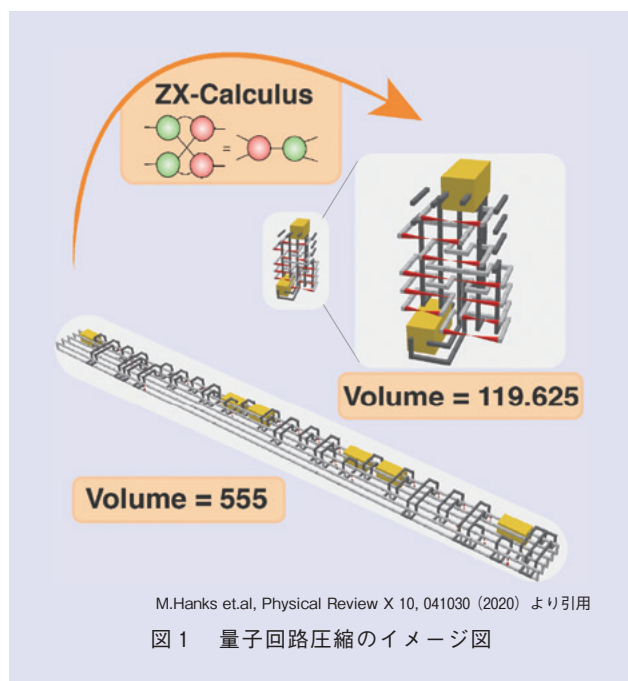


図 1 量子回路圧縮のイメージ図

のいわば量子版ですね。量子インターネットをどのようにデザインして、実際にどのように使うのかを明らかにすることが焦点となります。量子インターネットは情報伝達における新たな可能性であり、量子物理学が拓くテクノロジーの大きな可能性の1つといえます。私たちは、量子マルチプレキシング、量子ルーチング、量子ネットワークのアグリゲーションといった新しいコンセプトを導入して、その性質について研究しています。これらが持つ固有の性質は、量子通信に有効に用いることができたり、またうまく導入することで量子システムに内在する本質的な弱点を克服できることが分かってきました。この分野はまだあまり注目されていませんが、面白い研究対象です。

ちょっと毛色の違うものでは、時間結晶の研究があります。時間結晶という言葉は、もしかしたら映画『スター・トレック』で聞いたことがあるかもしれません。砂糖や塩は結晶として知られた例ですが、時間結晶は時間軸に並んで結晶構造を持ったものを指します。この時間結晶を特徴付けるのに、グラフ構造を用いることが有効であることが分かってきました。量子システムを使って時間結晶を生成すると、例えば20といった量子ビット数が小さくても百万

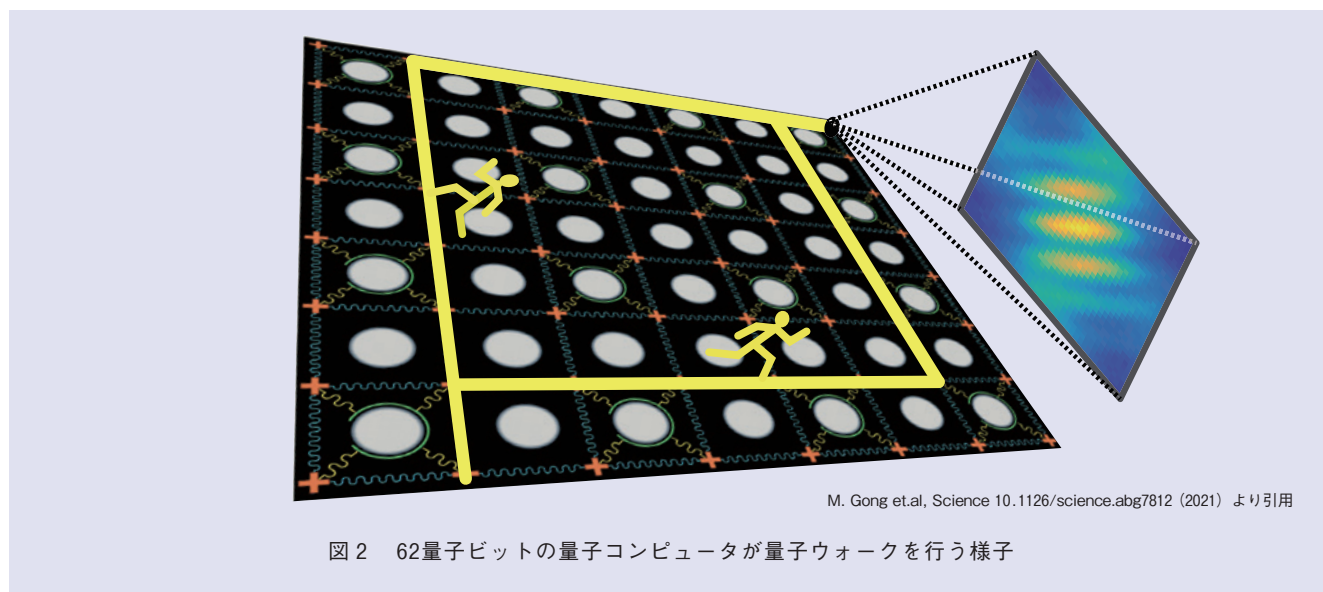


図 2 62量子ビットの量子コンピュータが量子ウォークを行う様子

ノードを超える、極めて大規模なネットワークをつくり出すことができます。そして、この時間結晶が溶けていく過程でネットワークもまた変化し、スケールフリーとなることを発見しました。スケールフリー性が示されることは重要で、例えば現在のインターネットはスケールフリーネットワークと関連しており、小規模の量子コンピュータで、地球規模のネットワークの性質を調べたりすることができるかもしれません。ワクワクするような発見で、これからこの研究がどこへ発展していくのかはまだ誰にも分かりませんし、量子シミュレーションの新しいアプローチとしても期待できます。さまざまな可能性を秘めた非常に魅力的な世界です。

もう1つの最近の成果は、量子力学的に安全な高速乱数生成についての研究です。乱数は、さまざまなICTのタスクにおいて重要な役割をになっています。量子技術により、安全性が飛躍的に向上した通信ネットワークの実現に寄与すると期待されています。IOWN構想では、光を中心とした革新的技術を活用した新しいネットワーク・情報処理基盤の構築が打ち出されていますが、私たちの研究はIOWNの量子版（qIOWN）を可能にするものだと考えています。これらの研究を統合することは、量子プロセッサと量子センサや量子時計などすべての量子デバイスを量子ネットワークへつなげた分散型の量子情報処理システムの構築へとつながっていきます。それはまさにqIOWNの実現への道と重なります。

素晴らしい研究成果ですね。量子コンピュータの研究は世界各国で盛んに実施され、注目されていますが、社会全体の利益になるような研究成果をいち早く上げるとすれば、世界各国の研究者には何が求められるでしょうか。

量子コンピュータの分野は世界的に非常に注目されており、特に欧米、中国等で先進的な取り組みが行われています。残念ながら日本は少し遅れをとっています。現在、60量子ビット程度のさまざまな量子プロセッサがつくりだされ、一部で利用可能となっています。これらの量子プロセッ

サは非常にノイズが多いものの、量子力学がもたらす可能性を探るには有用で、現在の世界最大のコンピュータでもおそらく何千年かかるといわれるようなタスクの実行も報告されています。ただ、このようなデバイスは作動中に常にノイズが発生してしまうので、ノイズによってあまり影響されないようなタスクに限定されるという側面があります。

この先、量子コンピュータが発展するためには、はるかに大規模な、できれば何百万量子ビットからなる量子プロセッサにスケールアップすることが必要で、その実現方法を見出す必要があります。どうすればできるかはまだはっきりとしていませんが、現在のNISQデバイスの実現方法とは本質的に異なったアプローチが必要だということは分かっています。そして、世界規模でコミュニティが協働することが不可欠だと私は考えています。研究をクローズドにすることは、大規模な量子コンピュータの実現を遅らせることにつながるだけでしょう。

大規模量子コンピュータが持つ本当の可能性は実はまだ十分に分かっていませんが、底知れないインパクトがあると期待できます。そのインパクトの大きさは、1940～50年代にコンピュータが社会へ与えたインパクトに匹敵するような革新的なものとなるかもしれません。今日の私たちには想像もつかないような複雑な問題も解決できるかもしれないのです。



研究に取り組み続けるために大切なこと

研究者とはどんな存在だと思いますか。

研究者は、問題を解決しようとする旺盛な好奇心を持ち、既存の考え方にとらわれることなく、物事がどのように成り立ち、機能しているのかを解明しなければなりません。ケンブリッジ辞典で「研究者」と引くと、「特に新しい情報を発見したり、新しい理解に達するために、注意深く検証する人」とあります。これは非常に広い定義ですが、新



しい情報の発見や理解に達すれば、研究としては成功ということですが、ただ、どう成功なのか、は別問題なんです。

自分自身のことに照らすと、私は自分のことを研究が好きな科学者でありエンジニアだと思っています。物事の仕組みを理解し、より良いものを設計、構築し、そしてさらに重要なことはそれを楽しむことです。また、研究は仕事というよりは、生き方そのものなので、研究を切り上げるのが結構難しかったりするんですね。研究は面白いですし、挑戦でもあります。NTTでは、大学と異なり、より長い時間をかけてグランドチャレンジといった大きな課題に取り組むことができます。そうして、研究を楽しむということが私にとっては大切と感じています。

ところで、私たち研究者にとって研究環境は非常に重要で、その中でも特に他の研究者との交流は非常に大きな意味があると考えています。研究者が集まることで、より多くの成果を上げることができるからです。研究者が同じ場所に集い、そこに1杯のコーヒーとホワイトボードがあるだけで、まさしくそこは魔法のような場所になるのです。最近では、新型コロナウイルスの感染防止のためにリモートワークが増えて環境が変化しました。電子プラットフォームでもできることもありますが、対面と同じ効果を得るには、ツールとしてはまだまだ足りないものがたくさんあると思います。

厳しい環境で活動をしているのですね。こうした中でも続けられている研究活動において、どのように課題やテーマを探しているのですか。

私は研究テーマを探す際、時間の約20%を専門分野外の研究を幅広くチェックすることに費やしています。また、さまざまな資料を幅広く読むことによって、新しく刺激的なトレンドを見出し、素晴らしいと実感したものを調べて研究活動につなげていくことがあります。それから、国際会議は最新の研究に触れる絶好の機会です。大規模な会議では、専門分野以外のセッションにも参加するようにしています。中でも特に招待講演や、チュートリアル講演では、

その分野の重要なポイントや課題を的確に示してくれるので、大変役に立ちます。

振り返ってみると、私の研究のほとんどは、トレンドを追うことではなくて、新しいトレンドをつくり出すことにフォーカスしたものです。常にトレンドの一步先を進むということですね。これは、不可能だと思っていた問題を解決するということとも深く関係しています。例えば、私のこれまでの研究の1つで、量子中継に関する研究を行ったときのことですが、当時は量子中継の性能は1つのノードから別のノードへ信号が伝達される時間で制限されると考えられていました。私たちは5年近く信号伝達時間による制限を回避しようと試みましたが、この分野のほとんどの研究者たちと同様に、この限界を取り除くことは不可能であるとの結論に達しました。結局、それを克服するためには、量子中継についての考え方を完全に変えなければなりません。つまり、これまで必須と考えられていた要素である量子メモリを取り除いたのです。当初は、あまりにも突拍子もないことでしたし、うまくいくはずがないとも思いました。しかし、簡単な計算をしてみると、うまくいく可能性があること、そして量子中継システムの新しい分野を生み出すことが分かったのです。私たちが明らかにしたのは、物理的に実現するのはとても難しいけれども、もし実現できたら量子中継器の性能を従来の方法と比較して何百万倍も向上できるということでした。大変革をもたらす可能性のある一手だったのです。



未開拓の分野には多くの可能性が埋もれている

未知の領域への挑戦は過酷ではないでしょうか。プレッシャーを感じることはありませんか。

いいえ、むしろその逆です。未開拓の分野には多くの可能性が埋もれていて、誰もがパイオニアになり得るのです。また、そこへ踏み込むことは科学技術の最先端にいることを意味します。研究者であれば誰もがやってみたいことな

のではないかと私は思います。未知の領域はどの角度から眺めても非常に大きなやりがいがあります。ただし、当然リスクもあります。自分の前に道はないということは覚悟する必要があるでしょう。

研究である以上、失敗はつきものです。最先端で研究をしているときはなおさらです。すべてが順調に進むと期待することはできませんし、問題は必ず出てきます。失敗が繰り返される場合は注意が必要ですが、失敗したからと過度な批判は避けるべきです。私の場合、おそらく引き受けたプロジェクトの20%ほどは思ったようにはいきませんでした。しかし、私たちは失敗から貴重な教訓を得ることができ、失敗のおかげで研究者として成長できると考えます。

また私は、テクノロジーには社会をより良く変える可能性があると思っています。もちろん私たちの想定内の自然なテクノロジーの進化もありますが、時には本質的な大変革を起こし得る驚異的なテクノロジーが現れることもあります。量子テクノロジーはそのような驚異的な性質を有しています。実現されれば、eコマースのさまざまな側面や、情報をどのように動かし、保存するのかということを根本から変えざるを得ないでしょう。つまり、非連続な技術革命を意味します。一方、量子技術はプライバシー保護の手段として量子の法則を活用するなど、コンピュータの処理能力に新しいチャンスももたらしてくれます。科学技術には必ず多面性があり、私たちの想像を超えたさまざまな応用があることも忘れてはいけないことだと感じます。

後進の研究者に一言お願いいたします。

まず、オープンな心を持ちましょう。そして、失敗を気にかけないことです。自分が面白いと思える問題を選んで、それに挑戦することを楽しみましょう。幅広くいろいろな文献を読んで知識を広げることも大切だと思います。新しい分野を開拓することの助けにもなります。私自身は、時間の20%ほどを新しいスキルと知識の開発に費やしています。

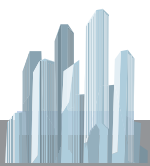
新しい分野開拓の方法に1つの答えはありません。私自

身は5年ぐらいのペースでテーマの開発をしています。現在の研究テーマに力を注ぎつつ、新しいテーマを同時並行で開拓していきます。国際会議に出席したり、気軽に読める科学記事を読んだりして、自分にとってエキサイティングな分野を見つけてください。そこから面白い問題を見出せるか、挑戦できそうか、そして自分で挑戦してみたいか、ということのみていけば良いのではないかと思います。

新しい分野開拓や新しい挑戦課題で迷ったりすることや、考えがうまく整理できなかったり、論文書きがうまくいかないなどがあるかもしれません。そんなとき、周りの研究者と話をしてみることも有益です。新しい分野のアドバイスがもらえたり、論文の構想のアイデアのヒントが得られることもあると思います。ただ、そのためにはまずは自分から話しかけてみないことには始まりませんし、そしてどうするかを決めるのもあなた自身です。

研究には必ず山や谷があり、すんなりと成果が出るときもあれば、全くうまくいかないと思うときもあります。でも、それは自然なことなのだとすることを忘れないでください。私はいつも複数の違うテーマのプロジェクトを持つことにしています。そうすることで、1つのプロジェクトがうまくいかないときは、もう1つのテーマに集中することもできます。うまくいかないプロジェクトから一度距離をおくことで、頭がスッカリとリセットされ、もう一度取り組みむときに新しいアイデアが出てくるとことは実はよくあることなのです。最後に、あなたの周りには話をしたり影響し合える研究者がたくさんいることも覚えておいてほしいと思います。私たち先輩の研究者はあなたを支援するためにここにいるのです。

明日のトップランナー



NTT未来ねっと研究所

井上 武 特別研究員

少し未来の情報通信ネットワーク像を提示。 大規模計算基盤のための光パス設計技術の研究

現在の情報通信ネットワークの課題として、「柔軟性の欠如」があげられます。例えば拠点間で新たに光ファイバ回線を設定しようとする場合、かなりの手間が掛かるでしょう。今回は、自由に切り替え可能な柔軟なネットワークの構成をめざして「大規模計算基盤のための光パス設計技術」の研究に取り組む井上武特別研究員にお話を伺いました。

◆PROFILE：2000年日本電信電話株式会社入社。科学技術振興機構 ERATO 湊離散構造処理系プロジェクトERATO研究員（2011年6月～2013年6月）、NTT未来ねっと研究所（2013年7月～現在）、早稲田大学 基幹理工学部 非常勤講師（2016年9月～）、NTTコミュニケーション科学基礎研究所（2020年3月～）。



5年先、10年先のネットワークを 見据えた技術開発

◆NTT未来ねっと研究所ではどのような研究を行っているのでしょうか。

これまでNTTが構築・管理・運用してきた都市間を結ぶ中継伝送路は、トラフィック予測に応じた容量の光ケーブルと伝送装置により構成されています。このトラフィックについては、従来は、伝送路が構築される都市間単位でみると、例えば「朝から徐々にトラフィックが増えていき、夜寝る前にピークを迎え、深夜にはトラフィックが少なくなる」「大手検索サイト、有名動画配信サイトなどとの間の通信が多い」など特定の傾向があり、ある程度予測することが可能でした。ところが近年ではユーザの行動も多様化し、システムや端末も高機能化・高速化したため、トラフィックも年々数十%の勢いで増加傾向にあるとともに、トラフィックの変動も多様化することで予測しづらくなり、トラフィックが既設の中継伝送路の容量をオーバーする懸念が高まってきました。

こうした懸念に対してこれまでは、中継伝送路の新設・増設で対応することになりますが、そのために数カ月単位の時間が必要となるばかりか、トラフィックの予測精度に依存して早晚同様な容量不足が発生します。そこでこうしたトラフィックの変動に対して中継伝送路を柔軟に構成することで、新たなアプリケーション等による通信の可能性をさらに広げることができるのではないか、という考え方が出てきたのです。

柔軟なネットワーク構成を実現するため、NTT未来ねっと研

究所では構成技術の研究を進めています。

研究所内で光の専門家が集結している「トランスポートイノベーション研究部」では、1本の光ファイバの中を通る光の数を増やしたり、光ファイバの中の光の通り道（コア）の数を増やしたりすることで広帯域の光信号を送る研究をしています。

そして私の所属する「フロンティアコミュニケーション研究部」では、光ファイバ内の光信号を別の光ファイバへ最適に切り替える技術や、中継伝送路網の中で光信号の経路を最適に切り替える技術の研究開発を行っています。本日はその中から、「通信ビルにおける光ファイバ配線切替装置群の効率的な網構成技術」および「光パス伝送モード自動最適化技術」の2つの技術について簡単に紹介します。

◆「光ファイバ配線切替装置群の構成技術」とはどのような技術なのでしょう。

通信ビルから他のビルや他の事業者まで新たに光伝送路を通す場合を考えてみましょう。

例えば図1の左図では、左下から入ってきた赤色の光ファイバを右下の光ファイバにつなごうとしています。しかし、途中の配線切替装置は、3つのバツ印で表されるように右下へとつながられません。これを「ブロック」、または日本語で「閉塞」と言いますが、そうした場合、従来のアプローチでは右図のように切替装置を追加して開通させることを考えていました。しかし、この方法では高価な配線切替装置を数多く設置する必要があり、経営上好ましいとはいえません。

そこで、最適な配線切替装置数とその配置を数学的な方法で決定する技術を開発しました。具体的にいうと、今まで階層構造を取ることが一般的であったネットワークの構成を見直し、下位

から入ってきた光信号が上位を経由せずに折り返すことを許可したり、ブロックの発生を完全に防ぐのではなく、例えば100万分の1など運用している間には「ほぼ起こりえない」といえるくらい低い発生確率である場合には許容したりすることで、効率的な網構成を探索します。

これには数学の中でも、特にパズルを解くような分野の数学を活用しました。「離散数学」や「グラフ理論」といった言葉をお聞きになったことのある方もいらっしゃるかもしれません。

この技術により、実際に、光ファイバが2万本入っている状態で毎年数千件の接続要求が寄せられると想定したネットワークにおいて、5時間の計算により切替装置の台数を42%削減できることを証明しました。

◆「光パス伝送モード自動最適化技術」とはどのような技術なのでしょう。

「光ファイバ配線切替装置群の構成技術」により接続先に常に空いているポートが1本以上存在することが保証されたとしても、すぐに光伝送路を開通することができるとは限りません。

まず、光信号を送受信する伝送装置のベンダが異なる場合、送受信の伝送装置が対で動作する前提であり、ベンダ間で標準以外の部分の規格が異なるため、従来は通信を行うことができません。しかし、送信先を切り替えることを考えた場合には、異なるベンダの装置であっても標準的なインタフェースを使用して制御する必要があります。また、要求する速度や伝送距離、通信品質に応じて通信を最適化する必要もあります。例えば、距離が近いにもかかわらず強力なレーザを発射すれば、受光器が壊れてしまうでしょう。また、隣接する信号との干渉を防ぐ必要もあります。

そこで、標準的なインタフェースのみを使用して通信に使用する伝送モードを自動で最適化できる技術を開発しました。

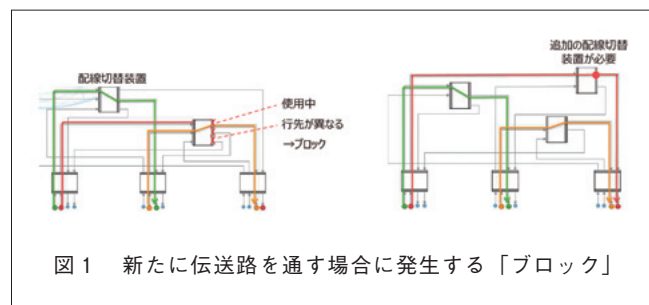


図1 新たに伝送路を通す場合に発生する「ブロック」

具体的には、図2に示すように、まず弱い信号である初期設定用光パスで伝送路の状態を把握します。その後、光協調制御コントローラに拠点Aおよび拠点Bから通信に関するパラメータ情報を収集し、最適なパラメータの組み合わせを計算し、エンドユーザの要求に応じた光パスを開通させるという流れです。

これらの制御はソフトウェアにより行われているのですが、ソフトウェアによりネットワークを定義するSDN (Software Defined Network) などの興隆に加え、各分野でのオープンソース化への動きもあり、現在はこうした技術の必要性がますます高まっています。

先ほどの技術が数学的なアプローチであったのに対し、こちらの技術はソフトウェア的なアプローチといえるでしょう。

さらに実用性の高い技術に取り組む

◆両技術により、今後どのようなことが可能となるのでしょうか。

これらの技術により、刻々と変化するネットワークの状況に対して、常に最適にネットワークを構成することが可能になります。IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) の3つの主要技術分野の1つである「オールフォトニクス・ネットワーク (APN)」もこのような考え方から立脚しているのではないかと思います。

例えば遠隔会議システムは、昔に比べれば画質は格段に向上したものの、実際に会うこととはやはり差があります。また、や

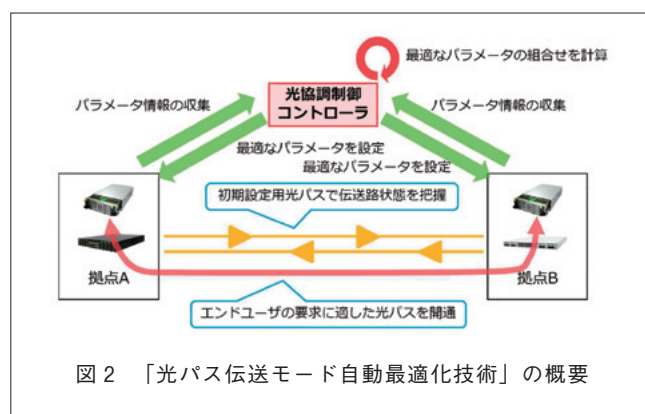


図2 「光パス伝送モード自動最適化技術」の概要



り取りに多少の遅れがあるため、話始めるタイミングが重なってしまったりと、やはり「離れている感」はまだ残っていると個人的には思っています。その点、APNでは人間が処理できる情報量をすべて送受信することができるため、「リモートでもできる」から「リモートであることを意識させない」という時代になるのではと期待しています。また、現時点ではまだ難しい、例えば遠隔手術のような通信の遅れにシビアなアプリケーションも利用できるようになるのではないのでしょうか。

◆今後の方向性についてはどのようにお考えでしょうか。

今回は2つの技術を紹介しましたが、実はどちらもまだ実用化には至っていません。むしろ「やっとスタート地点に立った」といったほうが近いでしょう。

例えば「光ファイバ配線切替装置群の構成技術」では、引き込む光ファイバの数が固定されている場合には有益ですが、ネットワークは絶えず大きくなるものです。大きくしようとしたときには設備を追加したり組み替えたりといった必要が生じますが、すでに配線切替装置には光信号が走っています。パケット通信と比較しても光通信を止めたり移動したりすることは難しいため、稼働したまま拡張するような方法を探りたいと思っています。難しい問題ですが。

また、「光パス伝送モード自動最適化技術」にも課題はあります。今回は伝送路の両端、送信側と受信側の設定のみに話を限定しましたが、実際の光通信は両端だけで実現できるものではありません。例えば20～30キロメートルを超えると、光信号が弱まるため「アンプ」と呼ばれる装置で信号を増幅する必要があります。



(今回はリモートにてインタビューを実施しました)

ます。その他、「フィルタ」と呼ばれる装置など、一般的には、経路上のすべての機器を併せて制御しないと最適な通信は実現できません。

さらに日々の保守運用プロセスと合わせて考えると、かなりいろいろな条件が入り組んだ複雑な問題といえます。これはほぼすべての関係者が抱いている実感ではないでしょうか。

◆これから情報通信ネットワークの研究に組み組みたいと思っている方へメッセージがあればお願いします。

NTTの研究環境は非常に充実しています。特に情報通信ネットワークに関しては、必要な設備はほぼそろっているといえるでしょう。例えば光伝送に関する装置、光信号を送信する装置などは、以前に比べてかなり安価になったとはいえ大学の1研究室でそろえることは難しいでしょう。

その点、NTTでは実際の装置を使用して研究や検証を実施することができます。これはNTTグループの大きな強みといえるでしょう。

「情報通信ネットワーク」と聞くと、電気信号を扱う電子工学的なイメージをお持ちの方もいらっしゃるかと思います。しかし、私の研究に数学や情報工学などの色合いがあることから分かるように、非常に幅広い分野といえます。もちろん電子工学は重要な分野ですが、現在の情報通信ネットワークは「ただ信号を送るもの」ではないため、それを管理するソフトウェア・プログラミングの技術、数学的な裏付け、時には経済学的な観点などさまざまな知見が必要となります。

自分の知見を社会インフラの一部として実現する、自分の知見を活かして社会インフラを支える、ということに魅力を感じる方がいらっしゃれば、ぜひ挑戦してほしいと思っています。

docomo InsightMarketing

リサーチとプロモーションを相互連携させた 高度なソリューションで 企業のマーケティング活動を支援する

ドコモ・インサイトマーケティングは、「個客理解」中心のマーケティングプラットフォームや、新型コロナウイルス感染対策において一躍知名度が向上したモバイル空間統計®の提供を通じて、ドコモグループのデジタルマーケティングビジネス拡大に取り組んでいる。大きく変化する社会において、生活者理解に取り組む思いを三毛孝彦社長に伺った。



ドコモ・インサイトマーケティング 三毛孝彦社長

マーケットリサーチ・リサーチデータ 活用事業とプロモーション事業を展開

◆設立の背景と目的、事業概要について教えてください。

ドコモ・インサイトマーケティング（DIM）は、大規模な顧客基盤・情報を有し、これらを活用したマーケティングビジネスへの進出をめざすNTTドコモと、マーケティングリサーチの有力会社であり、データの分析・価値化に関するノウハウを有する株式会社インテージ（現 株式会社インテージホールディングス）の出資により、スマートフォン等を活用した企業のマーケティング支援事業を新たに展開することを目的に2012年4月にジョイントベンチャーとして設立されました。

事業内容としては、①1000万規模のモニター会員（dポイントクラブ会員、インテージ独自モニター）を活用したアンケートによる高品質なリサーチ「マイティモニター」、②ドコモユーザの実行動データとリサーチデータを組み合わせ、マーケティングPDCAをワンストップで提供するプラットフォーム（DMP: Data Management Platform）「di-PiNK」、③NTTドコモ契約の携帯電話がアクセスしている基地局エリア情報を基に、時間帯別・居住エリア別に推計した人口統計「モバイル空間統計®」等のリサーチ・データ活用事業、④dポイントクラブを対象にしたアンケート形式のプロモーションで、ドコモプレミアパネルとしての商品提供の他ダイレクトメールやサンプリングなども展開する「対話型プロモーション」、⑤dポイントを活用したdポイント加盟店での販促サービス「ポ

イントボーナスチケット」等のプロモーション事業を展開しています。

◆まもなく会社設立10周年を迎えますが、事業を取り巻く環境はどうですか。

会社全体的にみると、収益、営業利益ともにこの5年間で約2倍の伸びとなっており、急激な成長とはいえないまでも、結果として6期連続での増収増益を達成し、着実に手ごたえを感じています。とりわけ、前述のDMP関連はここ5年間で約8倍、モバイル空間統計®は約4倍の成長を遂げるなど、今後も成長させたいと考えているところです。

こうした良い状況が続く中で迎えた2020年度は、新型コロナウイルスの影響で市場の先行きの不透明感が増す中、さまざまな分野の企業においてプロモーションや販売促進関連の費用を削る傾向が強まり、その影響を大きく受けたプロモーション事業もかなり苦戦を強いられました。しかし、新型コロナウイルスに起因するさまざまな環境変化は、新しい生活様式ニューノーマルの定着や、それに伴うマーケット、顧客の変化をしっかりと把握していこうというクライアントの新たな動きを生み出し、結果としてモニターを含む調査関係の新たな需要創出につながることによってプロモーション事業の苦戦をカバーすることができました。2021年度についても、当面同様の傾向が続くものと予想していますが、例えば、ワクチンの接種状況やオリンピックのようなイベントにより環境が一変する可能性もあり、これにどう柔軟に対応していくかという点が課題と考えています。

当面はこの短期的な課題に対応していきつつ、中期的な視点で事業そのものを取り巻く課題もあります。マーケティングリサーチ市場は約2000億円規模で、年2%程度の成長を続けている市場ではありますが、この市場において、どのようにビジネスをスケールさせるかということが課題になっています。調査のみでは限られた市場ですが、調査結果を活用してプロモーションに展開していくことで隣接する市場でビジネス展開が可能となります。また、調査結果も2次加工することで、多様な業界におけるマーケティングへの活用や、その隣接市場への展開も可能となります。これはDIM単独ではできない部分もあり、パートナー企業との連携が不可欠となることから開拓を進めていきます。



◆新型コロナウイルスの影響を受けつつも順調にビジネスが進んでいるようですが、その要因は何でしょうか。

DIMの保有するデータは、dポイントクラブを含むNTTドコモの顧客基盤・情報がベースであり、大規模で年齢や性別等の偏りの少ないデータといえます。この基盤にアンケート情報や外部メディアの接触情報等を統合し、インテージのデータ解析、情報の価値化のノウハウを活用することで、“顧客理解”中心のマーケティングプラットフォームをお客さまに提供することができます。

さらに、例えば旅行会社がマーケット調査結果に基づいてキャンペーンを行い、モバイル空間統計®を活用したキャンペーンによる旅行地への人流予測を行ったうえで効果測定し、次の施策に結びつける、といったようにPDCAをワンストップで回すことができることも大きな付加価値になっています。

また、モバイル空間統計®についていえば、新型コロナウイルス感染拡大を防止するため、政府や各自治体が入人流を抑制する目的で、定量的に入人流の変化を示すためのツ-

ルとして、大いに活用をいただくことができました。新聞やテレビ等のマスメディアからも、日々の変化を示す指標として引き合いをいただき、これまでの都市計画、防災対策、観光促進、商圈分析といった目的とは全く異なる目的で大きく注目されました。基本的にtoBのサービスではありますが、一般の皆様にも広く認知をいただくことができましたと思います。

DIMの事業が少しずつ認知されるようになるとともに、これらの付加価値をお客さまやパートナー企業に認めていただけるようになってきたことが、業績に結び付いてきたのだと思います。

◆今後の展望についてお聞かせください。

マーケティングリサーチの市場のみでは、急激な成長を望むことができませんがDIMが提供するDMPや位置情報を活用したソリューションを組み合わせることにより、クライアントのマーケティングニーズにワンストップでこたえることができるのではないかと期待しています。ただ、こういった取り組みはDIM単独では限界もあり、パートナー企業との連携が重要になってきます。パートナー企業の開拓に注力し、ともに新しい分野、事例を創り出していきたいと考えています。

また、これまでのビジネスモデルは、単発でのリサーチ、プロモーション等がビジネスのベースとなっています。そのため、2020年度のコロナ禍による環境の変化に限らず、毎年のようになんらかの外的要因の影響を大きく受ける可能性があります。会社業績に顕著な影響を与えるおそれが生じかねません。こうした状況は経営上の課題であると認識し、これを解決するための方法として、サブスクリプション型のビジネスモデルを組み合わせることにより、このリスクを軽減したいと考えています。まだまだ検討を始めたところではありますが、これを加速することで安定したビジネス展開を図るようにしていきたいと思っています。

モバイル空間統計[®]で新しいマーケティング

エリアマーケティング部長

鈴木 俊博 さん

◆担当されている業務について教えてください。

モバイル空間統計[®]を活用したデータ解析から、パートナー開拓、営業活動まで全般を担当しています。

モバイル空間統計[®]は、スマートフォン等のつながる仕組みを利用して、ある時間にエ



鈴木俊博さん

リア内に存在する端末数からその時々的人口を推測するもので、NTT ドコモでは2008年から取り組んでいます（商用開始は2013年）。DIMでは、NTT ドコモが作成したモバイル空間統計[®]を基に、それを、例えば、地図上に示した「モバイル空間統計[®]人口マップ (<https://mobakumap.jp>)」のようなサービスを作成・提供しています。

モバイル空間統計をイベント情報と重畳することでイベント会場周辺の人流調査、天気情報と重畳させることで小売店における当日の売れ筋情報の予測、観光地への移動情報と組み合わせることで帰路の高速道路の渋滞予測等が可能となります。こうしたデータの“加工”により、小売・流通業、交通インフラ、観光・旅行業、防災・都市計画、イベント、不動産、投資といったあらゆるシーンにおいてデータの活用が見込まれます。

DIMでは、パートナー企業と連携することで、さまざまな業界や自治体様の課題を解決できるようにモバイル空間統計[®]に“加工”を加えて提供しています。また、モバイル空間統計[®]をパートナー企業のプラットフォームにオンライン連携することで、お客さま向けにさまざまな情報サービスも提供しています。

◆ご苦労されている点を伺えますか。

2013年から取り組んでいるモバイル空間統計[®]が、どのようなもので、どのような効用があるかをなかなか理解してもらえず、説明に苦労してきました。しかし、コロ

ナ禍で緊急事態宣言が発出されたターミナル駅等の人口の増減が報道番組等に登場し、画面に「NTT ドコモ提供」と文字が露出してくることで、モバイル空間統計[®]の認知は一気に向上しました。

一方で、別の報道番組では他社提供の文字も出ており、そちらのデータと混同されることが多くなり、今度はこの説明に苦労することが多くなってきました。結果の対象は同じ人口なのですが、数字の精度やそれに伴う応用の範囲が大きく異なります。他社はGPSにより位置情報を把握しています。基地局による位置情報の把握の場合と比較して、GPSのほうがエリアを特定する範囲が細かいため、GPSを利用した人口統計のほうが高精度と誤解されてしまいます。ところが、基地局位置情報を利用したほうが実態に近いものになります。理由は、個人を把握するのは1つひとつのエリア特性程度が高いGPSが良いのですが、集団を把握するためには位置情報の連続性や量が重要で基地局位置情報を利用するほうが優位なためです。基地局位置情報はつながる仕組みの根幹の技術のため、スマートフォン等の電源さえ入っていれば継続的に取得することができるのですが、GPSの場合は、利用者がGPS関連アプリをインストール、データの利用許諾をし、さらに、アプリ自体が動作していないと位置情報を取得することができません。つまり、位置情報把握がアプリの利用状況に大きく依存し、エリアや時間に応じて位置情報が取得できる状況が違ってきてしまうため、原理的に、エリア間比較や時間帯別の比較ができません。一方、基地局位置情報を利用しているモバイル空間統計[®]の場合は、電源さえ入っていれば、エリアや時間にかかわらず常に位置情報を取得できるため、より実態に近く、精度の高い人口を推計できます。

このようなことを、いかにお客さまやパートナー企業に簡単に分かりやすく伝えていくかということを試行錯誤しています。

◆今後の展望について教えてください。

モバイル空間統計[®]開始当初から、「モバイル空間統計[®]で世の中を変える」をキャッチフレーズとして、「数千万の動態情報」と「インテリジェンス」を活用して、産業と都市基盤の高度化を行い、豊かな街づくりを行っていくことをめざして活動してきました。

そこに向けて、1つでも多くの事例を増やしていくことに注力していきたいと思います。より多くの分野でモバイル空間統計[®]を活用していただくためにも、それぞれの分

野に精通したパートナー企業との連携は欠かせません。そのためにも、さまざまなアイデアを携えてパートナーを開拓していくことを推進していくつもりです。

ドコモ・インサイトマーケティング ア・ラ・カルト

■放課後バドミントン部

月に数回、終業後に任意のメンバーが集まって公営の体育館でバドミントンをしているそうです。横で見覚えのある顔の人たちがフットサルを行っていて、それがインテージ（親会社）のメンバーだと分かったら、競技種目が変わってしまうメンバーも登場し、なんとムルイ雰囲気ของทีมです。終了後はもしかしたらこちらがメインかもしれない、行きつけの居酒屋での懇親会。コロナ禍で懇親会ができないばかりではなく、体育館の開館時間短縮や閉館でバドミントンすらもできない状況とか。オリンピック後の再開をめざして、イメージトレーニングに励んでいるメンバーもいるそうで、やはりバドミントンがメインなのですね。

■ランチ探検隊

2020年11月に新橋から池袋へオフィスに移転しました。リモートワークの多い中の移転とはいえ、社員の気になるところはやはり食生活。新橋が特に恵まれていただけに、どうなるものかと池袋に来てみると、安くていい店がたくさんあって安心したとのこと。出社した社員がランチで訪問した店の名刺、メニュー、コメント等を休憩コーナーにあるホワイトボードに地図とともに貼って情報交換しています（写真1）。ただ、客層が新橋のサラリーマンから、池袋は若者中心なので料理もコッテリ・ガッツリ系が多いようです。「安くておいしい寿司が食べたい」といったボヤキが聞こえてくるとかこないとか。



写真1

■オンライン懇親会

リモートワークが中心で、どうしても社員どうしのコミュニケーションや雑談がやりにくくなり、また、人事異動後も新チームに溶け込みづらくなっているのを、会社主催でオンライン懇親会を行っているそうです（写真2、3）。特徴は全社員一斉参加ではなく、身近なコミュニケーションを目的に部署単位で開催することです。とにかく全員が参加できるように、メンバーを変えながら少人数の部屋を設定したり、ゲーム大会のようなイベント形式にしたり、部署ごとに趣向を凝らした企画が盛りだくさんだそうです。中には企画・準備段階からすっかり楽しんでいる幹事担当の社員もあちらこちらにいるようです。



写真2



写真3

教育現場のDX推進に寄り添う「まなびポケット」 “虎の巻”を産んだデザインの力

NTTコミュニケーションズが提供するクラウド型教育プラットフォーム「まなびポケット」。教育へのICT導入の関心が高まり、まなびポケットが多くの学校で導入される中、教育現場ではうまく活用できない場面があるという課題に突き当たっていました。ここではデザインスタジオ・KOELが教育現場を直接リサーチし、まなびポケット導入をサポートするための“虎の巻”を制作した経緯を紹介します。

教育現場をサポートするクラウド型教育プラットフォーム「まなびポケット」

2019年に文部科学省から発表された「GIGAスクール構想」では、生徒1人にタブレット端末と高速大容量の通信ネットワークを整備することを目標としていました。さらに、コロナ禍での学校教育の環境変化など、学びを止めないための教育現場でのICT導入が急速に求められていました。学校教育の課題をサポートするべく開発された「まなびポケット」はNTTコミュニケーションズ（NTT Com）が提供しているクラウド型教育プラットフォームです。デジタル教材の提供からシングルサインオンによる簡単なアクセスと強固なセキュリティの両立、生徒情報の管理の一元化やコミュニケーションツールなど、教育現場に求められる機能を備えたサービスとなっています（図1）。

2021年6月現在、まなびポケットの申し込みID数は200万IDを突破しました。今後も「まなびポケット学力調査（CBT）」や、定額制コンテンツサービス「まなホーダイ」など教育現場のニーズを満たす新たなサービスも展開される予定です。

便利なのに利用されない…… 教育現場で何が起きているのか？

2020年春、NTT Comのデザインスタジオ・KOELに、社内のまなびポケットチームから、とある相談が届きました。その内容は「着実にまなびポケットを導入する教育委員会が増えているが、教育現場の先生が毎日使い続けてくれないケースが見受けられるので、これを解決する方法はないか」というものでした。しかし、社内で話を詳しく聞いてみると、主にコミュニケーションをとっている教育委員会視点での課題はクリアにとらえられていますが、実際の教育現場での課題を、実感を持ってとらえられていない

ことがみえてきました。

NTT Comのビジネスは導入して終わりではなく、それが正しく使われ続けることで成立するモデルです。そのためにもKOELがまず行ったのは、サービスが利用されない原因を突き止めるために現場の先生方へのデザインリサーチでした。

みえてきた現場の先生方の「苦悩と現実」

まず、実際にまなびポケットを導入していたいくつかの小学校に赴き、先生方から直接ヒアリングを行いました。聞こえてきたのは、確かにコロナ禍に伴うデジタル教育の推進によって一時的にまなびポケットが利用はされたもの

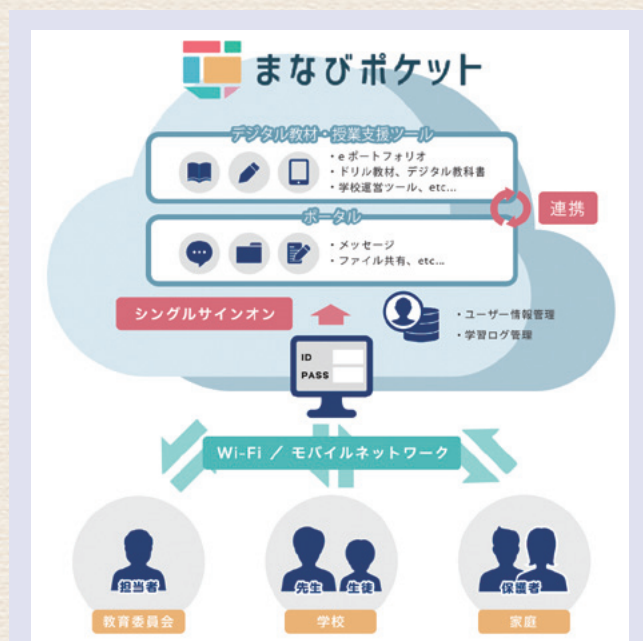


図1 まなびポケットサービス概要

の、峠を越え、生徒が通常どおり登校できるようになると途端に使わなくなった、という声です。つまり、教育現場では一時的に利用はできていた、しかし利用のハードルが上がっていったことが考えられます。

では、もしかすると、そもそも現場の先生方はまなびポケットのようなICTに興味がなかったのでしょうか。実際に聞いたところそうではなく、現場にはデジタルを教育に導入しようという意志が確実にあり、中には学校内での利用を普及させるコミュニティに自主的に参加する先生も見受けられました。そうしていくつかの学校で詳しく話を聞こううちに、まなびポケットの浸透を阻害している大きな2つの課題がみえてきました。

1番目はまなびポケット導入にあたり、ICTスキルが高い先生にしわ寄せがいくってしまう構造です。デジタルツールのリテラシーが高い一部の先生に対して、学校内でのサポートが一極集中してしまい、優先的にタスクが集中し機能不全が発生することです。結果、キーパーソンとなる先生が疲弊し、学校内での普及活動がストップしてしまうのです。

2番目の課題は、そもそも先生方があまりにも忙しすぎるということでした。昨今では日本全体の教員の長時間労働が問題視されていますが、働き方改革を推進するためのリソースすらも捻出できない、というのが現場の実情です(図2)。必要なツールの選定などを行う時間もなければ、レクチャーを受ける時間もないなど、先に紹介した普及コミュニティに自主参加していた先生も自分の活動が広まっていくとも思えず、半ば諦めの表情がみえていました。

結論からいえば、2つの課題を短期間で正面から解決することが難しいのは明らかです。先生方のリテラシーを向

上させることも、労働量を削減することも、どちらも容易なことではありません。ならば「先生方のリソースを考慮しながらも、リテラシーの高い先生を中心に、その他の先生方をICT導入のサイクルに巻き込む手法をみつける」ことこそが、まなびポケット利用推進のために私たちがやるべきことだと考えました。

現場の声と経験値の結晶「虎の巻」制作過程

ここでKOELのメンバーは、プロジェクトのゴールを、手法をまとめて1つの共有可能な資料「虎の巻」を制作する方針を決定しました。「虎の巻」とは学校内にICTを取り入れるためのTIPS集です。「虎の巻」を通じて校長先生や管理職にあたる先生にまなびポケット導入に対する理解を醸成し、現場の先生に直接「虎の巻」を利用してもらう戦略です。

方向性が固まった段階でまず着手したのが「虎の巻」のプロトタイピングです。この段階で得られた情報を基にスライドを起こし、プリントして現場の先生が利用できる状態をつくり、実際に先生方にヒアリングを行いました。特にICTに対するスキルが高い先生に対して、周囲の先生にどのような流れが教えやすいか、具体的な内容を探っていました。

プロトタイピングと同時期に「虎の巻」利用者のペルソナづくりも並行して行っています。リテラシーや考え方、態度など、先生によってタイプが異なります。また、ICTに対する学校自体の方針や空気感にもタイプが存在してい

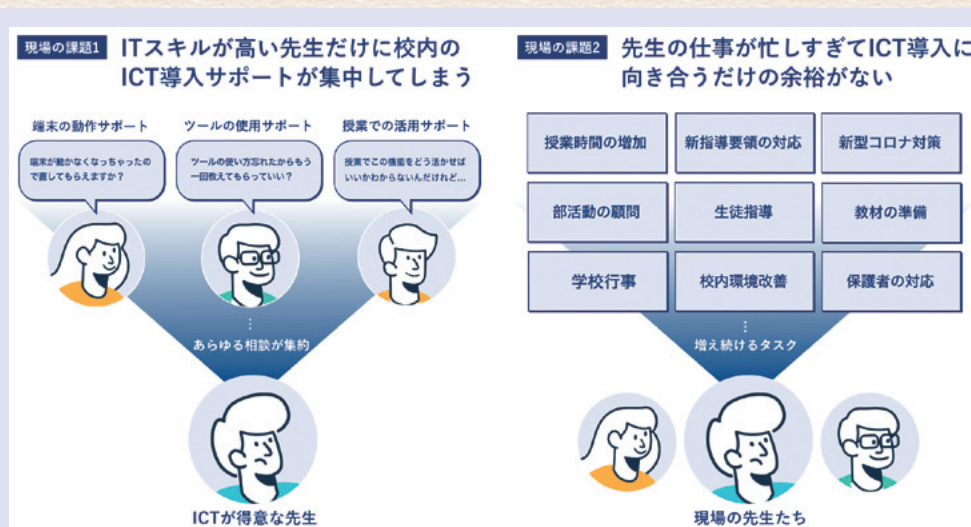


図2 先生を取り巻く現場の課題

ます。先生や学校によって異なる細かい課題を整理し、「虎の巻」があらゆる課題に回答できるよう、対応するキーアクションを設定する必要がありました。学校ごとのICTの浸透具合を大きく4つの分類、「得意な先生が複数いる」「数人の得意な先生が先陣を切ってくれる」「苦手な先生を手厚くサポートする必要がある」「あまり浸透していない」に分け、各段階の課題と対策を検討しました（図3）。

プロトタイピングとペルソナづくりという検証を経た後、最終的な「虎の巻」をKOEL内で制作します。冊子をつくるにあたって、どのような利用環境で資料に触れるのか（紙、タブレットなど）、どのような文章の書き方が良いのか、文字の適切なサイズなど、検証で確認しながら最終的なデザインを制作しました（図4）。



図3 学校のICT浸透レベルを4段階に分類

実際の先生方からのフィードバック内容は誌面にも反映されています。「キャッチーなイラストがあることで資料を読み進めたい」という声にこたえて、全体のイラストの分量を厚くし、心理的なハードルを下げるよう心掛けました。また「具体的な効果が知りたい」という意見に対しても、実際にあった過去の事例やICT採用による現場の変化を盛り込むことで、まなびポケット導入に対する障壁を下げています。

現場の喜びの声とさらなるKOELの支援

「虎の巻」完成後は教育委員会を經由して各学校に配布されました。一部の校長先生からは「冊子があることで先生に情報を直接渡しやすくなり、資料ベースでコミュニケーションが取れるようになった」との喜びの声をいただきました。また、ほかにも「こういう資料が必要な先生こそPCに触らないケースが多く、紙資料として渡せる設計なのが良い」と評価をいただきました。白黒印刷を推奨する学校も多いため、白黒印刷しても見分けられるカラー展開を採用したデザインが効果を発揮した例です。

「虎の巻」に続き、別のプロジェクトも立ち上がりました。KOELでは具体的にICTをどう活かすか定番の使い方をまとめた「毎日のICT活用お助けレシピ」を制作しました（図5）。朝礼での気軽な交流を習慣づける「朝ノート」や、授業の感想や振り返りを共有する「グループフレクショ

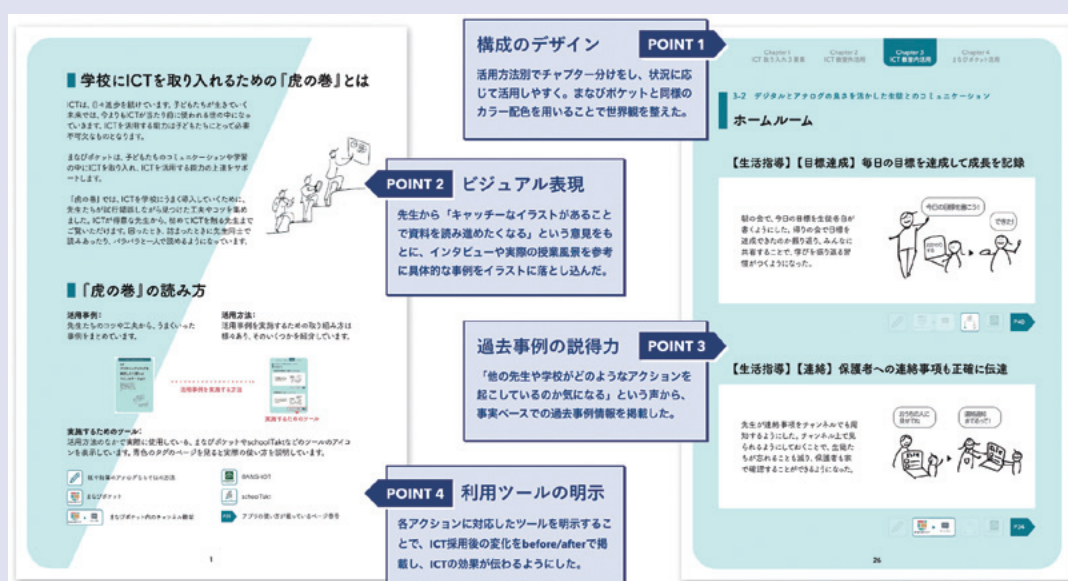


図4 「虎の巻」の一部ページとフィードバックから反映されたポイント



図5 「毎日のICT活用お助けレシピ」の一部ページ

ン（ぐるり）」など、具体的なツールの利用方法から期待される効果をまとめた内容になっています。

この「毎日のICT活用お助けレシピ」を活用するためには、先生と学校全体で教え合う文化の醸成が不可欠です。そのために検討したものが「教え合いプログラム」です。こちらは日報の配布など毎日の校務を通じた状況づくりや教え方の型化、相談可能な関係性づくりなどを2日間の研修と、追加の実践強化期間によって定着させることを目的としたプログラムとなっています。このプログラムの実施の結果、ある学校の2週間のツール利用が0件から42件に伸びたという成果もありました。

「虎の巻」「お助けレシピ」「教え合いプログラム」施策実施の後、まなびポケットユーザ全体の活用率が昨年度比較で倍以上になるという大きな変化を生み出すことができました。

デザインの力がSmart Educationを支えていく

KOELが本プロジェクトで行ったのは「現場の先生方に寄り添う」ことです。先生方が現場で培った暗黙知を解き明かし、誰しもが使える形式知に変えることで、多くの先

生方がまなびポケットを活用するための「虎の巻」をデザインすることができました。

現在は、今回の気づきを活かしながら「まなホーダイ」という先生や生徒が自分でデジタル教材を選択できるようになる新サービスのコンセプト・それを体現するUI（ユーザインタフェース）づくりに携わっています。今後も先生や生徒から愛されるプロダクトデザインに貢献していきたいと考えています。

これからもKOELは「虎の巻」のような“伝わりやすいデザイン”を通じてSmart EducationをはじめとしたSmart World実現に向けた課題を解決し、KOELのビジョン「新しい時代の社会インフラをデザインする」ことの実現をめざします。

まなびポケット「虎の巻」はこちらでご覧になれます。
<https://manabipocket.ed-cl.com/support/toranomaki/>

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーションズ
 イノベーションセンター デザイン部門
 E-mail koel@ntt.com