

# NTT 技術ジャーナル

12

DECEMBER  
2025

Vol.37 No.12

## 特集

5G/6Gに向けた光・無線の融合による  
伝送技術・高付加価値化技術

NTTドコモのRAN仮想化(vRAN)技術

## トップインタビュー

前田 義晃

NTTドコモ 代表取締役社長

## For the Future

沈黙のリスク、崩れゆく基盤(後編)——最新技術動向と次世代の展望

## グループ企業探訪

OREX SAI

from NTTファシリティーズ

レジリエンス時代の耐震性能評価技術——実験と解析で支える社会基盤





URL

<https://journal.ntt.co.jp/backnumber/2025/vol3712>

DOI

<https://doi.org/10.60249/25120000>

4 トップインタビュー

テクノロジと人間力で「心躍る価値」を社会へ

前田 義晃

NTTドコモ 代表取締役社長



8 特集1

IOWN/6Gに向けた光・無線の融合による  
伝送技術・高付加価値化技術

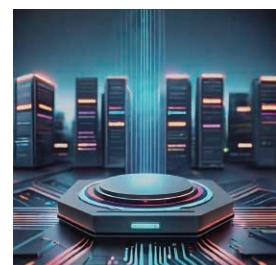
- 10 光・無線の融合が導く次世代ネットワーク・コンピューティング基盤の革新
- 14 超長波長帯（X帯）の新規開拓による超広帯域大容量光増幅中継伝送技術
- 19 光ネットワークサービスのオンデマンド提供を実現する  
光ネットワークデジタルツイン技術の研究開発
- 23 IOWN/6G時代の超高速・大容量通信を実現する光無線融合伝送技術の研究開発
- 27 主役登場 間野 暢 NTT未来ねっと研究所



28 特集2

NTTドコモのRAN仮想化(vRAN)技術

- 30 仮想化技術を利用し経済的な基地局を実現するvRANの標準化動向
- 37 RAN向けコンテナ基盤（O-Cloud）の大規模展開の実現
- 41 大規模仮想化ネットワークを統合制御するSMOの実用化
- 46 RAN向けコンテナ基盤（O-Cloud）を活用した経済的なvRAN展開の実現
- 49 RICによる無線制御自動化の実現
- 53 主役登場 鈴木 勇斗 NTTドコモ



54 For the Future

沈黙のリスク、崩れゆく基盤（後編）  
—最新技術動向と次世代の展望

## 59 挑戦する研究者たち

## 柏野 牧夫

NTTコミュニケーション科学基礎研究所 フェロー

トップアスリートの脳と身体のメカニズムを  
解明し、選手のパフォーマンス向上、  
ひいては人のWell-beingに貢献



特集

## 65 挑戦する研究開発者たち

## 中村 泰治

NTTデータグループ 技術革新統括本部  
グローバルアーキテクト推進部 シニア・スペシャリスト

世界最先端の国産暗号鍵管理システムの開発により、  
安心で使いやすいハイブリッドクラウド環境を提供



For the Future

特別企画

## 70 明日のトップランナー

## 小林 孝行

NTT未来ねっと研究所 特別研究員

「コーヒーレント光増幅中継伝送」で  
さらなる光伝送の長距離化・大容量化へ



挑戦する研究者たち

## 74 グループ企業探訪

## 株式会社OREX SAI

“真のOpen RAN”を世界へ提供、OREX®のグローバル展開



挑戦する研究開発者たち

## 78 from NTTファシリティーズ

レジリエンス時代の耐震性能評価技術  
——実験と解析で支える社会基盤

明日のトップランナー

## 82 Webサイト オリジナル記事の紹介

1月号予定

編集後記

83 総目次

グループ企業探訪

本誌掲載内容についてのご意見、お問い合わせ先

NTT技術ジャーナル事務局

問い合わせページ <https://journal.ntt.co.jp/contact>

本誌ご購読のお申し込み、お問い合わせ先

一般社団法人電気通信協会 ブックセンター

TEL (03)3288-0611 FAX (03)3288-0615

ホームページ <http://www.tta.or.jp/>

NTT技術ジャーナルは  
Webで閲覧できます。



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

from

NTT ドコモ  
代表取締役社長

## 前田 義晃 Yoshiaki Maeda

### PROFILE

2000年NTT ドコモ入社。2008年コンシューマサービス部担当部長、2017年執行役員プラットフォームビジネス推進部長、2020年常務執行役員マーケティングプラットフォーム本部長、2022年代表取締役副社長を経て、2024年6月より現職。



# テクノロジと人間力で「心躍る価値」を社会へ

2025年7月、新たなコーポレートアイデンティティと「ダイナミックループ」をあしらったロゴを策定したドコモグループ。競争の激しい携帯電話市場で磨き上げた先進的な通信技術で社会生活を支えています。前田義晃NTTドコモ 代表取締役社長にドコモの経営環境やトップとしての心構えを伺いました。

### 競争激化と変革へのコミットメント

この夏は新たなコーポレートアイデンティティを掲げるなど、変化のあった1年ではないでしょうか。まずはNTTドコモの経営状況からお聞かせください。

携帯電話マーケットにおける競争環境は、昨年も今年も厳しい状況が続いています。私たちは現在もマーケットの中でトップシェアを維持していますが、2006年にモバイルナンバーポータビリティ(MNP)が始まって以来、基本的にシェアを落とし続けてるのが現状です。2006年当時は52%あったシェアが、今や40%を切る状況です。この顧客減はモバイル通信の収入減と直結していて、成長領域（スマートライフ領域や法人領域）での拡大をもってしても、ベースの減少を埋め合わせてわずかに成長しているにとどまっていることが事業上の大きな課題です。

この下降傾向を止めなければなりません。そのためには、競合企業に打ち勝つような取り組みを進めていかなければならぬと考えています。短期的な視点でみれば、現在も料金競争や端末の値引き、販売チャネルへの投資といった「お金の使い合い」に

よる競争が続いています。この競争には、業界全体で4000億円、5000億円もの巨額の資金が投じられており、この流れが果たして生産的であるのかは業界の課題です。私たちは今まで利益を重視する傾向があったため、販促コストについては他社と比較し抑制的で、それがシェアを奪っていた一因でした。今後はこのコストを業界水準に合わせていくことになりますが、短期的には利益が落ちることは避けられません。しかし、これを実行し、顧客基盤自体を毀損させず強化したうえで、改めてその上に成長を乗せていく構図をつくっていかなければならぬと考えています。また、物価上昇とコスト高騰という世の中の経済動向に合わせ、パートナーの方々全体に経済効果が回るよう、環境に応じて値上げも考えていかなければいけないという課題はあります。しかし、単純な値上げではなく、付加価値をしっかりお客さまに提供させていただくことを前提に取り組むことが重要です。

確かに、コンシューマにとっては、付加価値の大きさはとても重要だと思います。その期待にはどのようにこたえていかれるのでしょうか。

料金プランや端末価格の競争に加え、ポイント・金融・エンタテインメントなどのサービスを含めた経済圏全体での顧客獲得競争へと本格的に移行しています。しかし、各社が「ポイ活」のようなサービスプランを出し、サービス面で横並びになった結果、端末価格を中心とした値下げ競争に回帰し、非効率な状況です。

私たちはこれを変えるべく、他社が容易に追随できないバリュー提供による顧客獲得というマーケティング変革を行います。その具体的な施策が、通信サービスに差別化された価値をバンドルする「ドコモMAX」です。現時点では、Amazonプライムの無料提供や、スポーツ配信サービス(DAZN, NBA)をバンドルしており、強いIPを持つパートナーと連携することで、お客さまに「指名買い」をいただく仕組みを構築していきます。

このアプローチは、コンテンツやアプリケーションを携帯電話のプラットフォーム上に載せて提供してきた、日本特有のマ

ケット特性を活かしたもので、dポイントの会員基盤をうまくつくりながら、通信サービスと連携させ、そのうえで金融やエンタメ、そしてマーケティングソリューション事業を展開し、俗に言う「経済圏」を大きくする取り組みを実施しています。

社長就任時から展開されている抜本的な構造改革の基盤となるネットワークについて、詳しくお聞かせいただけますでしょうか。

通信サービス品質の向上は一目一番地であり、もっとも重要な取り組みと考えています。お客さまに「ドコモの通信サービス品質はNo.1だ」と実感していただけるように、ネットワークの装置そのものから、構築、運用の方法まで見直します。

大きな改革として、グローバル装置の導入拡大を進め、2025年度から段階的に導入します。また、以前は地域内にさまざまなベンダが混在するマルチベンダ型で基地局を構築していましたが、今後は地域ごとにベンダを統一するクラスター化を行います。これによりベンダのノウハウや独自機能を最大限に活用する基地局配置に変えていき、そのうえで、2025～2026年にかけて大規模な基地局増設に取り組み、他社キャッチアップを行います。足元では、山手線や大阪環状線などの重要導線や人の多く集まる重点エリアを中心に、着実に通信サービス品質の改善は進んでいます。引き続きNo.1をめざして取り組みます。

## 次世代通信技術による社会課題解決と体験価値の進化

IOWN、6Gについて、NTTドコモの取り組みと今後の展望をお聞かせください。

NTTグループにはさまざまなアセットがありますが、その中でももっとも期待の大きいものの1つがIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) です。NTTドコモでは、事業の核となる通信ネットワーク分野においても、IOWN技術によるネットワークインフラの進化と高度化に取り組んでいます。

現在、APN (All-Photonics Network) のドコモネットワークへの活用を進めており、グループ共用網伝送装置にAPN伝送装置を導入しています。法人向けには、低

消費電力で高品質・大容量・低遅延なAPN専用線サービスを2024年3月から提供、2025年10月から柔軟な帯域・経路変更機能を追加した「docomo business APN Plus」の提供を開始しました。

また、ICTリソースの最適な調和をめざしたCF (コグニティブ・ファウンデーション) のモバイルネットワークへの適用として、E2EO (End-to-End Orchestration) の研究開発や、デジタルツインコンピューティングの取り組みとして、交通混雑の解消や都市の防災計画、地域活性化、医療ヘルスケア分野における生活習慣の改善など、人流データをはじめとするビッグデータを活用したさまざまな社会課題の解決に向けた技術開発にも取り組んでいます。

移動体通信サービスを提供するドコモにとって、IOWN技術だけでなく、次世代の無線通信である6G (第6世代移動通信システム) の研究開発も重要なテーマです。当社は多くのグローバルプレイヤーをリードし、2030年ごろの商用化をめざして標準化に取り組んでいます。

6Gでは、5G (第5世代移動通信システム) を大きく上回る「大容量・高信頼・超低遅延・超多数同時接続・超カバレッジ」を実現します。環境負荷の低減や、1人ひとりのお客さまに最適な通信環境の提供、新しい体験価値の創出、AI (人工知能) やロボットとの共生、そしていつでもどこでもつながるネットワークをめざしていきます。

その世界観を先取りするかたちで、大阪・

関西万博のNTTパビリオンで、人気女性ユニットPerfumeのライブを追体験しました。離れた場所の空間を丸ごと点群データでリアルタイムに持ち込み、3Dで再現するというリッチなコンテンツ体験は、技術の進化を実感する機会となりました。今後はIOWNや6Gの実現により、新しくリッチな体験価値の提供が可能となり、「こんなに楽しいんだ」「これすごいな」と感じていただける体験を、さまざまな場面で楽しんでいただけるようになるはずです。

万博のPerfumeのライブは新しいエンタテインメントの可能性を強く感じました。そんなエンタメも含め、成長領域であるスマートライフ事業には期待が高まりますね。合わせて、法人事業についても具体的な取り組みを教えてください。

はい、ご期待に沿えるよう、スマートライフ事業の主要分野であるエンタメ、金融、マーケティングソリューションを加速させます。エンタメ分野では、IP開発から配信プラットフォーム、そして国立競技場やIGアリーナなどを運営するベニュー事業まで、バリューチェーン全体にアセットを包有していることがドコモの強みです。これらのアセットを組み合わせ、ファン心理を理解した特別な体験を提供することで成長を図っていきます。

そして、金融事業においても「決済」「投資」「融資」「保険」「銀行」と広くサービスを展開しています。2025年10月に、約





900万の銀行口座を保有する住信SBIネット銀行が新たに子会社となり、銀行業へ本格参入しました。これにより、銀行口座と決済・証券等のドコモの金融サービスを一体的に提供し、スマートフォン1つで金融にかかわるすべてをまとめて便利にご利用いただけます。

加えて、法人事業では、社会課題を解決する「産業・地域DXのプラットフォーム」をめざします。高品質・高信頼性のネットワークとインテグレーション機能をベースに、総合ICTソリューションをワンストップで提供します。ソリューション分野では、企業のAI導入ニーズにこたえるデジタル・AI基盤「AI Centric ICTプラットフォーム」構想の実現に取り組んでおり、企業のAI変革を支援します。

### トップは最終決定者であるという「ファンクション（機能）」

改めて、社名変更にかける思い、そして、競争環境の激しい市場で戦うトップとしての覚悟についてお聞かせいただけますか。

NTTドコモグループは、競争環境の激化に対抗し、強さを増すためにNTTドコモ、当時のNTTコミュニケーションズ、NTTコムウェアの三位一体となって事業運営し、成長していくことをめざしてきました。そして、マーケットに対しては一体化した私たちが強い存在であることをアピールする

ために「心躍る価値創造」というグループビジョンをつくりました。

2025年はさらに一体感を強化するため、NTTコミュニケーションズを「NTTドコモビジネス」に、NTTコムウェアを「NTTドコモソリューションズ」に社名を変更しました。これは、愛着を持つ社員にとっては受け入れることが難しかったかもしれません、お客様のため、そして自分たちのためにと突き詰めて考えると、この変更是必要であると判断しました。

私が社長を拝命したタイミングは、マーケット環境の厳しさやネットワーク品質に関するご指摘など多くの課題が存在していました。こうした状況において、新しい体制になるということは、課題に対して私たちが変化し、解決し、成長していくという「変化のタイミング」であろうととらえました。

社長としての最大の覚悟は、会社およびグループ全体の最終的な責任をすべて負わなければいけないことですね。そして、社長は最終決定者であるという「ファンクション（機能）」であり、腑に落ちようが落ちまいが、必ず決めなければならない義務があるのです。

正直なところ、中にはつらい決断もありますが、最近、「面白い！」という思いで決断したのは「ドコモMAX」の本格展開ですね。通信に体験価値を乗せる設計は、オペレーション上の負荷や新たな協業ス

キームの調整など想定外なことばかりで日々試行錯誤を繰り返しています。それでも、お客様の反応やデータを見ていると、選ばれる理由が増えている実感があります。これは非常に手ごたえを感じた決断でした。

さて、その意思決定においては、私自身はまずお客様起点でものを考えること、そしてそれが私たち企業としての成長につながるのかという2つの点がもっとも重要なと考えています。そして、それらの判断がグループビジョンにある「心躍る価値創造」、そしてコーポレートスローガンの「つなごう。驚きを。幸せを。」に合致しているかを常に意識することが重要であると考えています。

### 最後に皆さんへのメッセージをお願いします。

まず、社員の皆さんには「人間力」を大切にしていただきたいと考えています。具体的には実践してもらいたい「人間力」として、以下のグループ行動原則を言語化しました。1番目は当事者意識を持つこと。つまり、通信サービス担当でない社員も品質を意識するなど、すべての仕事に当事者となることです。そして、リスペクトすること。お客様や多様なビジネスパートナーの声に耳を傾け、期待を超えていくことです。さらに、チャレンジし続けること。お客様の喜ぶ顔を想像しながら、挑戦し続けることが大切です。最後に、つなぎます。常に社会の利益を考え、誠実に真摯に「つなぐ」をやりきる責任感を持つことです。組織運営方針として掲げた「オープン＆フラット」を体現するように、1人ひとりがバイアスをかけずにフラットに考え、それを物理的にも心理的にもオープンに話し合える環境を築いていきましょう。

技術者・研究開発者の皆さん、社会を変化させ、進化させられる起点になるのがテクノロジであり、それを体現し実装するのはやはり人間の力です。お客様は新しい価値を求める、マーケット競争は激しい。こうした中で先進的かつ差別化された価値を投入するには、テクノロジの新しさとそれによる価値創造が近道です。私たちは、それを創り上げられる方々を強く欲しています。もっと野心的に、そういった部分をアピールしていただきたいですね。



お客さまへ、ドコモグループは事業運営方針として「お客さま起点の事業運営」を掲げています。これは徹底的にお客さまに向き合うということです。不満や要望、何でも構いませんのでさまざまな声を聞かせてください。私は社長就任以来、お客さまの声を全社員がスムーズに確認可能な仕組みの構築や、経営陣がお客さまの声の状況

確認と対策を議論する委員会を設置しました。その声を真摯に受け止め、スピーディにお客さま体験の向上につなげます。

最後にパートナーの皆様へ、グループビジョンの「つなぐ」に込められているとおり、パートナーの皆様との「つながり」が、ネットワーク品質向上も、ドコモMAXも、法人事業のAI Centric ICTプラットフォー

ムも、すべての改革の実現に不可欠です。テクノロジと、お互いの力を掛け合わせながら、今後も共に価値を創造し、日本を活性化し、世界を豊かに、幸せにしていきたいと思っています。

(インタビュー：外川智恵／撮影：大野真也)

## インタビューを終えて

白いシャツに紺系のスーツ、副社長時代にお話を伺った3年前と変わらぬ姿でインタビュー会場に現れた前田社長。「(会場の)準備が整ったのであれば、少しでも早く対応しますよ」とお心遣いをいただき、予定よりも早くお話を伺うことができました。ずっしりとした低い声でお話になりながら、前田社長は時折、クシャっとした人懐っこい笑顔で周囲を和ませてくださいます。多くは語られませんでしたが、トップとしていかに重責を担われているかを「大変ですよ」とカラッと笑い飛ばされているご様子に、頬もしさを感じます。そんな前

田社長は先日、愛知のIGアリーナで開催されたステイングのライブに赴かれたそうです。「若いころは感じなかったステイングの魅力を感じましたよ」という前田社長。IGアリーナでのライブで披露された『Englishman in New York』という曲の「Be yourself no matter what they say (人が何を言おうと、自分らしくあれ)」という歌詞に、何事にもスタイリッシュに、そして果敢にチャレンジする前田社長のあり方に重なりました。3年前と変わらず、ご自身を貫く姿にオーセンティック・リーダーシップの重要性を感じたひと時でした。



# IOWN/6Gに向けた光・無線の融合 による伝送技術・高付加価値化技術

本特集では、ゲームチェンジにつながる革新技術の早期具現化と  
事業や顧客に求められる差別化技術の確立に取り組むNTT未来ねっと研究所の研究開発方針を紹介する。  
世界一・世界初の研究成果とIOWN(Innovative Optical and Wireless Network)/  
6G(第6世代移動通信システム)に貢献する成果を創出する光(量子)・電波・音波を用いた伝送技術および  
その高付加価値化の最新取組状況について紹介する。

光・無線の融合が導く  
次世代ネットワーク・コンピューティング基盤の革新 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。





## 超長波長帯（X帯）の新規開拓による 超広帯域大容量光増幅中継伝送技術

14

光ファイバ通信システムの大容量化と波長資源の拡大に向けた、光ファイバ中のチャネル間誘導ラマン散乱を利用し新規に開拓した超長波長帯（X帯）を含む伝送帯域27 THzの1000 km級超広帯域光増幅中継伝送実験について紹介する。

## 光ネットワークサービスのオンデマンド提供を実現する 光ネットワークデジタルツイン技術の研究開発

19

光ネットワークインフラを即時かつ最大限の性能でオンデマンドに利用可能とするため、光ネットワークデジタルツインによる自動監視・設計・制御技術の確立に取り組んでいる。本稿では伝送路可視化技術と伝送品質推定技術を組み合わせた光波長パスの自動最適設定手法を解説する。

## IoWN/6G時代の超高速・大容量通信を実現する 光無線融合伝送技術の研究開発

23

将来の超高速無線通信での使用が想定される高周波数帯電波ビーム制御用のビームフォーマーでは、回路の大規模化、消費電力の増大といった課題が想定される。本稿では光技術を応用した新たなアプローチを紹介する。

## 主役登場 間野 暢 NTT未来ねっと研究所

27

IoWN構想の実現を支える「光ネットワークデジタルツイン」への挑戦

URL <https://journal.ntt.co.jp/article/37493>DOI <https://doi.org/10.60249/25125001>

# 光・無線の融合が導く 次世代ネットワーク・コンピューティング基盤の革新

NTT未来ねっと研究所（未来研）では、世界トップレベルの通信技術と、それを最大限に活用するネットワーキング技術を駆使し、通信技術の飛躍的な性能向上と新たな利用領域の開拓に挑戦しています。常識を超える「世界一」「世界初」の研究成果の創出と、それらの社会実装による新たな価値創造をめざし、研究開発を推進しています。本稿では、未来研で取り組む技術の概要を紹介します。

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

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

NTT未来ねっと研究所 所長<sup>†1</sup>  
NTT未来ねっと研究所<sup>†2</sup>

## はじめに

近年、生成AI（人工知能）の急速な普及により、データ処理量と通信トラフィックが爆発的に増加しており、世界各地でデータセンタの建設が加速しています。これに伴い、データセンタの電力消費やデータセンタ間の接続が大きな課題となっています。さらに、量子コンピュータへの期待も世界的に高まっており、創薬・材料設計・金融・暗号通信など多様な分野での応用が期待されています。NTT未来ねっと研究所（未来研）では、これらの課題に対し、光・量子・電波・音波を活用した伝送技術とその高付加価値化の研究開発に取り組み、IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）/6G（第6世代移動通信システム）の実用化に貢献する「世界一」「世界初」の新たな価値の創出をめざしています。

未来研の取り組み領域を図1に示します。

光ファイバを用いた光通信、電波を用いた空中・宇宙での無線通信、音波を用いた水中での音響通信において、大容量化・長距離化・カバレッジ拡大・低電力化を実現する技術に加え、空間光通信や光無線融合伝送など、光と無線の境界領域、さらには量子を扱う伝送技術にも積極的に取り組んでいます。加えて、これらの伝送技術のさらなる高付加価値化の研究開発も進めています。

未来研では、2023年3月にサービスが開始されたIOWNのさらなる高機能化・高付加価値化に向け、研究開発を推進しています。

直近の取り組みとしては、APN（All-Photonic Network）IOWN 1.0サービスにおいてレイヤ1ネットワークの通信遅延を自在に制御する装置「OTN Anywhere」の進化版として、マイクロ秒精度の遅延測定・調整機能を備え、

HDMI/USBなどの汎用インターフェースに対応する「OTN Anywhere model-B」の要素技術を開発しました。大容量デジタルコヒーレント光伝送技術を用いたDSP（Digital Signal Processor）について、800G版の技術開発を完了し、実用化に向けて準備を進めています。1.6T版については要素技術を確立し、本格的な技術開発を開始しました。光ネットワークデジタルツイン技術については、トランシーバおよび伝送路の品質推定技術を確立し、実用化に向けた技術開発を進めています。

次に、IOWNの大容量化・長距離化・カバレッジ拡張に向けた要素技術の研究開発について紹介します。海中音響通信技術では、より高品質な通信エリアを面向に海中へ提供するため、変復調信号処理技術やマルチサイト受信技術を確立し、さまざまなユースケースの実現に向けた研究開発に取り組んでいます。スケーラブル光トラン



図1 未来研が取り組む研究開発の領域

スポーツ技術では、2つの方向性で研究開発を進めています。1つは空間多重光伝送で、1本の光ファイバの中に複数のコアを内包するマルチコアファイバを用いて、12コアによる3000 km級の増幅中継伝送を実現しました。もう1つは超広帯域光増幅中継伝送で、従来の光通信波長帯のC帯/L帯を大幅に拡大し、S+C+L+U+X帯（X帯はNTTが命名）による長距離大容量通信の実証に成功しています。

最後に、将来に向けて新たな価値を創造する研究開発について紹介します。空間光通信技術では、大気擾乱の影響を受けやすい層間の地表付近において、従来比10倍以上の擾乱耐性を持つ波面補償技術を実証しました。さらに、ユースケースの拡大をめざし、海上の船舶間（～10 km）通信に向けた研究開発にも着手しています。量子通信技術では、光子検出の安定化や光子対配信に向けた同期制御技術を確立するとともに、量子もつれ実験用プラットフォームの構築に着手し、量子もつれ生成システムの実現に向けた研究開発を進めています。

以降では、未来研が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の3つのカテゴリ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2に示します。AI基盤や光量子コ

ンピュータにより超高速な計算を実現し、さらに光ネットワークデジタルツインや量子通信によって、これらのコンピューティングリソースを広域に接続・連携させます。これにより、素材開発や創薬、地球環境問題などの幅広い分野において、従来は現実的な時間内に計算不可能であった複雑な問題を短時間で処理することが可能となり、さまざまな社会課題の解決に貢献します。

### ■光ネットワークデジタルツイン技術

IOWN APNの性能を最大限に引き出すには、光伝送路の状態を正確に把握し、機器設定を自動最適化する技術が不可欠です。光ネットワークデジタルツインは、光伝搬の物理特性に基づき光ネットワークの設備を可視化し、実ネットワークの情報を仮想空間に高精度で再現します。この仮想空間でシミュレーション結果を活用し光ネットワークの設計・制御を行うことで、送受信機の伝送モード（変調方式、ボーレート、誤り訂正方式）や中継用光増幅器の増幅度を自動最適化できます。本技術により、人的作業を必要としない自律的な光ネットワーク運用が実現し、オンデマンドで高速かつ柔軟な拠点間光波長パスを提供可能となります。IOWN APNサービスの可能性を大きく拡張する光ネットワーク設計・制御技術です<sup>(1)</sup>。

### ■AI基盤向け光インターフェクト技術

AIの学習・推論など大規模処理を支えるデータセンタインフラとして、AIクラスターネットワークの高速化・省電力化・大規模スケールアウトを可能とする光インターフ

ネット技術の研究開発を進めています。従来の電気スイッチベースのネットワーク構成では、拡張性や消費電力に制約があり、GPU基盤を複数利用者で効率的に使う「マルチテナント運用」にも課題がありました。本プロジェクトでは、OCS（Optical Circuit Switch）と呼ばれる光スイッチを活用し、テラビット級のAI基盤に対応した光インターフェクトを実現します。オンデマンドでのAIクラスタ提供とセキュアなマルチテナント運用を両立し、90%の省電力化とネットワーク規模の飛躍的拡大をめざします。

### ■光量子コンピュータ技術

光通信で培ったデバイス・制御・ソフトウェア技術を結集し、光量子コンピュータ（連続量方式）の研究を統合的に推進しています。光は室温・常圧で高速動作し、大規模な量子もつれ生成に適しており、時間多重によるスケーラブルな拡張が可能です。これにより、省エネルギー性と大規模化の両立が期待されます。これまでNTT研究所が長年研究開発を続けてきた世界最高水準の量子光源や、他方式における先行的な量子ソフトウェア研究を基盤とし、大規模汎用計算を可能とするFTQC（Fault-Tolerant Quantum Computer）の早期実現をめざします。さらに、産学連携やコミュニティ形成を通じてアプリケーション開発や標準化を推進し、パートナーとともにエコシステムを構築することで、量子技術の社会実装を加速します。これにより、新素材開発や創薬、地球環境など幅広い分

## 古典系

AI基盤向け  
光インターフェクト技術  
大規模かつ省電力にスケールアウト可能なAIクラスターをオンデマンドに生成

## 量子系

光量子コンピュータ技術  
従来のコンピュータでは困難な大容量汎用計算を実現

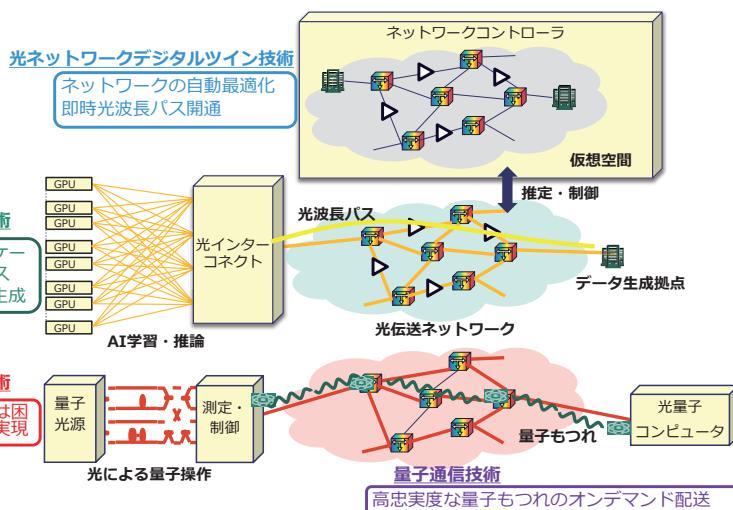


図2 フロンティアコミュニケーション技術の概略

野での社会課題解決に貢献します。

### ■量子通信技術

量子コンピュータ間で量子情報を伝送する量子通信技術の研究開発を進めています。特に、量子コンピュータにおいて重要な量子もつれリソースを、安定的に長距離・高速伝送するため、単一光子による量子もつれ配達システムを研究開発しています。本システム開発では、複数量子もつれを生成し、複数拠点へのリアルタイム配達を可能しています。また、単一光子の高速伝送に対応する量子測定装置も開発しました。さらに、2025年から新たに異種混合の量子コンピュータをオンデマンドに接続するため、多モードに対応した量子ノード構成技術の研究にも着手しています。今後、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拡張できる量子ネットワーク基盤の実現をめざします。

## 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3）。海中音響通信技術や超広域IoT（Internet of Things）無線技術、空間光通信技術では、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力バレッジ拡張をめざすとともに、波動制御大容量伝送技術や光無線融合伝送技術により、通信速度を飛躍的に向上する究極に速い高速大容量伝送にも取り組んでいます。さらには、無線環境を把握・予測することにより、通信エリアを最適制御し高品質・安定な無線伝送を可能とするユーザセントリック無線AI制御基盤技術にも近年新たに取り組んでいます。

### ■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力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。1 Mbit/s級の海中音響通信技術の実現によって世界初となる完全遠隔無線制御型水中ドローンを実験実証し、海底通信ケーブル保守業務への適用検討などを行ってきました。現在は産業分野の各種パートナーと連携し、さまざまな業務への適用・技術実証に取り組むとともに、水中音響測位や複数基地局の連携による広域通信ネットワークといった新たな技術開発にも取り組んでいます。

### ■超広域IoT無線技術

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データを収集する超広域IoT無線プラットフォームの基盤技術に取り組んでいます。山間部や海洋など、地上網ではカバーできない超力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。

### ■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、安定した超高速大容量伝送を実現し、将来的には災害時での迅速なネットワーク一時復旧などへも適用することをめざしています。

### ■波動制御大容量伝送技術

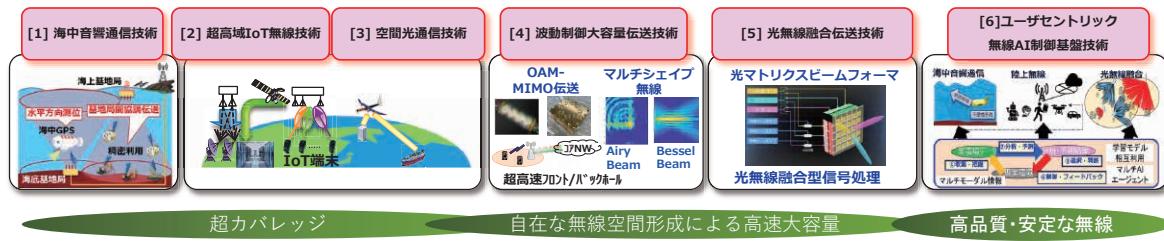
IOWN/6G時代のフロントホールやバックホール、無線アクセスにおけるテラビット級の無線伝送技術に取り組んでいます。近年では、OAM（Orbital Angular Momentum：軌道角運動量）多重伝送によりミリ波帯で世界最高速となる140 Gbit/sのリアルタイム大容量無線伝送を実証しました<sup>(2)</sup>。マルチシェイプ無線では特徴的な電波の軌跡を持つエアリービームやベッセルビームを生成・組み合わせ制御することにより、自在な無線空間の形成を行い、干渉フリーで大容量な無線伝送の実現をめざしています。

### ■光無線融合伝送技術

IOWN/6Gにおける無線システムでは、ミリ波以上の高周波数帯の活用が期待されています。高周波数帯での伝搬損失を補うため、数千～数万素子の超大規模アーチアンテナを用いた無線ビームフォーミングが必要になると考えられています。これらに資する要素技術として光信号処理技術を用いて、複数信号を光波長上で多重して処理することで、超大規模アーチアンテナで複数ビームを同時生成する技術に取り組んでいます。

### ■ユーザセントリック無線AI制御基盤技術

高周波数帯の電波や音波、光を用いた無線通信では伝搬環境のわずかな変化が通信品質に影響を与えます。そこで、無線・物理空間等を組み合わせたマルチモーダルな無線環境情報を収集し、仮想空間上で分析・予測を行い、ユーザの求める未来の状態にもっとも近い未来環境を選択し、現実世界への制御としてフィードバックする技術に取り組んでいます。



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3 波動伝搬技術の概略

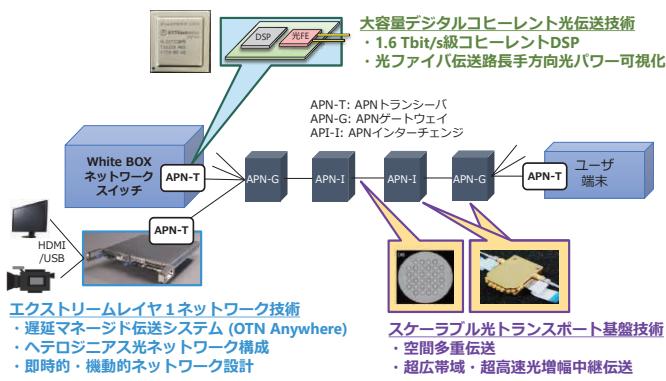


図4 トランスポートイノベーション技術の概略

## 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のさらなる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ーション技術の研究開発に取り組んでいます(図4)。革新的な光ネットワークの実現に向けて、ネットワーキング技術と光伝送技術の両面において基盤研究から実用化開発まで幅広く展開しています。具体的には、①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、②光パスの大容量化かつ低電力化を実現する大容量デジタルコヒーレント光伝送技術、③将来の膨大な通信トラフィックを効率的に収容するスケーラブル光トランスポート基盤技術を重点テーマとして研究開発を推進しています。

### ■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ネットワークにおいて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し、APNの広範な普及をめざしています。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に変革をもたらす技術として、ナノ秒精度でネットワーク遅延を測定・制御する遅延マネージド伝送システム(OTN Anywhere)、さまざまな通信規格が混在するネットワークにおいてシームレスな通信パスの提供を可能とするヘテロジニアス光ネットワーク構成技術、サービスオーダーに対してネットワークリソースの使用状況を踏まえて即座に通信パスを提供する即時的・機動的ネットワーク設計技術などの

の帯域拡張や波長帯一括変換技術などの研究開発に取り組んでおり、波長帯一括変換技術を用いた世界最大27 THzの光帯域を利用した160 Tbit/s、1000 km以上の長距離光増幅中継伝送を実証しています<sup>(5)</sup>。これらの基盤技術を統合し、将来の超大容量光ネットワークの実現をめざしています。

## 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・量子・電波・音波を用いて伝送技術や高付加価値化に取り組み、数年以内の実用化につながる差別化技術と、ゲームチェンジにつながる革新技術によって、事業会社の継続的なビジネス創出に貢献します。

### ■参考文献

- (1) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2025/03/31/250331a.html>
- (2) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2025/03/24/250324a.html>
- (3) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2024/08/20/240820a.html>
- (4) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2024/03/21/240321a.html>
- (5) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2025/08/12/250812a.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

増加し続ける膨大な通信トラフィック需要にこたえるとともに新たな価値を提供するため、世界最高性能の大容量化とカバレッジ拡張を実現する革新的な光・無線伝送技術と、これらの通信性能を最大限に引き出す高付加価値化の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

# 超長波長帯(X帯)の新規開拓による超広帯域大容量光増幅中継伝送技術

デジタル信号処理技術の進展によって光ファイバ伝送システムの周波数利用効率は理論限界に近付いており、さらなる大容量化のためには波長多重を行う伝送帯域の広帯域化が重要です。本稿では、周期分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN: Periodically Poled Lithium Niobate) 導波路を増幅媒質とした光パラメトリック増幅器 (OPA: Optical Parametric Amplifier) による超広帯域波長帯一括変換技術と、光ファイバ中の誘導ラマン散乱の有効利用によって実現した、新規超長波長帯 (X帯) の開拓と、S+C+L+U+X帯を用いた27 THzにわたる超広帯域・大容量伝送実験について解説します。

キーワード: #超広帯域波長多重伝送, #光パラメトリック波長帯一括変換・光増幅, #周期分極反転ニオブ酸リチウム導波路

## 伝送帯域広帯域化の必要性

光ファイバ通信網は、インターネットなどを介しまさまであるデータがやり取りされる現代社会を支える通信インフラの根幹を担っています。基幹光通信網には、伝送チャネルごとに異なる波長を使用して多重化した波長分割多重 (WDM: Wavelength-Division Multiplexing) 信号を、エルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier) を用いて一定区間ごとに増幅しながら数100 km以上にわたり光のまま伝送する光増幅中継伝送システムが導入されています。2010年代にはデジタルコヒーレント方式の導入による大幅な周波数利用効率の向上が実現され、現在では光ファイバ1本当たり10 Tbit/s級の伝送システムが実現されています<sup>(1)</sup>。

一方で近年では、高度な符号化技術や誤り訂正技術によって周波数利用効率は理論

限界であるシャノン限界に漸近してきています。そこで、さらなる大容量化に向け、WDMを行う伝送帯域の拡張が重要となっています<sup>(2)</sup>。これまでEDFAの増幅帯域であるC帯やL帯と呼ばれる波長帯 (バンド) 内のそれぞれ4 THz程度の帯域が利用されてきましたが、近年ではこの2つの波長帯を併用した10 THz級の帯域のC+L帯マルチバンド伝送システムの開発も進められています<sup>(3)</sup>。また、研究レベルでは3バンド以上の波長帯を利用した検討が行われており、超広帯域 (UWB: Ultra Wide Band) 伝送と呼ばれています。図1は、光通信波長帯における、一般的な光ファイバの伝送損失スペクトルの測定例を表しています。C+L帯を最低損失帯として、短波長側は主にレイリー散乱の影響で、長波長側は石英系ファイバの吸収特性によって、損失が大きくなります。C帯の短波長側であるS帯はC+L帯に次ぐ低損失帯であり、第3の波長帯として有望視されています。

清水 しみず 新平 しんべい<sup>†1</sup> / 木村 きむら こうすけ  
 川合 かわい 晓 あきら<sup>†1</sup> / 阿部 あべ まさし  
 紺野 こんの 紺野 しゅんや<sup>†2</sup> / 風間 かざま たくし  
 嶋矢 しまや<sup>†2</sup> / 風間 かざま たくし<sup>†1,2</sup>  
 NTT未来ねっと研究所<sup>†1</sup>  
 NTT先端集積デバイス研究所<sup>†2</sup>

さまざまな研究機関からS帯を用いたUWB伝送の報告がなされており、NTTでも18 THz級S+C+L帯のUWB伝送によって、伝送容量100テラビット毎秒超の1000 km伝送を実証しています<sup>(4)</sup>。一方で、UWB伝送システムの実現に向けた課題として、新規波長帯に対応した伝送装置 (送受信機や光増幅器など) を新たに開発する必要がある点が挙げられます。特に、L帯より長波長帯であるU帯では、高品質なコヒーレント伝送を実現するための狭線幅なレーザや高速な受光器、EDFAのような希土類イオン添加型の光増幅器の実現が難しいという課題があります。

そこで私たちは、これまでNTTで20年以上にわたり研究開発を進めてきた周期分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN: Periodically Poled Lithium Niobate) 導波路デバイス<sup>(5), (6)\*1</sup>を用いた光パラメトリック増幅器 (OPA: Optical Parametric Amplifier) の適用による伝送

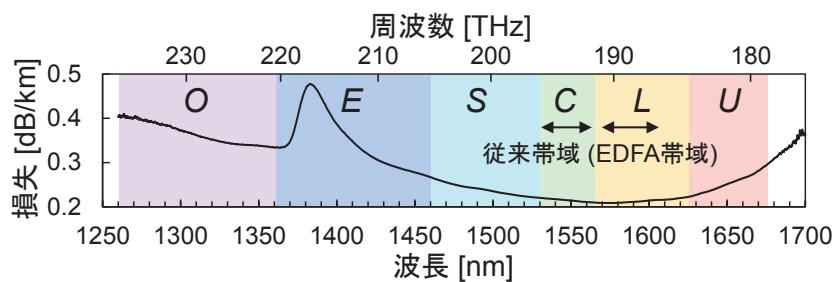


図1 光ファイバの損失測定例

帯域拡張技術の検討を行っています。PPLN型OPAは広帯域な増幅帯域を持つことに加え、増幅に伴って入力信号光とは異なる波長に発生するアイドラ光と呼ばれる成分を用いることで、全光学的な波長帯一括変換を行うことができます。この波長帯一括変換機能により新規波長帯（S帯やU帯）と既存の波長帯（C帯またはL帯）との間を高効率に相互一括変換・光増幅することができます。既存の伝送装置を新規波長帯のWDM信号にも適用できるようになります<sup>(7), (8)</sup>。私たちは、この方式を利用して新規波長帯の信号にも既存のEDFAを適用する増幅中継器構成を検討しており、この構成をOPA/EDFAハイブリッド増幅中継器と呼んでいます。これまで、S帯用、U帯用のOPA/EDFAハイブリッド増幅中継器を開発し、S+C+L+U帯を用いた伝送帯域22 THzの超広帯域WDM信号の1000 km増幅中継伝送を実証しています<sup>(9)</sup>。

今回、新たにU帯のさらに長波長側の波長帯に対応したOPA/EDFAハイブリッド増幅中継器を開発し、長距離伝送実験に適用しました。図1中の各波長帯の定義は電気通信標準化団体であるITU-T (International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector) にて定義されているのですが、長波長帯はU帯までし

か定義されていませんでした。NTTでは、今回使用した1702 nmまでの波長帯を新たにX帯と定義し、信号伝送に利用することを提案しました<sup>(10)</sup>。

### OPA/EDFAハイブリッド増幅中継器

図2は今回開発したOPA/EDFAハイブリッド増幅中継器の構成図です。S+C+L+U+X帯のWDM信号が入力されると、WDMカプラによってそれぞれの波長帯に分割されます。その後、C帯およびL帯信号はEDFAを用いて従来どおり増幅されます。S帯信号とU+X帯信号は、それぞれの帯域とC+L帯との間に縮退周波数<sup>\*2</sup>を持つように設計された各OPAによってC+L帯に変換されます<sup>(11), (12)</sup>。その後、C帯とL帯に分割され、それぞれC帯用とL帯用のEDFAで増幅されます。ここでは、波長変換によりL帯から拡張された短波長および長波長の帯域をそれぞれS-帯とU帯、C帯から拡張された帯域をS+帯とX帯としています。増幅後は、後段のOPAでS帯、またはU+X帯に再変換し、すべての波長帯の信号をWDMカプラで再び合波し、次のスパンへ送信します。この構成によって、既存のEDFAを活用して増幅中継帯域の新規波長帯への広帯域化を実現できます。

OPAに求められる要件として、S帯全域およびU+X帯をカバーする8 THzを超える広い波長帯一括変換帯域が必要になります。また、広帯域なWDM信号の伝送品質を十分に得るためにには、中継器全体の雑音指数を低く抑えるとともに、多くの波長チャネルを十分な光パワーで送信するために出力を大きくすることが重要となります。光パラメトリック増幅は高非線形媒体中の非線形光学効果を利用した現象であり、媒体として高非線形光ファイバを用いた3次非線形光学効果を利用した構成が代表的ですが、PPLN導波路を用いた2次非線形光学効果による構成では、信号間の不要な相互作用による信号劣化が少ないという特徴があります。この特徴により、広帯域な波長帯変換と20 dBm以上の高い光出力を両立することができるため、増幅中継器への応用に適しています。本実験で使用した各

\*1 周期分極反転ニオブ酸リチウム：二次非線形光学媒質の1つ。効率良く非線形過程が発生するように、媒質の伝搬方向に非線形感受率の符号が反転した領域を周期的に形成し、疑似的な位相整合を実現する構造となっています。

\*2 縮退周波数：非線形光学媒質の位相整合特性とポンプ光周波数によって決まる周波数。二次非線形光学効果による光パラメトリック増幅過程においてはポンプ光の半分の周波数になります。この周波数を境にして対称な周波数に波長変換光（アイドラ光）が発生します。

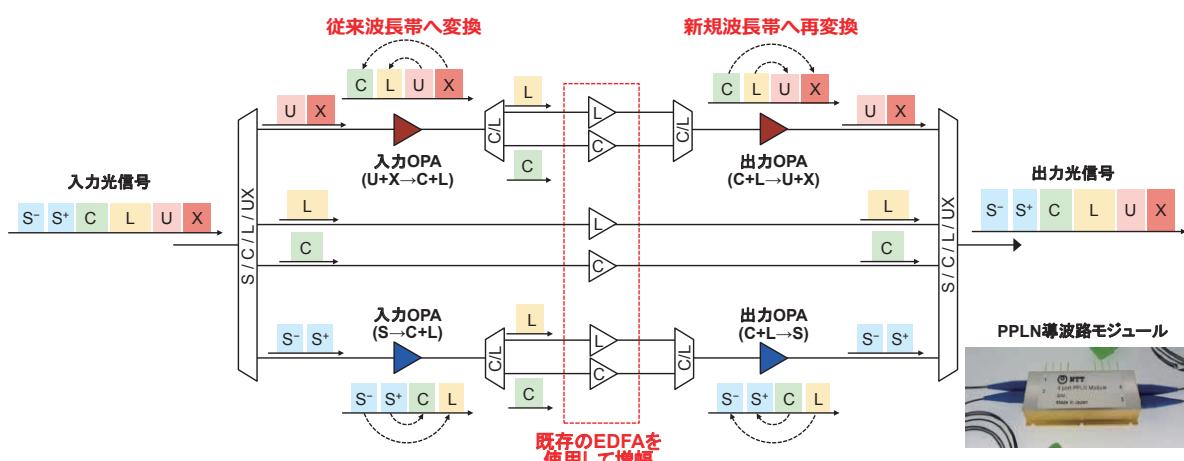


図2 S+C+L+U+X帯 OPA/EDFAハイブリッド増幅中継器の構成

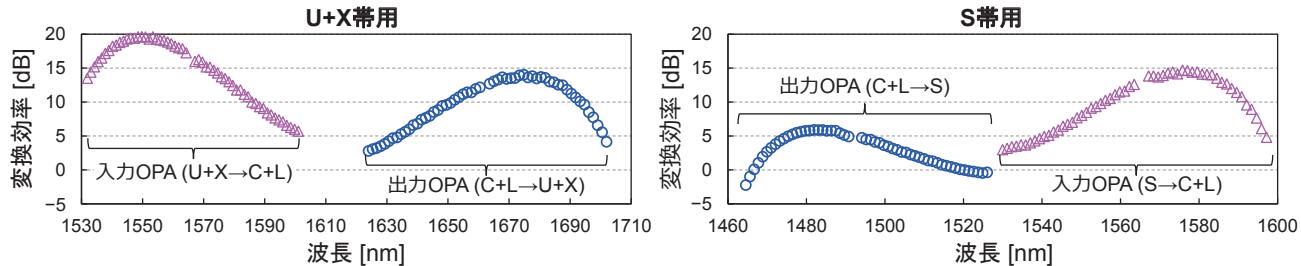


図3 各OPAの波長帯一括変換効率スペクトル

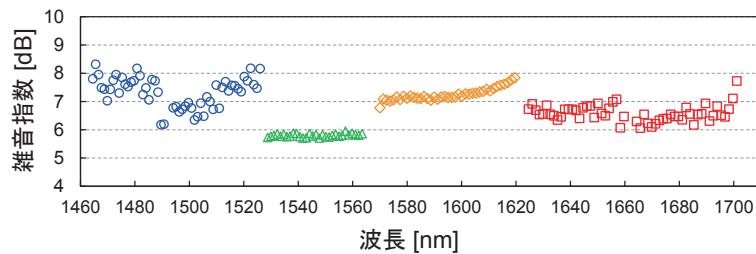


図4 S+C+L+U+X帯増幅中継器の雑音指數スペクトル

PPLN型OPAの波長帯一括変換効率スペクトルを図3に示します。ほとんどの波長で正の変換効率を実現できていることが分かります。変換効率が正であるということは、波長帯変換に伴って增幅利得も得ているということを意味します。また、增幅中継器の雑音指數を低く抑えるには入力側の波長帯変換の効率が特に重要になりますが、各入力OPAは8 THz以上の広帯域にわたって高い変換効率を実現できています。図4に增幅中継器の雑音指數を測定した結果を示します。NTTのPPLN導波路モジュールの低雑音性と高い変換効率によって、波長帯変換を介して増幅したS帯、U帯、X帯でも、C+L帯と同程度の低雑音な増幅中継が実現できることが分かります。

### チャネル間誘導ラマン散乱を活用した1040 km 27 THz増幅中継伝送実験

広帯域なWDM伝送を行う際の課題の1つとして、チャネル間誘導ラマン散乱(ISRS: Inter-channel Stimulated Raman Scattering)という現象があります。この

現象は、光ファイバを伝送中に短波長のチャネルから長波長のチャネルへ光パワーが遷移するもので、これにより、光ファイバの伝送損失スペクトルは光ファイバ固有の損失と比べ長波長側にシフトします。この現象は、光ファイバに入力されるWDM信号の帯域幅や各チャネルの送信パワーによって変化するため、伝送設計を複雑にします。一方で本実験では、このISRSを積極的に利用することでX帯までを利用した高速信号伝送を実現しています。従来の光通信波長帯は、石英系光ファイバの損失スペクトルを基に定義されています。U帯は通常、低損失に利用できる最長波帯であり、1675 nmより長い波長はファイバ伝送には適さないと考えられていたため、光通信波長帯としては定義されていませんでした。今回、マルチバンド伝送時のISRSを考慮すると、1700 nm付近の波長の伝送損失がS帯と同程度となることに着目し、従来の光通信波長帯の定義を超えたX帯の利用を提案しました。

図5に、本実験で使用したWDM信号のファイバ伝送路への入出力スペクトルと伝送損失を示します。伝送路として陸上基

幹伝送網で標準的に利用されている増幅中継間隔に相当する80 kmの標準シングルモードファイバを使用しました。各波長帯の帯域は、波長多重間隔150 GHzを想定し、S帯は54波長8.1 THz、C帯は30波長4.5 THz、L帯は40波長6.0 THz、U帯は28波長4.2 THz、X帯は28波長4.2 THzであり、総伝送帯域は180波長27 THzでした。

光ファイバ伝送における信号品質は、増幅中継器で発生する雑音と、光ファイバに入力するパワーに応じて増加する非線形歪みとのバランスによって決まります。そのため、より良い伝送性能を得るためにには、波長帯ごとの光パワーやスペクトル上の傾きなどの、WDM信号の送信条件を最適化する必要があります。しかしながら、この送信条件を実験的に最適化することは、信号が広帯域になりISRSの影響が大きくなるほど膨大な数の測定を要するため、困難になります。そこで、このような石英系光ファイバのラマンシフト周波数(約13 THz)をはるかに超える超広帯域WDM伝送の送信条件を最適化するための方法として、非線形歪みの影響を含めた信号品質を高速にシミュレーションできるガウス雑音

モデルの広帯域化の検討が活発化しています。本実験でも、ISRSを考慮した広帯域ガウス雜音モデルに基づいて、総伝送容量が最大となるように送信条件の最適化を行いました<sup>(13), (14)</sup>。送信条件を最適化したWDM信号を伝送することにより、ISRSによって最低損失帯はL帯とU帯の境界付近へシフトしました。また、光スペクトルの両端における伝送損失は同程度となっており、ISRSを利用することでX帯へ低損失帯を拡張できることが確認できました。このときの総送信パワーは26.5 dBm(約450mW)でした。

前述のOPA/EDFAハイブリッド増幅中継器を適用した中継間隔80 kmの周回伝送系<sup>\*3</sup>によって、27 THz WDM信号の長距離増幅中継伝送を実施しました。テスト信

号として、144 Gbaudの確率的コンステレーション整形(PCS: Probabilistic Constellation Shaping)直交振幅変調(QAM: Quadrature Amplitude Modulation)信号を使用しました。図6は560 km、1040 km伝送後の全180チャネルのネットビットレート<sup>\*4</sup>の測定結果です。すべてのチャネルの合計で、560 km伝送後において189.5テラビット毎秒、1040 km伝送後において160.2テラビット毎秒の伝送容量を達成しました。また、X帯でもテラビット毎秒級の高速信号伝送が実現できており、X帯の利用の有効性を示すことができました。

図7に増幅中継間隔80 km以上のUWB伝送の実証例を伝送容量と伝送距離の観点でまとめました。本実験の結果は、500

km以上、1000 km以上の長距離伝送において、最大の伝送容量を記録しました。UWB伝送では、ISRSによって過剰な損失を受ける短波長帯の伝送品質を改善するた

\*3 周回伝送系：光増幅器や伝送路ファイバをループ状に接続し、光スイッチで光信号の出入力タイミングをコントロールすることで、少ない機材で長距離の光増幅中継伝送を試験できる実験方式。

\*4 ネットビットレート：エラーフリー復調を実現するための誤り訂正用の冗長ビットなどを差し引いた正味のビットレート。

\*5 分布ラマン増幅：光ファイバ伝送路中にWDM信号とは別にポンプ光を入力することで、ポンプ光からの誘導ラマン散乱によって光ファイバを伝送中にWDM信号を増幅する手法。実質的に光ファイバの伝送損失を減らすことができるため効果的に伝送品質を向上することができますが、サブワット級の光パワーのポンプ光を伝送ファイバに入力する必要があります。

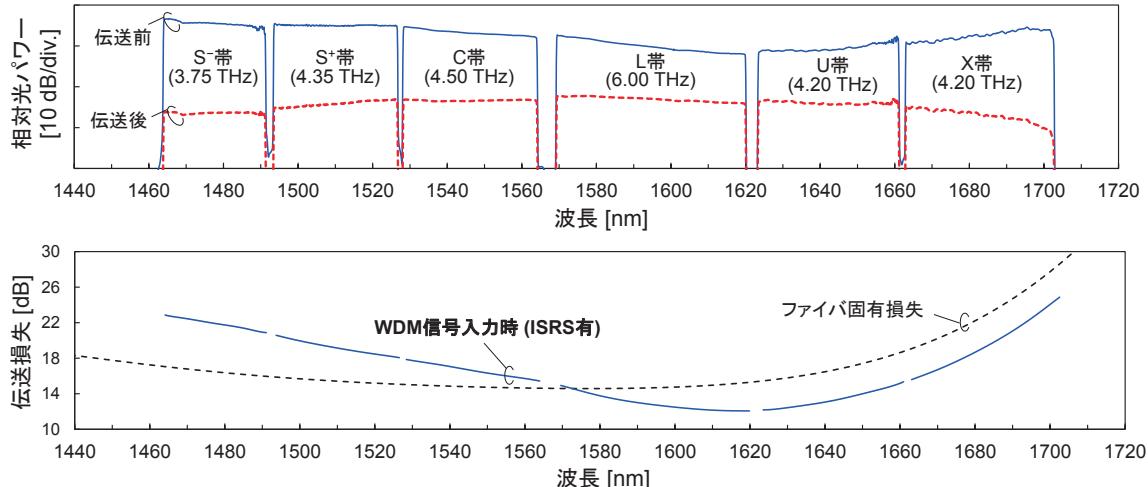


図5 WDM信号の80 km シングルモードファイバ伝送前後の光スペクトルと伝送損失

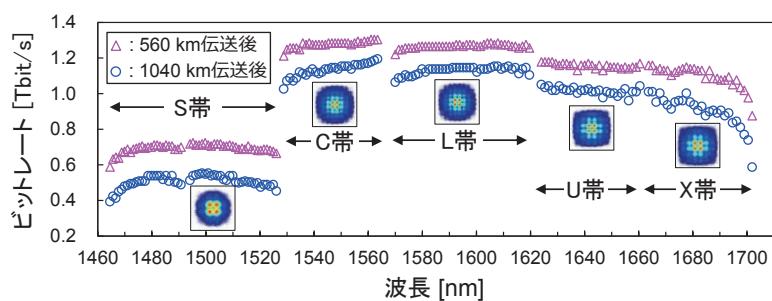


図6 全180チャネルのネットビットレート特性

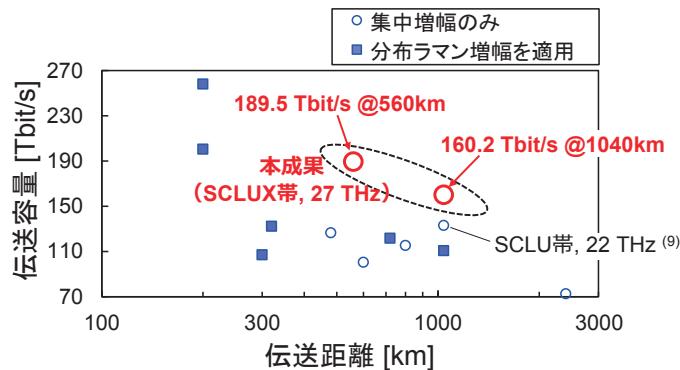


図7 シングルモードファイバ伝送の先行研究と本実験の比較

めに分布ラマン増幅<sup>5</sup>が適用される場合が多いですが、本実験では、WDM信号内のISRSを効果的に設計することで、集中増幅だけで大容量かつ長距離の伝送を実現できていることも特徴的な点です。また、27 THzの伝送帯域は、これらの増幅中継伝送実験において最大の伝送帯域となっています。

## まとめ

本実験では、従来の4 THzの伝送帯域の6倍超となる27 THzの伝送帯域による大容量長距離伝送を実証しました。本技術を用いることで、既設ファイバインフラを活用した基幹光伝送網のさらなる大容量化を実現することができます。

本研究成果の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)の委託研究(JPJ012368C04501)および助成事業(JPJ012368G60101)により得られたものです。

## 参考文献

- (1) <https://journal.ntt.co.jp/article/14780>
- (2) Y. Miyamoto et al.: "Wideband PPLN-based optical parametric amplifiers for scalable optical transport network," Proc. of OFC 2021, paper M5B.2, 2021.
- (3) <https://journal.ntt.co.jp/article/20087>
- (4) F. Hamaoka et al.: "Long-Haul >100-Tb/s Transmission Over >1000 km With High-Symbol-Rate Triple-Band WDM Signals," J. Lightw. Technol., Vol. 43, No. 4, pp. 1987-1994, 2025.
- (5) T. Umeki, O. Tadanaga, A. Takada, and M. Asobe : "Phase sensitive degenerate parametric amplification using directly-bonded PPLN ridge waveguides," Opt. Express, Vol.19, No.7, pp.6326-6332, 2011.
- (6) T. Kazama et al.: "Over-30-dB Gain and 1-dB Noise Figure Phase-Sensitive Amplification Using Pump-Combiner-Integrated Fiber I/O PPLN Module," Opt. Express, Vol. 29, No. 18, pp. 28824-28834, 2021.
- (7) T. Hoshida et al.: "Ultrawideband Systems and Networks: Beyond C+L-Band," Proc. IEEE, Vol. 110, No. 11, pp. 1725-1741, 2022.
- (8) T. Kobayashi et al.: "C+L+U-Band 14.85-THz WDM Transmission Over 80-km-Span G.654.E Fiber with Hybrid PPLN-OPA/EDFA U-Band Lumped Repeater Using 144-Gbaud PCS-QAM Signals," Proc. of OFC 2024, paper Th4A.1, 2024.
- (9) S. Shimizu et al.: "133-Tbps 1040-km (13 × 80 km) Lumped-Amplified Transmission Over 22 THz in S-to-U-Band Using Hybrid Multiband Repeater with PPLN-Based Optical Parametric Amplifiers and EDFA," Proc. of ECOC 2024, paper Th3B.2, 2024.
- (10) S. Shimizu et al.: "27-THz ISRS-Supported Transmission Over 1040 km in S+C+L+U and Extreme Longer-Wavelength Band," Proc. of OFC 2025, paper Th4A.2, 2025.
- (11) M. Abe et al.: "Periodically Poled Lithium-niobate-based Wavelength Converters for Waveband Extension to U-band and Beyond," J. Lightw. Technol., Vol. 43, No. 13, pp. 6335-6341, July 2025.
- (12) S. Konno et al.: "9 -THz Wideband PPLN-Based Wavelength Converter for Simultaneous Conversion of C+L-Band WDM Signal to Full S-Band," Proc. of OFC 2025, paper W1I.2, 2025.
- (13) P. Poggolini and M. R.-Zefreh: "Closed Form Expressions of the Nonlinear Interference for UWB Systems," Proc. of ECOC 2022, paper Tu1D.1, 2022.
- (14) K. Kimura et al.: "100-Tb/s-Class C+L+U-Band NZ-DSF Transmission with Closed-Form-GN-Model-Based Launch Power Optimization," J. Lightw. Technol., Vol. 43, No. 13, pp. 6313-6325, July 2025.



(上段左から) 清水 新平 / 木村 光佑 / 川合 晓  
(下段左から) 阿部 真志 / 紺野 峻矢 / 風間 拓志

IOWN/6Gにおけるオールフォトニクス・ネットワークの進化に向けて、独自のデバイス技術と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

# 光ネットワークサービスのオンデマンド提供を実現する光ネットワークデジタルツイン技術の研究開発

IOWN APN (Innovative Optical and Wireless Network All-Photonics Network) は、光信号を電気に変換せずに伝送することで、大容量・低遅延・低消費電力な通信をオンデマンドに提供することを目指しています。その実現には運用の自律化が不可欠であり、NTTは光ネットワークデジタルツインを活用し、実ネットワークを仮想空間に再現し、設計・分析・制御の自動化をめざしています。本稿では、伝送モードの自動最適化技術を中心に、オンデマンド光サービスを支える取り組みを紹介します。

キーワード: #IOWN APN, #デジタルツイン, #伝送モード自動最適化

まの 間野	とおる 暢	にしづわ /西沢	ひでき 秀樹
あなざわ	かずや	いしはら	ひろゆき
穴澤	和也	石原	裕之
やまもと	あつし	そね	よしあき
山本	淳	曾根	由明

NTT未来ねっと研究所

## IOWN APN と 光ネットワークデジタルツイン

### ■ IOWN APN によるオンデマンドな光ネットワークサービス

IOWN APN (Innovative Optical and Wireless Network All-Photonics Network) では、顧客拠点や端末までを光波長パス<sup>\*1</sup>で直接接続し、信号を途中で電気信号に変換せずに光のまま伝送することで、大容量・低遅延・低消費電力な通信サービスの提供をめざしています。さらに、ユーザーの要求に応じて多様な地点間で迅速に光波長パスを確立し、「必要なときに、必要な場所へ、必要な帯域を即座に提供する」

オンデマンド型の光ネットワークサービスの実現をめざしています。代表的なユースケースは分散データセンタです。地理的に離れた複数のデータセンタを大容量・低遅延なAPNで接続することで、あたかも1つの巨大なデータセンタのように扱うことができます。こうしたサービスの提供にはネットワーク資源だけでなく計算資源も必要となるため、APNは単なるネットワークサービスにとどまらず、計算基盤との連携も視野に研究開発を進めています。

### ■ 光ネットワークデジタルツインによる運用自律化

APNによるオンデマンドな光サービスを実現するには、ネットワーク運用の自律

化が不可欠です。現在は、人的作業中心に光ネットワークを監視し、設計・分析や制御を行っています。しかし、多くが手作業であるため、サービス提供までの時間短縮や提供頻度の向上には限界があり、オンデマンドなサービスを実現するのは困難です。

そこで私たちは、光ネットワークデジタルツインを活用した運用の自律化をめざしています。光ネットワークデジタルツインでは、実際のネットワーク装置からデータを収集し、仮想空間に精密なネットワークモデルを再構築します。この仮想ネットワーク上で設計・分析を行い、最適な制御を算出して実ネットワークに反映します。

この仕組みは、①データ収集、②設計・分析、③制御、という3つのステップで構成され、これを絶えず繰り返すことで運用の自律化を実現します（図1）。

本稿では、3つのステップのうち②設計・分析に関連する技術として、光波長パスの伝送モード最適化技術を紹介します。

## 光波長パスの伝送モード自動最適化技術

### ■ 光波長パスの伝送モード

伝送モードとは、光伝送装置が「どのように光信号を送るか」を決める設定の組み

\*1 光波長パス：トランシーバ間で特定の波長を用いて接続された接続。トランシーバ間で波長を占有することで低遅延・大容量の通信が可能。

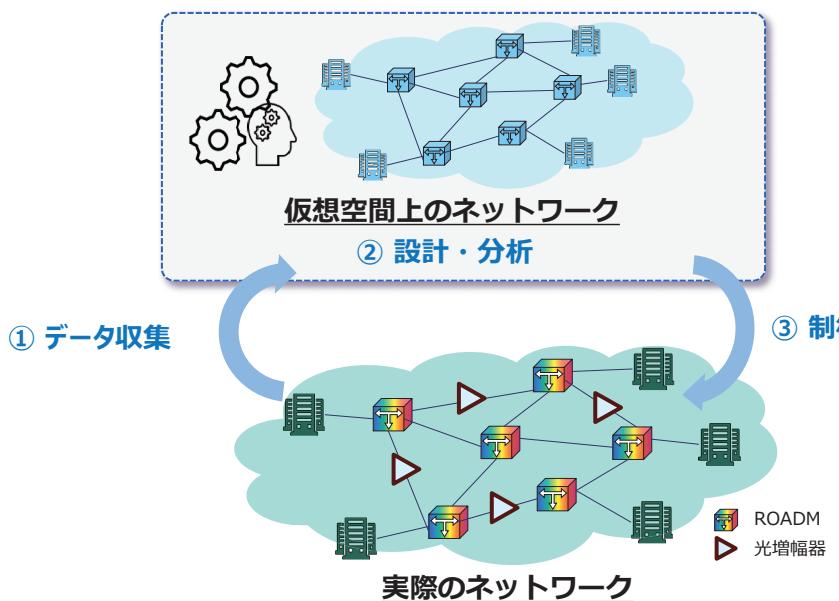


図1 光ネットワークデジタルツインとデータ収集、設計・分析、制御のステップ

表 Open ROADM MSA で規定・検討されている伝送モードの一部

伝送モード識別子	データレート [Gbit/s]	変調方式	ボーレート [Gbaud]	FEC
OR-W-100G-SC	100	DP-QPSK	28.0	SC-FEC
OR-W-100G-oFEC-31.6Gbd	100	DP-QPSK	31.6	oFEC
OR-W-200G-oFEC-31.6Gbd	200	DP-16QAM	31.6	oFEC
OR-W-200G-oFEC-63.1Gbd	200	DP-QPSK	63.1	oFEC
OR-W-300G-oFEC-63.1Gbd	300	DP-8QAM	63.1	oFEC
OR-W-400G-oFEC-63.1Gbd	400	DP-16QAM	63.1	oFEC
OR-W-400G-oFEC-124Gbd	400	DP-QPSK	124	oFEC
OR-W-800G-oFEC-124Gbd	800	DP-16QAM	124	oFEC
OR-W-800G-oFEC-131GbdE	800	PCS-16QAM	131	oFEC

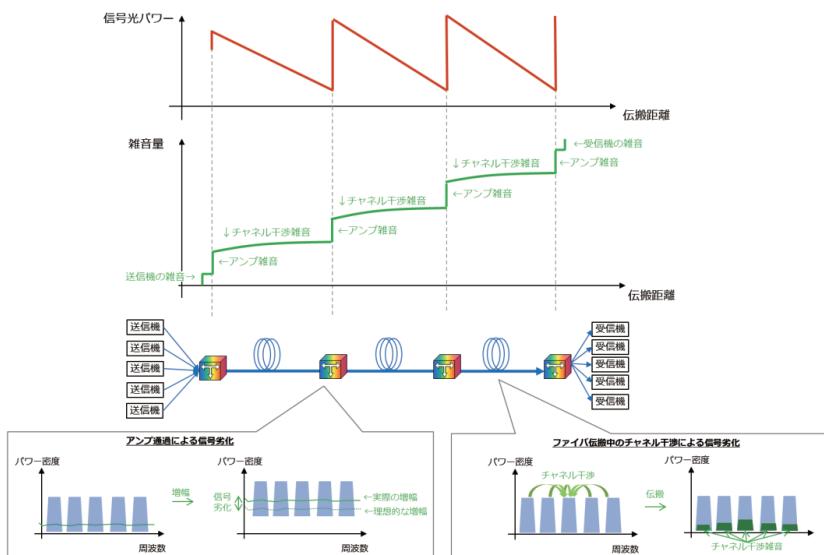


図2 信号伝搬による光パワーと雑音量の変化（上）、アンプ通過による信号劣化（下左）、ファイバ伝搬による信号劣化（下右）

合わせです。具体的には、変調方式<sup>②</sup>（信号変化の方法）、ボーレート<sup>③</sup>（信号変化の速さ）、FEC<sup>④</sup>（誤り訂正方式）、その他の伝送条件などで構成されます。これらの伝送モードごとに、データレートや伝送可能な条件が異なります。表は、Open ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer) MSA (Multi-Source Agreement) で規定・検討されている伝送モードの一部を抜粋したもので<sup>⑤</sup>す。これだけでも多数のモードが存在することが分かります。なお、Open ROADM MSA<sup>⑤</sup>以外にも Open ZR+ MSA<sup>⑥</sup>などの他の標準化団体が規定するモードやベンダ独自のモードも存在します。光伝送装置

は複数の伝送モードを実装しているため、光ネットワークの状態に応じて適切な伝送モードを選択することが重要です。

### ■伝送モード選択の難しさ

ある伝送モードでエラーなく信号を送れるか（伝送可否）を判断するのは簡単ではありません。なぜなら、次の2つを同時に考慮する必要があるからです。

- ・システム全体で発生する雑音（信号劣化）の総量

- ・伝送モードが持つ雑音への耐性

光アンプを使わない単純な回線では、信号劣化の主な要因は光パワーの減衰であり、距離でおおよそ判断できます。しかし、実際の大容量のネットワークでは光アンプで

信号を増幅中継して伝送するため、単純に光パワーを見るだけでは不十分です（図2上）。アンプで信号は増幅されるものの、そのたびに雑音が加わり、信号が少しづつ劣化していくためです（図2下左）。この信号の劣化量（雑音量）を考慮する必要があります。さらに、雑音の原因はアンプだけではありません。送受信機（トランシーバー）内部の回路や、波長多重伝送時の隣接チャネル干渉（図2下右）など、さまざまな要素が信号を劣化させます。つまり、伝送システム全体で発生する雑音の総量を正しく把握することが不可欠です（図2上）。

また、伝送モードごとに雑音に対する耐力が異なるため、同じ雑音量であったとしても伝送可能なモードとそうでないモードが存在します。例えば、変調方式は多値度<sup>⑦</sup>が増加するごとに、シンボルどうしの距離が小さくなるため、雑音耐力が低くなります。多値度が増加するとデータレートが増加するため、データレートと伝送距離の間にトレードオフがあります。このように伝送モードを選択する際は、伝送システムから発生する雑音の総量の把握と伝送モードごとの雑音耐力の把握の2つの課題があります。

本稿では伝送モードの最適選択に必須となる伝送システムの雑音量を把握する方法を解説します。

\* 2 変調方式：信号伝送の方式で搬送波の振幅、周波数、位相などを変化（変調）することで通信する方式のこと。デジタルコヒーレント伝送方式では光の振幅と位相を用いる変調方式が使用されます。

\* 3 ボーレート：信号伝送において、何回信号の状態（シンボル）が変化するかを表す指標のこと。単位はバー（baud）であり、100バーは1秒間に100回の信号変化を意味します。

\* 4 FEC：通信中に発生する誤りを、送信側で元のデータに冗長データを付与して送信し、受信側で冗長データを使い誤り検出、可能なら訂正する技術。

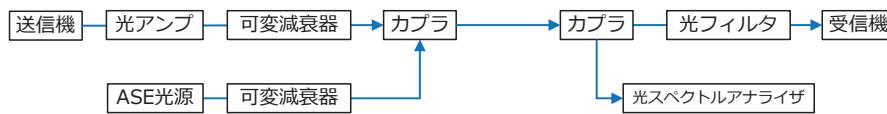
\* 5 Open ROADM MSA：メトロ・ロングホーラーの光ネットワークのオープン化とマルチベンダ化をめざす標準化団体。http://openroadm.org/

\* 6 OpenZR+ MSA：小型プラグアブルトランシーバ（QSFP-DDやOSFP）でのデジタルコヒーレント伝送方式を標準化し、マルチベンダ間の相互運用性を確保することをめざす標準化団体。https://openzrplus.org/

\* 7 変調方式の多値度：変調方式の1つのシンボルで表現できるビット数のこと。QPSKでは2ビット、16QAMでは4ビット。

### 従来のTRx雑音の測定系

多数の光学機器が必要となる。



### 提案技術の測定系

従来の測定系に比べ、必要な光学機器が少ない。

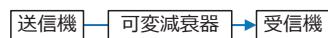


図3 従来のTRx雑音の測定系（左）と提案技術による測定系（右）

### ■主要な雑音源との雑音量の求め方

データセンタ間通信からメトロ領域をカバーする約数100 km程度までの伝送システムでは、支配的な雑音が

- ASE (Amplified Spontaneous Emission) 雜音: 光アンプからの自然放射増幅光による雑音
- NLI (Non-Linear Interference) 雜音: 波長多重した信号間の非線形効果による干渉雑音
- TRx (Transceiver) 雜音: トランシーバ由来の雑音

の3つであることが知られています。

また、これら3つの雑音は独立したガウス雑音として扱えるため、それぞれ独立に求めて、加算することで伝送システム全体の雑音量を得ることができます。

ここでは3つの雑音量の把握方法を説明します。特にNTTが考案したTRx雑音の定量化方法とその簡易な取得手法についても紹介します。

#### (1) 光アンプ雑音 (ASE雑音)

光アンプから発生するASE雑音は光スペクトラムアナライザを用いて直接測定する方法や、アンプの性能パラメータから計算する方法があります。ASE雑音は光アンプ内で自然放出された光が増幅され、信号品質を劣化させるため発生します（図2下左）。ASE雑音量は光スペクトラムアナライザで光増幅前後の光スペクトルを測定することで直接計測することができます。また、光アンプの性能指標である雑音指数と光アンプに入力される信号の光パワーや周波数から計算する方法もあります。

#### (2) 非線形干渉雑音 (NLI雑音)

NLI雑音は、信号間の非線形効果による干渉で発生します。この雑音は直接測定できないため、信号伝搬の物理モデルを使って計算します。

光ファイバで複数の波長を同時に伝送すると、非線形光学効果（Kerr効果）によって信号どうしが相互作用し、信号品質が低下します（図2下右）。この現象は非線形シュレディンガー方程式で記述されており、厳密なNLI雑音量を求めるには、この方程式を解く必要があります。

非線形シュレディンガー方程式には解析解が存在しないため次の2つのアプローチが採用されています。

- ・厳密解法：数値計算で方程式を解く方法。ただし、計算時間が非常に長いという課題があります。
- ・近似解法：ファイバ伝搬の物理モデルを近似した方程式を解く方法<sup>(2)</sup>。短時間で計算が完了します。

近似解法は、メトロから長距離（数100 km以上）の領域で十分な精度を達成できることが、シミュレーションと実機評価で確認されています<sup>(3)</sup>。

さらに、NTTは、データセンタ間通信への適用を想定し、100 km前後の領域でも、この近似手法が実用上十分な精度でNLI雑音量を求められることを、フィールド設備を用いて確認しています<sup>(4)</sup>。

#### (3) トランシーバ雑音 (TRx雑音)

NTTは、トランシーバの性能試験データを活用してTRx雑音量を抽出する手法<sup>(5)</sup>と、より簡単に推定する手法<sup>(6)</sup>を考案しました。

トランシーバは、電気信号を光信号に変換して長距離伝送する装置で、電子回路と光回路で構成されています。商用トランシーバは、コスト・性能・消費電力のバランスを重視して設計されており、どの程度の雑音が発生するかは従来明確ではありませんでした。通常、トランシーバは出荷前などに性能試験を行います。この試験では、送信信号に外部からASE雑音を加え、その

量を変えながら受信側で誤り率を測定します（図3左）。この試験データはトランシーバの性能を表すデータとして扱われます。例えば、同じ雑音量でより誤り率が低いトランシーバのほうが、性能が高いなどとトランシーバ間の性能を比較できます。このデータを解析することで、NTTはTRx雑音を抽出する手法を考案し、商用トランシーバでも有効であることを確認しました<sup>(5)</sup>。

しかし、この試験には光アンプ、光フィルタ、光スペクトラムアナライザ、可変光減衰器<sup>\*8</sup>など、多数の測定器が必要で（図3左）、コストや設備面で負担が大きいという課題があります。そこでNTTは、トランシーバと可変減衰器だけを使う簡易手法を考案しました（図3右）。この方法では、可変減衰器で入力光パワーを変化させながら誤り率を測定し、そのデータを解析してTRx雑音を推定します。この簡易手法も商用トランシーバで有効性が確認されています<sup>(6)</sup>。

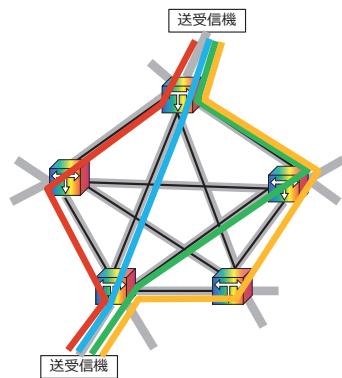
このようにして、ASE雑音・NLI雑音・TRx雑音の3種類を独立に求めて合算することで、システム全体の雑音量を把握できます。さらに、これを各伝送モードの雑音耐力と比較することで、伝送可否を判定できます。そして、伝送可能なモードの中から、データレート最大や占有波長帯域最小などの条件に応じて最適なモードを自動選択し、機器に設定することで、光波長パスの伝送モード自動最適化が完了します。

### ■雑音量最小の経路の効率的な選び方

ここでは、多数の経路候補から雑音量が最小の経路を効率的に選ぶNTTの技術<sup>(7)</sup>を紹介します。

\* 8 可変光減衰器：光パワーを指定の値だけ減衰させる機器。強すぎる光によって光学装置が故障することを防ぎます。

メッシュ型ネットワークにおける経路候補の例



リンクごとの雑音量から経路全体の雑音量\*への変換

\* ここでの雑音はASE雑音とNLI雑音で、TRx雑音は含まない

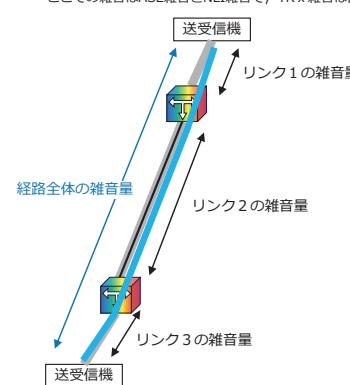


図4 メッシュ型ネットワークにおける経路候補の例（左）とリンクごとの雑音量から経路全体の雑音量への変換する考え方（右）

データセンタ間通信で想定されるメッシュ型ネットワークでは、始点と終点を結ぶ経路候補が非常に多く存在します（図4左）。前述したように、伝送可否は単純な距離ではなく、経路上で発生する雑音量で決まります。雑音量がもっとも少ない経路ほど、伝送できる可能性が高くなります。しかし、すべての経路について雑音量を計算するのは現実的ではありません。なぜなら、経路数はノード数（ROADM数）に対して指数的に増加するためです。

そこでNTTは、リンク単位（ROADM間）で雑音量を求め、その結果を使って最小雑音経路を算出する手法を考案しました。この方法では、リンクごとに発生する雑音（ASE雑音とNLI雑音）を独立したガウス雑音として扱い、経路全体の雑音量はリンク雑音の和とみなします（図4右）。こうすることで、リンクごとの雑音量を求めた後は、最短経路アルゴリズム<sup>\*9</sup>を使って雑音量が最小の経路を効率的に選べます。

この手法は、NECや複数の海外大学（コロンビア大学、デューク大学、ダブリン大

学）と協力し、ニューヨークの学術テストベッド網で検証されました。その結果、リンク単位の雑音量から経路全体の雑音量を高精度に推定できることが確認されています<sup>⑦</sup>。

## まとめ

IOWN APNは、大容量・低遅延・低消費電力な光波長パスサービスを、必要なときに、必要な場所へ、必要なだけオンデマンドに提供することをめざしています。その実現に向けて、光ネットワークデジタルツインを活用した運用の自律化に取り組んでいます。

本稿では、デジタルツインを構成する3つの要素のうち、①データ収集、②設計・分析、③制御の中から、②設計・分析に関するNTTの取り組みとして、光波長パスの伝送モード自動最適化を紹介しました。①データ収集については、光伝送路の状態を効率的に可視化する技術<sup>⑧</sup>を開発中です。また、③制御についても、複数ベンダの装置を統一的に扱うためのオープンなインターフェースに関する議論を、IOWN Global Forum、Open ROADM、TIP（Telecom Infra Project）<sup>\*10</sup>などの場で進めています<sup>⑨</sup>。

今後も、①データ収集、②設計・分析、③制御の研究開発を進め、デジタルツインのループを絶えず回し続けることで、運用の自律化とオンデマンドな光サービスの実

現をめざしていきます。

## ■参考文献

- 1) [https://github.com/OpenROADM/OpenROADM\\_MSA\\_Public/wiki/files/20250327\\_open-roadm\\_msa\\_specification\\_ver8.0.1.xlsx](https://github.com/OpenROADM/OpenROADM_MSA_Public/wiki/files/20250327_open-roadm_msa_specification_ver8.0.1.xlsx)
- 2) <https://opg.optica.org/jocn/fulltext.cfm?uri=jocn-14-6-C92&id=472581>
- 3) <https://opg.optica.org/jocn/fulltext.cfm?uri=jocn-12-6-C31&id=429003>
- 4) <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=ECEO-2022-We3B.1>
- 5) <https://doi.org/10.23919/ONDM57372.2023.10144894>
- 6) <https://ieeexplore.ieee.org/document/10926060>
- 7) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/10/13/231013a.html>
- 8) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2024/08/20/240820a.html>
- 9) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2025/03/31/250331a.html>



（上段左から）間野暢／西沢秀樹／穴澤和也

（下段左から）石原裕之／山本淳／曾根由明

NTT未来ねっと研究所は、大容量・低遅延・低消費電力な通信をオンデマンドな光ネットワークサービス提供するIOWN APN実現のために必要不可欠となる運用自律化の研究開発を推進しています。

## ◆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

# IOWN/6G時代の超高速・大容量通信を実現する光無線融合伝送技術の研究開発

現在NTTでは、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）の融合による、革新的なネットワーク・情報処理技術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「光マトリクス無線ビームフォーミング技術」について紹介します。

キーワード: #6G, #アレーアンテナ, #光マトリクス無線ビームフォーミング技術

いとう ほのか  
**伊藤 穂乃花**  
 ひらが けん  
**平賀 健**  
 ましの じゅん  
**増野 淳**

NTT未来ねっと研究所

## 移動通信システムの進化を支えるIOWN構想

移動通信における技術とサービスの進化はめまぐるしく、約10年ごとに世代を変え、NTTドコモでは2020年から5G（第5世代移動通信システム）の商用サービスが展開されています。5Gの特徴の1つは、ミリ波と呼ばれる高周波数帯を用いることで、飛躍的に広い周波数帯域幅による数Gbit/sクラスの超高速無線通信を実現していることがあります。2030年前後を目途に、次なる6G（第6世代移動通信システム）の商用化も各国で検討され始めており、ITU-R（International Telecommunication Union-Radiocommunication Sector）では6GをIMT-2030と位置付け、2024～2026年に技術性能要件と評価方法を定義、2027～2030年に標準規格化へと進める計画で、WRC-31（World Radiocommunication Conference 2031）以降に、ミリ波よりもさらに高周波数帯であるサブテラヘルツ帯<sup>①</sup>について、モバイル利用に関する議論

が行われることが決定されています<sup>②</sup>。

私たちは、NTTが提唱する超大容量・超低遅延・超消費電力を特徴とした革新的なネットワーク・情報処理基盤であるIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想の要素技術を6Gとを融合させることで、6Gで求められる、超高速・大容量通信、超カバレッジ拡張、超低消費電力・低コスト化、超低遅延、超高信頼通信、超多元接続&センシングといった種々の要求にこたえ、移動通信システムを継続進化させることをめざしています<sup>②</sup>。本稿では、このIOWN/6Gに向けた研究開発の取り組みの1つとして、光回路を用いて超高速・大容量通信を実現する「光マトリクス無線ビームフォーミング技術」について紹介します。

## 超多ビーム通信への期待

スマートフォンやIoT（Internet of Things）デバイスの普及などを背景に、モバイルトラフィックは年々指数的に増大しており、これらを収容する移動通信システムには通信の大容量化が求められ続けています。通信容量を増大させる手段として、1シンボル当りの情報量を増やす（変調多値数を上げる）方法や、複数アンテナで並列通信を行うことで空間多重<sup>②</sup>数を増やす方法、広帯域が使用可能な高周波数帯の利用などが検討されています。特に高周波数帯の利用については、6Gではさらなる無線資源を開拓するため、サブテラヘルツ帯と

呼ばれる100 GHz以上の周波数帯の活用が検討されており、世界的に研究や議論が活発化しています。このような高周波数帯では電波の伝搬損失を補うため、基地局にはアンテナ素子を多数並べたアレーアンテナ<sup>③</sup>の構成が求められています。各アンテナ素子に給電する信号の位相を制御し、電波に通信相手の方向に応じた指向性を持たせるビームフォーミング技術を用いると、細いビームで相手端末へピンポイントに電波を送信することができます。結果として、他の端末に対する電波干渉を抑えることができるため、前述の空間多重数を増やす方法として知られるMIMO（Multiple Input Multiple Output）通信と組み合わせた際、すなわち同時に多ビーム通信を行った場合に、干渉抑圧のための複雑な信号処理が必要となり、省電力と大容量通信を両立できる可能性があります。NTT未来ねっと研究所では、100 Gbit/s/ビーム×100ビーム/基地局=10 Tbit/s/基地局の超多ビーム型大容量無線伝送の実現をめざし、「光マトリクス無線ビームフォーミング技術」に取り組んでいます（図1）。

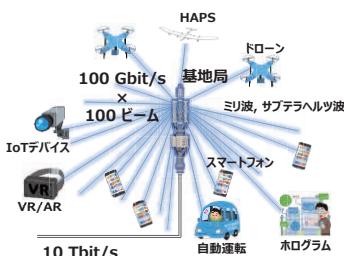


図1 「光マトリクス無線ビームフォーミング技術」によりめざす、無線基地局の大容量化の世界

\* 1 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、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。

\* 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、同時に・同周波数帯において並列に伝送する伝送方法。

\* 3 アレーアンテナ：複数のアンテナ素子を一定の配置で組み合わせたアンテナで、ビーム形成や指向性の制御が可能。無線通信やレーダ、衛星通信など広く利用されます。

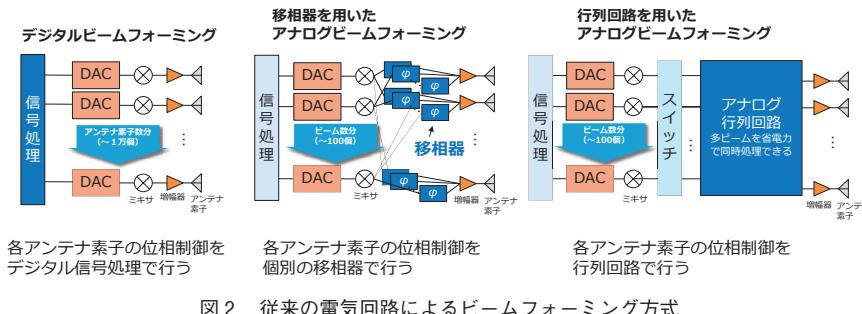


図2 従来の電気回路によるビームフォーミング方式

## 光技術の無線通信への展開

図2に、従来考えられてきたビームフォーミング方式を示します。5Gでは電気回路によるビームフォーミングが用いられていますが、サブテラヘルツ帯で想定される、最大数千～1万素子クラスの多素子アレー アンテナへの適用が難しいと考えられています。例えば、デジタルビームフォーミングを行った場合、アンテナ素子数分のDAC（デジタルアナログ変換機）やミキサが必要になることに加え、アンテナ素子数・ビーム数に伴って増加する信号処理量により消費電力の大幅な増加が想定されます。移相器を用いたアナログビームフォーミングでは、アンテナ素子ごとに多重するビーム数分の移相器とその個別制御が必要になります。高周波帯における狭いアンテナ素子間隔での集積が困難と想定されます。一方、行列回路を用いたアナログビームフォーミングは原理上マルチビーム生成に適しており、電源の不要なパッシブ回路により、入力するポートに応じた所定の方向へ複数ビームを同時に制御することが可能なため有望です。しかし、高周波帯の電気回路での実現となると金属導波管による立体構成が求められ、加工の観点から実現が難しい問題があります。そこでNTT未来ねっと研究所では、行列回路を用いたアナログビームフォーミングを、小型・低損失（省電力）な光回路で実現することを考えています。

近年、シリコンフォトニクスを含む光半導体技術の著しい進展により、光デバイスの高機能・小型化・低コスト化が進んでお

り、従来の光通信技術への活用にとどまらず、無線通信分野にもその応用範囲が拡大しています。フォトミキサと呼ばれる半導体デバイスは、異なる周波数の光波（レーザ）を入力するとそのビート信号（差の周波数成分を持つ電気信号）が出力される性質があり、レーザ周波数を変えるだけで出力する電波の周波数を高精度かつ柔軟に制御できるため、サブテラヘルツ帯を含む高周波数帯の電波生成法としてさまざまな研究が進められています<sup>③</sup>。また、光通信で培ったPLC（Planar Lightwave Circuit：平面光波回路）技術で、従来の電気回路では実現が難しいとされたアナログビームフォーミング用の大型立体行列回路を実装すれば、数千～1万素子クラスのアレー アンテナに対応した行列回路の圧倒的な小型化（平面化）を低コストに実現できます。さらに、光通信のWDM（Wavelength Division Multiplexing：波長分割多重）技術を応用することで、同時ビーム生成数のスケールアップも容易であり、基地局容量を従来から各段に増大することができます。

## 光マトリクス無線ビームフォーミング技術

NTT未来ねっと研究所では、光行列回路を用いたアナログビームフォーミングと光通信のWDM技術により、高周波数帯の大規模アレー アンテナで干渉レスな超多ビーム通信を行う回路を圧倒的に小型で構成可能な「光マトリクス無線ビームフォーミング技術」の研究を進めています。N×

M素子のアレー アンテナに対応した光マトリクス無線ビームフォーミング技術の原理について説明します（図3）。周波数f<sub>1</sub>のレーザ光源の光（搬送波）を2つに分配し、片方を送信したい無線信号（周波数f<sub>RF</sub>）でSSB変調（単側帯変調）します。この2つの光の波（搬送波と側帯波＝信号波）をフォトミキサに入力すれば、ビート信号として2波の周波数の差f<sub>RF</sub>の無線信号が出力されますが、このとき出力される無線信号の位相には入力する2波それぞれの位相が反映される性質があります。光マトリクス無線ビームフォーミング技術ではこの性質を活用し、フォトミキサに入力する前の光の段階で、アレー アンテナの各アンテナ素子に給電する無線信号の位相を制御することで、2次元方向のビームフォーミングを行う点に特徴があります。ここでは、アンテナからビームを向ける方向を仰角成分・方位角成分に分解し、搬送波と信号波それぞれに行列回路を用いて仰角方向・方位角方向の位相を重み付け（給電するアンテナ素子ごとに、特定の方向へ電波が強め合うような位相を付与）することで、無線信号に対する2次元方向の位相重み付けをしています。光スイッチを用いて、ビームを向ける仰角方向に応じた光行列回路の入力ポートを選択すれば、N×N光行列回路すべての出力ポートV<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>, …, V<sub>N</sub>から同じ搬送波が出力されますが、各出力間には所望の位相重み付けがされています。同じように、光スイッチを用いて、ビームを向ける方位角に応じた光行列回路の入力ポートを選択すれば、M×M光行列回路のすべての出力ポートH<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>, …, H<sub>M</sub>から同じ信号波が出力されますが、各出力間には所望の位相重み付けがされています。これらの光を、N×Mに並ぶアンテナ素子（N, M）に対応する組合せで合波し、マトリクス状に並ぶフォトミキサにそれぞれ入力すれば、仰角・方位角の2次元方向への位相重み付けが反映された無線信号が各アンテナ素子から送信されます。各アンテナ素子から送信される電波は位相重み付けにより

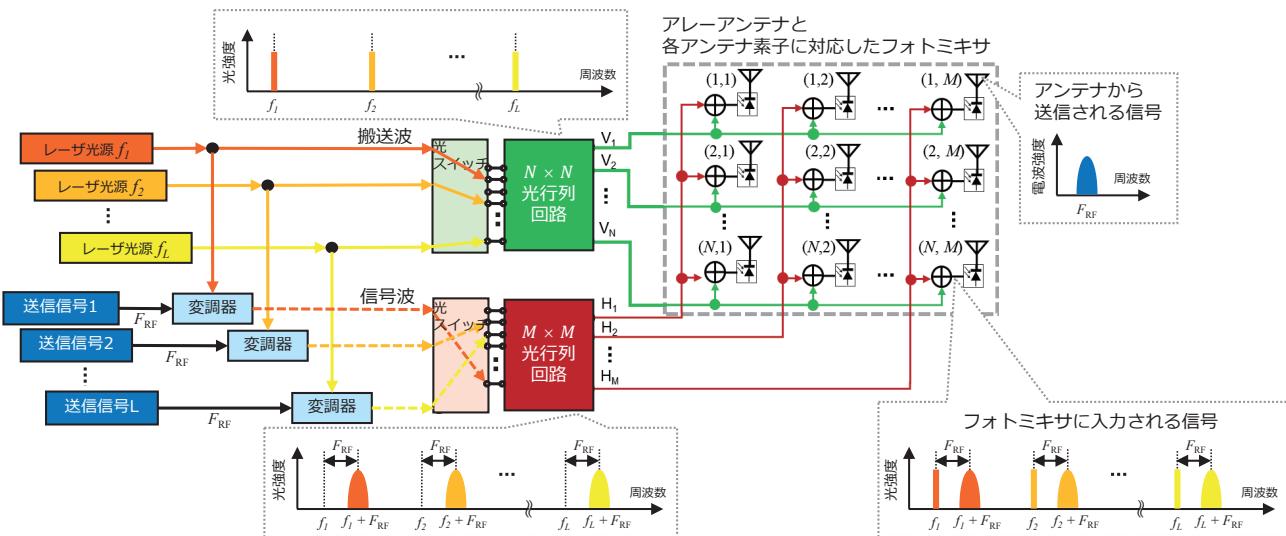


図3 光マトリクス無線ビームフォーミング技術の概要図

## 信号生成部

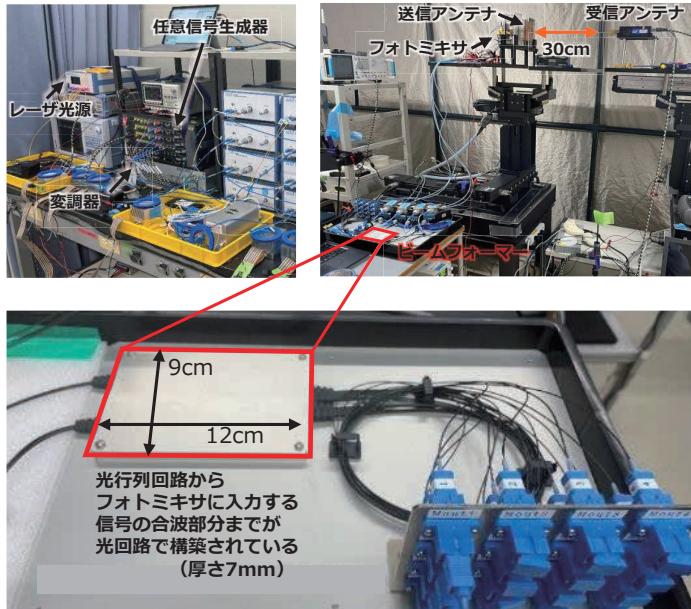


図4 平面光回路による小型のビームフォーマと測定の様子

特定の方向で強め合い細いビーム状になります。行列回路は多入力に対応しているため、レーザ光源の周波数を  $f_1, f_2, \dots, f_L$  のように多数用意し WDM すれば、ビーム数  $L$  の多ビーム信号を同一回路で同時に一括制御し生成することができます。

## 世界初 光回路による150 GHz帯2次元マルチビーム伝送実験

光マトリクス無線ビームフォーミング技術の原理実証を行うため、16素子ビームフォーマを試作し、電波暗室で実験を行いました（図4）。ビームフォーマは  $4 \times 4$

表1 送受信アンテナ諸元

パラメータ	値	
アンテナ形状	送信	プローブホーン
	受信	スタンダードゲインホーン
対応周波数		110-170 GHz
アンテナ素子間隔	送信	2 mm
	受信	—
アンテナ利得	送信	2 dBi/素子
	受信	24 dBi

表2 実験諸元

パラメータ	値
中心周波数	150 GHz
信号形式	シングルキャリア
変調方式	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM
変調速度	16 Gbaud
誤り訂正	LDPC
符号化率	適応符号化率 (2/3, 3/4, 4/5, 5/6)

素子のアーレーアンテナに対応しており、2つの  $4 \times 4$  光行列回路から、フォトミキサに入力する信号の合波部分を含む回路まで

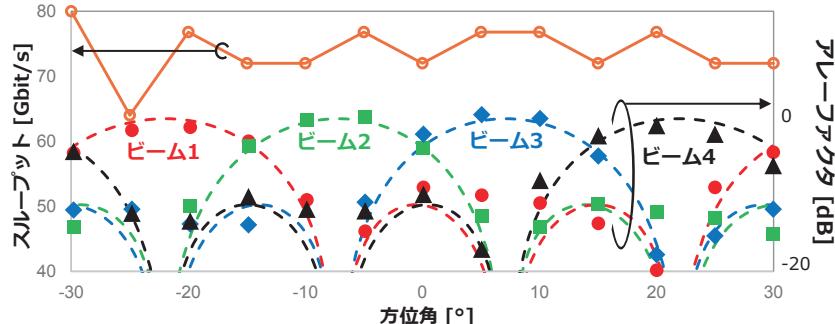
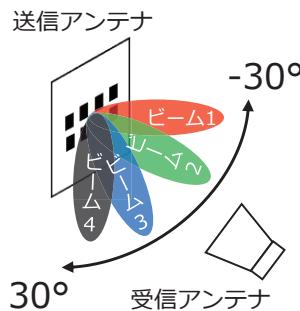


図5 150 GHz帯を用いた伝送実験によるスループット

が手のひらに乗るサイズのPLCで構築され、光ファイバによる出力をフォトミキサに接続することができます。2つの行列回路にはそれぞれ入力ポートが4つあり、この入力ポートを切り替えることにより、2次元16方向へのビームフォーミングが可能です。

信号生成部では、レーザ光源を用いて150 GHz差の2波光を生成し、一方を変調器と任意信号生成器により変調します。ビームフォーマで位相重み付けされた光信号は、各アンテナ素子に対応したフォトミキサに入力され、150 GHz帯の無線信号に変換されます。電波暗室内では、表1に示す $2 \times 4$ 素子の送信アンテナから表2に示す実験諸元の広帯域信号を各方向へ送信し、30 cm離れた受信アンテナで受信しました。今回の実験では、ビームフォーマとしての性能を確認するため、送信アンテナからの角度5度ごとに、各ビームの受信電力とスループットを測定しました。一例として、図5に送信アンテナからの仰角が $-7^\circ$ となる面の結果についてグラフで示します。各ビームの受信電力を最大値で規格化した4色のプロットと、理想的なビームフォーマとアンテナによるアレーファクタ（送信される電波の指向性）の計算値を示す破線は、縦軸右側に対応しています。これらが高いほどSINR (Signal-to-Interference-and-Noise Ratio : 信号対干渉雑

音比) \*4がよくなる傾向にあり、高いスループットが達成されます。橙色の実線は実際に測定された各方位角における最大スループットで、同図の縦軸左側に対応しています。選択ビームを適切に切り替えることにより、すべての方向で高次の変調方式である64 QAM (直交振幅変調) が選択され、64.0 Gbit/s以上の伝送が確認できました。また、複数ビームを同時に送信した際のスループットも測定しました。実験機材の都合で、 $2 \times 4$ 素子の送信アンテナのうち、内側の $2 \times 2$ 素子を送信アンテナとして使用し、2つの受信機の位置を(方位角、仰角) =  $(-6^\circ, 19^\circ)$ と $(19^\circ, 19^\circ)$ としています。2ビーム間の干渉によるSINRの劣化はわずか0.5 dBであり、2ビーム合計で最大136 Gbit/sの伝送スループットを確認しました。以上の実験結果から、光マトリクスビームフォーミング技術の原理を実証することができました。

## 今後の展望

今回の実験では、世界で初めてサブテラヘルツ帯での光回路を用いた100 Gbit/s級マルチビーム無線伝送に成功し、光マトリクス無線ビームフォーミング技術の原理実証を行いました。今後は、多素子化・マルチビーム化・マルチバンド化を進め、サブテラヘルツ帯で100 Gbit/s×100ビーム生成可能なビームフォーマ実現に向けた無線通信技術の確立をめざすとともに、電波イメージング・センシング分野への応用を含

め、研究開発を推進していきます。

## ■参考文献

- (1) ITU-R : "The ITU-R Framework for IMT-2030 Recommendation ITU-R M.2160," 2024.
- (2) NTT DOCOMO: "White Paper 5G Evolution and 6G," Jan. 2023.
- (3) P. Sanjari and F. Aflatouni: "An integrated photonic-assisted phased array transmitter for direct fiber to mm-wave links," Nat. Commun., Vol. 14, 1414, 2023.
- (4) H. Ito, K. Hiraga, H. Hirofumi, and R. Kudo: "Sub-THz Wireless Transmission with Photonic-assisted Two-dimensional Beamformer Using Optical Butler Matrix Circuits," Proc. of ECOC 2025, pp. 98-101, Copenhagen, Denmark, Sept. 2025.



(左から) 増野 淳/ 伊藤 穂乃花/ 平賀 健

NTT未来ねっと研究所では、無線通信に光技術を応用した光無線融合伝送技術の研究開発を推進し、便利で豊かな社会の実現に貢献していきます。

## ◆問い合わせ先

NTT未来ねっと研究所  
波動伝搬研究部

\*4 SINR: 信号の強さと、他信号との干渉および雑音の強さの比率で、通信品質を評価する指標の1つ。高いほど大きな通信容量が得られます。

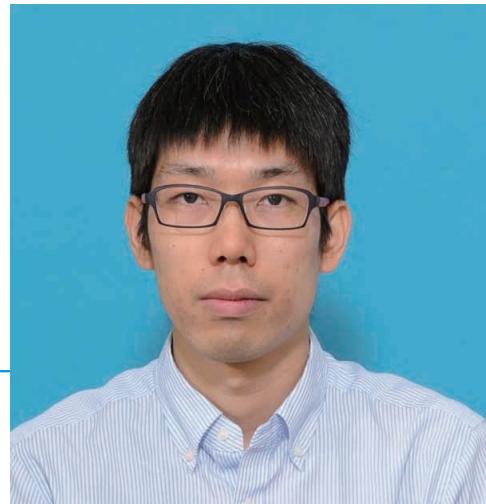
URL <https://journal.ntt.co.jp/article/37486>DOI <https://doi.org/10.60249/25125005>

## 主役登場

## IOWN構想の実現を支える 「光ネットワークデジタルツイン」への挑戦

間野暢 Toru Mano

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  
主任研究員



私が光ネットワークの研究開発に携わりはじめたのはIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想が始動し, IOWN Global Forumが設立されてから少し経ったころのことでした。それ以前はより上位レイヤ, 具体的にはIP/Ethernet, の仮想化やソフトウェア化を活用した運用技術の研究開発を行っていました。一方で, NTTが光アンプやデジタルコヒーレント技術, またそれを実装したDSP (Digital Signal Processor) などで世界を先導してきたこともあり, 光ネットワークの研究開発に挑戦したいという思いも抱いてました。ちょうどそのころ, 社内にも研究領域を光分野へ拡大する動きがあり, これを良い機会ととらえ, 私も新しい領域への挑戦することを決意しました。

実際に光ネットワークの研究開発に取り組むうえで, 私が特に重要だと考えているのは2点あります。1点目はオープン化やソフトウェア化による運用効率の向上です。私はもともとIP/Ethernet領域で研究開発を行ってきました。そこでは, IETF (Internet Engineering Task Force) やIEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) による標準化を背景に, 異なるベンダ間の相互接続や, ソフトウェアによる統一的な制御が当たり前のものとなっていました。インターネットがBGP (Border Gateway Protocol) を介して多数の組織を結びつけているのは, その典型例です。一方, 光ネットワークでは長らく標準的なプロトコルやフォーマッ

トが不足しており, 単一ベンダによる垂直統合システムが主流でした。しかし近年, Open ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer), MSA (Multi-Source Agreement) や TIP (Telecom Infra Project), OpenZR+ MSAといった団体の活動を通じて, 光レイヤにおいてもオープン化と標準化の動きが急速に進んでいます。すでに相互接続可能な信号フォーマットやオープンな制御インターフェースが登場し, リファレンス実装も整いつつあります。こうした環境の変化により, 従来は難しかったオープンインターフェースを活用したソフトウェアの制御が現実的なものとなりました。私自身, この流れこそが光ネットワークにおける新しい価値創出の鍵であり, 私のこれまでの仮想化やソフトウェア化に関する知見を活かして, デジタルツイン研究を推進するうえで絶好の機会だと感じています。2点目は光特有の物理現象を踏まえた運用技術による差異化です。光通信はIP/Ethernet通信のように0と1の論理だけで決まる世界ではなく, 光アンプの雑音, ファイバの非線形光学効果, 波長分散といった物理的要因が信号品質に直結します。さらに, それらの影響はネットワークの状態やファイバ・アンプ・トランシーバといった構成要素の固有特性にも大きく左右されます。したがって, 光ネットワークの性能を最大限に引き出すデジタルツインの構築には, こうした物理現象や特性を考慮することが不可欠です。私は特に, 光トランシーバの影響

を高精度にモデル化し, 低コストで特性を把握する技術に取り組んでいます。近年は電力制約や地理的制約からデータセンタの分散化が進み, データセンタ間を結ぶ光通信の重要性が高まっています。伝送距離が比較的短いデータセンタ間通信では, 従来のメトロやロングホール通信に比べ, 光トランシーバが信号品質に与える影響が相対的に大きくなり, そのモデル化や特性把握技術の重要性が増すと考えたからです。そのほか, NTTでは, 受信信号を解析することで専用測定機器を使わずに光ファイバの状態を低コストに把握できる伝送路可視化技術にも取り組んでいます。このように光ネットワーク運用の研究開発は物理法則への深い理解が求められる難しさがある一方で, ほかにはない差別化のポイントとなり得る分野でもあり, 大きな挑戦しがいを感じています。

NTTはこれまで日本の光通信網を長年安心・安全に運用してきた実績と経験があります。これに加えて, NTTがこれまで培ってきた光技術の研究開発の知見とオープン化・ソフトウェア化の潮流を融合させることができるのはNTTならではの強みと考えています。引き続き, 光ネットワーク運用を高度化・自律化する光ネットワークデジタルツインに取り組み, Open APN (All-Photonic Network) がめざすオンデマンドサービスの実現をめざしていきたいと考えています。

# NTTドコモのRAN仮想化 (vRAN) 技術

NTTドコモでは以前からコアネットワークの領域でネットワーク仮想化(NFV)の導入を推進してきており、

2025年より無線アクセスネットワーク領域の基地局の仮想化(vRAN)を推進している。

vRANでは無線特有のリアルタイム処理要求に対応するため数千の分散された拠点に配備する必要がある。

本特集では大規模展開の技術的課題と標準化での議論動向、

およびNTTドコモで実現した解決方法について紹介する。

## 仮想化技術を利用し経済的な基地局を実現する vRANの標準化動向

30

vRAN実現に向けた標準化団体であるO-RAN Allianceの現状を紹介するとともに、O-RAN Allianceがリードし提唱するアーキテクチャ、およびそれを実現するO-RANエコシステムについて紹介する。

## RAN向けコンテナ基盤（O-Cloud）の大規模展開の実現

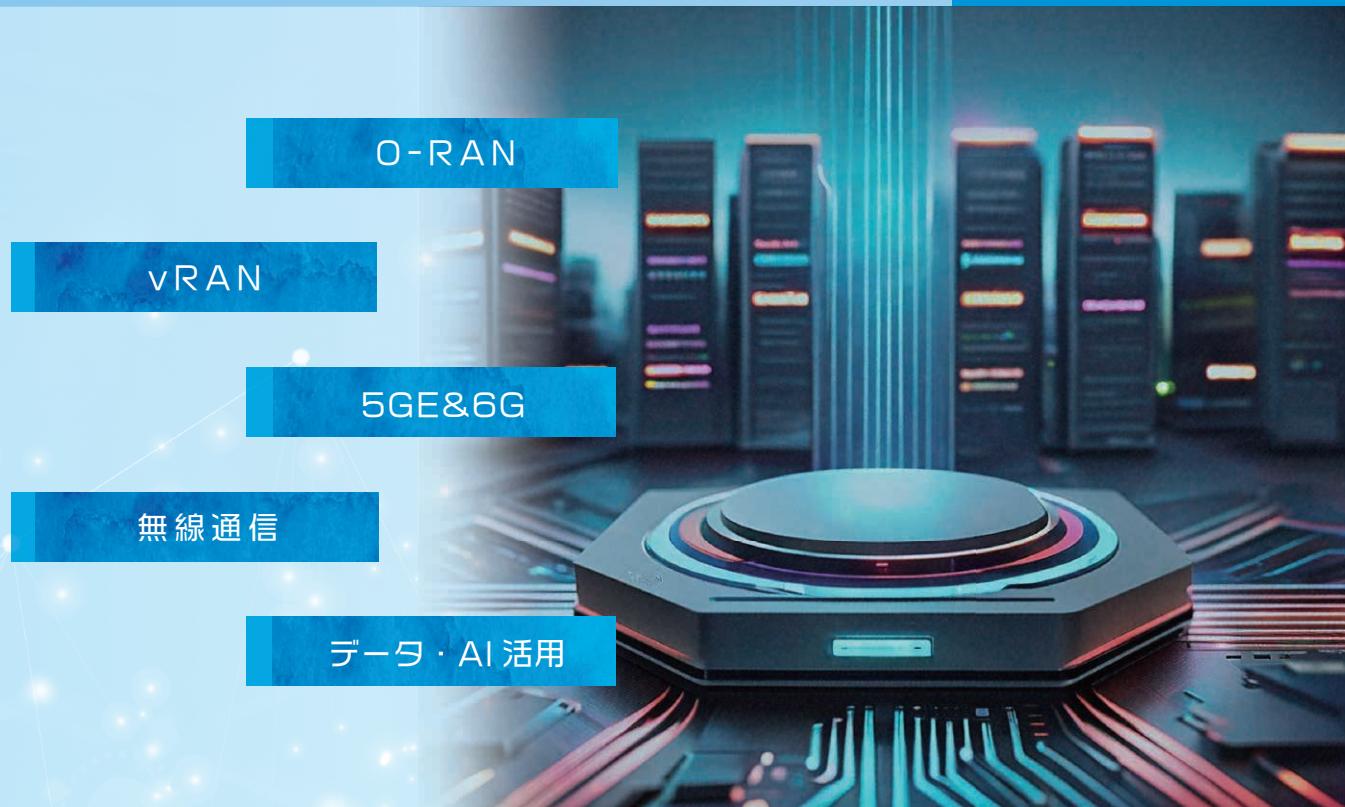
37

無線アクセスネットワーク（RAN）領域で基地局仮想化（vRAN）を収容する分散型コンテナ仮想化基盤（O-Cloud）の大規模展開時の技術的課題、および実現した解決方法について紹介する。

## 大規模仮想化ネットワークを統合制御するSMOの実用化

41

vRANの推進に伴い開発・導入したSMO（Service Management and Orchestration）の実用化開発について解説するとともに、海外展開を視野に入れた将来展望を紹介する。



## RAN向けコンテナ基盤（O-Cloud）を活用した 経済的なvRAN展開の実現

46

NTTドコモで開発したリソースの柔軟な設計や設備投資の最適化が可能となるO-Cloudを活用した無線基地局装置の配備、およびその効果について紹介する。

## RICによる無線制御自動化の実現

49

SMOを構成する機能部の1つであり、無線制御の自動化を実現するRIC (RAN Intelligent Controller) の概要、および今後のRICの拡張について紹介する。

## 主役登場 鈴木 勇斗 NTTドコモ

53

コストメリットのある無線インフラをめざして



# 仮想化技術を利用し経済的な基地局を実現するvRANの標準化動向

基地局装置は、リアルタイム・多同時実行可能・安定的な無線処理が要求されたため、これまで専用装置として設計・実装されてきました。一方、近年のプロセッサの進化や仮想化技術の進展により、基地局の仮想化(vRAN)が実現可能になってきました。本稿では、vRAN実現に向けた標準化団体であるO-RAN Allianceと、関連するエコシステムについて解説します。

キーワード: #O-RAN, #仮想化, #オープンソース

Refik Fatih Ustok<sup>†1</sup>

Muhammad Hamza<sup>†1</sup>

さがえ ゆうた<sup>†2</sup> / くの ゆうや<sup>†2</sup>  
寒河江 佑太 / 久野 友也

なかじま よしひろ<sup>†2</sup>  
中島 佳宏

ドコモ欧州研究所<sup>†1</sup>  
NTT ドコモ<sup>†2</sup>

## はじめに

無線基地局装置は、従来、リアルタイム性など無線処理特有の要求から専用装置を用いていました。一方、近年の急速な技術進歩により、汎用サーバを利用して無線基地局装置の要求条件である高性能・高信頼性・低消費電力化を実現することが可能となっていました<sup>(1)</sup>。汎用装置は、専用装置に比べて調達が容易で安価であることから、汎用仮想化技術を基地局に適用することで、より経済的な基地局vRAN(virtualized Radio Access Network)を実現できるようになりました。特に、従来は専用装置でしか実現できなかった多量の信号の同時符号化の際に、低遅延処理が要求される汎用装置において、アクセラレータの進化や、基地局などの特殊装置を汎用装置で実現するO-RANアーキテクチャの成熟化は、vRANの実現に大きく貢献しました。

本稿では、O-RAN Allianceの現状を紹介するとともに、O-RAN Allianceがリードし提唱するアーキテクチャやそれを実現するO-RANエコシステムについて解説します。

## O-RAN Alliance

### ■O-RANの概要

O-RANとは無線基地局装置のオープン化をめざし、さまざまなRAN装置を組み合わせたり、ハードウェアとソフトウェアを分離したりすることができるアーキテクチャです。O-RANでは、参考文献(2)での活動内容に基づき、3GPP(3rd Generation Partnership Project)仕様に準拠しつつ、3GPPの仕様の範囲外である、無線基地局装置の実装や運用の自動化に関する以下の仕様が定められています(図1)。

① RU (Radio Unit) および DU (Distributed Unit) をマルチベンダーで接続する「Open Front haul」

② 無線パラメータを自動調整する「RIC (RAN Intelligent Controller)」およびその「E2インターフェース<sup>\*1</sup>」

③ DUおよびCU (Centralized Unit)<sup>\*2</sup>の仮想化とその基盤である「O-Cloud」および「O2インターフェース<sup>\*3</sup>」

④ ①～③の実装に向けて策定された標準インターフェース仕様やオープンソースの実装

2025年時点のO-RAN Allianceの各WG(Work Group)の所轄範囲(図2)と状況を表に示します。

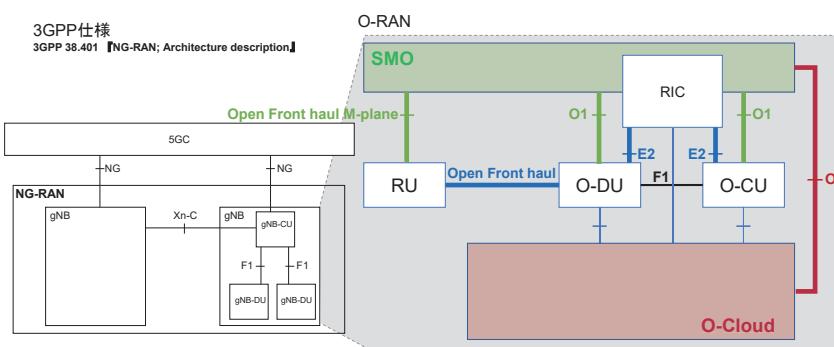


図1 O-RAN仕様の範囲

\*1 E2インターフェース: O-RAN AllianceにおけるNear RT RICとO-DU/O-CU間のインターフェースであり、Near RT RICからO-DUやO-CUなどの基地局ソフトウェアの設定情報を自動制御することができます。

\*2 CU: 5Gシステムにおける無線基地局装置のデジタル信号処理部分であり、ノンリアルタイムのL2機能やRRM(Radio Resource Management)機能などを実装する集約ノード。ベースバンド処理部や保守監視機能を備えています。

\*3 O2インターフェース: O-RAN AllianceにおけるSMOとO-Cloud間のインターフェースであり、O-CUやO-DUなどの基地局ソフトウェアをO-Cloud上にデプロイして制御したり、O-Cloud自体を管理したりすることができます。

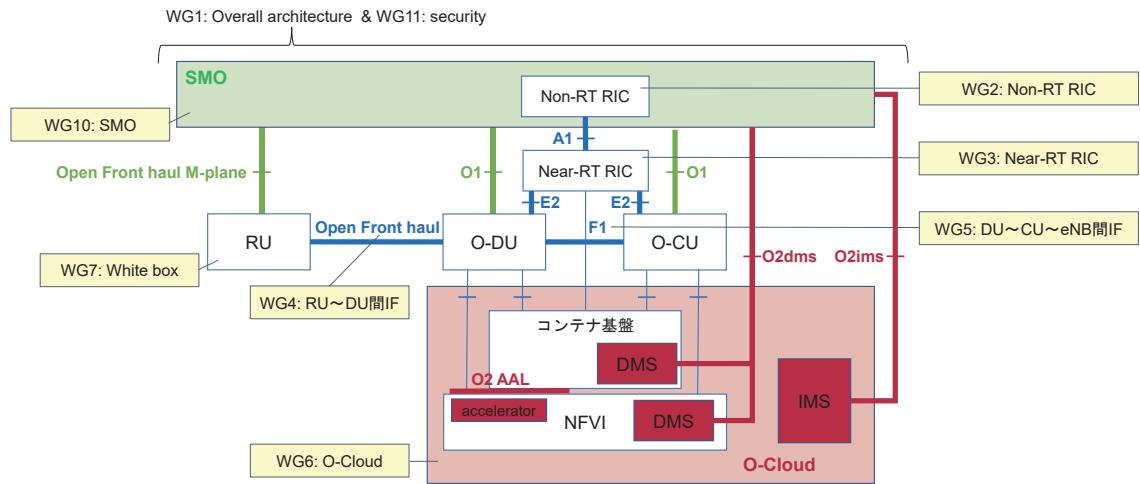


図2 O-RAN Allianceの各WGの所轄範囲

表 各WGにおける標準化状況

WG	状況	主なアウトプット
WG1: Use Cases and Overall Architecture Workgroup	仕様化中	SMOの分離, インテントドリブン管理, ネットワークスライシング, 潜在的なユースケースの特定など, 全体的なアーキテクチャの指定.
WG2: Non-Real-time RIC and A1 Interface Workgroup	ステージ3とテストの仕様化中	A1インターフェース (Non RT RIC～Near-RT RIC) 仕様とテスト. R1インターフェース (Non RT RIC～rApp) 仕様. ユースケース.
WG3: Near-Real-time RIC and E2 Interface Workgroup	テストの仕様化中	E2インターフェース (Near-RT RIC～vDU/vCU) の仕様とテスト. ユースケース.
WG4: Open Fronthaul Interfaces Workgroup	テストを含む全仕様化の完了後, 機能拡張 (テスト含む) やメンテナンスを継続中	Open Front haulインターフェースの仕様とテスト.
WG5: Open F1/W1/E1/X2/Xn Interface Workgroup	テストを含む全仕様化の完了後, 機能拡張 (テスト含む) やメンテナンスを継続中	3GPPで指定されたF1/W1/E1/X2/Xnインターフェースのプロファイル.
WG6: Cloudification and Orchestration Workgroup	ステージ2の仕様化中	O2インターフェース (SMO～O-Cloud) の仕様とテスト. AALインターフェース (vDU/vCU～Accelerator) の仕様. ユースケース.
WG7: White-box Hardware Workgroup	ステージ1の仕様化中	ハードウェア設計と導入シナリオの検討.
WG8: Stack Reference Design Workgroup	停止	ソフトウェア設計とIOTテストの検討.
WG9: Open X-haul Transport Workgroup	テストの仕様化中	トランスポート仕様. トランスポートの運用管理の仕様.
WG10: OAM for O-RAN	ステージ1/ステージ2の仕様化中	OAMのユースケース. 要件, 情報モデル, データモデル, およびSMOSのAPI仕様とOAMアーキテクチャ. O1アラームとパフォーマンス測定の新しい仕様を含むO1インターフェースの仕様.
WG11: Security Workgroup	テストの仕様化中	セキュリティの観点からのインターフェース要件. セキュリティの観点からの機能要件.

IOT : Interoperability Test

## ■WG1におけるO-RANアーキテクチャとユースケース

### (1) SMO (Service Management and Orchestration) の分離

WG1では、各コンポーネントのマルチベンダ化とその相互運用性の強化、および3GPPなどで標準仕様化された既存の機能とO-RAN Allianceで定義された新しい機能の統合のために、SMO (Service Management and Orchestration) アーキテクチャの分離化を推進しています。SMOは複数のSMOS (SMO Service) に分離され、参考文献(3)の技術レポートのとおり、OAMやトポロジ管理、O-Cloudのオーケストレーション、スライス管理、AI/MLなどさまざまなSMOSを例示しています。

### (2) インテントドリブン管理

WG1では、インテントドリブンアプローチにより、参考文献(4)のとおり、高レベルのインテントを使用してRANサービスを管理するという概念が導入されています。これにより、オペレータは具体的なインスタンス数や接続条件などネットワークの作成手順を記述することなく、必要となる最終形態のネットワークをインテントとして指定しただけでネットワークを構築できます。

### (3) ユースケースの仕様化

WG1では、WG横断での全体的なユースケースの仕様化が進められています。参考文献(5)のとおり、例えば、動的スペクトル共有 (DSS : Dynamic Spectrum Sharing) \*4は、LTEデバイスとNRデバイスがQoE (Quality of Experience) を損なうことなく既存のスペクトルリソースを共有できるインテリジェントな制御機能をサポートし、L3 (Layer 3), L2, およびL1の制御機能を強化することにより、マルチベンダ環境でもシームレスで効率的なスペクトル使用を実現しながらDSSを実装しています。

## ■WG6のvRAN仕様

参考文献(1)のとおり、WG6は、O-Cloudの機能要件とO1インターフェース

仕様要件をGA&P (General Aspects & Principles) に規定し、それをベースにユースケースの仕様化を推進することに重点を置いています。

O-Cloudには、①NFデプロイメントとしてのvCU (virtualized CU) /vDUのリソースとリソースプール、②NFデプロイメントを管理するDMS (Deployment Management Service)、③リソースとDMSを管理するIMS (Infrastructure Management Service)、④アクセラレータであるAAL (Acceleration Abstraction Layer) \*5の4つの要素があります。

O-Cloudは、VM (Virtual Machine) やコンテナ技術で仮想化されたvCU/vDUにワーカロードを提供し、NFデプロイメントとして管理しています。

## ■WG10のSMO仕様

### (1) OAMアーキテクチャおよびO1インターフェース

WG10は、OAMアーキテクチャ、OAMの要件、およびO1インターフェース仕様の開発に重点を置いています。OAMアーキテクチャは、参考文献(6)で規定されており、SMOの包括的なフレームワークを提供しています。これにより、vRANコンポーネントを含むO-RANネットワーク機能を効果的に管理できます。

O1インターフェースは、O-RANネットワーク機能のソフトウェア管理機能とともに、参考文献(7)のとおり、FCAPS (Fault, Configuration, Accounting, Performance, Security) \*6機能の実装をサポートしています。

### (2) パフォーマンス測定とO1 Alarms

現在、WG10は、ドコモ主導の下、O-CU-CP (Control Plane), O-CU-UP (User Plane), O-DUなどのO-RANネットワーク機能ごとにパフォーマンスKPIやO1 Alarmsを規定しており、オペレーターがマルチベンダのO-RANネットワーク機能全体で測定値や障害管理を収集できるようにしています。

### (3) クラウド環境での運用

WG10は、従来のOAM機能が基地局と

一体になったアーキテクチャから、クラウド環境の機能を利用してOAMを実現する新しいアーキテクチャを指向しており、vRANコンポーネントの管理への影響分析に取り組んでいます。

(4) O-RANネットワーク機能のリカバリ また、WG10は、マルチベンダネットワーク環境におけるO-RUやvRANの障害シナリオとそれに対応するリカバリメカニズムを検討し、エンド・ツー・エンドのネットワークの回復性をめざしています。

## O-RANエコシステム

### ■O-RAN関連プロジェクトの概要

O-RAN Allianceは、オープンで仮想化されたRANの相互運用性とイノベーションを実現するために、他の標準化団体と緊密に連携することで、大規模で協調的なエコシステムの開発を主導しています。特にRANとコアネットワークの接続については3GPP仕様で規定されているため、3GPPはO-RAN Allianceにとってもっとも重要な標準化団体です。

O-RAN Allianceは、vRANの実現のためのクラウド技術を利用した仮想化基盤であるO-Cloudに対する要件とインターフェースを定義するにあたって、ETSI NFV仕様やCNCF (Cloud Native Computing Foundation) 仕様を参照することで、複数の標準化団体で仮想化基盤の仕様が矛盾しないようにしています。また、WG2には、ETSI ZSM (Zero-touch network and

\*4 動的スペクトル共有：動的に波長分布を分合う仕組みであり、特にLTEの周波数帯の一部を5Gで利用することを指します。

\*5 AAL : O-Cloud上に設置されたハードウェアアクセラレータのハードウェアとソフトウェアを分離するレイヤ。O-RANで定義されており、異なるベンダのハードウェアアクセラレータをソフトウェアと組み合わせ、標準フォーマットやインターフェースなどを指定してアクセスできるようにします。

\*6 FCAPS : 通信事業者のネットワークの管理・監視項目である、障害 (Fault), 設定 (Configuration), 課金管理 (Accounting), 性能 (Performance), セキュリティ (Security) を指します。

Service Management) の概念が組み込まれており、自動化と運用効率向上が実現しています。

### ■3GPP

WG10は、O1管理サービスを可能な限り既存の3GPP標準に合わせており、どちらもSBA<sup>7</sup>アプローチに従っています。

WG10の検討および仕様化の主な目的は、3GPP標準に準拠するユースケースを特定し、そのユースケースとO-RANに固有の管理サービスのギャップを検出し、このギャップに対して必要な拡張をO-RANの仕様に定義することで、O-RANと3GPPの仕様の整合性を確保することです。

### ■ETSI NFV

ETSI NFVが仕様化しているETSI NFVフレームワークは、ネットワーク機能を仮想化し、クラウドベースの通信インフラストラクチャを管理するための標準化されたアプローチを提供しています。O-RAN AllianceおよびO-RAN SCのアーキテクチャは、クラウドネイティブで仮想化されたRANアプローチのため、相互運用性、スケーラビリティ、および効率的なリソース管理を実現するために、それらをETSI NFV標準に合わせることが重要です。

- SMOは、ETSI NFVフレームワークのOSS (Operations Support System)、EM (Element Management)、およびNFVO (Network Functions Virtualization Orchestrator)<sup>8</sup>相当の機能を実現しています。
- O-Cloudは、ETSI NFVフレームワークのNFVI (Network Functions Virtualization Infrastructure)<sup>9</sup>、およびCIS (Cloud Infrastructure Software) クラスタに対応しています。
- DMSは、VIM (Virtualized Infrastructure Manager)、CISM (Cloud Infrastructure and Service Management)、およびVNFM (Virtual Network Function Manager) に該当します。
- IMSは、仮想化基盤の構成、監視、および全体的な制御を行うPIM (Physical

Infrastructure Manager) とCCM (CIS Cluster Manager) にマップされます。

- AALは、ETSI NFVフレームワークに不足しているコンポーネントです。

AALの拡張はETSI NFV仕様の将来必要となる機能強化であり、ETSI-NFVフレームワークとO-RAN WG6の仕様のギャップを埋めることができます。また、この機能強化はO-RAN SCとNFVベースの通信クラウドインフラストラクチャの間のシームレスな相互運用性を確保することができます。

### ■O-RAN SC

O-RAN SCは、O-RAN Allianceの実現のために設立された、Linux Foundation<sup>10</sup>配下のオープンソース団体です。O-RAN SCの目標は、従来のRANアーキテクチャを進化させ、5G (第5世代移動通信システム) および将来の無線ネットワークにおけるさまざまなユースケースに対応が可能な相互運用性、柔軟性、およびインテリジェンスな制御による効率性を可能にするオープンなソフトウェアエコシステムを構築することです。

#### (1) SMO

O-RAN SCは、RANコンポーネントの運用とライフサイクルの管理を担当するSMOフレームワークを開発しています。SMOは主にONAP (Open Network Automation Platform) コンポーネントを利用しています (図3)。

- AI主導のポリシー制御と最適化を行うNon-RT RIC<sup>11</sup>相当のCCSDK (Common Controller Software Development Kit)。
- O1インターフェースを収容し、RANコンポーネントからパフォーマンスとトレーメトリデータを収集するためのVES (Virtual Event Streaming)。
- SMOフレームワーク内におけるイベント駆動型通信のメッセージバスとしてのプラットフォーム機能であるKafka。
- OAM向けのKubernetes<sup>12</sup>ベースの自動化ツールであるNephio。

・オーケストレーション機能を強化するために、ネットワーク機能オーケストレータ (NFO : Network Function Orchestrator)<sup>13</sup>としての役割を果たすdevtron。

#### (2) O-Cloud

O-RAN SCは、O-RANアーキテクチャでVMベースのネットワーク機能 (VNF (Virtual Network Function)) およびコンテナベースのネットワーク機能 (CNF (Cloud native Network Function)) を収容する仮想化基盤としてO-Cloudを実装しています。

O-Cloudの現在の実装には、次のものが含まれます (図3)。

- ・低遅延、高可用性、およびリアルタイム処理機能を備えたキャリアグレードのクラウドプラットフォームを提供するためのIMSおよびDMSとして機能

\* 7 SBA : 5GCやO-RANで採用されているソフトウェアアーキテクチャの1つで、コアネットワークの各NFや保守管理機能を、SBI (Service Based Interface) と呼ばれるバス型の統一的なインターフェースを介して接続し、相互作用させるアーキテクチャ。SBIには通信先装置を発見するための機能などが定義されています。

\* 8 NFVO : 複数のVIMにまたがる仮想リソースのIMSを実行し、VNFやネットワークサービスを展開・管理するシステム。

\* 9 NFVI : ETSI NFVで定義された、VNFが展開される環境を構築するすべてのハードウェアおよびソフトウェアコンポーネントの総称。クラウドプラットフォームを構成する汎用サーバ、ストレージデバイス、ネットワークデバイス、およびそれらの物理リソースを仮想化するための仮想化レイヤ上のソフトウェアの総称。

\* 10 Linux Foundation : Linuxを標準化し、商用利用を促進するために設立された非営利の技術コンソーシアムであり、さまざまなオープンソースのプロジェクトが活動しています。

\* 11 Non-RT RIC : O-RAN Allianceにおいて、リアルタイム性が求められないことに対してインテリジェンスな制御を行うシステム。

\* 12 Kubernetes<sup>®</sup> : 複数のサーバで構成される大規模環境に向けて、コンテナを管理するコンテナオーケストレーションツール。Kubernetes<sup>®</sup>はオープンソースソフトウェアです。

\* 13 ネットワーク機能オーケストレータ : 仮想およびクラウドネイティブのネットワーク機能を調整・管理するシステム。

\* 14 StarlingX : OpenStackやKubernetesの機能を利用し仮想化基盤を提供するオープンソースの団体およびそのソフトウェアコンポーネント。

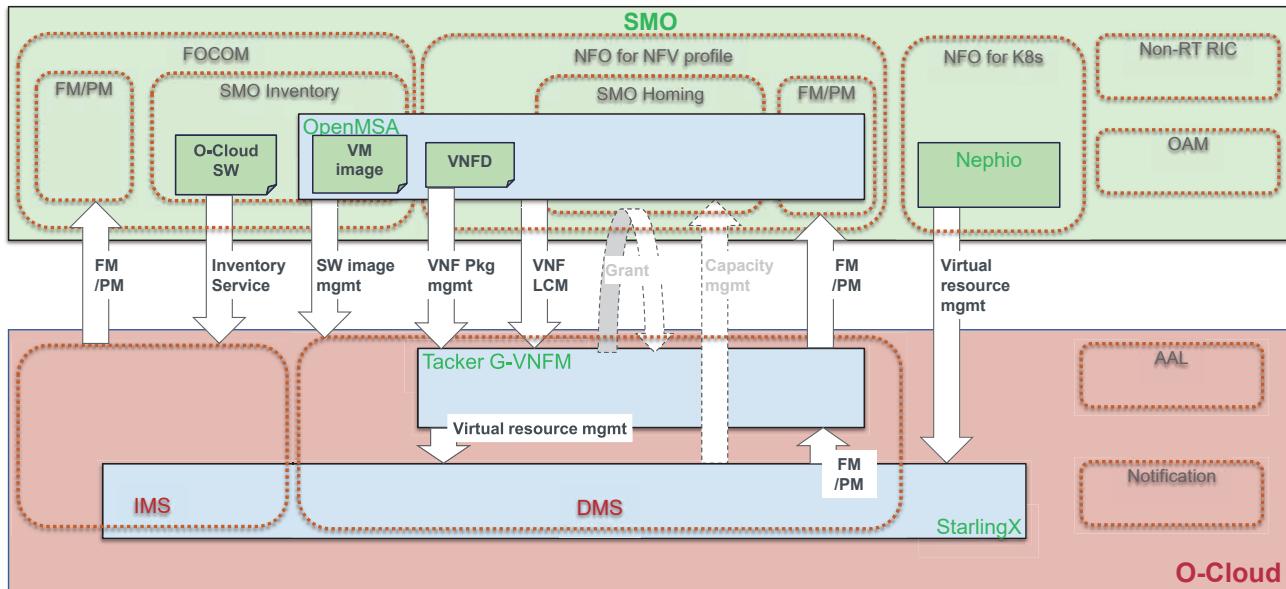
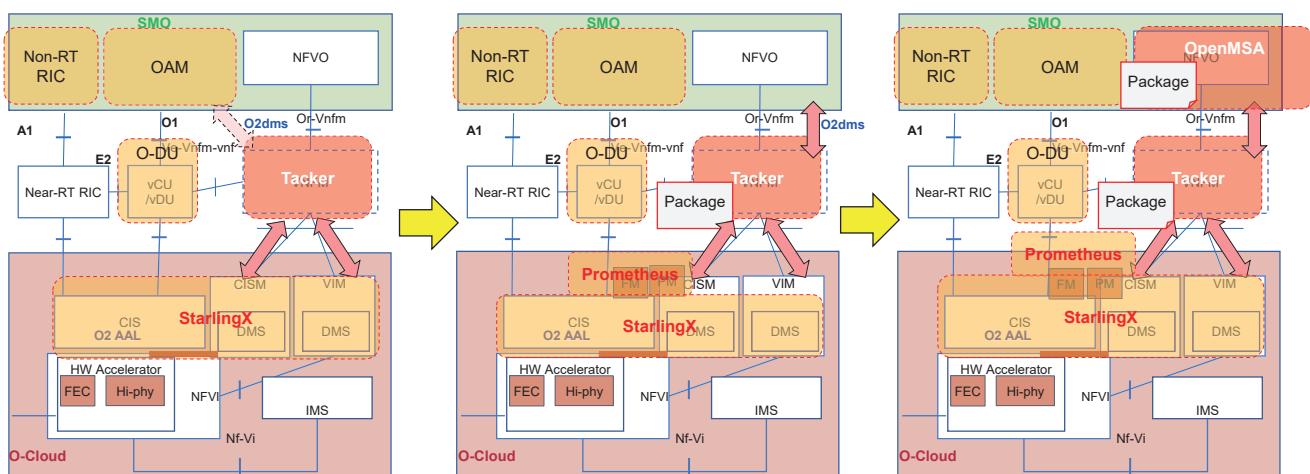


図3 SMOとO-Cloudの構成要素

**F-I-Release:** O2dms for VM and container  
O2 DMS ETSI NFV Profileへの追従と、TackerとStarlingXの接続

**J-K-Release:** FM/PM  
FM/PMの実現

**L-Release later:** automation framework  
TackerとOpenMSAの接続



FEC (Forward Error Correction) : 送信側で冗長な情報を付加し、受信側でその情報を使ってデータ伝送時に発生したエラーを修正する仕組み。  
Hi-phy : 無線物理層の上位機能の処理をカバーする機能で、O-RANフレームワークではO-DUが実装する。

図4 StarlingXとTackerをベースとするSMOとO-Cloudインフラストラクチャの検討

するStarlingX<sup>14</sup>.

- WG6仕様にしたがって、VNF LCM (Life-Cycle Management)などのインターフェースを提供しつつVNFおよびCNFを調整・管理するためのDMSとして機能するOpenStack Tacker (Tacker)。

### (3) O-DU

O-DUは、細分化されたRANアーキテクチャの重要なコンポーネントであり、無線信号のリアルタイム処理とタスクのスケジューリングを担当しています。O-RAN SCは現在、O-DUの基本実装としてOAI (OpenAirInterface) をベースに検討して

おり、これによりオープンで柔軟なソフトウェアドリブンのRAN機能を可能にします。

O-RAN SCは現在進行中のプロジェクトであり、O-RAN SCのリリースサイクルにしたがってO-CloudやSMOのさまざまなコンポーネントが隨時提供されています(図4)。

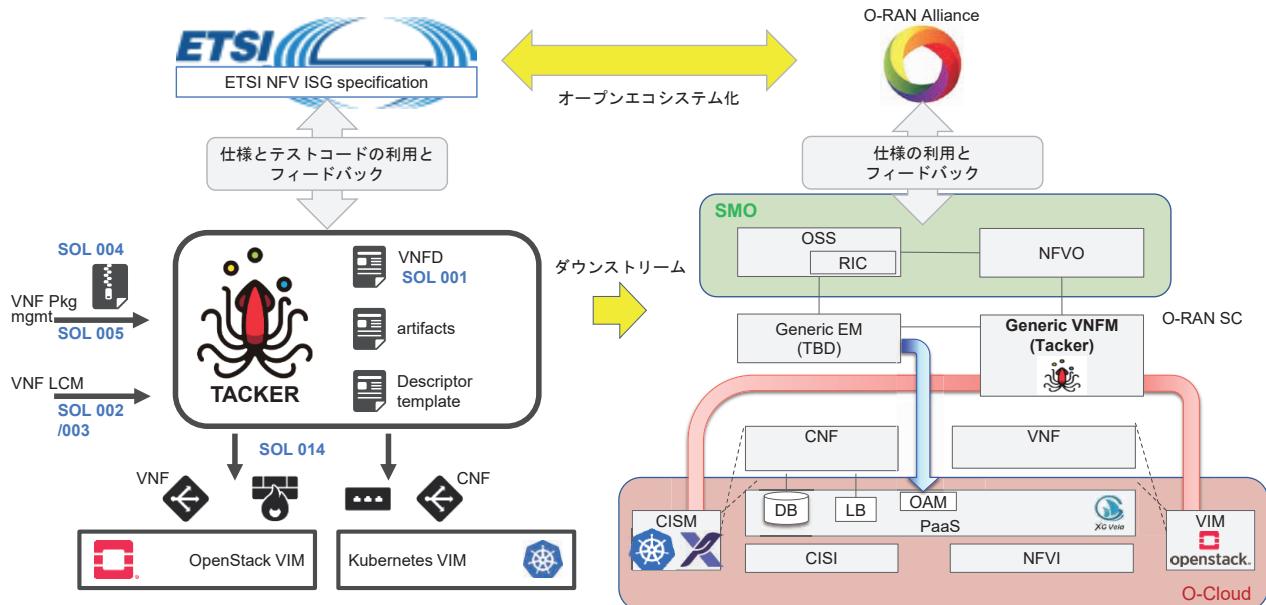


図5 ETSI SOL標準を基にO-RANアーキテクチャに組み込まれたTacker

### ■ Tacker

Tackerは、ETSI NFV、O-RAN WG6などの業界標準とOpenStackやO-RAN SCなどのオープンソース実装の間のギャップを埋める重要な役割を果たし、通信エコシステムにおける整合性と相互運用性を確保しています。これにより、Tackerはテレコム業界の仕様や実装の断片化を回避し、さまざまな利害関係者がNFVオーケストレーションとO-RANデプロイに対して統一されたアプローチを採用できるようになります(図5)。

Tackerは、標準に準拠したオープンソースのVNFMとして機能することで、ETSI NFVとO-RAN SC両方の相互運用性を維持し、ベンドロックインを減らし、オープンで協調的な通信エコシステムを促進します。

### ドコモのvRAN実現に向けた標準化活動

ドコモは、O-RAN、3GPP、ETSI NFV、ETSI ZSM、OpenStack、O-RAN SCをサポートすることで、5G以降のオープンでインテリジェントなRANの実現と、柔

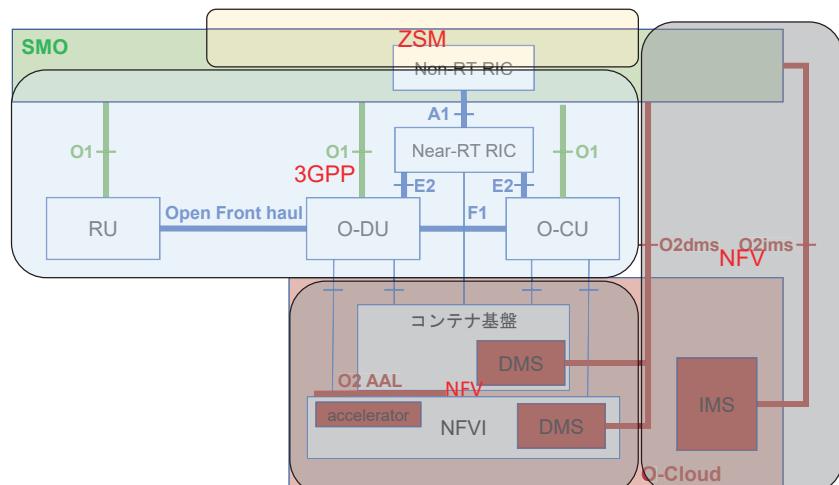


図6 O-RANの仕様と各標準化団体の仕様との関係

軟かつ相互運用可能な通信エコシステムの構築に向けて積極的に貢献しています(図6)。

#### (1) インテントドリブン管理への貢献

現在、O-RAN AllianceのWG1において、ドコモはSMO Intent-Driven Managementの発展に貢献し、SMOをルールベースからインテントによる結果駆動型に移行しています。インテントドリブン管理とは、従来のような事前にプログラ

ミングされたWorkflow型の処理とは異なり、オペレータが想定するるべき姿のネットワーク構成である「意図(インテント)」を指定し、その意図を解釈するIntent Handler<sup>\*15</sup>、が自身の中で事前に学

\*15 Intent Handler: インテントドリブン管理を実現するために、AI機能を利用してインテントを解釈し、必要なワークフローや設定ファイルを生成するシステム。

習していた機械学習モデルを利用して、リアルタイムデータを分析してネットワークの動作を予測、最適化、適応することで、これらの「意図」を自動化されたワークフローやネットワーク設定情報に変換する仕組みです。

ドコモは、WG1に加えて、ETSI ZSMや3GPP SA (Service and System Aspects) 5などの複数の標準化団体におけるネットワーク管理の自動化にも注力しています。3GPP SA5は、Closed loop、ネットワークデジタルツイン、AI/ML管理などのインテントドリブン管理に加えて、自動化イネーブラを標準化しています。

#### (2) エネルギー効率(EE:Energy Efficiency)の課題解決への貢献

さらに、RANの進化に伴い、EEはオペレータにとって重要な優先事項となっています。従来のRANとは異なり、vRANは仮想化のオーバヘッドと動的なリソーススケーリングによって電力消費に新たな課題をもたらしています。現在、O-RAN Alliance内の複数のWGにおいて、ドコモはEEと省エネルギー(ES:Energy Saving)の2つの侧面から、この課題解決に向けた重要な役割を果たしています。

WG1のユースケース仕様書<sup>(5)</sup>「Network Energy Savingユースケース」では、特にAI/MLベースの自動化によるEEの最適化とESメカニズムの実装に焦点を当てています。

RANはモバイルネットワークのエネルギーの大部分を消費するため、EEの改善は運用コスト(OPEX: OPerating Expense)と環境への影響の両方を削減するために不可欠です。

ESの手法は、キャリア、RF(Radio Frequency)チャネル、ネットワークコンポーネントの停止からリソース割当ての最適化が対象です。また、ES戦略はO-Cloudコンポーネントにも適用され、O-CloudリソースのEEとESを可能にするアーキテクチャがWG6内で検討されています<sup>(6)</sup>。

ドコモは、EEの高いvRANを実現するために、3GPP SA5などの他の標準化団体

においても大きく貢献し、3GPP TS28.310<sup>(9)</sup>で規定されているように、エネルギー使用を最小限に抑えながらネットワークパフォーマンスを評価するためのEE KPI(Key Performance Indicator)やその制御を仕様化しています。

## おわりに

ドコモは、ネットワーク全体での効率的な運用を可能にする、経済的で信頼性の高い全国的な展開をめざしたvRANの開発に成功しました。この成果は、O-RAN、3GPP、ETSI NFV、ETSI ZSM、OpenStack、およびO-RAN SCによって支えられており、これらの連携を踏まえた標準化やオープンソースを受け、2024年度に開発され2025年度以降、順次商用デプロイを実施中です。ドコモは、これらの標準化団体に2000件以上の提案貢献を行い、オープンで仮想化されたネットワークをかたちづくるうえで重要な役割を果たしてきています。

今後ドコモは、vRANの課題を解決し、次世代モバイルネットワークをさらに前進させるために、Beyond 5Gおよび6G(第6世代移動通信システム)の研究開発を積極的に行ってています。今後も新たな技術開発やグローバル標準への貢献を通じてイノベーションを推進し、より効率的で柔軟かつインテリジェントなネットワーク基盤の実現をめざします。

## ■参考文献

- https://www.nttdocomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical\_journal/bn/vol30\_1/vol30\_1\_004jp.pdf
- https://www.nttdocomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical\_journal/bn/vol27\_1/vol27\_1\_007jp.pdf
- O-RAN ALLIANCE：“O-RAN Decoupled SMO Architecture 3.0,” WG1: Use Cases and Overall Architecture Workgroup, Oct. 2024.
- O-RAN ALLIANCE：“O-RAN SMO Intents-driven Management 4.0,” WG1: Use Cases and Overall Architecture Workgroup, Feb. 2025.
- O-RAN ALLIANCE：“O-RAN Use Cases

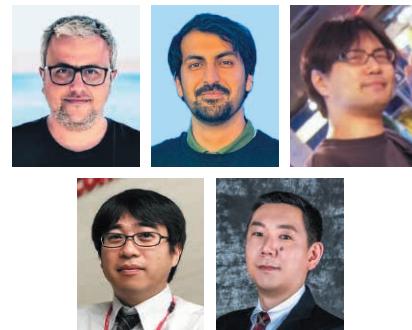
Detailed Specification 16.0,” WG1: Use Cases and Overall Architecture Workgroup, Feb. 2025.

(6) O-RAN ALLIANCE：“O-RAN Operations and Maintenance Architecture 14.0,” WG10: OAM for O-RAN, Feb. 2025.

(7) O-RAN ALLIANCE：“O-RAN O1 Interface Specification 15.0,” WG10: OAM for O-RAN, Feb. 2025.

(8) O-RAN ALLIANCE：“O-RAN Study on O-Cloud Energy Savings 2.0,” WG6: Cloudification and Orchestration Workgroup, Oct. 2024.

(9) 3GPP TS28.310 V18.1.0：“Management and orchestration; Energy efficiency of 5G,” March 2023.



(上段左から) Refik Fatih Ustok/  
Muhammad Hamza/  
寒河江 佑太

(下段左から) 久野 友也/ 中島 佳宏

O-RANやETSI NFVなどのさまざまな団体が連携したことと、近年のHWや仮想化技術の進化により、基地局の仮想化が実現し、商用へのデプロイが成功しました。6Gの実現に向けては、技術開発やグローバル標準への貢献を通じてイノベーションを推進し、より柔軟な基盤の実現をめざします。

## ◆問い合わせ先

NTTドコモ  
サービスデザイン部

URL <https://journal.ntt.co.jp/article/37480>DOI <https://doi.org/10.60249/25125102>

# RAN向けコンテナ基盤(O-Cloud)の大規模展開の実現

NTTドコモでは、以前からコアネットワーク(NW)の領域でNW仮想化を推進しており、2025年には無線アクセสนットワーク(RAN)の領域で基地局仮想化(vRAN)を収容する分散型コンテナ仮想化基盤(O-Cloud)を開発しました。vRANは、アンテナサイトに近接した数千の分散拠点に仮想化基盤を迅速かつ簡易に展開することが課題です。本稿では大規模展開時の技術的課題と実現した解決方法について解説します。

キーワード: #NW仮想化, #vRAN, #コンテナ

とくなか  
徳永  
すえなが  
末永  
いたや  
板谷

しゅういち  
秀一  
ひろあき  
大明  
こうじ

みかわ  
けんじ  
さき  
あや  
彩

/三河  
/津留崎  
賢持  
彩

NTTドコモ

## はじめに

半導体技術および仮想化技術の進化により、テレコム向けの要件の厳しい通信ソフトウェア(SW)を汎用ハードウェア(HW)上の仮想化レイヤで動作させることができました。これにより、従来のHW/SW一体型の装置の場合と比較して、設備の低コスト化やSWアップデートだけによる新機能追加が可能となり、新機能追加やサービス開始までのリードタイムの迅速化を図ることができます<sup>(1)</sup>。NTTドコモでは、2015年度から商用ネットワーク(NW)におけるコアNW<sup>\*1</sup>装置へ仮想化技術の適用を開始し、2025年度時点で仮想化適用率は100%に達しています。一方、無線アクセสนットワーク(RAN: Radio Access Network)では、無線レイヤのベースバンド処理などでリアルタイム性が求められるため仮想化技術の適用が難しかったところを、近年のIT仮想化技術、汎用HW、HWアクセラレータの進歩により、RAN領域にも仮想化技術が適用できるようになりました。このため、国内外のオペレータでは、RAN領域に対する仮想化技術vRAN(virtualized RAN)の導入を進めています。

ドコモでは、O-RAN(Open RAN)<sup>\*2</sup>とETSI(European Telecommunications Standards Institute)NFV(Network Functions Virtualization)に準拠した、vRANを収容する分散型コンテナ仮想化基盤(O-Cloud)を開発し、2025年より商用導入を開始しました。コアNW仮想化と異なり、vRANは処理性能の観点でアンテナサイトに近接したEdgeサイトに機能配

備する必要があるため、数千の分散拠点に仮想化基盤を迅速かつ簡易に展開し、運用することが新たに課題となっています。O-Cloudの開発では、クラウドネイティブや仮想化技術を活用した構築、および運用の自動化を促進するワークフローを設計・実装することにより、それを可能としました。本稿では、具体的にどのようにアプローチすることで、技術課題を解決したか解説します。

## vRAN

### ■ NW仮想化技術

NW仮想化技術とは、汎用HW上に仮想化レイヤを導入し通信SWを仮想資源上で動作させることにより、これまで専用HWと専用SWとで提供してきた高信頼・高性能のキャリアグレードの通信サービスを汎用HW上で実現させる技術、およびオーケストレーション技術<sup>\*3</sup>を組み合わせたものです。NW仮想化技術により、HWとSWの分離が可能になり、安価な汎用HW利用によるコスト低減やベンダロックインの回避、最先端のHWの早期導入、SWのアップデートだけによる新規機能の提供や、オープンソースの適用や効率的な開発手法によるサービス開始までのリードタイムを短縮できます。

### ■ ドコモのコアNWに対する仮想化技術 適用状況

ドコモでは、2010年代前半よりNW仮想化技術の研究開発と標準化を進め、2015年度から商用NWへの適用を開始しました。2021年度導入の5G(第5世代移動通

信システム)のコアNWも仮想化され、2023年6月には全国7地域23拠点に仮想化設備が設置され、約1万台以上のCOTS(Commercial Off-The-Shelf)サーバ群と数千台のNW機器群、25万以上の仮想マシン(VM: Virtual Machine)群を保守しています。2025年度内にすべての商用コアNWの仮想化を完了する予定です。

### ■ グローバルでのテレコムにおけるvRAN導入背景

従来、RAN仮想化には、無線信号処理やデータ暗号化で行われる高次の計算が可能なHWが必要とされ、これを安価かつ容易に導入できないことがボトルネックでした。しかし、昨今の汎用HWの性能向上や、高次の計算に特化したHWアクセラレータの登場により、RAN仮想化が可能になってきました。この背景から国内外のオペレータはvRANの取り組み、導入を進めています。

### ■ O-Cloudの大規模デプロイにおける技術課題

O-Cloudの構築、大規模展開には、以下(1)~(3)の課題があります。

\*1 コアNW: ゲートウェイ装置、位置管理装置、加入者情報管理装置などで構成されるNW。移動通信システムを構成するNWのコア部分。移動機は無線基地局などで構成されるRANを経由してコアNWとの通信を行います。

\*2 O-RAN: O-RAN Allianceにおいて、3GPPの仕様の範囲外である基地局の実装や運用の自動化に関する仕様を定めたもの。

\*3 オーケストレーション技術: アプリケーションやサービスの運用管理を自動化するために、必要となるリソースやNWの接続性の管理・調停を実現する技術。

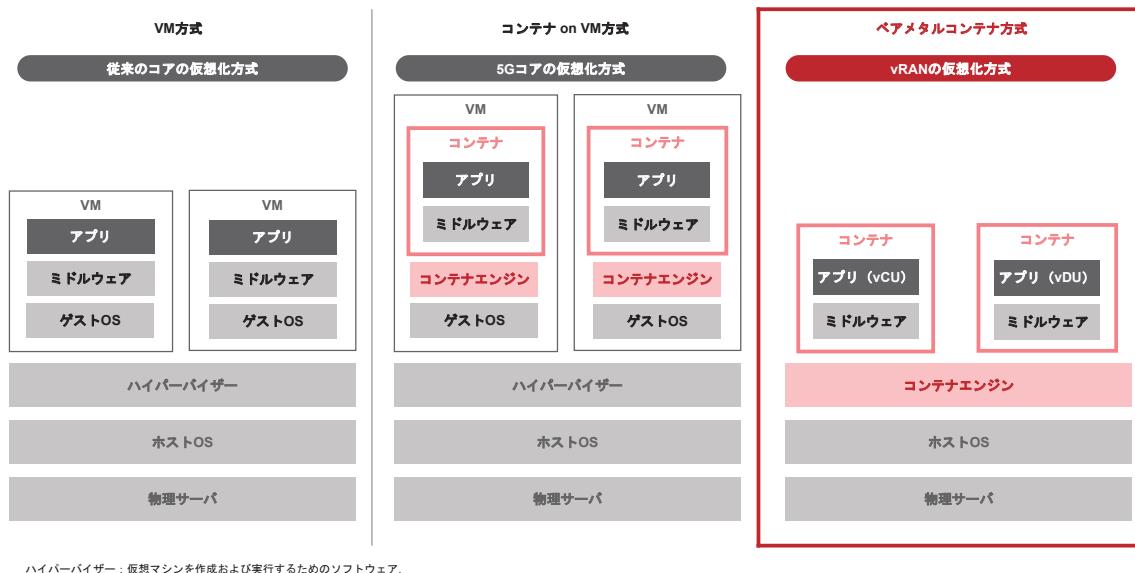


図1 O-Cloudにおける仮想化方式

### (1) O-Cloudコンポーネント設計

ドコモのコアNWの仮想化装置は、全国7地域23拠点のオンプレミス環境で構築されています。一方、vRANでは全国の数千に分散した拠点で大規模展開していくことから、従来のコアNWのアーキテクチャを踏襲すると設備コストが増大します。そのため、仮想化基盤展開に必要な所要時間・工数を最小化するためのワークフローを考慮し、仮想資源の管理制御機能部やHWの物理レイヤの監視制御機能部など、仮想化基盤のどの機能部をパブリッククラウド・オンプレミス環境に配置すると効率的に基盤展開できるか、十分な検討が必要です。

### (2) 自動化と遠隔保守の促進による構築・保守作業の効率化

vRANでは、オンプレミス設置環境がCentralサイト（東京・大阪）、Regionalサイト（各都道府県）、Edgeサイト（アンテナサイトに近接した全国数千の分散拠点）の大きく3つに分類されます。具体的には、Central・Regionalサイトは、データセンタ相当のドコモビルが該当し、Edgeサイトは、全国各地のNTT局舎やアンテナサイト、民間ビルなどに近接する収容函が該当します。特にEdgeサイトについては設置環境に起因する制約条件（限られた設置スペースや空調など）に対応した機器・物

理配備構成の検討、構築時の工事や構築後の保守運用の遠隔実施、自動化によるZero Touch化および作業の最小化が求められます。

### (3) NW・セキュリティ設計

名前解決やCA（Certificate Authority）構成などさまざまな設置形態へ柔軟に対応できるように、コンポーネント間のNWや疎通・暗号方式を設計する必要があります。

ドコモでは、これまでのコアNW仮想化の開発・運用の知見を踏まえ、進歩した技術を取り入れつつ、上記の課題解決とともにvRANの実現をめざしています。

### ■O-Cloud

従来のコアNWの仮想化基盤はVM方式で構築され、5Gコアではコンテナon VM方式<sup>4</sup>が採用されています（図1）。一方、O-Cloudではペアメタルコンテナ方式を採用しています。コンテナ方式は軽量であるため、数千の分散拠点に迅速かつ簡単に展開することが可能となります。

CU（Central Unit）・DU（Distributed Unit）機能を仮想化したvRANアプリケーション[vCU（virtualized CU）・vDU]をコンテナ化し、O-Cloud上にデプロイすることで、RAN仮想化を実現します。

### ■O-Cloudの全体像

O-Cloudは、アプリケーションの起動、

停止、復旧などの制御機能、HWの障害・輻輳の監視・通知機能、コンテナの動作・処理に必要なコンテナ監視・NW機能、およびコンテナのイメージ作成・構築に必要な資材格納機能を具備します。また、全国への大規模展開のため、事前にシナリオを設定し構築を自動化することにより、省力化を実現しています。

### ■コンポーネント

#### (1) コンポーネントの役割

数千の分散拠点に展開するため、基盤構築作業はCCM（CIS Cluster Management）<sup>5</sup>により自動化されています。事前作成シナリオに応じてBIOS・OS・ファームウェア（FW）などをHWに自動設定し、そのHW上にDMS（Deployment Management Services）<sup>6</sup>・LFS（Large File Server）<sup>7</sup>・CIR（Container Image

\*4 コンテナ on VM方式：VM上にコンテナランタイム環境を配置し、その上でコンテナアプリケーションを実行するアーキテクチャ。従来の仮想化インフラストラクチャとコンテナ技術の統合を目的として使用します。

\*5 CCM：事前に設定されたシナリオに応じてCIS・DMSの構築と、COTSサーバーに対するBIOS、OS、ファームウェアなどの設定を、それぞれ自動で行うコンポーネント。

\*6 DMS：vRANアプリケーションの配置・起動、停止、復旧などの制御機能を提供するコンポーネント。

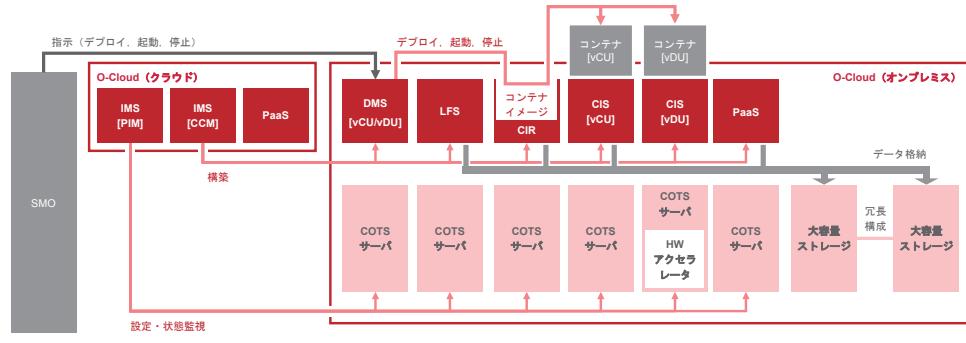


図2 O-Cloudコンポネントと役割

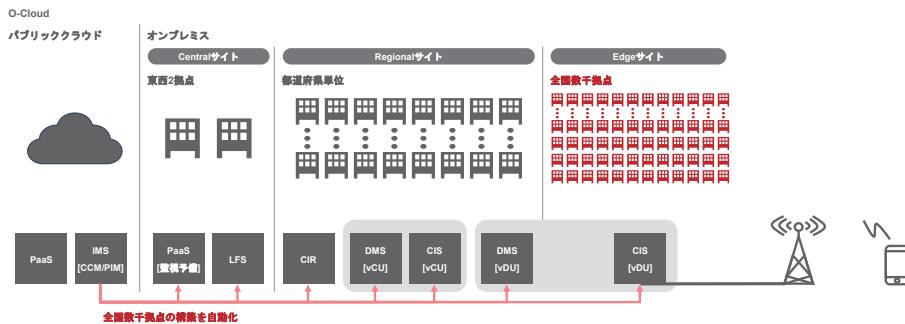


図3 O-Cloudサイト構成

Repository) \*<sup>8</sup>・CIS (Container Infrastructure Service) \*<sup>9</sup>・PaaS (Platform as a Service) \*<sup>10</sup>など、各コンポーネントを構築し、コンテナ向け仮想化基盤を形成します（図2）。

vRANアプリケーション（コンテナイメージ）はCIRに格納され、その他構築資材はLFSに格納されます。vRANアプリケーションは、SMO（Service Management and Orchestration）\*<sup>11</sup>の指示に基づき、DMSによりCIS上にデプロイされ、起動・停止・復旧も同様にDMSが制御します。

運用においては、PIM（Physical Infra-

structure Manager）\*<sup>12</sup>が物理サーバの障害・輻輳を監視し、PaaSがNW機能、時刻同期、名前解決、監視などコンテナの動作・処理に必要な機能を提供します。

オンプレミス環境の物理リソースは、主にCOTSサーバで構成されますが、vDUが動作するCOTSサーバは、物理レイヤを処理する専用HWアクセラレータが搭載されています。CIR/LFSの実データやvCU/O-Cloudログの保管には、冗長構成の大容量ストレージを設置します。

## (2) O-Cloudのサイト構成

各コンポーネントは、パブリッククラウド・オンプレミス環境に配置されます（図3）。パブリッククラウドには、監視・自動化機能を集約しIMS、PaaSが配置されます。オンプレミスは、商用呼の処理、構築資材の保管、パブリッククラウドがダウンした際の監視（予備系）を行い、規模に応じてCentral・Regional・Edgeサイトに区分されます。Centralサイトは、全国東西2拠点に設置され、構築用資材の保管やパブリッククラウドがダウンした際の監視（予備系）を行うため、PaaS、LFSが配

置されます。Regionalサイトは47都道府県単位に設置され、CUの呼処理を行うため、CIR、DMS（vCU/vDU）、CIS（vCU）が配置されます。Edgeサイトは、5Gの低遅延通信を実現するためCIS（vDU）が全国数千の拠点に分散設置されます。

オンプレミスでは、Central・Regionalサイトへの機能集約、低廉なCOTSサーバの採用、自動化による省力化でコストを最適化し、かつCIS（vDU）の分散設置により低遅延NWを構築しています。一方で、クラウドでは既存のOSS（Open Source Software）資産を活用し、開発を効率化・高速化しています。低コストのオンプレミス設備と急速に進化するクラウド技術とが連携したハイブリッド構成を採用することで、最適なソリューションを実現しました。

## 自動化によるシンプルかつ インテリジェントな構築

### ■構築の流れ

図4のとおり、O-Cloudの構築後にRANアプリケーション構築を行うことで、

\*<sup>7</sup> LFS：構築に必要な資材を格納・保管する機能を提供する大容量ファイルサーバ。

\*<sup>8</sup> CIR：コンテナイメージを格納・保管する機能を提供するコンポーネント。

\*<sup>9</sup> CIS：コンテナ化されたvRANアプリケーションを実行するためのリソースを提供するコンポーネント。

\*<sup>10</sup> PaaS：コンテナの動作・処理に必要なNW機能、時刻同期、名前解決、ログ機能などを提供するコンポーネント。

\*<sup>11</sup> SMO：vRANにおいてNWの管理とオーケストレーションを行うシステム。

\*<sup>12</sup> PIM：HW障害・輻輳の監視・通知を行うコンポーネント。

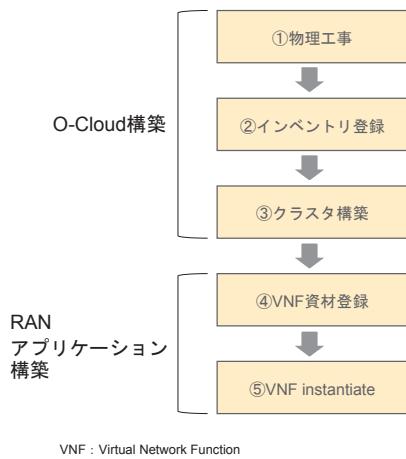


図4 基地局構築フロー

基地局機能の提供が開始されます。ここでは、O-Cloudの構築に焦点を当てて解説します。

図4に示すとおり、O-Cloudの構築は①ラックやサーバ、NW機器の物理工事、②各種インベントリ<sup>\*13</sup>への登録と③クラスタの構築の3段階で行われます。①では、サプライヤが事前にキッティングしたサーバを利用することにより、現地作業をラッピングや配線だけとし、SW設定をパブリッククラウド上からの投入とします。②では、IMSに存在する作業者向けインターフェースから必要情報をインベントリに登録し、③でCentral, Regional, Edgeサイトに対する作業シナリオをトリガします。以下では、インベントリの種類および登録内容、クラスタ構築作業の流れを解説します。

#### ■インベントリの種類

O-Cloudのインベントリは、サイトインベントリ、サーバインベントリ、クラスタインベントリの3種類です。

サイトインベントリは、サーバを設置する拠点の住所、GatewayのIPアドレス、

利用可能なクラスタのタイプなど、拠点ごとの固有情報が登録されます。

サーバインベントリは、IPアドレスや管理画面への認証情報など、物理サーバの固有情報が登録され、各サーバはいずれかのサイトに紐付いています。

クラスタインベントリは、NF (Network Function) が動作するKubernetes<sup>\*14</sup>クラスタに紐付くインベントリであり、紐付けるサイトおよびPaaS用クラスタ、vCU用クラスタ、vDU用クラスタなどのクラスタ種別ごとに共通的な設定値 (CCD : CIS Cluster Descriptor) が登録されます。CCDの活用により、大規模展開時における設定投入、および運用工程における設定管理を簡易化しています。

#### ■インベントリへの登録

vRANでは数千の分散拠点（サイト）を構築する必要があり、サーバ単位ではさらに多くのレコードを登録する必要があるため、効率化が求められます。そこで、UI (User Interface) から1レコードずつインベントリ登録するほかに、レコードのエクスポート・インポートに対応しています。これによりレコードが流用可能となり、かつ多数のレコードを一括登録できるため、作業を効率化させます。

#### ■クラスタの構築

クラスタ構築はシナリオ化されており、必要な設定値を登録し、シナリオをトリガすれば、作業は自動実行されます。

各インベントリへの登録完了時点で、各サイト・サーバには必要情報が、クラスタにはCCDが登録されるため、クラスタ構築時に必要な設定は、C-Plane (Control Plane)<sup>\*15</sup>の冗長数や、物理リソースの論理的なグルーピングなど、クラスタ個別の設定値だけです。

#### ■保守作業

O-Cloudでは、保守作業をサイト・サーバ・クラスタ単位で効率的に実行できます。実施可能な作業は、ヘルスチェック、再起動、FW更新、BIOS設定更新などであり、例えばサーバ単位での再起動、サイト単位でのFW更新、クラスタ単位でのヘルスチェックなど、保守のユースケースに応じ

て効率的に使い分けることができます。

このように、O-Cloudではインベントリ、および構築・保守作業のシナリオ化により、大規模な展開が可能となっています。

## おわりに

NTTドコモでは、vRANを収容するO-Cloudを開発し、2025年から商用導入を開始しました。コアNW仮想化と異なり、数千の分散拠点に仮想化基盤を迅速かつ簡単に大規模展開することが新たな課題でしたが、クラウド技術を活用したアーキテクチャ設計や、構築・運用作業のシナリオ化による自動化機能により、本格的に商用導入できました。今後は、コンテナ仮想化基盤の展開領域や自動化適用領域の拡大・高度化の実現に取り組んでいきます。

#### ■参考文献

- (1) 水田・ウメシ・中島・久野: "RAN仮想化(vRAN)に向けた取組み," NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル, Vol.30, No.1, pp.14-26, 2022.



(上段左から) 徳永 秀一 / 三河 賢持 /

末永 大明

(下段左から) 津留崎 彩 / 板谷 浩志

\*13 インベントリ: 本稿では、関連する情報が保持されるテーブル型のデータ構造のこと。

\*14 Kubernetes: 複数サーバで構成される大規模環境向けのコンテナ管理を目的としたコンテナオーケストレーションツール。

\*15 C-Plane: 本稿では、Kubernetesクラスタ全体のpodのスケジューリングや、インベントリの検出応答を行うコンポーネントを指します。KubernetesではC-Plane、ETSI NFVではCISMと呼称。

本稿で紹介したとおりコアNWで培った仮想化技術の知見をRAN領域に適用し、数千拠点へ大規模展開させる新たな挑戦に取り組んでいます。今後も技術的課題を克服しながら、開発をさらに推進していきます。

#### ◆問い合わせ先

NTTドコモ  
サービスデザイン部

# 大規模仮想化ネットワークを統合制御するSMOの実用化

NTTドコモでは、2023年より無線アクセสนetwork装置の仮想化を推進しています。大規模導入する仮想化された無線アクセสนetwork装置(VNF)の迅速かつ効率的な構築・運用を実現するため、O-RAN標準仕様に準拠したSMO(Service Management and Orchestration)システムを開発し、導入しました。本稿では、SMOの実用化開発について解説するとともに、海外展開を視野に入れた将来展望を紹介します。

キーワード: #5G&6G, #無線通信, #ネットワーク

たにぐち  
谷口 航介<sup>†1</sup> / 相馬 悠人<sup>†1</sup>  
たなべ  
田辺 賢史<sup>†1</sup> / 福田 太<sup>†1</sup>  
すずき  
鈴木 吉行<sup>†2</sup> / 駒寄 雅則<sup>†2</sup>  
NTTドコモ<sup>†1</sup>  
ドコモ・テクノロジ<sup>†2</sup>

## はじめに

近年、汎用ハードウェア・アクセラレータの性能向上や仮想化技術の進歩により、世界的に仮想化された無線アクセสนetworkネットワーク(vRAN: virtualized Radio Access Network)の製品開発が加速しています。これらは、汎用ハードウェア導入による設備コストの削減、仮想化技術やAI(人工知能)技術を活用した構築・保守業務のインテリジェント化によるオペレーションコストの削減や、通信サービスの信頼性向上につながるものと期待されます<sup>(1)</sup>。

NTTドコモでは、O-RAN<sup>\*1</sup>サービスブランドであるOREX(Open RAN Ecosystem Experience)<sup>\*2</sup>を海外展開するとともに、日本国内においては、2025年にvRANの商用サービスを開始しています。

vRANの国内導入においては、仮想化された通信ソフトウェアであるVNF(Virtualized Network Function)、ならびにVNFを配備する分散型コンテナ仮想化基盤O-Cloudを全国規模で展開していますが、このような大規模運用を実現するためには、建設・保守業務の自動化が必須です。そこでドコモでは、O-RANのコンポーネントであるSMO(Service Management and Orchestration)を開発・導入することによる建設・保守業務の自動化を実現しました。

化を実現しました。

本稿では、ドコモが開発・導入したSMOを概観するとともに、開発方針、課題とその対策、システム構成技術、コンポーネント間連携による高度な自動化方式について解説し、海外販売を見据えたSMOの将来展望について述べます。

## SMO概要

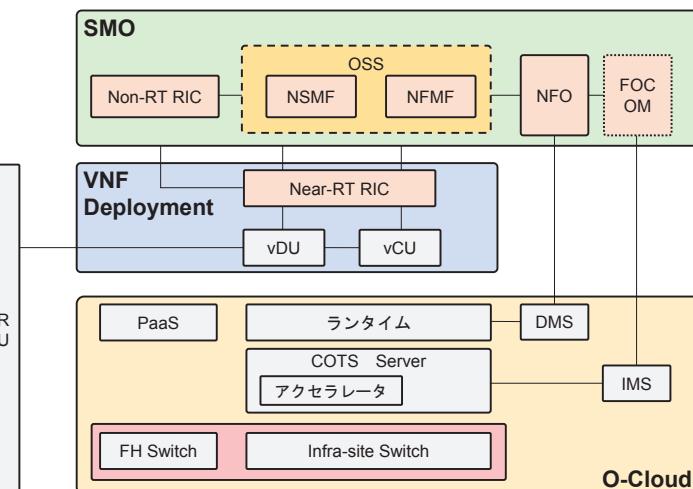
### ■SMOの期待される役割と構成

SMOには、vRANの仮想化による費用・運用メリットを最大化するための効率的かつ統一的な制御が求められています。さらに、保守効率の抜本的な向上に向けて、ZTO(Zero-Touch Operation)<sup>\*3</sup>の実現やAI技術を活用した動的なパラメータ

チューニングとの連携が行えるアーキテクチャの実現が期待されています。

SMOは、VNFとO-Cloudを制御するためのFOCOM(Federated O-Cloud Orchestration and Management)とNFO(NF Orchestration)、スライス管理のためのNSMF(Network Slice Management Function)、VNFのFM(Fault Management)・PM(Performance Management)・CM(Configuration Management)のためのNFMF(Network Function Management Function)、自動制御・最適化のためのRIC(Ran Intelligent Controller)の論理機能から構成されます(図1)。

FOCOMは、O-CloudのInventory管理・FM・PMを行い、NFOはO-Cloudと



COTS: Commercial-of-the-Shelf  
 DMS: Deployment Management Service  
 IMS: Infrastructure Management Service  
 PaaS: Platform as a Service

図1 vRANアーキテクチャにおけるSMOの位置付け

\*1 O-RAN: O-RAN Allianceにおける標準化において、3GPPの仕様の範囲外である基地局の実装や運用の自動化に関する仕様を定めたもの。

\*2 OREX: ドコモが提供する、O-RANを活用した通信インフラ構築支援サービス。

\*3 ZTO: 人手の介在無く、オペレータの通信システムの運用が実現できる思想。

連携してVNF Deploymentのライフサイクル管理・FM・PMを行います。NFMF/NSMFは、VNF・スライスのInventory管理・FM・PMを行います。RICはAI/ML(Artificial Intelligence/Machine Learning)を利用し、収集したvRANアプリケーション情報に応じた最適化とCM制御を行います。

### ■ドコモのSMO開発方針

VNFは、多くの通信ソフトウェア開発ベンダにより製品化されており、各VNFの製品特性やベンダ戦略により、対応する仮想化プラットフォームが選定されています。近年、VNFはベアメタルコンテナ方式を採用する製品が多いため、O-Cloudは、Kubernetes<sup>4</sup>をベースとした製品が主流です。ドコモへの導入については、vRANアプリケーション・O-Cloudともマルチベンダ構成となることを想定して、どのような組合せでも対応できるvRAN開発を進めてきました。ドコモにおいては、VNFは数十万インスタンス、O-Cloudは数百クラスタに及ぶものと想定されます。このような全国規模のプラットフォームに対して安定した通信サービスを提供するために、SMOは効率的かつ統一的な構築・保守手段を提供します。

マルチベンダのVNF、O-Cloudが混在するネットワーク環境においても、効率的な運用を実現するためには統一された建設・保守業務の提供が必要になります。このような統一された建設・保守操作の提供、ならびにマルチベンダ間の差分の吸収には柔軟な開発を伴うため、ドコモでは、NTTの研究開発成果であるコグニティブ・ファンデーション(CF)連携基盤技術を活用しSMOを自社開発しました。NTTの研究開発成果については参考文献②を参照してください。なお、国内導入におけるFOCOM、ならびにFOCOMにより制御されるIMS(Infrastructure Management Service)については、標準仕様と製品の成熟状況をかんがみ、現時点では自社開発を見送り、O-Cloudベンダ製品の提供機能を利用しました。FOCOM、IMSの詳細仕様については、参考文献③を参照してください。また、RICは自社開発していますが、詳細仕様については参考文献④を参照してください。

## VNFの統合ライフサイクル制御を実現するNFOの実用化開発

### ■コア・無線ネットワークの統合仮想化ライフサイクル制御

これまで、通信ソフトウェアの仮想化は、VM(Virtual Machine)方式が主流であり、ドコモのコアネットワークにおいても、OpenStackベースの仮想化プラットフォーム上で各種VNFの仮想化を実現してきました。

一方、近年、ベアメタルコンテナ方式の仮想化通信ソフトウェアが増加傾向にあり、同一ネットワーク内にVMとコンテナが混在するようになってきています。このためNFO機能部は、同一ネットワークに混在するVM・コンテナ方式のVNFに対しても、統合的なライフサイクル制御を実現する必要があります。そこで、ETSI NFVのMANO(Management and Orchestration)<sup>5</sup>仕様に準拠したNFOの機能開発を行うことで、NFOに求められるVNFライフサイクル機能を提供しつつ、コア・無線ネットワークの両方に対応できる汎用性の高い機能実装をめざしました。

### ■オープンソースソフトウェアを活用した経済的なシステム開発

ドコモは、ETSI NFVにおける標準仕様の策定実績やコアネットワークの仮想化運用の経験を基に、MANOのオープンソースソフトウェア開発コミュニティである、OpenStack Tackerプロジェクトに参画し、MANOソフトウェアの発展を牽引しています。OpenStack TackerはETSI NFVに準拠した、VM・コンテナ型VNFのライフサイクル制御をサポートしているため、NFOのシステム開発にあたっては、このソフトウェアを積極的に利用することで、ドコモでの実装範囲を限定、ならびに標準仕様準拠のIF(インターフェース)対応によるVNFのインテグレーション工数を削減し、経済的なシステム開発を中長期的に行うこととしました。このシステム開発に伴い、多くの仮想化プラットフォーム製品との接続性を確認しており、仮想化プラットフォームのマルチベンダ化を実現できます。

### ■NFO機能部概要

実用化したNFO機能部のシステム構成

を図2に示します。NFOはNFVO(NFV Orchestrator)<sup>6</sup>機能部とVNFM(VNF Manager)<sup>7</sup>機能部で構成されます。

#### (1) NFVO機能部

NFVO機能部は、仮想化プラットフォーム上の仮想リソースのキャパシティ管理、コンテナイメージ管理やVNF Packageの管理ならびにVNFM機能部への流通機能を具備しています。VNF Packageは、VNFのテンプレートとなる資材をパッケージ化したものであり、VNFの構成や必要リソースを定義するVNFD(VNF Descriptor)<sup>8</sup>と仮想化プラットフォームにアプリケーションをデプロイするためのHOT(Heat Orchestration Template)やHelmchart、Imageファイルで構成されます。VNF Packageの仕様はETSI NFV SOL001/004にて定義され、VM・コンテナから構成される仮想リソースの定義情報(HOT、Helmchart)が格納できることから、VM・コンテナ方式を統合したVNFライフサイクル制御が可能となります。

#### (2) VNFM機能部

VNFM機能部は、仮想化プラットフォームと接続し、VNFのライフサイクル制御のための、仮想リソースの制御を行います。ライフサイクル制御とは、VNFのインスタンシエーション、ターミネーション、ヒーリング、スケーリング、アップデートを指します。本機能を提供するソフトウェアがOpenStack Tackerそのものです。OpenStack Tackerは、内部にHOT生成機構とHelm Client機構を備えていることに加えて、各製品の仕様差分を吸収する

\*4 Kubernetes: CNCF(Cloud Native Computing Foundation)にて管理されている複数サーバで構成される大規模環境向けのコンテナ管理を目的としたオープンソースのコンテナオーケストレーションツール。

\*5 MANO: ETSI NFV ISGにて標準化されている、VNFへのライフサイクル機能を提供する論理機能部。

\*6 NFVO: ETSI NFVにて定義される、各種通信ソフトウェアの生成から削除までの管理を行い、システム全体の運用管理を行うためのコンポーネント。複数の仮想化プラットフォーム上に展開されるVNFのリソース調停を行います。

\*7 VNFM: ETSI NFVにて定義される、仮想化された通信機能や通信システム(VNF)のライフサイクル制御として起動や停止などVNFの制御を担うコンポーネント。

\*8 VNFD: VNFの仮想リソース構成、機能や振舞いを定義するテンプレート。

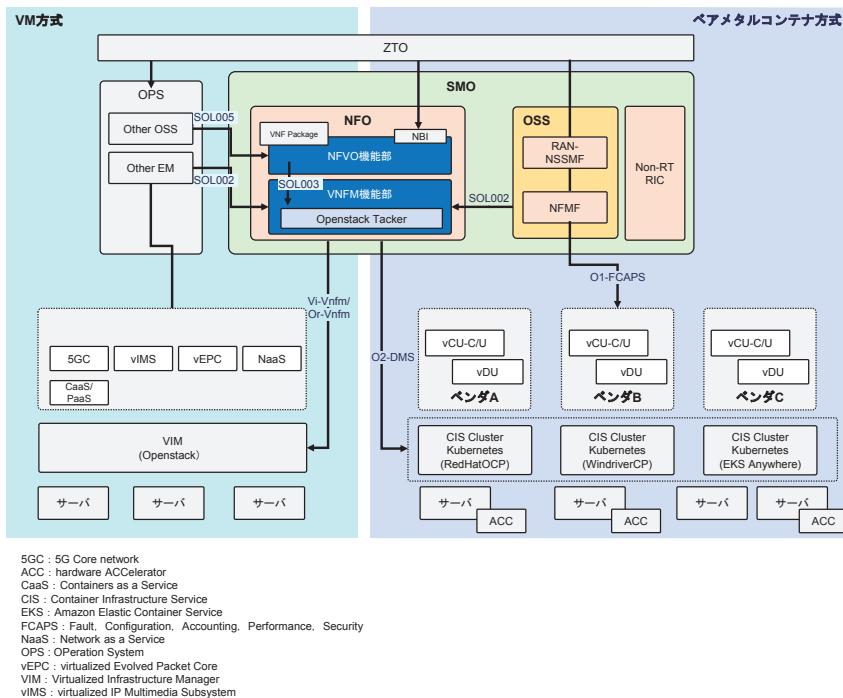


図2 NFOのシステム構成と統合ライフサイクル制御

ためのアダプタ機構を持つため、前述したさまざまな仮想化プラットフォーム製品に対しても、接続が容易となっています。

ただし、商用化に向けては、Tackerが提供する機能に加えて、商用運用のためのO&M (Operation & Maintenance) 機能、拡張性向上のための処理分散機構、可用性向上のための冗長構成、データベース管理機構の実装が必要となります。また、NFOは数十万インスタンスのvRANを収容することから、VNFライフサイクルの数百以上の同時実行制御や各機能部の拡張性、ライフサイクル制御の自動化のためのZTOやインテリジェント化の実現も求められます。ドコモ網への導入を見据えたこれらの拡張開発には、高い同時実行制御の実現が必要であるため、制御要求のキューリング処理の実装やTacker機能部のス

ケーリングによる処理性能の向上が可能な構造としました。ZTOに関しては、NBI (NorthBound Interface) をZTOに向けて開放することで、VNFライフサイクル制御のZTOを実現できます。

### vRANアプリケーションの高度な制御・運用を提供するNSMF/NFMFの実用化開発

OSSの主な機能部はNSMFと、NFMFに分けられます。vRAN監視のOSSの場合、RAN-NSSMF (RAN Network Slice Subnet Management Function) 機能部が、NSMFで管理するE2E (End-to-End) Network Sliceの一部であるRANドメインのSlice Subnetの管理を行い、スライスごとの監視 (FM, PM) や構成情報管理 (CM) を行います。また、NFMF/EM (Element Manager)<sup>\*9</sup>機能部が、vRANアプリ [vCU (virtualized Central Unit), vDU (virtualized Distributed Unit)] の、VNFごとの監視 (FM, PM) や、構成情報管理 (CM) を行います。

OSS構成と接続する各コンポーネント間のIFについて、以下に記載します (図3)。

#### (1) OSSとベンダEM間IF

vRANアプリ監視については、FM、

PM、CMともにベンダEMを経由してOSSで実施します。OSSがベンダEMからFM、CM通知を受信、もしくはベンダEMからFM、PM、CM情報を取得することで監視を行います。

本機能を実現するためのOSSとベンダEMのIFについて、OSSの開発段階では、SA5-IFとO1-IFを比較し、完成度が高いSA5-IFを採用しました。今後のOSSのロードマップにおいては、O1-IF標準化が進んだ際にGenericEM機能をOSSで具備したベンダEMを介さず監視・制御する対応と、オープンで相互接続性の高いIFを採用し、さまざまなベンダEMの対応をめざします。

なお、マルチベンダのvRANをOSSで収容する場合、SA5-IF上でプロトコルやデータフォーマット、データモデルは規定されていますが、ベンダごとに保持するCMデータのパラメータ項目の有無や、共通パラメータの中でもデータ配列の差分など、共通化が実現できていない個所が存在しています。OSSがvRAN開発ごとにベンダ差分の対応をすることは影響が大きいため、すべてのパラメータからユーザが選択して編集・登録可能なUIにする対応としました。

#### (2) OSSとNon-RT (Real Time) RIC<sup>\*10</sup>間IF

OSS-Non-RT RIC間のIFは規定されておらず、OSSとNon-RT RICはそれぞれ独立で海外導入を見据えているため、他製品との接続を見越して一般的なREST (REpresentational State Transfer)<sup>\*11</sup>-IFで対応しました。

#### (3) OSSと外部システム間IF

OSSが保持するFM/PM情報の取得やvRANに対するCM制御を外部システム向けに開放し、海外のオペレータが保持する外部システムからも取得、制御が可能です。外部システム側が簡易に実装可能となるよう、開放するプロトコルはSFTP (SSH File Transfer Protocol) /RESTとしています。

### システム間連携によるシンプルかつインテリジェントな保守・運用の実現

仮想化によりソフトウェアとハードウェ

\*9 EM : 各々のネットワーク装置に対する障害 (Fault)・設定 (Configuration)・課金 (Accounting)・性能 (Performance)・セキュリティ (Security) (通例FCAPSと呼ばれる) の管理・監視を担う機能ブロック。

\*10 Non-RT RIC : O-RAN Allianceにおいて、リアルタイム性が求められないことに対してインテリジェンスな制御を行うシステム。

\*11 REST : APIの1つで、各リソース (URL) に対してGET, POST, PUT, DELETEでリクエストを送信し、レスポンスをXML (eXtensible Markup Language) やjsonなどで受け取る形式。

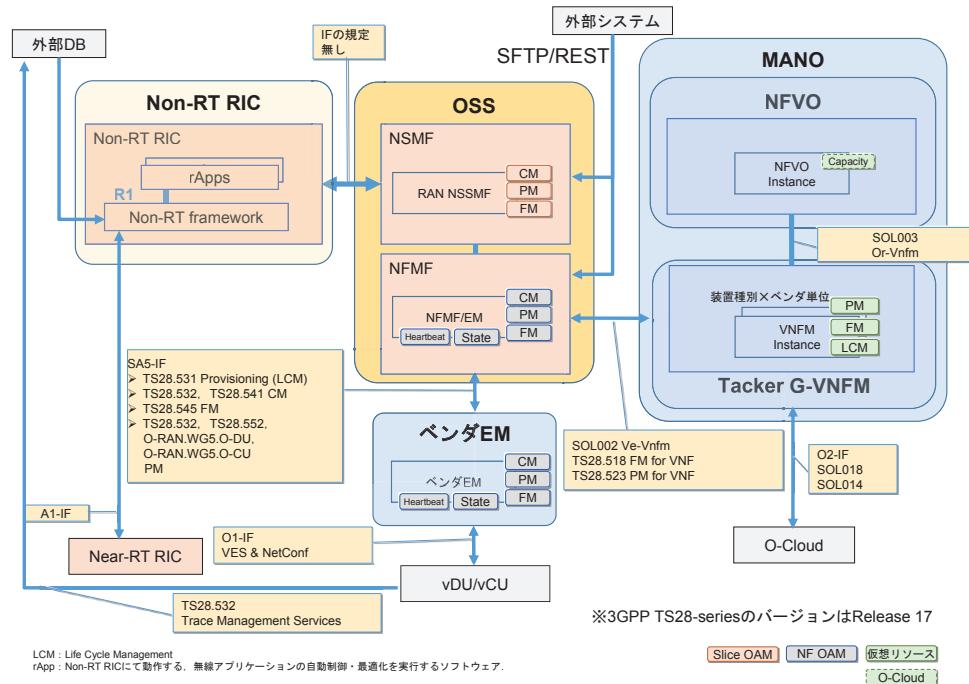


図3 OSS構成と接続する各コンポーネント間のIF

アが分離された環境においては、従来の保守・操作とは異なり、ソフトウェア制御と仮想リソース制御を連携させつつ、制御システム (NSMF/NFMF/FOCOM/NFO/O-Cloud) が保持する管理情報の整合性を常に維持するシステム間の連携が必要です。さらに、NFOが提供する仮想リソースの制御においては、O-CloudのKubernetes層の制御プレーンと連携し、適切な機能分担の下で行う必要があります。

O-CloudはKubernetesをベースに構成されており、宣言型定義に基づいた仮想リソースのオーケストレーション機能を具備しています。他の業界においては通常、Helmchartなどで定義されたリソース単位やPod単位で保守・監視が行われることが一般的です。一方、通信事業者においては、アプリケーション調達単位や構成情報の管理単位、保守のシンプル化の観点から、3GPP (3rd Generation Partnership Project) 定義のNF単位/ETSI NFV定義のVNF/VNFc (VNF components) Instance単位で管理が行われることが一般的です。そこで、O-Cloudを構成するKubernetesの提供するオーケストレーション機能を活用しつつ、VNF/VNFc Instance単位での抽象化を実現するために、これらをマッピングで

きる、ETSI NFV準拠のVNF PackageをNFOに登録、利用することとしました。

VNF PackageはNF単位/VNF/VNFc単位を定義するVDU(Virtual Deployment Unit)<sup>12</sup>と、O-Cloudに対して要求する仮想リソース情報を定義するHelmchart内で定義する仮想リソース名をマッピングする構成(図4)としました。この仕組みにより、OSSや保守者からの従来の管理単位であるVNF単位の制御指示をKubernetesのオーケストレーションに変換でき、高度な専門知識を持たない保守者にも、仮想リソースの複雑な運用管理を実現できる仕組みとしました。以降に本仕組みにより実現したユースケースと動作について解説します。

#### (1) 局建設 (インスタンシエーション)

局建設は、局建設用データ作成・投入工程と、以降のVNF立上げ工程に分類され、自動化されています。

vRANアプリケーション構築時に必要な局建設用のデータ作成・投入は、膨大な設計データに関してOSSとRICが連携することで実現しています。局固有の必要最低限のパラメータをOSSに投入すると、OSSはRICとデータ連携し、RICは収容するRU (Radio Unit)<sup>13</sup>の型番、セルの位置などの基地局の諸元情報や置局情報に応じてパ

ラメータを設計・補完し、OSSにvRANアプリケーション構築時に必要な局構成データとしてそれらを通知・投入します。

VNFの立上げについて、NFOからの指示のもとO-CloudがVNF起動した後は、局構成データに基づいて、VNFは必要とする設定データをEMから自動的に取得します。共通化したキー情報を基にNFOはインスタンシエーションの結果をOSSに通知し、OSSは管理するVNFの情報を局建設としてステータス管理します。本連携により、VNFがサービス可能かつ監視されている状態となります。

#### (2) 障害復旧動作 (ヒーリング)

① Kubernetes層における自動仮想リソース復旧：仮想リソース障害が発生した場合、宣言型定義に従って、O-CloudによるPod/Kubernetesリソースの再構築が行われます。NFO内のVNFMからO-Cloudに対する仮想リソース情報の定期的なポーリングによって、NFO

\*12 VDU : ETSI NFVにて定義されているMANOが管理する仮想リソースの実行単位。

\*13 RU : 基地局を構成する装置の1つとして、送信するデジタル信号を無線信号に、受信する無線信号をデジタル信号に変換します。また、送信電力の増幅、アンテナ素子での無線信号の送受信、大規模MIMOでのビーム生成に必要な処理を実行します。

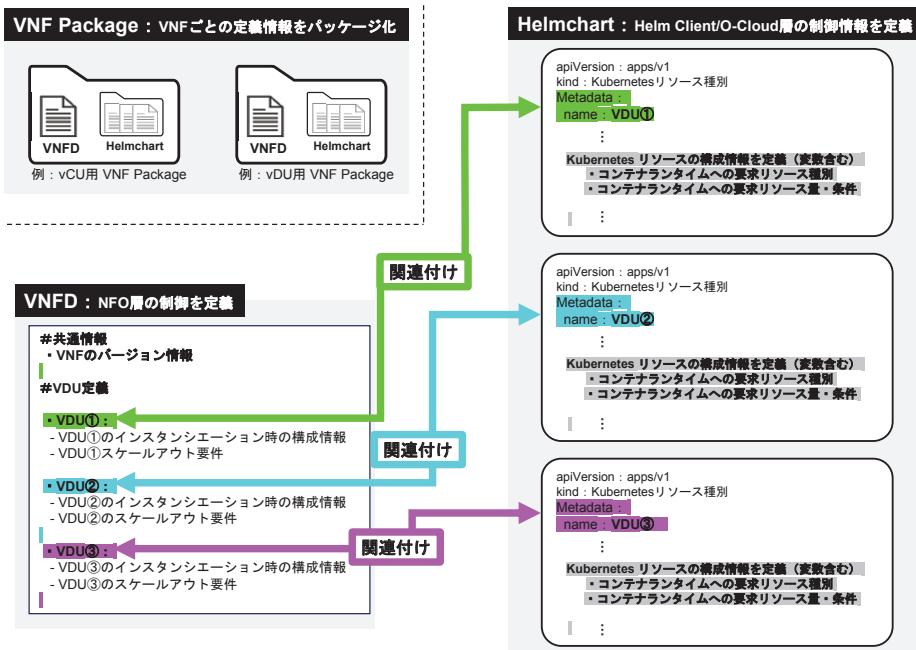


図4 VNF Packageの構成と関連付け方法

は再構築後の情報を最新の管理情報として更新します。また、再構築後のPod/Kubernetesリソース情報は、VNFM経由でOSSに対して通知されます。これらの動作はシステム間の情報連携により自動的に行われるため、保守者による操作は要求されず、Kubernetes層のオーケストレーションを保守者に対し隠蔽できています。

② ソフトウェア障害の手動・自動復旧(OSS契機の手動・自動ヒーリング) : Kubernetesリソースとしては正常に動作していますが、アプリケーションの具合が発生している場合があります。当該事象への対応策として、OSSが検知した障害に対してNFOに手動・自動ヒーリングの指示を出し、仮想リソース生成結果を得る流れにより、状態異常を回復する機能がNFOに具備されています。このように、Kubernetesレイヤで監視・救済できない異常に対しても、自動・半自動の復旧手段が確立されているため、安定したサービス提供を実現できます。

## 海外販売を見据えた将来展望

SMOにおいては、NTTグループのグローバルビジネス展開に向けてオープンソースソフトウェアを活用し、5GのvRANアプ

リケーションと仮想化基盤とを連携可能とする一元的な運用制御を実現しています。今後も海外販売を見据え、海外オペレータの要求に従った以下の機能などへ柔軟に対応していきます。

- ・4G/5Gの両世代のvRANアプリケーション対応。
- ・複数のオープンソースソフトウェアに関する一元的なユーザ管理。
- ・RANシェアリングによる事業者間共用に対応した監視制御機能。
- ・海外オペレータの規模に応じて、柔軟に収容を変更可能化。

## おわりに

NTTドコモでは、2025年からvRANの商用導入において、VNFならびにO-Cloudを収容するSMOを自社開発し、導入しています。保守者に対する統一的かつ効率的な保守手段の提供に向けて、NFO/NSMF/NFMFのシステム開発に加えて、システム間の動的な情報連携の仕組みを開発しました。今後は、vRANの展開規模の拡大や、後続の仮想化ユースケースに合わせて、さらなるインテリジェントな運用に向けたシステム機能・システム間連携の高度化を実現していきます。

## ■参考文献

- (1) [https://www.ntt.com/docomo/technology/rd/technical\\_journal/vol30\\_1/vol30\\_1\\_004jp.pdf](https://www.ntt.com/docomo/technology/rd/technical_journal/vol30_1/vol30_1_004jp.pdf)
- (2) <https://journal.ntt.co.jp/article/30138>
- (3) [https://www.ntt.com/docomo/technology/rd/technical\\_journal/vol33\\_2/005.html](https://www.ntt.com/docomo/technology/rd/technical_journal/vol33_2/005.html)
- (4) [https://www.ntt.com/docomo/technology/rd/technical\\_journal/vol33\\_3/003.html](https://www.ntt.com/docomo/technology/rd/technical_journal/vol33_3/003.html)



(上段左から) 谷口 航介 / 相馬 悠人 / 田辺 賢史

(下段左から) 福田 太 / 鈴木 吉行 / 駒崎 雅則

さまざまな社会課題の解決に寄与する高品質なモバイルネットワークの提供に向けて、新たな技術領域に対する仮想化への挑戦と抜本的な運用高度化・自動化への挑戦に取り組んでいきます。

## ◆問い合わせ先

NTTドコモ  
サービスデザイン部 クラウドデザイン室  
NW仮想化基盤担当

URL <https://journal.ntt.co.jp/article/37476>DOI <https://doi.org/10.60249/25125104>

# RAN向けコンテナ基盤(O-Cloud)を活用した経済的なvRAN展開の実現

これまでモバイルネットワークは、無線通信特有のリアルタイム・低遅延な処理を満たすため専用に開発された無線基地局装置を用い、装置全体をアンテナ近傍に配備してきました。しかしながら、エリア展開に応じた最適なハードウェアリソース設計が難しく、リソースが無駄になるケースが課題となっていました。NTTドコモでは、開発した分散型コンテナ仮想化基盤により、リアルタイム性が求められる機能はアンテナ近傍に配備しつつ、集約可能な機能はデータセンタへ配備可能となり、リソースの柔軟な設計や設備投資の最適化が可能となりました。本稿では、開発した仮想化基盤を活用した無線基地局装置の配備とその効果について解説します。

キーワード: #無線通信, #ネットワーク, #仮想化

## RANリソースの有効活用

モバイルネットワーク通信は、現代の日常生活や経済活動を支える重要な社会インフラであり、生活、医療、教育、経済活動、災害対応など多岐にわたる分野で不可欠な存在となっています。モバイルネットワークオペレータ(MNO: Mobile Network Operator)は、4G(第4世代移動通信システム)や5G(第5世代移動通信システム)といった高度化技術を導入することでこうした需要に対応していますが、無線アクセスネットワーク(RAN: Radio Access Network)特有のリアルタイム・低遅延な処理を満たすためにモバイルネットワーク専用に開発された装置を導入しています。しかしながら、これらの装置は同一ハードウェア(HW)上で実現されるのが一般的であるため、HWリソース設計の最適化が難しいという課題があります。例えば閑散エリアでは、装置のリソースが十分に使い切られず無駄が生じ、設備投資の観点で最適化が図れない、といったケースが生じる可能性があります。なお、無線基地局装置の機能はCU(Central Unit)<sup>\*1</sup>とDU(Distributed Unit)<sup>\*2</sup>に分けられ、DUはリアルタイム・低遅延な処理が求められるため集約は困難ですが、CUは集約可能であり、CUリソースを有効活用することができるようになるため、設備コストの低

減が見込めます。しかし、複数のCUを集約できるほどの大容量の専用装置がなく、障害発生によるサービス影響が大きいといった課題があります。

この課題に対し、NTTドコモではO-RAN(Open RAN)<sup>\*3</sup>とETSI(European Telecommunications Standards Institute)NFV(Network Functions Virtualization)<sup>\*4</sup>に準拠した、vRAN(virtualized RAN)を収容する分散型コンテナ仮想化基盤(O-Cloud<sup>\*5</sup>)を開発することで、リアルタイム性が求められるDUはエッジサイトに配備をしつつ、CUをリージョナルサイト<sup>\*6</sup>へ集約可能となり、リソースの柔軟な設計や設備投資の最適化が可能となりました。DUで求められる汎用HWだけでは実現しきれない無線レイヤのリアルタイム処理、データ暗号化などの高度な処理については、各種計算に特化したHWコンポーネント(HWアクセラレータ<sup>\*7</sup>)を用いることで実現しています。

本稿では、O-Cloudを活用した無線基地局装置のデプロイメントおよびその効果について解説します。

## O-CloudによるRANのデプロイメント

無線基地局装置のデプロイメントには、専用装置の場合とvRANの場合の2種類に

すずき ゆうと おがわ ひろあき  
**鈴木 勇斗 / 小川 弘顕**  
 いしくら しょうたろう やなぎさわ りき  
**石倉 彰太郎 / 柳澤 利樹**

NTTドコモ

大別されます。現在主流である専用装置の場合にはCUとDUが同一のエッジサイトに配備されます。O-Cloudを活用した無線基地局装置のデプロイメントを図1に示します。仮想化されたコンポーネントは接頭辞に“v”を付けvCU、vDUと表現します。vRANの場合には複数のCUをリージョナルサイトに集約し、DUはエッジサイトに配備されます。これにより、CUの配備拠点数・設備点数を削減でき、CAPEX(Capital Expenditure)の削減が期待されます。vRANでは、CUリソースの集約をO-Cloudによって実現しています<sup>(1)</sup>。

\*1 CU: 5Gシステムにおける無線基地局装置のデジタル信号処理部分。ベースバンド処理部や保守監視機能を備えています。

\*2 DU: 5Gシステムにおける無線基地局装置の分散制御部分。無線信号の送受信や処理を行います。

\*3 O-RAN: O-RAN Allianceでの標準化において、3GPPの仕様の範囲外である基地局の実装や運用の自動化に関する仕様を定めたもの。

\*4 NFV: 通信キャリアのネットワークを仮想化技術により汎用HW上で実現すること。

\*5 O-Cloud: O-RAN仕様にて規定されている、CU/DUを配備するための仮想化基盤とその関連コンポーネントの集合体。

\*6 リージョナルサイト: RU設置サイトから数100km以内に位置する、特定地域の設備を集約している中規模~大規模のデータセンタ。

\*7 アクセラレータ: コンピュータ(CPU)や画像表示などの処理性能を向上させるための周辺機器や附加装置のこと。本稿では、通信用CPUの処理速度を向上させるために追加したLSIのこと。

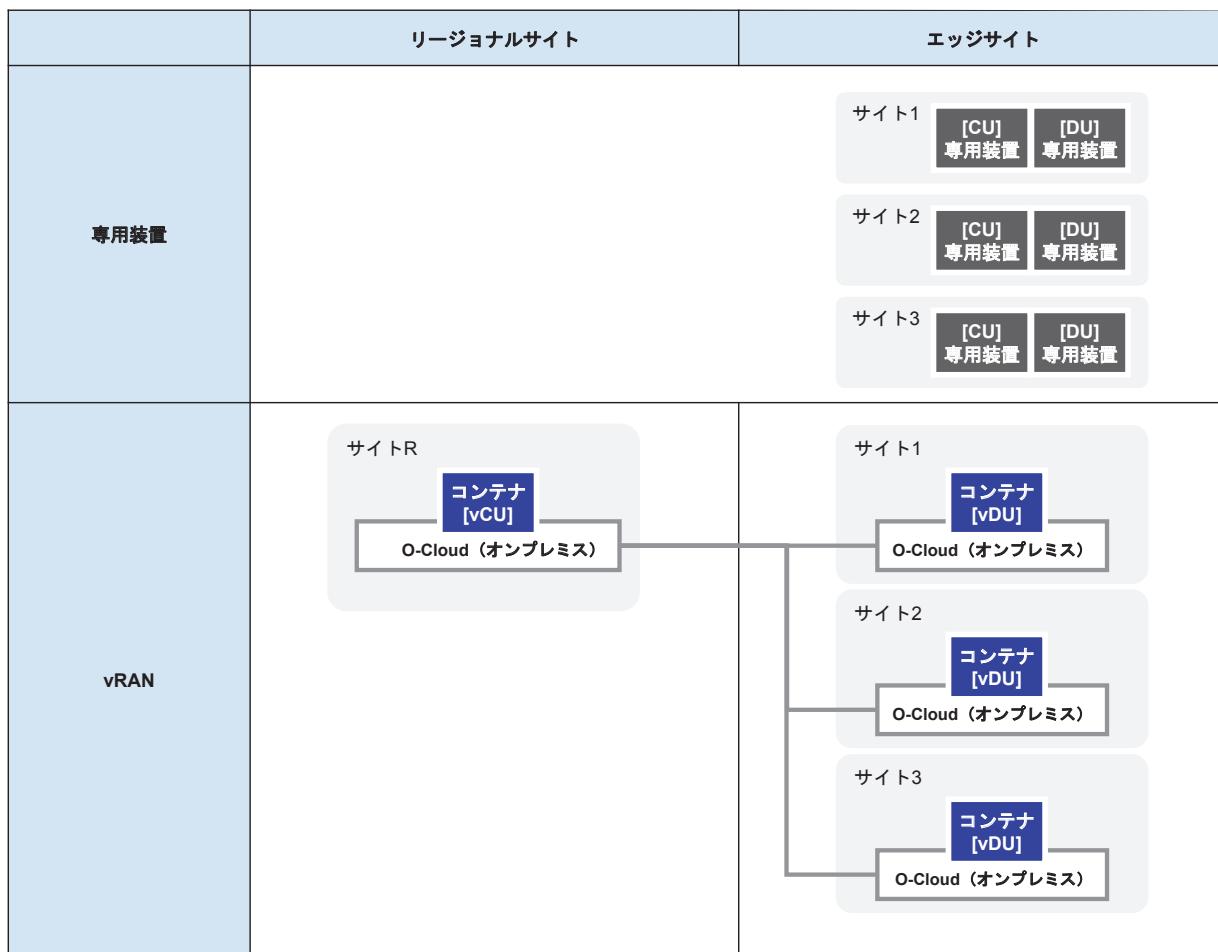
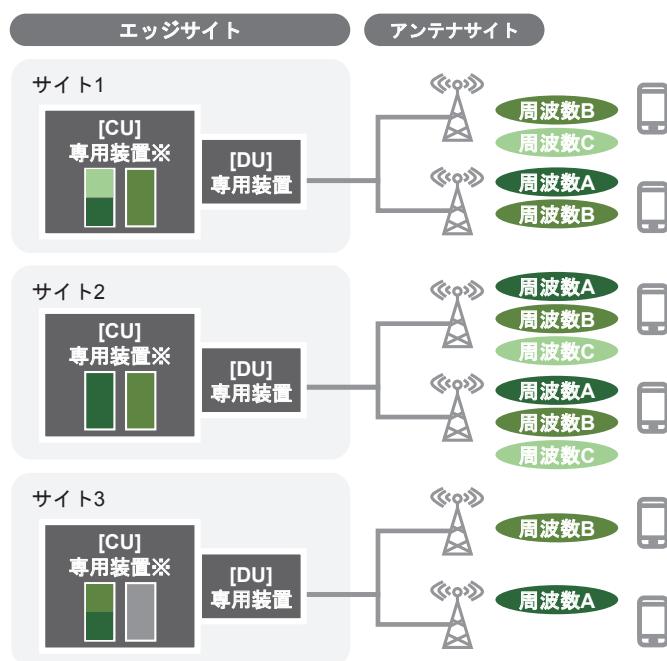


図1 O-Cloudを活用した無線基地局装置のデプロイメント

以降O-Cloudにより実現している機能について解説します。

#### ■プーリング

専用装置では、CUリソースはHWのスペックを基にあらかじめ決まっているため、需要に応じた柔軟なCUリソースの増減が困難となっています。専用装置におけるCUリソースのイメージを図2に示します。サイト2では周波数Cの2エリア分のCUリソースが不足しており、サイト3では2エリア分のCUリソースが余っている状況を示しています。次に、O-CloudによるCUリソースのイメージを図3に示します。vRANではO-CloudによりCUリソースをプーリング<sup>\*8</sup>できるようになるためCUリソースを集約することが可能となり、最適なCUリソースの配備が可能となります(図1)。



\*8 プーリング：本稿では、予備のサーバリソースを使用可能な設備として組み込んでおくことを指します。

図2 専用装置のCUリソースについて

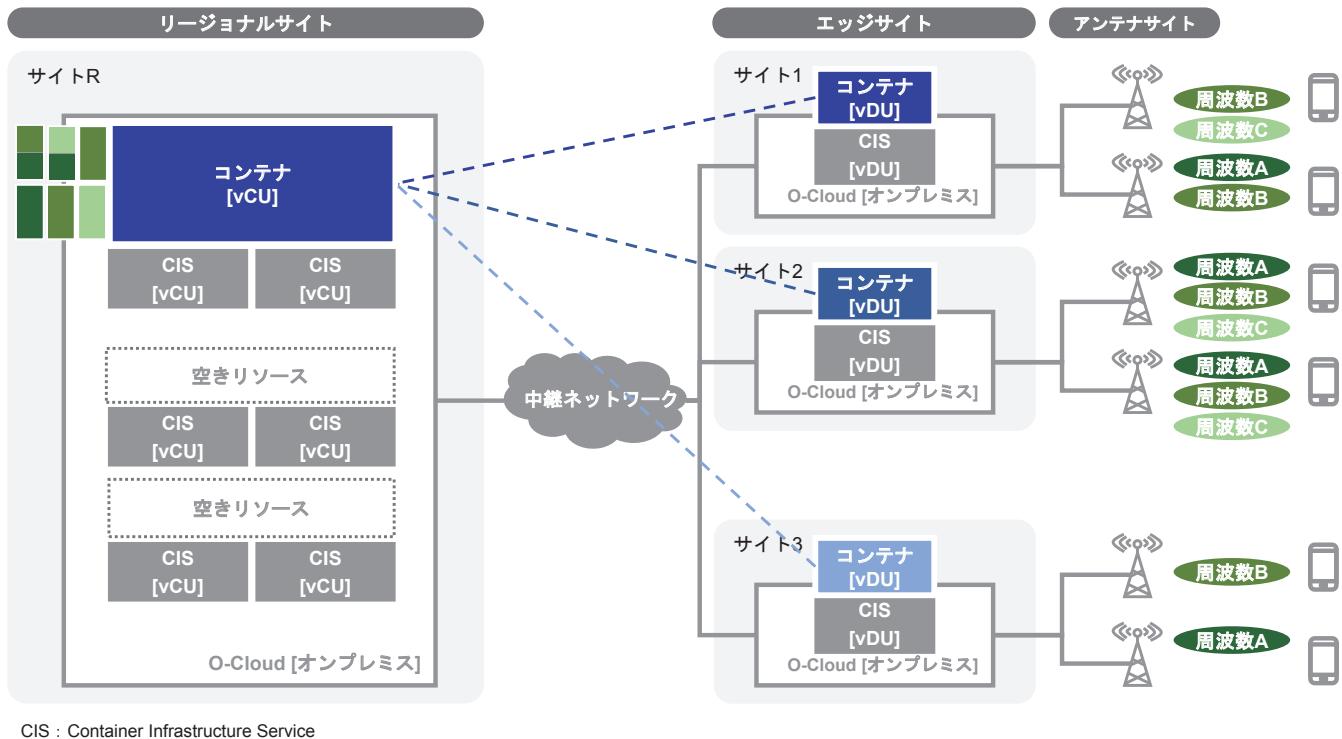


図3 O-CloudによるCUリソースのプーリング

中で便宜上「空きリソース」と記載しているCUについては、新規の構築が不要となるものもあり設備コストの削減につながります。もしくは通信エリアのトラフィック状況や時間帯などに応じて柔軟にアクティベート・ディアクティベートしても良いです)。

### ■ヒーリング

vRANでは、vCUの障害発生時にはあらかじめプーリングされたCUリソースに対し、遠隔操作によるヒーリング<sup>9</sup>機能にてvCUを再構築することが可能となります。これにより、従来に比べ早期に通信サービスの復旧が可能となります。また、これらの制御を自動化により実施することが可能となり、OPEX (Operating Expense)の削減が可能となります。

## vRANによる基地局インフラ運用の展望

O-Cloudによるさらなるリソースの有効活用としてDUリソースの活用が挙げられます。例えば、vDUへ冗長機能を追加し別エッジサイトに予備のvDUを構築しておくことで、DU - RU (Radio Unit)<sup>10</sup>間の通信処理を維持したままRUを別エッジサイトのvDUへ切り替えることが可能になります。これにより、自然災害などによる局所的な障害に対する復旧が期待でき、通信エリアの早期復旧に貢献できます。

一方、冗長機能を確保するため、DUリソースの増設やエッジサイトどうしを中継するための伝送路の整備といった新たな課題が生じ、CAPEX/OPEXを増やすことにもつながるため、適用領域の検討が重要となります。

ティ、効率的なリソース運用にメリットがあります。今後はDUのリソースを有効活用する方法についても取り組みを進め、さらなる無線インフラの有効活用をめざします。

### ■参考文献

- (1) [https://www.nttdocomo.ne.jp/corporate/technology/rd/technical\\_journal/bn/vol33\\_2/005.html](https://www.nttdocomo.ne.jp/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol33_2/005.html)



(上段左から) 鈴木 勇斗 / 小川 弘顕  
(下段左から) 石倉 彰太郎 / 柳澤 利樹

仮想化技術を活用し、さまざまなユースケースに対応できる、コストメリットのある基地局開発を進めています。

### ◆問い合わせ先

NTTドコモ  
無線アクセスマネジメント部  
RAN技術推進室 無線ネットワーク装置担当

\* 9 ヒーリング: HW障害や仮想マシン障害が発生した際に、正常なHW上に仮想マシンを移動、または再生成することで通信SWとして正常な状態に復旧する手続き。

\* 10 RU: 基地局を構成する装置の1つとして、送信するデジタル信号を無線信号に、受信する無線信号をデジタル信号に変換。また、送信電力の増幅、アンテナ素子での無線信号の送受信、大規模MIMOでのビーム生成に必要な処理を実行します。

## さらなる無線インフラの有効活用に向けて

本稿では、vRANのO-Cloudによるデプロイメントおよび今後の基地局インフラ運用の展望について解説しました。O-CloudによるCUの集約はスケーラビリ

# RICによる無線制御自動化の実現

NTTドコモでは、RAN (Radio Access Network) 領域における基地局の仮想化を推進しています。大規模導入する仮想化ネットワーク機能 (Network Function) の迅速かつ効率的な構築・運用を実現するため、O-RAN標準仕様に準拠したSMO (Service Management and Orchestration) システムを開発、導入しました。本稿では、SMOを構成する機能部の1つであり、無線制御の自動化を実現するRIC (RAN Intelligent Controller)について解説します。また、商用向けに開発した具体的なRICアプリケーションと、それらによる基地局制御の状況を説明し、さらに今後のRICの拡張について示します。

キーワード: #5GE&6G, #データ・AI活用, #ネットワーク

## はじめに

5G (第5世代移動通信システム) は、高速・大容量通信や低遅延性の特長を活かした高度なサービス提供が可能であるものの、近年の多様化するサービス需要に対応するために、高度な運用支援機能が求められています。こうした中で、RAN (Radio Access Network) 機器のパラメータ最適化をインテリジェントに行うシステムとして、AI/ML (Artificial Intelligence/Machine Learning) 技術を導入したRIC (RAN Intelligent Controller) が注目されています。

RICは、SMO (Service Management and Orchestration) の一部をOSS (Operation Support System) とともに形成し、内部に各種アプリケーションを複数実装可能なアーキテクチャとなっています。

これらRICのアーキテクチャはvRAN (virtualized RAN) /SMOとともに標準化団体O-RAN ALLIANCEにて規定されています。

NTTドコモではvRANの運用に併せてRICの運用も行い、AI/ML基盤とRICアプリケーションを開発しています。

本稿ではRICの概要とドコモにおける導入状況、AI/ML機能について解説します。

## RIC概要

### ■SMOおよびvRANとの関係

O-RANでは、SMOとvRAN (O-CU, O-DU) がRIC連携で最適化され、これが柔軟なRAN運用の中核となります(図1)。

SMOは統合運用管理基盤であり、構成・性能・障害管理とNon-RT (Real Time) RICを内包しています。Non-RT RIC<sup>\*1</sup>は

かわな 川名	あきひろ 昭博	はしもと /橋本	えいな 英奈
えんどう 遠藤	なおき 尚輝	たなか /田中	しゅんすけ 隼輔
えがわ 江川	ともき 知樹	こばやし /小林	るみ 瑠美

NTTドコモ

AI/ML技術を活用したrApp<sup>\*2</sup>によりポリシー制御やパラメータ最適化を行い、1秒以上の応答でネットワーク長期方針を策定します。

vRANでは基地局機能 [RU (Radio Unit), DU (Distributed Unit), CU (Central Unit)] のうち、DU, CUが仮想化されO-Cloud上で動作し、Near-RT (Real Time) RIC<sup>\*3</sup>がxApp<sup>\*4</sup>経由で10ms～1秒の応答でリアルタイム制御します。

SMOとvRANはNon-RT RIC・Near-RT RICと、O1・A1・E2・Y1・O2などの標準インターフェースで連携し、インテリジェントなマルチベンダ対応ネットワーク運用を支えます。

### ■O-RANアーキテクチャの特徴

従来の基地局制御はベンダ固有のロジックに依存しており、運用管理や最適化も装置単位で行われていました。その結果、設定変更の煩雑さ、マルチベンダ制御の非統一性、AI/ML活用の限定性が課題となっていました。

O-RANはSMO・RIC・vRANへの機能分離と標準化インターフェース (O1, A1, E2など) で柔軟性と拡張性を向上させ、SMOは全体運用を担い、Non-RT RICで

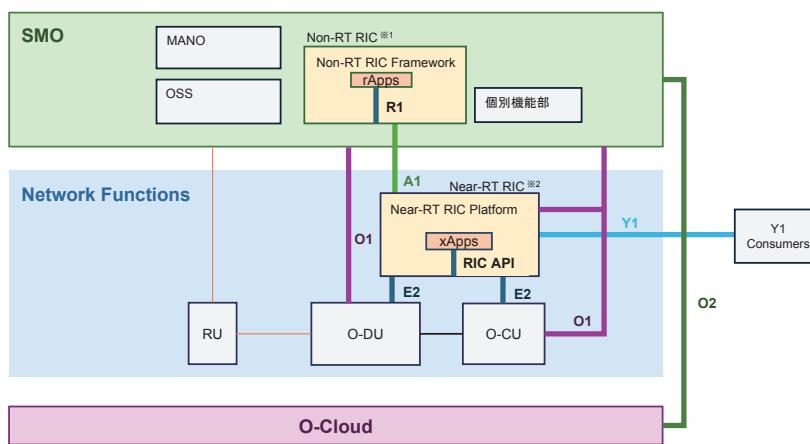


図1 RICの構成

\*1 Non-RT RIC : O-RAN ALLIANCEにおいて、リアルタイム性が求められることに対してインテリジェンスな制御を行うシステム。

\*2 rApp : Non-RT RICのプラットフォーム上で動作するアプリケーション。

\*3 Near-RT RIC : O-RAN ALLIANCEにおいて、リアルタイム性が求められることに対してインテリジェンスな制御を行うシステム。

\*4 xApp : Near-RT RICのプラットフォーム上で動作するアプリケーション。

ポリシー制御とAI/ML最適化を実施しました。RICは制御ロジックをrApp/xAppでモジュール化し、ベンダ非依存の開発・配備が可能になりました。vRANは仮想化RANをO-Cloud上で動作させ、RICと連携しました。

この転換により、制御機能は論理的に分離・集約され、マルチベンダ環境でも一貫した運用と高度な最適化が実現されます。

### ■近年のO-RAN動向

RICに関するインターフェースは、主にO-RAN ALLIANCEのWG(Working Group)2、WG3で議論されています。以下では、2022年以降の標準化動向を示します。なお、2022年4月までの標準化動向は参考文献<sup>(1)</sup>をご参照ください。

#### (1) R1インターフェース

AI/MLに関するAI/ML workflow serviceにおいて、2022年時点では未規定でした。関連するAIモデルのトレーニングや保存、モニタリングなどを実施するプロシージャが規定されました。これらについて、一部はプレリリースバージョンでStage3の規定が完了しました。

O1インターフェースに関するRAN OAM (Operations, Administration, Maintenance)-related serviceと呼ばれる機能では、CM serviceのプロシージャが規定され、rAppによるR1インターフェースからO1インターフェースを通じた基地局の設定パラメータの取得や書込みについての規定が進みました。

#### (2) A1インターフェース

A1インターフェースは、A1-P (Policy), A1-EI (Enrichment Information), A1-MLの3つの役割がありますが、現在はA1-MLの議論が加速しており、2025年を目指してStage3が規定される計画です。A1-MLの機能を使用することで、Non-RT RICとNear-RT RIC間でトレーニングの要求や、学習したモデルの受渡しなどが実施可能になります。

#### (3) E2インターフェース

E2インターフェースは、2022年以降、新規にQUERY, ASSISTANCEという機能が追加されました。またStage3の仕様策定も進んでおり、例えば、省電力化のためのO-RUのマイクロスリープ制御や、massive MIMO (Multiple Input Multi-

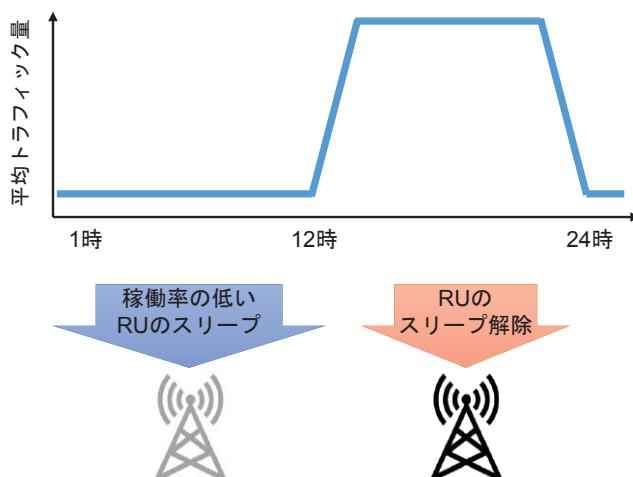


図2 トライアングル量に応じたスリープ制御イメージ

ple Output)<sup>\*5</sup>のビームフォーミング制御などに関連する内容が標準化されました。

#### (4) Near-RT RIC APIs

Near-RT RIC APIsはNear-RT RIC Platform, xApp間で提供される機能にアクセスするためのAPIが規定されており、一部の主要なメッセージについてはStage3まで規定されています。

Near-RT RIC APIsのうち、AIに関する機能のAPIは、新規にAI/ML workflow APIsとして定義され、標準化が進んでいます。詳細なStage3仕様は議論中ですが、概要レベルでは規定されており、本APIを通して、モデルの管理やトレーニングなどの機能を使用できます。

#### (5) Y1インターフェース

Y1インターフェースは、Y1 ConsumerがNear-RT RICからRAI (Radio Analytics Information)の取得を可能とする機能が規定されています。RAIには、例えば、平均スループットや、平均パケット遅延があり、Y1 Consumerはこれらの情報を取得することができます。外部のサービスで活用することができます。

### ドコモでのRICアプリケーション導入状況

RICでは、Non-RT RIC上で動作するrAppやNear-RT RIC上で動作するxAppのRICアプリケーションによって、ポリシー制御やパラメータの最適化を行っています。

以下では、ドコモが開発した基地局制御のためのアルゴリズムを搭載したRICアプ

リケーションの一部を解説します。

### ■RUスリープ

#### (1) 機能概要

RUスリープrAppはRUのスリープ制御を自動化し、ネットワークの消費電力を最小化するアプリケーションです。過去のPMデータに基づいてトライアングルが少ない時間帯を予測し、RUのスリープ時間を見直します。これにより、サービス品質を維持しながら基地局の電力消費を削減することができます(図2)。

#### (2) 特徴

本rAppは、各RUにおけるトライアングルの時系列データとセルのオーバレイ情報を統合的に分析します。これにより、サービスエリアへの影響を最小限に抑えながら最適なスリープスケジュールを生成します。

スリープ中においても、周辺セルのトライアングル状況を常時監視し、平常時と異なるトライアングルの急激な増加や変動を検知した場合、自動的にスリープ状態を解除します。この制御により、従来の静的なスケジュールベースでの基地局のスリープ制御では対応が難しかった突発的なトライアングル変動に対しても、通信速度の低下や接続断を防ぎ、安定的なサービス品質を維持す

\*5 massive MIMO: 送信と受信にそれぞれ複数素子のアンテナを用いることで無線信号を空間的に多重して伝送するMIMO伝送方式において、より多くのアンテナ素子で構成される超多素子アンテナの採用により、高周波数帯使用時の電波伝搬損失補償を可能とする鋭い電波ビームの形成や、より多くのストリームの同時伝送を実現する技術。これらにより、所望のサービスエリアを確保しつつ、高速なデータ通信を実現します。

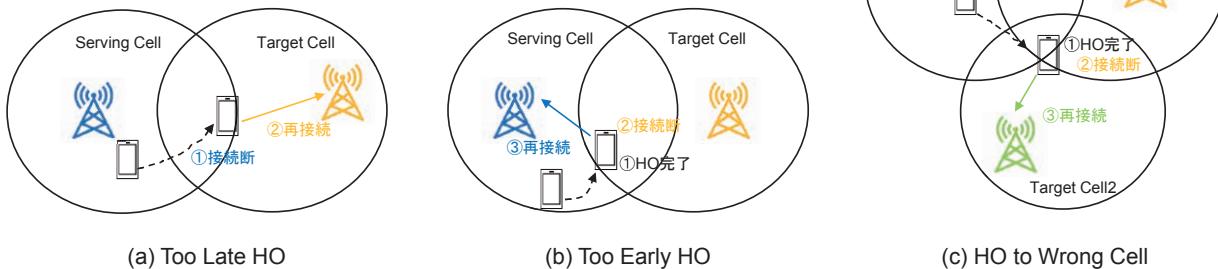


図3 通信品質に影響を及ぼすHOの失敗の要因

することができるようになります。

なお、本rAppは、スリープしたセルのエリアをカバーするために周辺セルのアンテナ指向角を調整する機能を持っています。この機能により多くのセルでのスリープを可能にし、さらなる省電力化を実現します。

#### ■HO最適化

##### (1) 機能概要

ユーザが通話やデータ通信を行っている状態で、かつ複雑なセル構成や高速に移動するような状況でHO<sup>6</sup>が実施されるとき、不要なHO、HOの繰返しやHO手順の失敗といった課題が生じます。

HO最適化rAppはHO関連パラメータを最適化することで、この課題を解決するアプリケーションです。本アプリケーションにより、通信の安定性や信頼性の確保を実現します。

##### (2) 特徴

上記の課題を解決するにあたり、電波伝搬がセル構成や新設された建築物により大規模かつ不可逆的に変化する中、従来システムでは適宜運用者が適切な種類のパラメータに最適値を反映する必要があります。

本rAppでは、特に通信品質に悪影響がある「Too Late HO<sup>7</sup>」、Too Early HO<sup>8</sup>、HO to Wrong Cell<sup>9</sup>」(図3)の発生回数を軽減するためにパラメータ最適化を実施します。最適化に必要な情報である、HO発生数、HO失敗数、最適化対象HO数などのPMデータとPMデータから算出した評価結果に基づき、HO前にUEが現在位置しているセル(Serving Cell)のパラメータを調整します。

また、Serving Cellとそれに隣接するセルの組合せであるCell Pair単位で設定可

能なパラメータを考慮することで、UEが移動する先のセル(Target Cell)の品質を加味した制御が可能となります。

このように、絶えず変化する環境においても最適化対象となるHOを自動的に検出し、適切なタイミングでHO手順を実施できるようパラメータを動的に制御することで、移動時における通信品質の確保をめざしていきます。

#### ■トラフィックステアリング

##### (1) 機能概要

O-RANで規定されているトラフィックステアリングのユースケースでは、さまざまな要件や環境を考慮したうえで、適切なトラフィックの管理を実施します。ドコモでは、その中でもセル間の負荷分散に着目して開発を行っています。

トラフィックステアリングrAppは、Non-RT RIC内のrAppと開発中のNear-RT RIC内のxAppが連携して、高負荷なセルから異なる周波数かつ負荷の低いセルにUEをHOさせることで負荷分散を実現するアプリケーションです。

##### (2) 特徴

開発されたrAppは、各セルより収集したPMデータより、各セルの目標となるリソース使用率とHO候補先のセルを決定します。Non-RT RICは、決定した情報をポリシーとしてNear-RT RICに送信します。開発中のxAppはNon-RT RICから送信されたA1ポリシーを解釈し、Near-RT RICは周囲の情報を取得し、高負荷セルから、通知された候補セルの中の適切なセルにUEをHOさせます。

本ユースケースでは、異なるベンダ間の基地局でもHOすることによって負荷分散

することができます。Non-RT RICやNear-RT RICを活用することによって、エリア全体の状態を踏まえたうえで負荷分散を実現することができ、これにより全体でのスループットの向上が期待されます。

## AI/ML基盤の導入によるRICのさらなるインテリジェント化

#### ■RICとAI/ML技術

RICの特徴の1つであるAI/ML技術の活用によるRANパラメータの高度な自動最適化によって、通信品質とお客様満足度の向上が期待されているだけでなく、通信事業者の運用コストの低減も見込まれます。ドコモでは、RICに接続するシステムとしてAI/ML基盤の開発を進め、これと連携する異常検知rAppの開発を行っています。

#### ■AI/ML基盤

AI/ML基盤の構成を図4に示します。AI/ML基盤は、MLOps (Machine Learning Operations)<sup>10</sup>を基に設計されており、モデルの前処理、学習、デプロイメントを可能としています。

\*6 HO: 端末とネットワーク間の通信を継続したまま、通信セル・基地局の切替えを行う通信技術。

\*7 Too Late HO: UEがTarget CellへHOされるタイミングが遅すぎるため、Target Cellに接続する前にServing Cellと接続断が発生してしまう事象。

\*8 Too Early HO: UEがTarget CellへHOされるタイミングが早すぎるため、再びServing Cellに接続してしまうHO事象。

\*9 HO to Wrong Cell: UEがHOされる際に、接続されるべきではないセルに接続されてしまうHO事象。

\*10 MLOps: 機械学習モデルの開発と運用までのプロセスを一体化し継続的に最適化を続けていく手法。

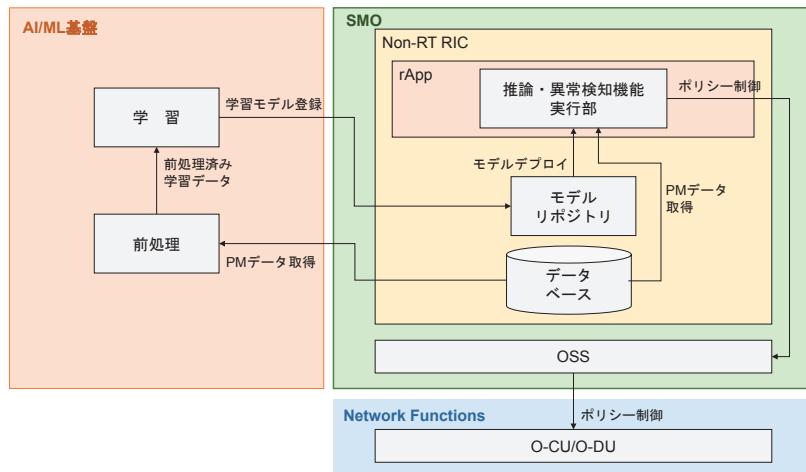


図 4 AI/ML 基盤構成

モデルの前処理は、蓄積されているPMデータを取得し、学習に適したデータ形式への変換を行います。学習は、データの性質や目的に応じた最適化手法を適用します。トレーニングの過程では、ハイパーパラメータのチューニングを行い、モデルの精度測定、評価指標を用いて検証し、モデルの性能を向上させます。

デプロイは、推論を実施するためモデルや推論機能実行部をrAppとしてRIC上にデプロイを実施します。

デプロイされたrAppは、PMデータを取得し、パラメータの最適値を推論、装置に反映します。デプロイされたモデルは運用環境で監視され、リアルタイムでパフォーマンスの評価やデータドリフトの検出が行われます。必要に応じてモデルの再トレーニングを実施することで、性能を維持し続けます。

### ■AI/MLを活用した異常検知

AI/ML基盤を活用したネットワーク運用アプリケーションとして、異常を検知するrAppを開発しました。通常、ネットワーク機器の故障による通信断の事象はアラームとしてOSSに通知されます。しかし通信断を伴わないスループット低下など通知がなされない異常もあります。

本rAppではAI/ML技術を用いてPMデータからそれらの異常を検知、通知します。

AI/ML基盤では、PMデータから深層学習により異常検知モデルを作成し、モデルをNon-RT RIC内のモデルリポジトリに登録します。異常検知rAppは、モデルリポジトリに登録されたモデルとPMデータを用いて異常検知を随時実施します。

また、異常検知モデルが劣化した場合には最新のデータを用いて再びモデル作成を行って異常検知をMLOpsプロセスとして運用し、性能の維持および改善を行っていきます。

めに、O-RAN ALLIANCEに準拠したRICの開発導入を進め、さまざまなアプリケーションの導入を通じてRANのインテリジェント化を推進します。また、O-RANでの標準化作業にも積極的に参加し、RANのインテリジェント化の仕様策定にも引き続き貢献していきます。

### ■参考文献

- 1) [https://ssw.web.ntt.com/orex/technical/pdf/vol30\\_1\\_005jp.pdf](https://ssw.web.ntt.com/orex/technical/pdf/vol30_1_005jp.pdf)

### 今後の展開

NTTドコモでは、2023年のvRAN導入に合わせてRICバージョン1.0の開発、導入以来継続して機能追加を実施し、2025年にはバージョン3.0を開発、導入しています。

今後も基地局制御の自動化の対象を広げ、さらなるRANインテリジェント化を推進していきます。さらなる自動化の一例としては、災害時や集客イベント開催時の臨時基地局の設置を迅速に行うためのパラメータ最適化などが挙げられます。

こうした最適化の実現にあたっては、ドコモでのRICアプリケーションの開発だけではなく、RIC上で動作可能な3rd Party製のRICアプリケーションの導入とインテグレーションを行っていく必要があります。そのため、業界各社との幅広い協力体制の下で、各種インターフェースの整備、標準化準拠の推進が必要となります。また、これら機能の拡充を図るとともに、さまざまなベンダーとの接続が可能なO-RANの特徴を踏まえ、海外の他通信事業者への展開も図ります。

ドコモは今後も継続してオープンなインターフェースを採用したSMOを実現するた



(上段左から) 川名 昭博 / 橋本 英奈 / 遠藤 尚輝

(下段左から) 田中 隼輔 / 小林 瑞美 / 江川 知樹

本稿では、無線制御の自動化を行うためのRIC (RAN Intelligent Controller)について紹介しました。引き続きRICの開発と導入を通じて無線制御の自動化を実現し、お客様に快適な通信環境をお届けします。

### ◆問い合わせ先

NTTドコモ  
無線アクセスデザイン部  
RAN技術推進室



## 主役登場

コストメリットのある  
無線インフラをめざして鈴木 勇斗 *Yuto Suzuki*NTT ドコモ  
無線アクセステザイン部  
担当URL <https://journal.ntt.co.jp/article/37472>DOI <https://doi.org/10.60249/25125106>

モバイル通信は私たちの仕事や生活に深く浸透し、今では当たり前のように享受しているサービスとなっています。私自身も仕事のちょっとした資料の確認や返信を移動中にスマートフォンで行うこともあります。近所への買い物は財布をもたずスマートフォンの電子決済で済ませてしまっています。

NTT ドコモでは、2020年3月から5G（第5世代移動通信システム）サービスを提供開始し順次拡大に取り組んでいます。一方で、お客さまにご利用しやすいサービスとなるよう、無線インフラを担う部門の使命としては高品質なエリアをより低成本で提供することが求められています。システムの世代としても6G（第6世代移動通信システム）を見据えた技術議論も始まっており、継続的かつ安定した品質・価格で設備を構築していくことが重要です。

これまでドコモではモバイルネットワーク専用に開発された装置を導入していました。一方、IT分野の技術革新は目覚ましく、ハードウェアの性能向上や仮想化技術によるハードウェアとソフトウェアの分離が進み、RANの仮想化(vRAN)を実現できるようになりました。その中でも、本記事のシステム構築はドコモ主導で行うという、基地局装置の開発としてはチャレンジとなるプロジェクトでした。サーバ、アクセラレータ、ルータなど、システムに必要なハー

ドウェアやソフトウェアを完全に異なるベンダで構成する実装を試み、コストメリットの大きいベンダ製品の組み合わせを選定することで実現に至りました。実現に際しては、ハードウェアとソフトウェアそれぞれにおいて、さまざまなプレイヤ、多数のステークホルダが存在する中、相互の仕様理解の促進、コンポーネント間の工程の見える化やアライン、コミュニケーションをつなぐことが重要でした。

また、RANの仮想化の知見が少ないこともあります。開発中は問題が発生することもしばしばありましたが、クリティカルパスを早期に解消するため、ベンダとの技術議論を高頻度で実施しました。ほぼ毎日、ベンダの方々と対策の立案・検討、スケジュール管理を粘り強く行いました。お客さまへ提供するエリアに直結する設備ですので、特に装置の安定的な動作品質については試験チームと慎重に見極めました。その結果、実現に至ることができたと感じています。

さらに、商用の試験環境をくみ上げることもゼロからの試みでした。商用の構成をそのまま配備すればいいというものでもなく、要件を維持しつついかに電力・スペースを必要最低限に抑えながら、他のシステムの試験へも影響を与えることなくくみ上げることを求められました。試験環境向けに急な仕様変更を取らざるを得ない場合もあり、そのときは夜遅くまでサーバのマウントや

配線、設定変更を実施し、試験への影響を最小限となるようにし、開発計画のリカバリに奔走しました。社内の試験体制としても部をまたがる体制であり、社内の開発に対する考え方や所掌の違いから意見がぶつかるものもありました。ただ、それはより良いシステムを提供したいという想いから来ており、実現に至った大事なプロセスだったと感じています。

今回紹介したシステムは、社内でも注目されている中、実は私が企画・立案の担当で企画し、その後開発部門に異動してそのまま開発するという、エンジニアとして大変貴重な経験と成長の機会をいただいたシステムです。それまでの保全・設計業務で経験した知見をこのシステムで活かせる点はどこか、この装置や仕様に詳しい人は誰かなど社内のつながりもどう活かせるか、といった今までの業務経験で活かせるものはすべて使う、そこからさらに知見を広げていく、といった姿勢で取り組まなければ実現に至らなかったと感じており、過去における自身の1つひとつの積み重ねが実ったという実感がありました。今後は培ったノウハウを他のシステムの導入や検討に活かし、引き続きコストメリットのあるシステム開発を進め、お客さまにご利用しやすいモバイルネットワークの提供に貢献していきます。



# 沈黙のリスク、崩れゆく基盤（後編） —最新技術動向と次世代の展望

前編では、インフラ老朽化問題について、我が国の制度の推移、予算・政策の方向性、そして過去に起きた代表的な事故事例を通じて、現場が抱える構造劣化リスクの深刻さについて述べてきました。道路の陥没、橋梁の落橋、トンネル壁の剥落等の事故は、さまざまな複合因子を介して引き起こされており、全国各地でいつ発生しても不思議ではないほど、劣化の予兆が表面化している状況を確認しました。後編では、インフラ老朽化に対応するための最新技術動向を中心に据え、検査・検知・復旧・予防の観点から、現在、研究・適用されている主要な技術を紹介します。そして最後に、全編を踏まえ次世代につながる社会インフラのあり方について考えます。

キーワード：#社会インフラ、#老朽化対応、#検知・復旧技術



## インフラ老朽化に対応する最新技術動向

### ■点検・検査技術の高度化

#### (1) ドローン・3Dスキャナによる非接触点検

ドローンを活用した非接触点検は、橋梁やトンネル、鉄塔、ダムなどの構造物を安全かつ迅速に点検できる技術として急速に発展しています。ドローンにはGPS・IMU（慣性計測装置）、高分解能力カメラ（可視光・赤外線併用）や小型LiDARセンサが搭載され、自律飛行または遠隔操作により構造物周囲を撮影することができます。撮影により得られた画像とレーザ照射データから点群（3次元座標群）が生成され、これにより、ひび・浮き・剥離の形状をミリメートル精度でとらえることが可能になりました。赤外線撮影を併用すると、表面温度の不連続性から裏面空隙や浮き部を推定することもでき、点群データ解析によっては断面変位やねじれモードも識別できるようになるなど、高度な技術の進化が実用レベルで進んでいます。

#### (2) AI画像解析技術

AI（人工知能）を活用したひび割れや錆の自動検出も、深層学習（ディープラーニング）の発展により、実際の現場環境でも運用可能なレベルになってきています。これらの技術は、国土交通省の「点検支援技

術性能カタログ」<sup>(1)</sup>にも複数登録されており、公共事業での導入が進みつつあります。このカタログでは、AIによる画像解析を用いた点検支援技術として、株式会社ブイイングの「ひびみつけ」、パナソニックホールディングスの「AI損傷判定システム」などが掲載されており、いずれも国管理施設や自治体橋梁を対象とした実証試験を経て、性能が確認されています。

実運用下での精度に関しては、国内外の研究機関が行った橋梁やトンネル覆工のフィールド実験でも、80～95%程度の検出精度が報告されています。代表的なものとして、G. Liらによる『Pixel-level bridge crack detection using deep fusion network』<sup>(2)</sup>では、実際の橋梁撮影データを使ったピクセルレベルのひび割れ抽出で認識精度98.6%を記録しています。さらに、UAV（無人飛行機）を用いた、風・照度・撮影角度の変動を含む実環境での橋梁・舗装点検を対象とした研究として、A. Altafらによる『Deployable Deep Learning Models for Crack Detection』<sup>(3)</sup>があり、検出精度90.5%を達成しています。

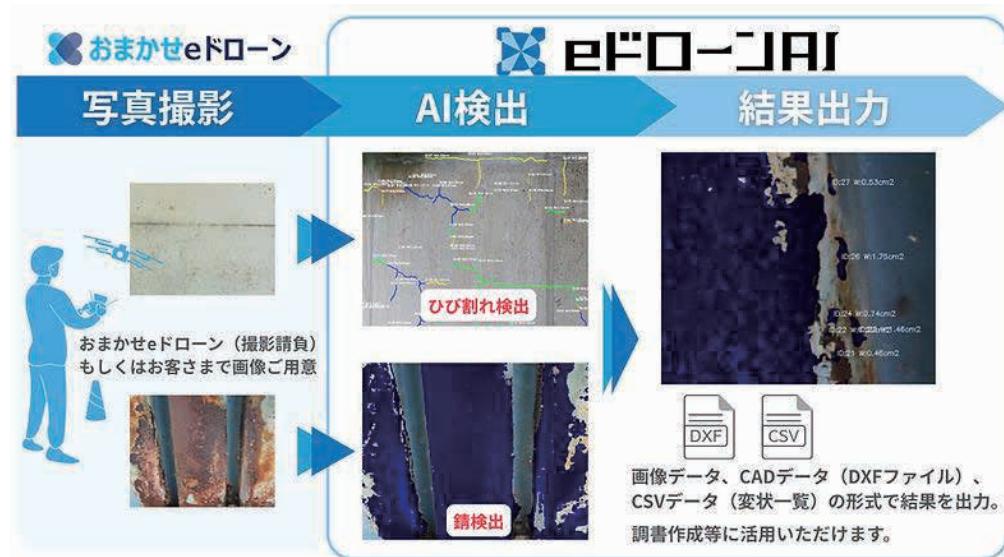
国内の自治体では、石川県七尾市が実施した小規模橋梁点検実証（2024年）<sup>(4)</sup>で、AIによる健全度判定の正答率92.9%、劣化要因判定正答率96.4%という結果が公表されています。このように、AI画像解析技術は実環境下で90%前後の精度が実証される

段階にあり、国の技術評価制度においても有効な補助技術と位置付けられつつあります。

NTTグループにおいても、NTTアクセスマルチサービスシステム研究所を中心とした複数の研究所でさまざまな関連技術に関する研究が行われていますが、NTT e-Drone Technologyにおいて、ドローンによる測距とAI画像解析を組み合わせたサービスとして実用化もされています。サービス概要は以下のとおりです（図1）。

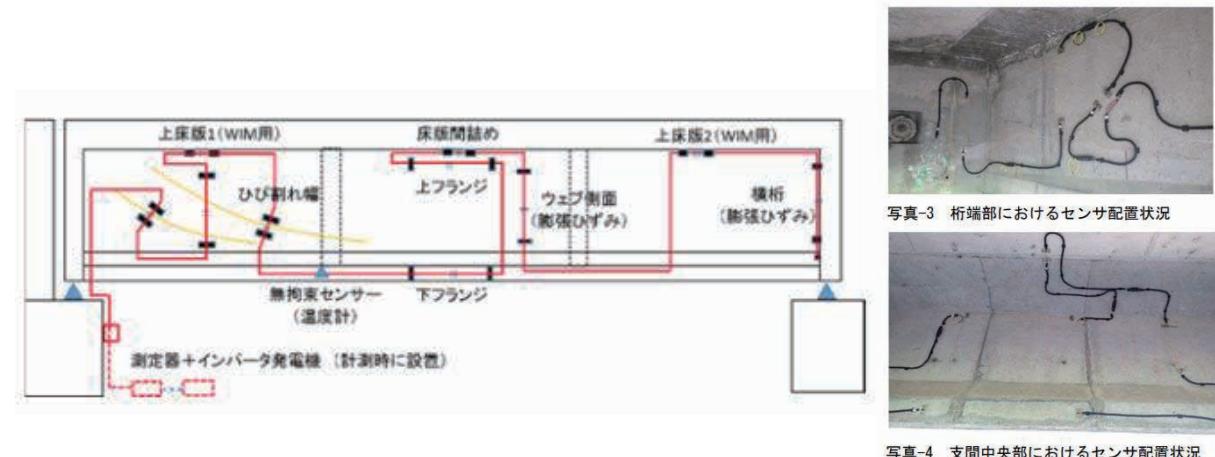
- ・飛行計画の作成：GPS・障害物データをもとに自律飛行ルートを設計
- ・撮影・スキャン：可視カメラ・赤外線カメラ・LiDARで構造物を多角的に撮影
- ・データ補正：取得データを点群化し、座標補正・ノイズ除去
- ・AI解析：損傷部（ひび、錆、剥離）をAIが自動認識し、補修優先順位の自動付与が可能
- ・CIM連携：解析結果を3Dモデルに統合し、劣化箇所を色別で可視化

(3) 光ファイバセンシング（FBG等）  
光ファイバセンサは、構造物内部の歪みや温度を高精度で長期間計測できる技術として、橋梁やトンネルなど実構造物への導入が進んでいます。特にFBG（Fiber Bragg Grating）センサは、光の反射波長変化を利用して微小な歪みを検出でき、電



出典：NTT e-Drone Technology HP (<https://www.nttedt.co.jp/>)

図1 おまかせ e ドローンおよび e ドローンAIサービス概要



出典：コンクリート工学年次論文集2017 「FBG光ファイバーを用いた橋梁モニタリング技術の実橋検証」

図2 橋梁へのファイバーセンサ設置イメージ

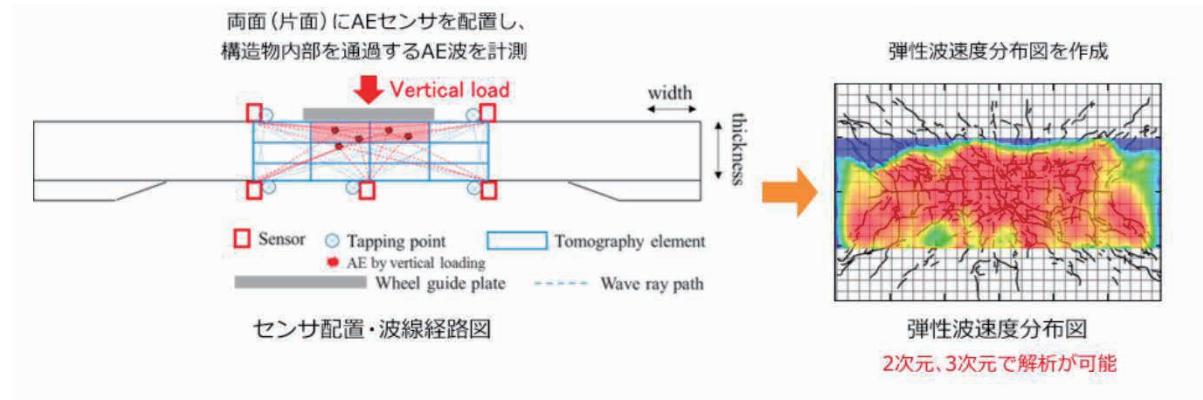
磁ノイズに強く、安定した計測が可能です（図2）。

日本では、実橋梁にFBGを埋設し、2年以上の実環境モニタリングで信号可用率が90%以上を維持した長期観測研究が行われており<sup>(5)</sup>、温度補正後も波長ドリフトが小さく安定していたことが報告されています。鋼橋での実橋試験でも、FBGが長期

間±5  $\mu\epsilon$  (マイクロストレン) 以内の精度で動作し、常時歪み監視が可能であることが確認されています<sup>(6)</sup>。海外では、エーレンド橋（デンマーク・スウェーデン間）でFBGを用いた常時監視を実施し、5年間の観測データで温度補正後の誤差が±5  $\mu\epsilon$  以内に収まる高安定性を示した事例があります<sup>(7)</sup>。

これらの実証により、FBGセンサは実構造物のモニタリングで実用化が進み、長期健全度評価における信頼性の高い手段として位置付けられています。

(4) アコースティック・エミッション（AE）による損傷検知  
アコースティック・エミッション（AE）は、コンクリート内部の微小破壊やひび割れ発



出典: 株式会社IHI検査計測 HP <https://www.iic-hq.co.jp/services/S-02-06/>  
本技術はインフラ先端技術産学共同研究部門(ITIL)で研究開発されたものとなります

図3 AEセンサによるコンクリート損傷検知イメージ

生に伴って生じる弾性波を検出する技術で、目視では確認できない微細なひびの発生を早期に検出でき、損傷の発生・進展をリアルタイムに把握できるため、構造ヘルスモニタリング技術として注目されています(図3)。

ケーブル橋を対象とした実橋モニタリングでは、UHPC床版(超高性能纖維補強コンクリートを用いた薄型、高耐久な道路橋床版)に設置したAEセンサによる計測結果から、AE信号発生頻度とひび割れ進展の関係を定量的に解析し、両者に強い相関があることが報告されています<sup>(8)</sup>。ヨーロッパ各国で実施された橋梁モニタリングでも、AEエネルギーと疲労指標の間に相関関係が確認され、構造健全度の定量評価に活用可能であるとされています<sup>(9)</sup>。

このように、AE技術は実環境においても高感度での損傷検出が可能であり、予防保全型のコンクリート監視手法として有効性が実証されています。

## ■新素材、予防保全の高度化

### (1) 超高性能纖維補強コンクリート(UHPC)

超高性能纖維補強コンクリート(UHPC: Ultra-High Performance Concrete)は、従来コンクリートを大幅に上回る強度と耐久性を持ち、橋梁床版や桁端部などの補修・オーバーレイ材として世界的に導入が進

ています。高密度なマトリクスと短纖維補強により、塩害・凍結融解・疲労劣化に対して高い抵抗性を示します。

日本では、兵庫県の加与川橋で世界初の鉄道用橋梁としてUHPCが採用され、薄肉スラブ化(鉄筋コンクリート造の床や屋根の構造体を薄く造ること)による軽量化と高耐久性が実証されています<sup>(10)</sup>。また、東京国際空港(羽田空港)滑走路補修ではUFCスラブ約2.2万m<sup>3</sup>が施工され、従来コンクリート比で重量を56%削減、施工後10年以上再劣化が確認されていません<sup>(10)</sup>。

米国では、連邦高速道路局(FHWA)の「Bridge Deck Overlay Program」で複数橋梁にUHPCを適用し、施工後10年間で再劣化率1%未満という結果が報告されています<sup>(11)</sup>。

これらの実績から、UHPCは長期性能が定量的に実証された高耐久補修材として、橋梁補修・維持管理分野における予防保全の標準技術の1つとなりつつあります。

### (2) 自己治癒コンクリート

コンクリート内部で発生した微細ひび割れを自ら閉塞・修復する「自己治癒コンクリート(Self-Healing Concrete)」は、維持管理負担を軽減する次世代材料として研究・実証が進んでいます。自己治癒機構には、①未反応セメントや混和材が再水和してひびを埋める化学的自己治癒型、②ひび

発生時にカプセルから修復剤を放出するマイクロカプセル型、③微生物の代謝により炭酸カルシウムを析出してひびを封鎖する微生物(バクテリア)型の3種類があります。

オランダのデルフト工科大学では、微生物型自己治癒コンクリートを橋梁部材に適用し、2年間の屋外暴露試験で幅1.0mmのひびが完全閉塞し、透水係数が10分の1以下に低下したことが確認されています<sup>(12)</sup>。また、欧州共同研究プロジェクト「HEALCON(EU FP7)」では、自己治癒材を用いた部材試験で耐凍害性能が50%向上し、塩化物の浸透が低減する結果が報告されています<sup>(13)</sup>。

日本国内でも、建設技術研究所と山口大学などの共同研究により、微生物型自己治癒コンクリートを用いた橋梁部材の現場適用試験が行われ、ひび幅0.5mm以下の閉塞効果が実環境下で確認されています<sup>(14)</sup>。これらの研究は、補修回数の低減やライフサイクルコストの縮減に寄与する材料技術として、今後の実用化が期待されています。

### (3) 予防保全とデータ活用

老朽化対策を「壊れてから直す」事後保全から、「壊れる前に防ぐ」予防保全へ転換するためには、点検結果や維持管理データを継続的に活用する仕組みの整備が重要

です。

国土交通省は、橋梁・トンネルなどの構造物点検で活用可能な技術を体系的に整理した「点検支援技術性能能力タログ」を運用しており、国が定めた標準項目に対して性能値を提示し、国管理施設等で検証された結果を基に技術を掲載しています<sup>(15)</sup>。2025年4月には、橋梁・トンネル分野に加えて舗装や道路巡視への対象拡大、活用の原則化などが示され、地方自治体を含む管理者が客観的な技術情報を基に点検方法を選定できる環境が整備されつつあります。

また、国土技術政策総合研究所（NIIJIM）では、デジタル技術を活用した維持管理の高度化に関する研究を推進しています。研究テーマには、AIによる劣化進行解析、点検画像データの自動分類、3次元モデル（CIM）やBIMを活用した維持管理情報の連携などが含まれており、国のインフラDX政策と連携して技術開発と普及が進められています。

これらの取り組みにより、従来は人手中心で行われてきた点検・診断のプロセスが、データ駆動型で継続的に分析・最適化できる仕組みへと変化しつつあります。今後は、各自治体や管理者がこれらの公的仕組みを活用し、AIやモニタリングデータを統合した予防保全型の維持管理体制を構築することが期待されます。

## ■今後の方針性

近年、AIやセンサ、新素材などの技術革新は、インフラ維持管理のあり方を根本から変えつつあります。それらは単なる「効率化の道具」ではなく、安全性と経済性を両立し、社会全体のリスクを体系的に下げるための基盤技術へと進化しており、今後の方向性は以下の3つの軸で整理することができます。

### (1) 導入の体系化

新技術を現場に根付かせるには、モデル事業で効果を検証し、その成果を設計・点検基準に反映することで信頼性を確保することが必要です。今後は、実装・評価・改善を一体化した「導入段階マネジメント」

を制度的に整え、成功事例を標準仕様へ昇華させるプロセスの体系化が求められます。

### (2) 制度連携と評価の高度化

技術の普及には制度面でのサポートが不可欠です。国土交通省が運用する点検支援技術性能能力タログは、技術性能を公的に検証し、客観的な比較・選定を可能にする仕組みとして機能しており、さらなる活用が期待されます。また、新たな技術に対応した法規制の適切な改正も求められます。

### (3) 複合化とシェアリングへの転換

老朽化が多様化する現代では、単一技術では対応しきれず、複合的アプローチにより、劣化の早期発見、最小限の介入、長期的な安定性を同時に実現することが求められます。また、維持管理のデジタル化による情報共有の推進とともに、技術者不足を補う取り組みとして、保守・保全に関する業務を業界を越えてシェアリングする動きが始まっています。官民連携（PPP/PFI）の推進の中で、維持管理業務の包括委託も広がってきており、官民が連携した業務シェアリングも、重要な取り組みになると想定されます。

## 次世代に向けた持続可能なインフラ維持の戦略と社会の選択

前編でみてきたように、日本の社会インフラは、高度経済成長期に整備された構造物が一斉に更新期を迎え、維持管理のあり方が国家的課題となっています。

2012年の笹子トンネル天井板崩落事故は、点検制度と安全管理の転換点となり、政府は橋梁・トンネルの5年ごとの近接目視点検を義務化し、「事後保全から予防保全へ」という基本方針を確立しました。さらに、「インフラ長寿命化基本計画」（2013年）および「公共施設等総合管理計画」（2014年）により、全国の自治体で長寿命化計画を策定する体制が整いました。こうして制度面は大きく前進ましたが、現場では依然として財源・人材・地域間格差といった課題に直面しています。

海外の事例も、日本が学ぶべき重要な示唆を与えています。

米国ではミネアポリスI-35W橋崩落事故（2007年）を契機に、連邦政府が全国統一の橋梁点検制度を整備し、その教訓から2021年に成立した「インフラ投資・雇用法（IIJA）」は、橋梁・道路・通信・電力などを一体的に更新する国家的プロジェクトであり、財源の恒久化と技術革新の制度化を同時に進めています。

欧州でも、イタリア・ジェノバ橋崩落事故（2018年）を機に、民間事業者への監督強化と安全データ公開制度が導入されました。フランスやドイツでは「国家更新計画」に基づく優先度に応じたインフラ政策が展開され、中央政府が財源と情報を統合管理する仕組みを整えています。

いずれの国も、国家レベルでの責任と透明性の確立が、持続的な維持管理の前提となっており、日本においても確立が急務であると考えます。

## ■制度と技術の融合

国土交通省が整備した「点検支援技術性能能力タログ」は、点検支援技術を検証し、性能を公表する仕組みであり、技術導入を客観的かつ透明に進める基盤となっています。後編で紹介した技術はほんの一部で、さまざまな技術が開発されており、実用化も進んでいますが、これまでのやり方を基本とした法規制も多く、制度面でのサポートも重要な検討課題となっています。

## ■社会構造の変化と新たな課題

これまでの日本の社会インフラは、山間部から離島まで、ユニバーサルサービスを基本として整備が進められてきました。しかしながら、国土交通省の『国土の長期展望』<sup>(15)</sup>によれば、2050年には全国の居住地域の約半数で人口が2015年比50%以上減少すると見込まれており、地方部を中心に人口が急速に減少し、維持管理に必要な人員・財源の確保が困難になることが想定されます。こうした人口構造の変化は、これまでと同様にすべてのインフラを同水準で維持することが現実的に難しくなることを意味



しており、今後は地域特性や利用実態に応じたインフラの選択と集中、および生活機能の再配置を進める必要があります。

また、地震に加え、気候変動に伴う災害リスクの増大している状況を踏まえ、災害対応と維持管理を一体化したレジリエンス重視の戦略が求められます。被災した構造物を単に元に戻すのではなく、被害を繰り返さない設計・運用に改める「ビルド・バック・ベター (Build Back Better)」の理論に基づき、復旧を安全性と持続性を高める再構築の機会とすることが望まれます。

さらに、社会の多様化とデジタル化が進む中、市民の理解と参加も欠かせません。老朽施設の撤去や機能統合には住民の合意が不可欠であり、情報公開と説明責任を果たす仕組みづくりが重要となります。

### ■今後の方向性

今後、日本がめざすべきは、制度・技術・社会構造を連携させた「持続可能なインフラ戦略の確立」であり、以下の4つの方向性が重要となります。

#### (1) 制度と財源の持続的確保

- ・インフラの更新・撤去・統合を含む資産マネジメントを国が長期的視点で責任を持つ法制度の策定
- ・国と地方自治体の役割分担の明確化と、財政と人材確保策の一体的支援の実施

#### (2) 技術の社会実装と統合運用

- ・AI、センサ、新素材など新たな技術開発のサポートと設計基準や補修指針への組み込み
- ・データの横断的活用による予防保全型維持管理システムの制度化と定着

#### (3) 官民連携 (PPP/PFI) の推進

- ・人材・財源の制約を補うため、民間の技術力・ノウハウ・資金を積極的に活用し、シェアリングする官民連携の拡充
- ・包括的委託や成果連動型契約方式 (Performance-Based Contract) の導入による、公共部門の負担軽減と業務効率化の実施

#### (4) 地域間連携と広域管理

- ・複数自治体が連携し、道路・河川・上下水道などの関連インフラを「群」として統合管理する地域インフラ群再生戦略マネジメント（群マネ）の確立
- ・国・自治体・民間によるデータプラットフォームの共有化により、点検・補修・予算計画を連携管理する体制の確立

これらの施策を同時に推進することで、インフラを「老朽化に追われる負債」から「社会を支え続ける資産」へと転換することができると言えます。制度改革と技術革新、そして社会構造の変化を一体でとらえ、科学的根拠と社会的合意に基づく選択を重ねていくことこそ、次世代へ安全で持続可能な社会基盤を引き継ぐ唯一の道ではないでしょうか。

インフラはすべての人の社会生活に影響を与える基盤であり、今こそ、官民、そして私たち国民1人ひとりが危機感をもって、そのあり方を考える姿勢が求められています。

### ■参考文献

- (1) <https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/inspection-support/zenbun.html>
- (2) <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109347>
- (3) <https://doi.org/10.3390/buildings15183362>
- (4) [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jseicim/1/1/\\_337/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jseicim/1/1/_337/_pdf)
- (5) M. Nishio, et al.: "Quality Evaluation of Fiber-Optic Strain Data Acquired in Long-Term Bridge Monitoring," *Sensors and Materials*, Vol. 29, No. 2, 2017.
- (6) 玉置他: "FBG光ファイバーを用いた橋梁モニタリング技術の実橋検証," *コンクリート工学年次論文集*, Vol.39, No.2, 2017.
- (7) M. Winkler, et al.: "Structural Health Monitoring of the Øresund Bridge using Fiber Optic Sensors," *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 2019.
- (8) Z. Chai, et al.: "AE Monitoring of Crack Evolution on UHPC Deck Layer of a Long-Span Cable-Stayed Bridge," *Construction and Building Materials*, Vol. 414, 2024.
- (9) IABSE: "Strategic Consideration for AE Monitoring of Bridges,"

International Association for Bridge and Structural Engineering, 2023.

(10) H. Musha, et al.: "Innovative UFC Structures in Japan," AFGC Symposium on Ultra-High Performance Concrete, 2013.

(11) FHWA: "Bridge Deck Overlay Program Report," Federal Highway Administration, 2024.

(12) 建設技術研究所・山口大学: "自己治癒コンクリートを用いたひび割れ補修材の現場適用試験," 土木学会年次学術講演会 講演概要集, 2023.

(13) [https://www.mlit.go.jp/report/press/road01\\_hh\\_001920.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/road01_hh_001920.html)

(14) [https://www.nirim.go.jp/japanese/organization/infradx\\_honbu/indexinfradx.htm](https://www.nirim.go.jp/japanese/organization/infradx_honbu/indexinfradx.htm)

(15) <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001365995.pdf>



株式会社情報通信総合研究所  
主席研究員 船本道子

NTTコミュニケーション科学基礎研究所  
フェロー

## 柏野牧夫 Makio Kashino

# トップアスリートの脳と身体のメカニズムを解明し、選手のパフォーマンス向上、ひいては人のWell-beingに貢献

極限のプレッシャーの中で、心と身体を自在に操り、高いパフォーマンスを発揮するトップアスリートたち。そのベースとなる脳と身体のメカニズムを科学的に解明することは、スポーツ選手の練習方法の充実はもちろん、私たち一般人の逆境への対応力やWell-beingの向上にも本質的な示唆を与えるものといえます。認知神経科学研究の第一人者であるNTTコミュニケーション科学基礎研究所 柏野牧夫フェローは、さまざまなスポーツ分野のトップアスリートに寄り添い、緊張感あふれる過酷な競技のオンラインでオリジナルの計測を実現し、斬新な知見を数々発掘しています。今回、最新の進捗状況を紹介していただくとともに、新たな研究分野を開拓していく思いや日頃の活動で心掛けていることなどを伺いました。

### ○ トップアスリートの脳と身体を実戦本番で測る

現在、取り組まれている研究内容について教えてください。

私の専門は、人間の認知や行動の特性を定量的に解析することです。もともとはスポーツの分野に取り組んでいたわけではなく、聴覚や多感覚知覚などを対象としていました。スポーツを対象にするようになったのは10年くらい前からで、トップレベルの競技団体やアスリートの方々と協力しながら研究を進めています。

スポーツ科学といえば、運動生理学やバイオメカニクス（生体力学）といった、「身体」に関するものが主流です。それに対して私たちは、「脳」に注目しています。いかに優れた身体でも、脳がなければ動きませんからね。一方で、脳だけを切り離して扱うことはできないとも考えています。脳と身体の相互関係にこそ、アスリートの優れた心身技能の本質があるというのが、私たちのスポーツ研究に通底する考え方です。

進行中の研究テーマを大きく分けるとすれば、1つは「心技体」における「技」、つまり技能の熟達に関する研究です。例えば、野球のバッターがボールを打つとき、視覚で得た情報に基づいて全身の動きを制御するという、極めて複雑な脳の情報処理が行われています。その情報処理の詳細はどのようなものか。トップレ

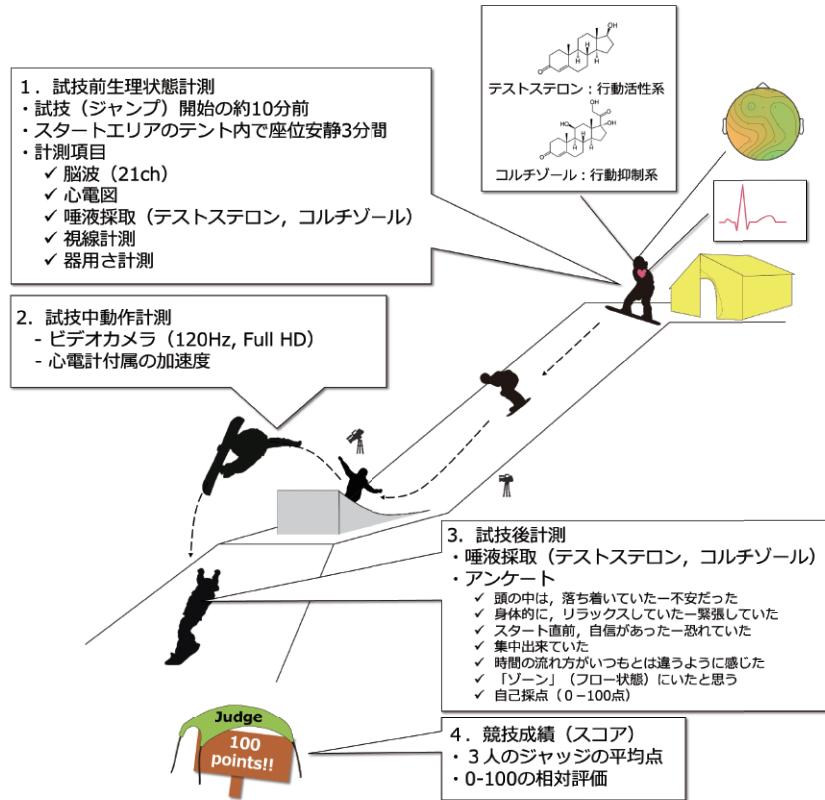


ベルのバッターは、そのどこが優れているのか。こういうことが分かれば、バッティングに対して、パワーやフォームとはまた別のアプローチがみえてくるわけです。

もう1つは、「心技体」の「心」、いわゆる「メンタル」に関する研究です。練習ではうまくできていたのに、本番では緊張のあまり失敗してしまった。あるいは逆に、本番で「ゾーン」に入り、思いがけない力を発揮できた。こういうエピソードをよく耳にします。そういうとき、脳や身体では何が起きているのでしょうか。精神論ではなく、神経科学的なメカニズムが分かれば、理想的な状態をシステムティックに取り出すことができるようになるかもしれません。

このような研究を進めるうえで、私たちが重視しているのは、実験場面のリアリティです。可能な限り、実際の試合か、それに準じる状況で計測を行います。私たちも、スポーツを対象とするより前は、統制された単純な条件下で実験を行っていました。それが基礎研究の常道であり、厳密な結果は得られるのですが、得られた知見が、そのまま複雑な実際場面に適用できる保証はありません。困難ではあっても、現実に何が起きているかをとらえることにチャレンジしたいというのが、この分野に参入した動機の1つでもあるのです。

リアリティというのは、実験環境だけでなく、問題設定についてもいえます。研究のための架空の問題ではなく、アスリートや



国内トップ選手が参加する国際的なルールに準拠した賞金付きの大会で、生体情報、動作、主観などを多角的に計測し、競技成績（スコア）との対応関係を探る。

図1 スノーボードビッグエアの大会における計測例

チームの直面している問題の中から研究すべきことを見つけるようにしています。もちろん、認知神経科学の観点からみて新規性があるか、解析の俎上に載るかというフィルタは通すのですが、成果はアスリートに還元したい。彼らは人生がかかっているですから、単離した要因について有意差はあるが効果量はわずか、という論文では意味がありません。

私たちはスポーツという分野においては後発組で、最初は試行錯誤の連続でしたが、10年間経ってみると、なんとかスタイルが確立してきました。世界的にみても独自のポジション、芸風ではあると思います。

### スポーツ競技のオンラインで生体情報を正確に実測するのは難しいですね。

競技中に計測を実施しますので、選手の皆さんへ邪魔をしてしまい、失敗につながっては本末転倒です。ですから、計測メンバーのオペレーション、パフォーマンスに干渉しない計測手段の選択、計測品質の確認など、用意周到な準備を心掛けています。それで

も、いざ当日になってみると、想定以上に過酷な状況だったということもあります。スノーボードビッグエアの大会での計測（図1）では、テント業者にも断られた吹雪の中で、急遽自分たちで計測用のテントを設営することもありました。

こんな環境で、20数名の参加選手の脳波、心拍、眼球運動、唾液中ホルモンなどの多項目の計測を一気にやろうというのですから、まっとうな神経科学者なら、ありえないと言うでしょう。脳波1つとっても、脳波計さえあれば誰でもなにがしかの信号は取得できるでしょうが、それだけだとほとんどはノイズです。専門誌に掲載できるクオリティで計測、解析するには、相当のノウハウが必要です。そんなノウハウは、世界中、なかなかないでしょうね。

動作の計測にしても、今はコンピュータビジョン技術で映像からモーションキャプチャを行うことが一般化していますが、通常のやり方では空中で華麗なトリックを決めるスノーボーダーの動作はとらえられません。動きが複雑なうえに、ウェアのだぶつきが大きいからです。スノボに限らず、過酷な条件下でも信頼できるデータを取得できる計測法の開発も、私たちの仕事の一部です。

そして何より、トップ選手たちが積極的に協力していただけているよう、強固な信頼関係を構築していくことが大切なポイントです。

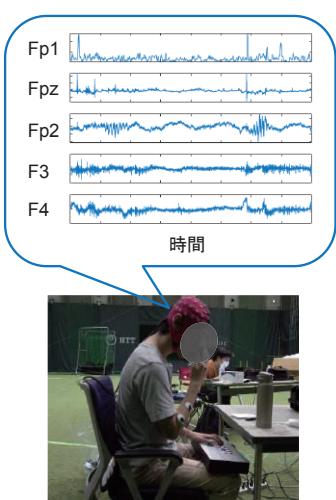
### 他のスポーツでの計測についても教えてください。

eスポーツでは、格闘ゲーム上級者どうしの対戦で両者の脳波を同時計測しました。その結果分かったのは、試合をする直前から、脳の状態としては勝負がある程度ついているらしいということです。試合の直前8秒間の脳波を調べてみると(図2(a))、結果的にその試合に勝つときと負けるときとで活動が大きく異なる部分があることが分かりました(図2(b))。そこで、試合直前の脳波データを用いて機械学習で勝敗を予測したところ、約80%もの命中率が得られました(図2(c))。

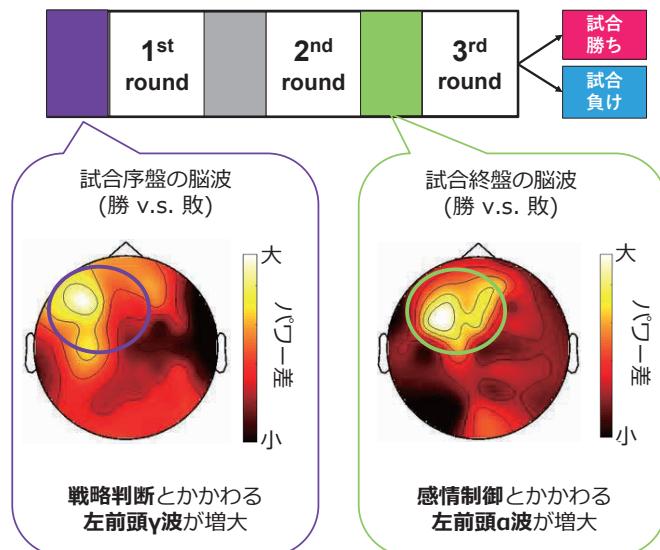
ここで重要なのは、「番狂わせ」も予測できるということです。AI(人工知能)が流行している今日、機械学習でさまざまなゲームの勝敗を予測すること自体はあちこちで行われていますが、それらは基本的に、過去の対戦履歴に基づくものです。しかし、これでは過去の対戦履歴から逸脱した予想は原理的に不可能です。ところが私たちの方法だと、番狂わせになる場合であっても、命中率は下がりません。次の試合では弱いはずの方が勝つということが、やはり8割当たるのです。「過去の結果がどうであったか」ではなく、「対戦直前の脳がどうであるか」という選手の最新の生体情報を使うことにより、より正確な予測ができるというわけです。

これは脳だけを対象とした研究でしたが、脳と身体の関係に注目した研究も行っています。オリンピック選手などを擁する日本

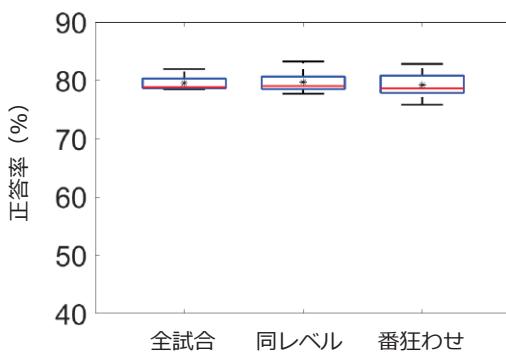
(a) ラウンド直前の脳波を計測



(b) 格闘ゲームの試合(2ラウンド先取制)



(c) 脳波データで学習



(d) 対戦履歴データで学習

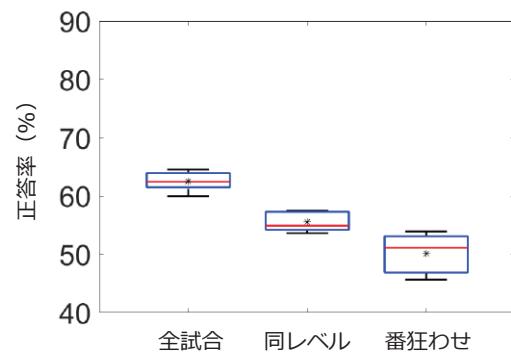


図2 戦う前の脳から勝敗が分かる：格闘ゲームにおける解析

ライフル射撃協会の方々と共同で、エアライフル競技におけるスコアの善し悪しと、脳や身体の状況との関係について解析しています。エアライフルは75分以内に60射して合計点を競うのですが、10 m離れたところでのミリ単位で勝負を争っているため、「人はこんなにも動かないものなのかな」と思わせるほど、選手が極限までじっとしている競技です。

この研究では、脳波、心拍、呼吸をはじめ、全身からさまざまな生体信号を計測し、それらの相互関係とスコアの関係を分析しています。まだ論文未公刊なので詳細は控えますが、脳と心臓の関係性がスコアに強く影響するという新たな発見がありました。脳と心臓の関係は神経科学の分野においてホットトピックスの1つなのですが、私たちの研究は先行研究とは全く異なるパラメータに着目しています。

興味深いのは、選手自身、そのようなことが自分の脳や身体で起きていることに気付いていないということです。あるトップ選手は、調子が最高に良いときは、「引き金を引こう」という意志なしに、「気付いたら引いていた」という感じだと教えてくれましたが、まさにそのような状態に対応した活動をとらえているのかもしれません。側から見ると究極まで動かないように見えますが、選手の内部では劇的な変化が起きているのです。

## 目は脳の状態を物語る

### 目の挙動に関する研究について教えてください。

目は見るためのセンサですが、目の挙動、例えば視線、瞬き、瞳孔径変化などは、脳での認知情報処理を反映して変化するという側面もあります。私たちは、こうした目の挙動と脳（認知）の状態との関係について、実験室レベルから継続的に研究してきました。

それをスポーツの実戦に展開した研究の一例が、国内最高峰のカーレースである「全日本スーパーフォーミュラ選手権」での計測です。このレースは最高時速300キロを超える世界で競われ、サーキットを何十周もしたすえに秒以下の差で順位が決まるようなシビアな戦いです。車両の性能差がないため、ドライバーの技量やチーム戦略の比重が大きく、リスクを冒して追い越すか否かといった瞬時の判断が勝負の鍵を握ります。

そのような判断や集中力といった選手の内部状態の変化を客観的にとらえたいのですが、レース中に脳活動を計測するのは困難です。そこで私たちは、瞬きに注目しました。選手たちは無自覚的に瞬きをしていますが、その頻度やタイミングに脳の状態が反映されているかもしれません。選手のヘルメットに小型カメラを埋め込んで計測したところ、瞬きのパターンに、驚くべき規則性があることが分かりました。

図3(a), (b)は各選手 (A, B, C) が周回コースのどこで瞬きをしているのかを示しています。多少の個人差はありますが、3人とも似た個所で瞬きしており、個人内での再現性も高いことが分かります。さらに解析すると、このような瞬きのパターンを生み出す3つの要因が明らかになりました（図3(c)）。

1番目は個人差で、瞬きの多い人も少ない人もいますが、全員トップレベルの選手で、パフォーマンスには関係しません。2番目はラップの速さで、高速で攻めているときほど、つまりリスクや集中度の高いときほど、より瞬きのタイミングのパターンが明確になります。

3番目は車両加速度です。前後方向、左右方向の車両加速度を走行全体でプロットすると、左のようなハート型が現れます。右は、その中で瞬きが起きた時点だけを抜き出したものですが、ほぼ原点（加速度0）付近に集まります。つまり、瞬きは、コーナリング時や、強くブレーキをかけているときには抑制されるのです。これもリスクや集中度と関係するかもしれません。

このような現象の背後にある脳のメカニズムについてはまだ解明すべき点も多いのですが、将来的には、過酷な環境でも計測可能な情報から脳の状態を推定することができるようになるのではないかと考えています。

ところで、このレースでは、目以外の生体情報も計測しています。その1つがホルモンで、走行の前後で選手の唾液を回収し、コルチゾールやテストステロンの濃度を調べています。コルチゾールは副腎皮質ホルモンの一種で、ストレスに対抗する機能を持ちます。また、不安を高め行動を抑制する脳の働きと関連することが示唆されています。一方、テストステロンは男性ホルモンの一種で、攻撃性・積極性を高め行動を強化する脳の働きと関連すると考えられています。リスクをとって攻めるといった行動には、これらのホルモンが関与している可能性があります。

分析の結果、これらのホルモンのバランスがレースの成績に関係していることがみえてきたのですが、興味深いのは「どちらのホルモンがパフォーマンスに強く関係するかは、選手によって異なる」ということです。考えてみれば、これは理にかなっています。もともと一か八かのチャレンジをしがちな選手は、それ以上無茶をしないほうがよいでしょう。一方慎重すぎる選手は、もっとリスクの高い行動をしたほうがパフォーマンスが上がるかもしれません。選手のタイプが客観的に把握できれば、それに合わせた介入ができるようになると期待されます。

「目」に話を戻せば、野球のバッティング中の目の挙動がスキルレベルによって異なるという論文を以前発表しました。いくらパワーがあってスイングが速くても、バットの芯でとらえなければ打球速度は出ません。バットの芯でとらえるにはボールの到達点を精度良く予測することが必要で、その予測の元になる視覚情報の質は目の挙動にかかっているわけです。打者の脳の予測能力

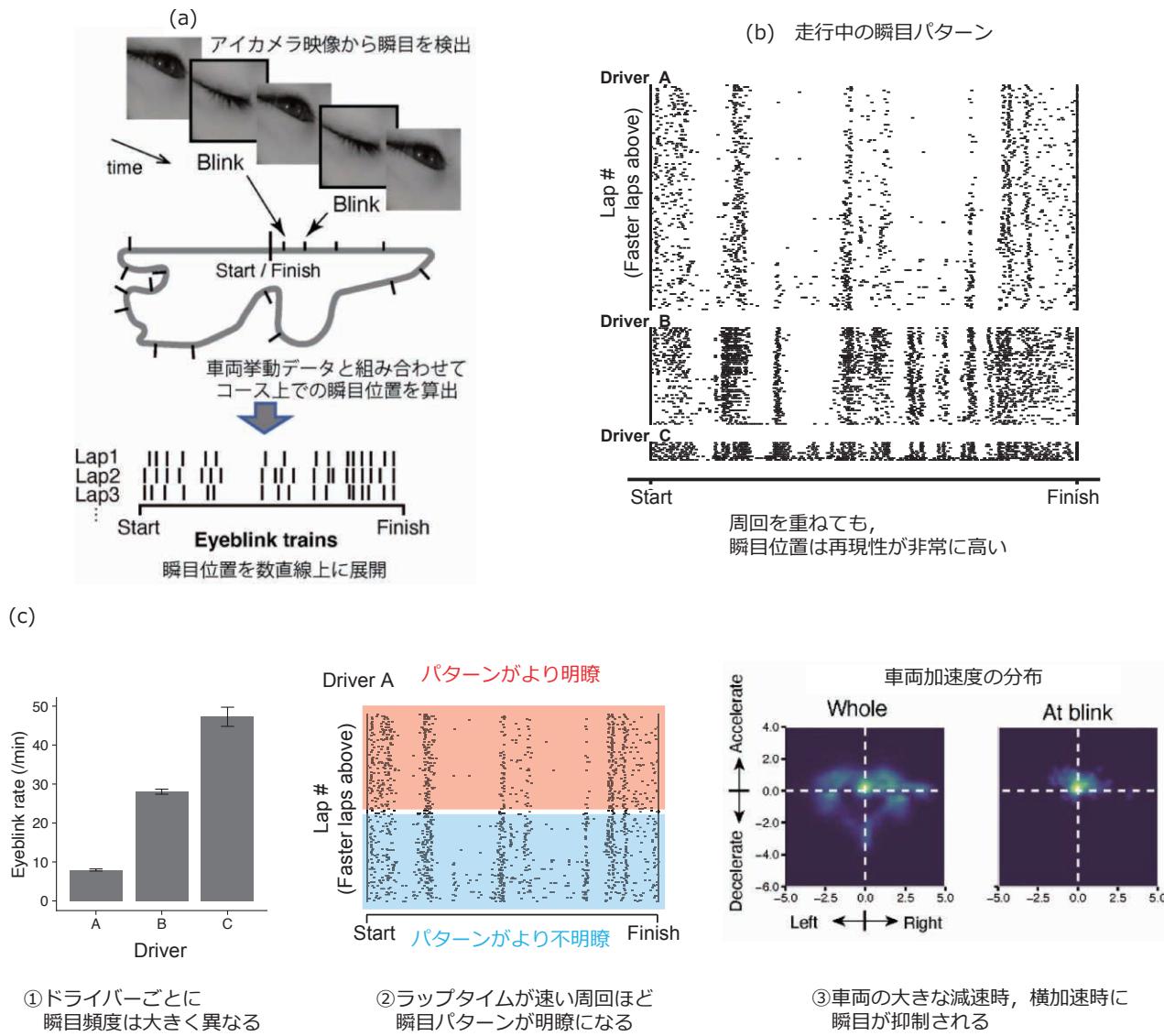


図3 目から認知、脳の状態を探る：スーパーフォーミュラでの走行中実験

を目から推定する試みといえます。その論文の内容はメジャーリーグ球団でもすでに活用されているようですが、その後、さらにデータが溜まっています。あるプロ球団の春季キャンプで、一軍スター選手から育成の若手選手までほぼ全員を一度に測定したこともあります。

こういうデータが蓄積されると、選手の育成、評価に活用できます。一口に「良いバッター」といってもいろいろあります。体格や身体能力、プレイスタイルなどは千差万別で、めざすべき方向はさまざまです。目の挙動は、選手のタイプを判断したり、伸ばすべき方向性を探ったりするうえで、貴重なヒントになります。

さらに、選手の潜在能力、将来性を見出すうえでも役立つ可

能性があります。計測した中に、目の挙動が理想的なスター選手がいました。小柄で、スイングも速くないのに、長打力はトップクラスです。その選手と似た目の挙動を示す若手選手も何人かいました。まだ目立った実績はないのですが、適切な経験を積めば、将来そのスター選手のようになるかもしれません。逆に、ある選手はドラフト1位であったにもかかわらずなかなか一軍に上がりず、結局引退したのですが、目の挙動に問題がみられました。それが活躍できなかった原因だと断定することはできませんが、レベルの高い投手に苦戦するのは十分予想できました。

先ほどの格闘ゲームの話もそうですが、過去の成績ではなく、脳や目などの生体情報を用いれば、環境が変わった場合も含め、「今

後どうなるか」が予測できるようになるかもしれません。単に「有望選手をピックアップする」ということではなく、壁に直面している選手の問題の所在を突き止めたり、個々の適性やスタイルに合わせた改善法を見出したりすることにも貢献できると考えています。

### 脳と身体の最適化原理を求めて

今後の展望をお聞かせください。

スポーツ分野では、いくつかの競技のトップアスリートに関して、リアルな状況ならではの興味深い現象がいくつか見つかりました。意外性の高いものも多く、謎がたくさんあります。今後は、これらの現象の神経科学的なメカニズムを深掘りすることにまずは注力したいと考えています。アスリートの現場にフィードバックする際にも、「とにかくこうすればこうなるらしい」ではなく、原理やメカニズムまで分かったうえで行えば、個人の特性や状況に応じて適切な方法を提供できるでしょう。直面している問題やトレーニングの目的が同じでも、人によっては全く逆のことをすべきということはよくありますからね。研究成果を世に出したいのはもちろんですが、質を担保するには、まずは基礎研究として足場を固めることが私たちの責務だと考えています。

さらに、スポーツの中でも、少し違った側面に焦点を当てたいとも考えています。1つは、複数人の相互作用です。スポーツには相手がいますし、チームメートがいる場合もあります。強い選手を集めたら強いチームになるわけでもありませんし、対戦相手にも相性があります。チームの勢いで個人のパフォーマンスが変わることもある。このような現象の正体を認知神経科学的に解明したい。これを実戦で観測するのはこれまで以上に大変ですが、そのチャレンジ自体、やりがいがあります。

もう1つ、美しさや感動、感情などの神経科学的なメカニズムにも興味があります。ただ、これは相当ハードルが高いですね。これまで扱ってきた側面は、そもそも結果が定量的で、良し悪し、勝ち負けがはっきりしています。しかし「美しさ」のような側面は極めて主観的で、人によっても感じ方はさまざまです。私たちの得意技は、当人も自覚できないような脳や身体の反応を客観的に測定、解析することですが、この技をどうやって活かすか、あるいは新しいアプローチを模索するのか、そのようなチャレンジの一環として、最近は音楽にも対象を広げているところです。

これまでのところ、私たちの研究対象はトップアスリートに限られていますが、見据えている先はさまざまな人々の活動です。スポーツに限らず、脳と身体の最適化、あるいは不調がかかわる問題は日常いたるところにあります。実は最近、腰を痛め歩くことに困難を感じる経験をしました。それだけで、直接的な不自由

さはもちろん、メンタル面も含め、想像以上にQOL (Quality of Life) が低下しました。その目線で街中を歩いていると、同様の問題を抱えている人が思いのほか多いことに気付きます。今後、急速に高齢化が進むわけですから、このような問題はますます深刻化するでしょう。腰が痛い、歩きにくいといった症状でも、原因は局所的な損傷などにとどまらず、全身および脳を含めた総合的な機能に問題がある場合も多いのではというが、自分が症状を経験したうえでの実感です。

一方、日本の将来を担う子どもたちの身体機能についても問題意識を持っています。都市部を中心に、小さいときに日常的に全身を使って遊ぶ環境が減っています。かけっこすら塾に習いに行く時代です。このようなことが、認知面、メンタル面も含め、想定外の影響を持つかもしれない。それが顕在化するのはまだ先だとしても、少し心配もしています。

AI時代とはいって、心と体を良い状態に保ち、意のままに操ることがQOLの根幹だとすれば、私たちの研究は、それに資するものでありたいと思っています。

### 研究対象が方法を教えてくれる

研究分野を開拓していく思いや日頃心掛けていること、そして後進へのメッセージをお願いします。

いいことかどうかは定かではありませんが、自分の行動原理は非常に単純で、おもしろいこと、不思議なことを追いかけるということに尽きます。これはまさに三つ子の魂というべきか、田舎で受験勉強などにも無縁で、学校の勉強に関係のない興味をひたすら追って育った名残だと思います。職業として研究をするわけですから、社会的意義ということはもちろん考えます。そのとき、あまり近視眼的にならないほうが、結局のところ有用性が高くなるのではないかと思います。

研究をするうえで、何を知りたいのか、あるいは実現したいのかが先で、方法論は後から来るはずです。方法論が確立しているような分野は、もはや新しくないともいえます。新しいことにチャレンジするということは、必然的に、方法から生み出していかなければなりません。これも個人的にはごく自然で、小さいときから、何をするにしても誰かに教えてもらうということではなく、勝手に自己流で突き進んでいました。それで相当損もしたとは思います。若手の方々には、あまり賢くならず、自分流に試行錯誤しながら本質的な問題に挑戦してほしいと思います。誰かが教えてくれるというより、対象としている現象そのものが、厳しいことも含めて教えてくれるのではないかでしょうか。

NTTデータグループ 技術革新統括本部  
 グローバルアーキテクト推進部 シニア・スペシャリスト

中村 泰治 Taiji Nakamura

## 世界最先端の国産暗号鍵管理システムの開発により、安心で使いやすいハイブリッドクラウド環境を提供

近年、経済安全保障の観点から、重要な情報を取り扱うシステムを海外資本のパブリッククラウドに頼ることなく、国内で自律的に運用していく気運が高まっています。しかし、パブリッククラウドの利便性は高く、当面はプライベートクラウドやオンプレミスにパブリッククラウドを組み合わせた、ハイブリッドクラウドの利用を促進することで、「自律性」と「利便性」を両立させていくことが現実的です。一般的に、パブリッククラウドの鍵管理はブラックボックス化されていることが多いため、利用者が主体的にこれを管理することは難しく、データを安全に利用するには、暗号鍵の管理技術が極めて重要となります。今回、この技術開発分野の一人者で、国が推進する「ハイブリッドクラウド利用基盤技術の開発」に取り組まれている、NTTデータグループ 技術革新統括本部の中村泰治氏に、強固な鍵管理によるデータセキュリティ技術の最新の研究開発状況と、技術者として大切にしている心構えを伺いました。

### 最新の国際標準規格に準拠する、世界でいまだ実現されていない鍵暗号モジュールの開発に挑戦

現在、手掛けている研究開発業務について教えてください。

現在、私たちのプロジェクトでは、2022年の経済安全保障推進法の制定に基づき、内閣府と経済産業省が構想を策定し、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が研究を推進する、経済安全保障重要技術育成プログラムの1テーマ、「ハイブリッドクラウド利用基盤技術の開発」へ全面的に取り組んでいます。

ハイブリットクラウドでは、各々が構築するシステムにおいて、利便性の高いパブリッククラウドの利用と、自律性を念頭にしたプライベートクラウド等の利用という、セキュリティポリシーの異なる領域を、データを行き来させて処理や利活用ができるよう、データ中心のセキュリティを確保していくことが重要となります。

昨今、海外発のパブリッククラウドが普及する中、データセキュリティの「最後の砦」は暗号鍵にあることから、国内における暗



号鍵分野の戦略的自立性が強く求められており、私たちは暗号鍵を正確に安全に使える、これまでにないシステムの実現に挑んでいます。

現状、暗号鍵管理システムは残念ながら外国製のシェアが非常に高いところですが、オールNTTで所有しているデータセンタ、クラウド、セキュリティ、暗号、ソフトウェアなどの優良な技術を結集させれば高性能な国産システムが完成できるはずだ、との思いで研究開発を進めています。

NTTデータとしては、この技術を活用することにより、クラウド基盤でのサービス提供をめざすとともに、将来のハイブリッドクラウドを構築する布石としても期待しています（図1）。

その技術開発は大きく3つに分かれています。

#### ■暗号鍵管理システムベース開発（図2）

パブリッククラウドのサービスプロバイダ側で内部不正や人的ミス、安全管理処置の不備が生じると、データセキュリティが破られるリスクが存在します。よって、利用者が内部仕様を知るとともに、暗号鍵の生成やローテーション等の管理を高セキュリティに実施できる必要があります。本検討では、事実上の世界標準となっている米国NISTが定める鍵管理要件仕様を満たすべく、クラウド上でも技術的に機密が保たれる仕組みTEE（Trusted

Execution Environment : 高信頼性環境)<sup>\*1</sup>ベースの暗号モジュールをプラグインしたシステムを開発しています。TEEはメモリが暗号化されており、OpenSSL<sup>\*2</sup>に代表される暗号ライブラリと比較しても、アクセスが難しく、鍵を生成、暗号化・複合化するうえで、セキュリティ的に極めて安全で理想的な環境といえます。

### ■クラウド統合暗号鍵管理モニタリング・監視技術

現在、暗号鍵の利用状態を統合的にモニタリング・監視する機能を提供する暗号鍵管理サービスはほとんど存在せず、利用者の負担が増加しています。そのため、ハイブリッドクラウドやマル

チクラウド環境において、クラウド統合暗号鍵管理のモニタリングや監視技術を新規に開発しています。

### ■PQC (耐量子計算機暗号)<sup>\*3</sup>実装技術

暗号アルゴリズムに関しては、現在のアルゴリズムが量子計算機によって現実的な時間で解読されてしまう危険化が懸念されています。

\*1 TEE : 通常のOSから独立した、CPU内に設けられた特別（安全）な領域。CPUのハードウェア機能により保護され、たとえOSに不正アクセスがあっても、データやコードの完全性・秘匿性が保証されます。

\*2 OpenSSL : TLS/SSLプロトコルを実装したオープンソースの暗号ライブラリで、Webサーバやメールサーバなどさまざまなシステムでセキュアな通信を実現するために広く利用されています。

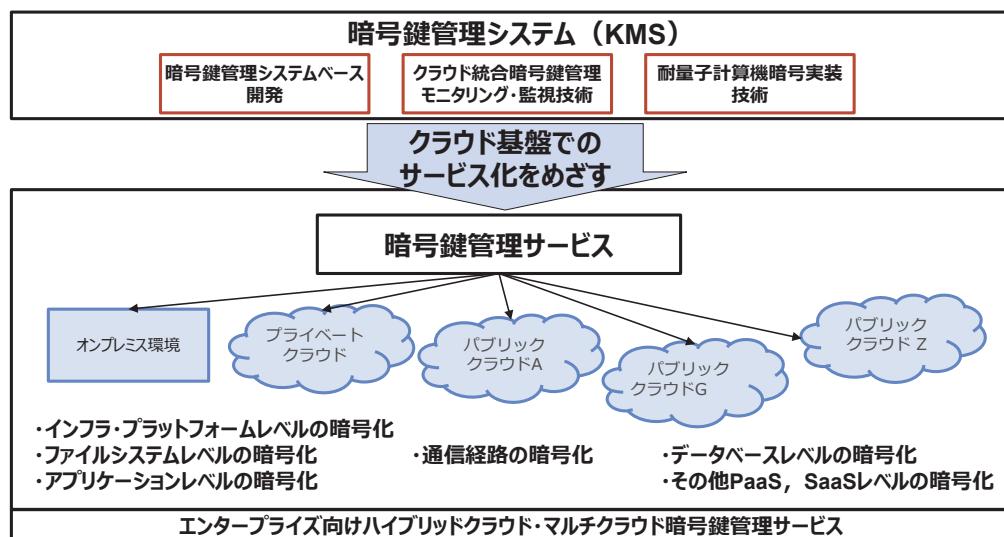


図1 暗号鍵管理システムの実施項目とめざす姿

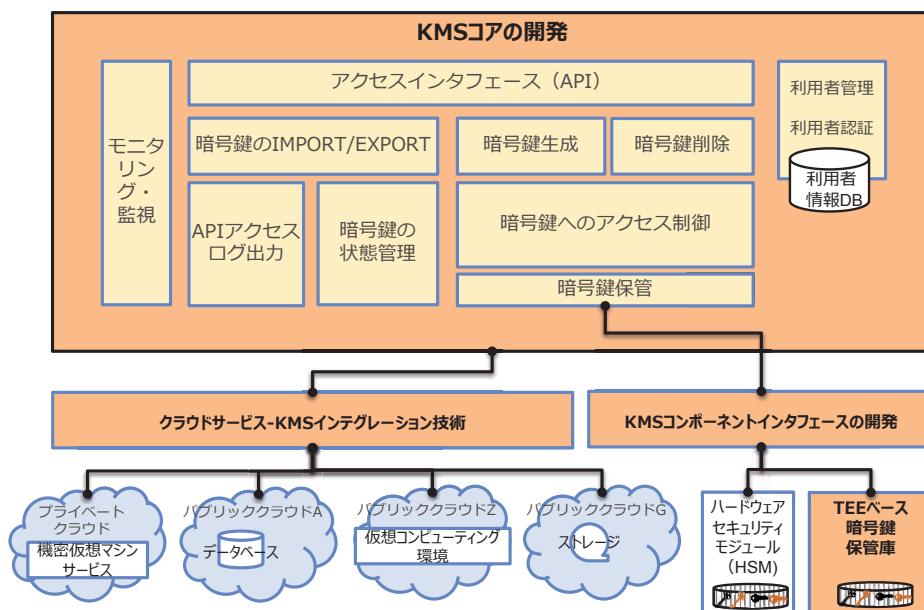


図2 暗号鍵管理システムベース開発の構成

おり、鍵管理システムベースにNTTグループオリジナルの耐量子計算機暗号アルゴリズムQR-UOV<sup>\*4</sup>を独自に実装しています。

これら一連の開発を通じて、技術的にハードルが高く、現在、挑戦的に取り組んでいるのが、TEEに基づく鍵管理暗号モジュールの実装になります。私たちは、TEEベースで高性能なモジュールを開発する際に、もっとも理想的とされるインテルSGX<sup>\*5</sup>のチップを活用することで、NIST (National Institute of Standards and Technology:米国国立標準技術研究所) が定める国際標準規格FIPS140-3による暗号モジュール規格に準拠するモジュールの実現を目指し掲げています。同時に、このシステムとAWS, Azure, Google Cloudなどのパブリッククラウドとの連携も実現しているところです(図3)。

ところで、このインテルSGXを使用したTEEを実装し、FIPS140-3の最新規格を取得したモジュールは世界的にもまだ実在していません。これは、SGXを組み込んだTEEの中でソフトウェアを作成するプロセスが、通常のOSにLinuxのアプリケーションを作成するときとでは大きく異なり、独自のプログラミングが求められるため、開発のハードルがかなり高くなることが理由の1つです。

\*3 PQC: 将来実用化される可能性のある強力な量子コンピュータでも解読できないように設計された暗号技術の総称。

\*4 QR-UOV: NTT社会情報研究所が開発したデジタル署名方式。多変数多項式問題の難しさを安全性の根拠としており、署名および公開鍵のデータサイズが小さいことが特徴。NISTの耐量子暗号標準化プロジェクトの第2ラウンドに進出した有力候補。

\*5 インテルSGX: Intel製CPUに搭載されたハードウェアベースのセキュリティ機能。プログラムの実行中にメモリ上に暗号化された保護領域を作成し、OSやハイパーテーブル、さらには物理的な攻撃からも機密データとコードを保護できます。

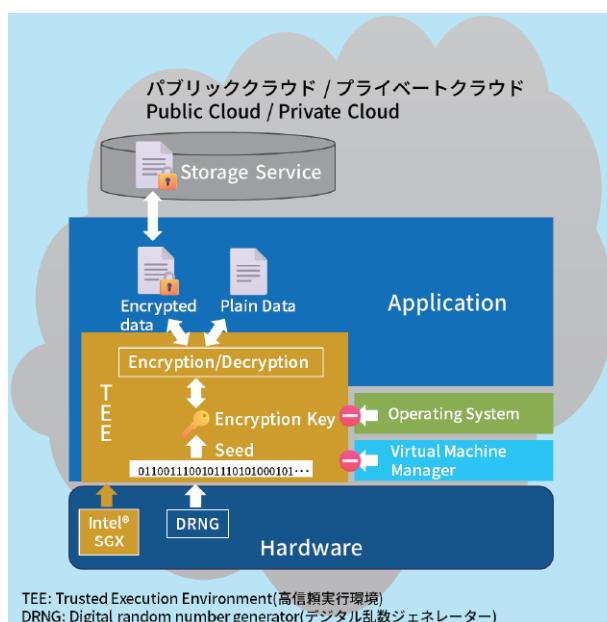


図3 Intel SGXを活用したTEEとその周辺の構成

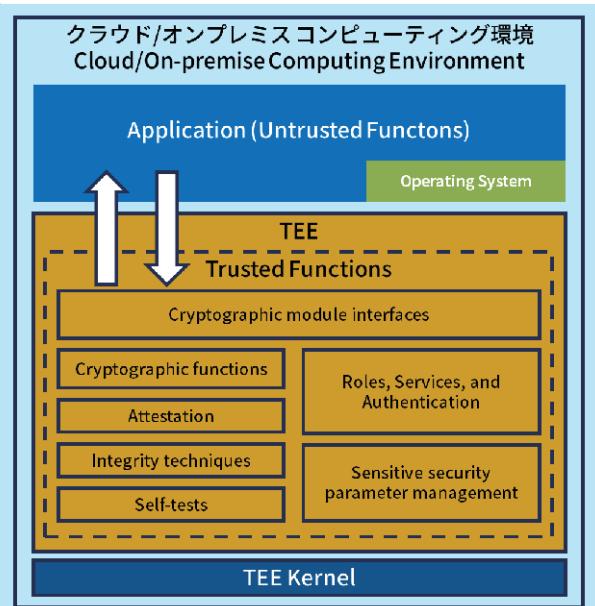
また、図3右の黄色で囲まれた個所に認証テストにパスする要件が列挙されていますが、self-testsについては規格が旧から新へと改変される中、要求されるセキュリティ条件が時代の要請により増えてきたこと、そしてself-tests自体、その方法を各社が権利化しているため、それを侵害せずに実施していく必要があることなど、認証取得の技術的ハードルを一層高めている理由もあります。

よって、現在、私たちが取り組んでいる、インテルSGXを使用するTEE内において、既存のアルゴリズムやPQCのアルゴリズムを実装し、さらにFIPS140-3の認証を取得することは、技術的に決して簡単なことではないです。

私たちは、こうした課題を現在乗り越えようとしている最中で、システムの新規性や性能性ともに、世界でもっとも先行しているプロジェクトの1つと認識しています。新規格の認証テストが通った暁には、安心して使えるFIPS140-3国産モジュールソフトウェア第1号となります。

現在、実施されている総合システム検証のポイントや来年度の社会実装化に向けた展開についてお聞かせください。

現在開発している、暗号鍵管理システムの各要素技術は今年度上期でほぼ完成し、市場のニーズを考慮しながら、下期から総合的な検証を開始しているところです。ここでは、来年度の社会実装に向けて、各クラウド利用者が暗号鍵を制御する度合い(セキュリティの度合い)に応じて提案されている、3段階のモデルをスコープに、その実行性について検証していきます(図4)。



### ■BYOK (Bring Your Own Key)

鍵の生成を利用者側で行い、生成した鍵をクラウド事業者側に持ち込み、持ち込まれた後の鍵はクラウド事業者側で管理されるモデルです。市場動向調査によると、マルチクラウド・複数リージョンにまたがる鍵の一括管理を目的とし、BYOKはグローバルメーカーなどで需要があるとのことです。よって総合検証では、社内でトライアルプロジェクトを募集し、AWS、Azure、Google Cloud、OracleCloudなどのパブリッククラウドへの暗号鍵配送や鍵の一括管理について、実サービスに近い環境で評価していきます。社会実装に向けては、NTTデータのクラウドサービスのラインアップに加えるとともに、他社クラウドサービスにも採用されるよう、ソフトウェアを提供していきます。

### ■HYOK (Hold Your Own Key)

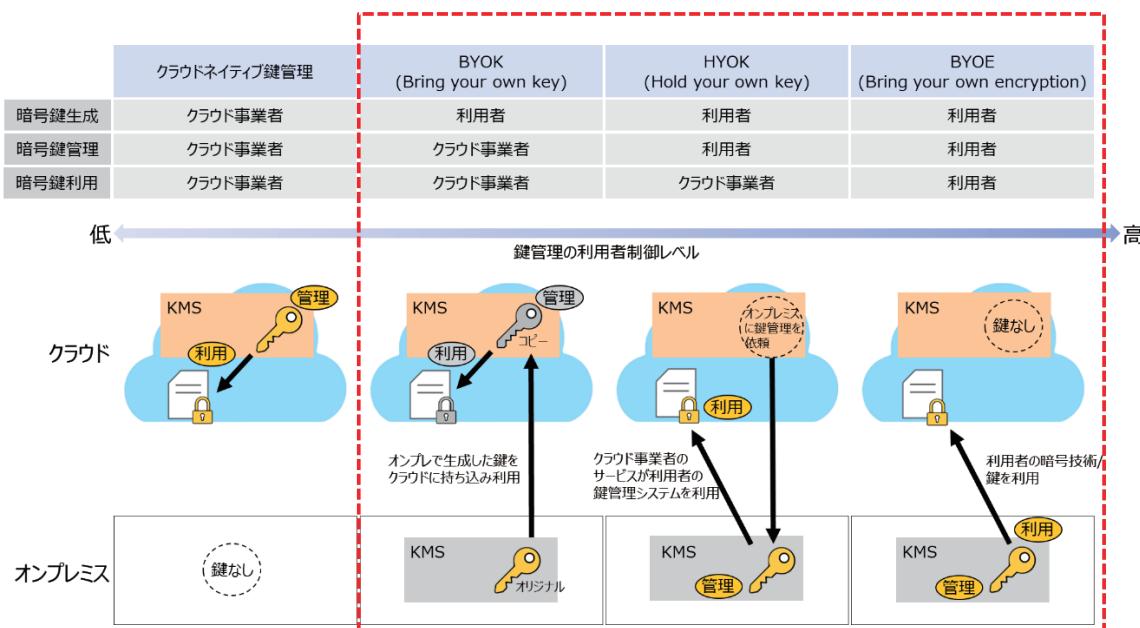
クラウド事業者が利用者の鍵管理システムを利用し、クラウド事業者側は利用者の管理下で鍵を扱うことになり、利用者が常に鍵管理を行うことが可能なモデルです。NTTデータによる市場動向では、2024年度に世界で話題になったものの、国内では浸透しておらず、暗号鍵は自国・自社の設備で保管する必要がある要件への対応に提起しているところです。よって、総合検証では、有望なユースケースの1つであるデータローカリゼーション要件への対応が十分であるか、想定利用者に評価していただく予定です。具体例として、重要技術を取り扱う製造業は開発・製造データのローカリゼーション管理が求められるケースがあり、データを特定の国や地域の物理的なサーバに保存・処理することを要求する法的・規制上の義務を遵守するために、暗号鍵を鍵管理システムに保管し、その所在が可視化されていることを検証する予定です。

### ■BYOE (Bring Your Own Encryption)

利用者が鍵の管理ならびに利用を一人称で行うモデルで、クラウド事業者が全く鍵にアクセスできないようにすることができます。社内の市場調査によると、国内や国外における新規の金融サービスを企画・開発する際に、この方式は必要とされるケースがあるとされています。したがって、総合検証では、ブロックチェーンの取引所ウォレットの秘密鍵を保管するシステムなどを検証します。例えば、イーサリアム基盤を用いたB2B金融サービスの場合は、イーサリアムの秘密鍵を、バリデータ（検証者）ノードから分離して、安全な環境として鍵管理システムに保管し、トランザクションデータにデジタル署名を実行するなど検証していきます。検証後はこれら機能を鍵管理システムに追加実装し、新規金融サービスに対応していくこととします。

利用者側の鍵管理のセキュリティレベルは向上していきますが、どの制御レベルの機能を利用するかは、利用者が求めるセキュリティの要件に依存します。いずれの制御レベルにおいても、暗号鍵に必要な保護および保証が提供され、暗号鍵のライフサイクル管理に必要な機能が提供されることが求められます。

2026年度以降の実用化では、経済安全保障重要技術育成プログラムの趣旨である「研究成果は、民生利用だけでなく、公的利用につなげていくことをめざす」を実現するため、NTTデータのハイブリッドクラウドは国内実績No.1の鍵管理システムをめざすことや、最強の暗号や認証技術の投入で長期安心して使える鍵管理システムをめざすことを方針とし、NTTデータによる鍵管理サービスの提供や他社への製品販売などを検討していく予定です。



## ○ 海上自衛隊との共同システム開発で得たセキュリティ技術の知見や経験を、強固な暗号鍵システムの開発に活かす

今回の研究開発の進め方を教えてください。また、これを実行するうえで役に立ったご自身の経験などありますでしょうか。

本研究開発は、いわゆる「システム開発」と異なり、あらゆる面で不確実性が高く、調査、要件定義、事前検証（PoC）、開発、テストというステップを組み、段階的に管理しながら進めていく必要がありました。その中でもっともコアな分野であるセキュリティにおいては、暗号のアルゴリズムに加え、暗号に関連した標準類の作成やベストプラクティスに関する知識が重要になります。

私自身、防衛省の海上自衛隊と共同で、長期間にわたりシステム開発をしてきた経験が、セキュリティの知見を高めるうえで、極めて大きかったといえます。装備品を開発するうえで、日米同盟として米国とのつながりが強い中、米国流のプロトコルに関する知識が必要となると、米国のエンジニアと仕事をする機会も多くありました。これらを通じて、米海軍の暗号鍵管理技術に接することができたのです。

かつては、米国等とやり取りする通信ネットワークは完全に隔離された専用線で運用されていましたが、インターネットの普及で、ある時期からバックアップ回線はインターネットも選択可能になり、私もこのテストプロジェクトに携わることとなりました。そこでは、インターネットでフォローする暗号アルゴリズムは、一般的に私たちが知っているものではなく、米海軍オリジナルのアルゴリズムを必要とされていましたので、暗号鍵を同盟国と米国の間でどう扱うかの取り決めや、鍵のローテーション期間をどうしていくのかなど、安全を守りながらデータ通信を実行するうえで、必要なプロセスを一通り学習できたのは大きな収穫でした。

また本研究の鍵管理システムをつくるうえで、暗号を取り扱う観点から必要となるのが、パブリッククラウドの知識と、それを使ったソフトウェア開発スキルとなります。例えばクラウド統合暗号鍵管理モニタリング・監視技術の場合、クラウドごとに仕様が異なるストレージやDBMSなど数多くのクラウドサービスの挙動に関する知見、シンプルで後々のメンテナンスも楽になるモニタリング手法やログデータ分析手法を考案するスキルが求められます。パブリッククラウドの知見は、個人というよりはNTTデータとして蓄えていますので、ここはNTTデータならではの強みであるといって良いと思います。昨今はクラウド環境のIaC（Infrastructure as Code）スキルが強く求められるなど、多様な人材が必要であり、いわゆるチームビルディングにも力を入れているところです。

## ○ さまざまな研究者、開発者、技術者と交わり、思いもしなかった概念や解決方法に接することを心掛けよう

自社のチーム内で、あるいは他社と共同で研究開発を進めていく中、日頃から心掛けていることはありますか。また、後進に向けたメッセージをお願いします。

現在、私たちのチームは20名ほどで構成されていますが、良い達成目標を与えると同時に、最大限の裁量も与え、取り組んでもらっています。これは若い人でもベテランでも通用するやり方だと思います。最終ゴールを示し、その過程については各メンバーが考え、試行錯誤してもらうと、皆その最終アウトプットに向けて、かなり良いロジックを考えてくれます。その際、目標を常に合わせていくことは非常に重要です。

特に若い人は、技術の習得が早く、古いタイプのC言語も、新しいクラウドのスクリプトも、熱心に学習して、実装に向けて高速に進める力があるので、明確な目標と、現在困っている課題の解決方法、方針を与えるだけで、コミュニケーションがとりやすいと感じています。

また、他社や他分野の技術者と共同でプロジェクトを進めていく際にも、目標を合わせることは重要です。例えば私の経験で思い出すのは、一緒に組み上げたシステムでトラブルが発生したときのことです。米国と日本との間で通信トラブルが発生し、これを解決するときに、各社が出したアイデアはさまざまに面白かったです。ある会社はハードウェア面で通信基盤回路の電圧電流値をチェックしました。また、ある会社は通信ケーブルの電圧や電流値を測定しました。NTTデータはその信号を受け取ったドライバーソフトや通信アプリケーションが期待どおり作動しているのかを確認しました。

私たちNTTデータにとって、電圧電流まで測定する発想は思いもよらぬことでした。このように、各社が“ここが怪しい”と思うところを広く持ち寄り、一緒に調査、対策を打ち、解決したという経験は貴重でした。ですから、目標は1つに合わせて、そのアプローチは自由であるべき、ソフトウェア的な視点とハードウェア的な視点それぞれで観察していくかないと、良いものはできないですね。

私自身、NTTデータ関係者はもとより、海上自衛隊の業務を通じて交流のあった米海軍エンジニアの方との交流、そして5年間在籍したNTT研究所で得た人脈は大きな糧となりました。ある意味特殊な分野である「暗号鍵管理システム」を企画できたのも、このおかげと思っています。さまざまな研究者、開発者、技術者と交わって、新しい視点を得て、自分では思いもしなかった概念や問題解決方法に接するよう心掛けてください。



NTT未来ねっと研究所  
特別研究員

小林 孝行 *Takayuki Kobayashi*

## 「コヒーレント光増幅中継伝送」で さらなる光伝送の長距離化・大容量化へ

インターネットや高速モバイルサービスの普及、モバイル機器の高性能化などによって日本国内の通信量は近年急速に増加し続けています。NTTでは、これまで基幹ネットワークにおける光通信システムの大容量化・長距離化を推し進めてきましたが、来るべき6G（第6世代移動通信システム）の時代に備えて光通信のさらなる大容量化が必須となります。そして研究領域では、現在使われているデジタルコヒーレント方式の理論限界がみえてきています。そこで今回は、さらなる大容量化・長距離化を実現可能なコヒーレント光増幅中継技術のトップランナー、小林孝行特別研究員にお話を伺いました。

◆ PROFILE : 2004年早稲田大学理工学部応用物理学科卒業。2006年早稲田大学大学院理工学研究科物理学および応用物理学専攻修士課程修了。2006年日本電信電話株式会社入社。2017年電子情報通信学会活動功労賞受賞。2023年 IEICE Communications Society Excellent Paper Award。2023～2025年電子情報通信学会 光通信システム(OCS)研究会委員長。博士(工学)。

### 既存インフラを活用して、光伝送の長距離化・大容量化を実現するには

#### 「コヒーレント光増幅中継伝送方式」というのはどのような技術なのですか。

私の研究を解説させていただく前に、予備知識として光通信の基礎的な伝送方式の進化・変遷についてお話しします。現在の光ファイバによる伝送・通信には特定の波長帯の光が使われています。光の波長は帯域別に波長の短いほうからS帯(Short Band), C帯(Conventional Band), L帯(Long-wavelength Band), U帯(Ultralong-wavelength Band)と呼ばれています。現在、大容量・長距離通信に使用されているのは主にこのうちのC帯とL帯です。これは光ファイバの根本的な特性として生じる伝送距離に応じた減衰や歪みの発生などが少なく、効率良くデータを伝送できるのがこの2つの波長帯になるためです。

NTTにおいては、1985年に日本を縦貫する光ファイバケーブル網が完成しています。当時は、一定の区間ごと（約80 km）に3R中継器が設置され、中継部で光信号を電気信号に変換して信号を整形・増幅し直して、再度光信号として送り出す再生中継方式が採用されていました。この方式では、光の明滅（オン・オフ）にデジタルデータ0,1を割り当てており、この明滅の速度を高速化する電気時分割多重（ETDM）技術を適用した送受信機および中継器をアップグレードすることで通信容量を増加させていました。しかしながら、急速な通信量増加に対応するためには、送信機から中継器、光ファイバ、受信機までのシステムが大量に必要にな



り、例えば1 Tbit/s/sの容量を実現するのに1波長10 Gbit/sのシステムを100並列組む必要が生じてしまいます。そこで、1990年代後半に導入されたのが光増幅中継器と波長多重（WDM）方式です（図1）。これら2つの技術により、40～80程度の異なる波長の信号を束ねて（波長多重）、1心の光ファイバで並列して伝送することができ、さらに、光増幅器により、波長多重された光信号を光のまま増幅中継することが可能になり、経済的な大容量・長距離通信が実現されてきました。インターネットや携帯電話の爆発的な普及により、さらなる大容量化に向けては、2010年代初頭にデジタルコヒーレント方式が導入されています。この方式では、送信された光信号は、光ファイバを通過する際に信号が受ける動的変化や歪みを送受信機に搭載された信号処理プロセッサでデジタル補正します。この技術によって、従来、光の明滅（オンオフ）だけを用いていましたが、光の波としての性質（振幅・位相・偏波）を使った高度な信号形式が利用可能になり、1波長当り100 Gbit/sを超えるような高速光信号伝送が実現されています（図2）。

100 Mbit/sの伝送システムが導入された1980年代初頭から40年以上が経過し、基幹ネットワークにおける光ファイバ1心当りの伝送容量は、10万倍以上の10 Tbit/s超に大容量化しています。1980年代はテキストデータ程度しか送れない程度だったものが、テキストとともに12 px × 12 px程度の絵記号が送れるようになり、それが携帯写真などの画像も可能になり、現在では大容量の動画データでも送れるようになっているということから、一般ユーザの方々が目にする機会がなかなかありませんが、大容量化の変遷を間接的に体感していただいている方は多いと思います（図3）。

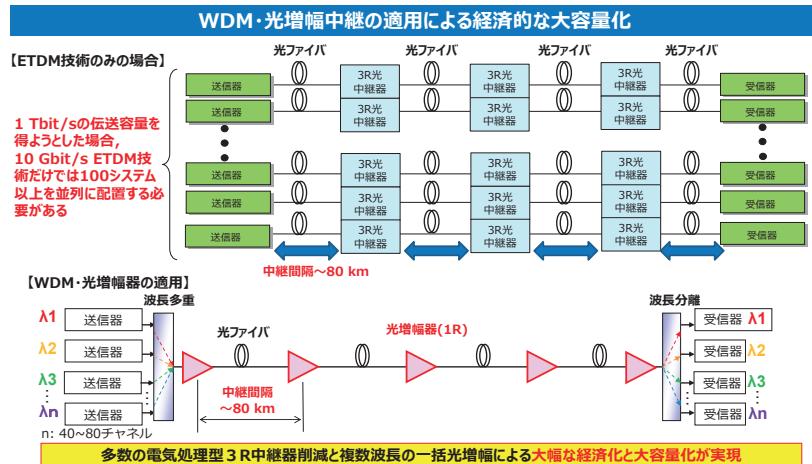


図1 光増幅中継伝送システムの概要

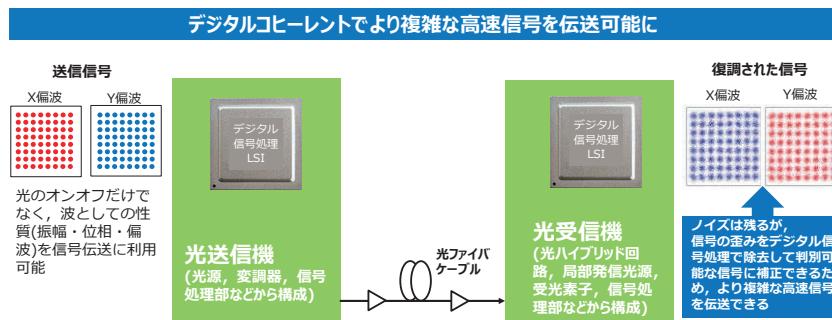


図2 デジタルコヒーレントの仕組み

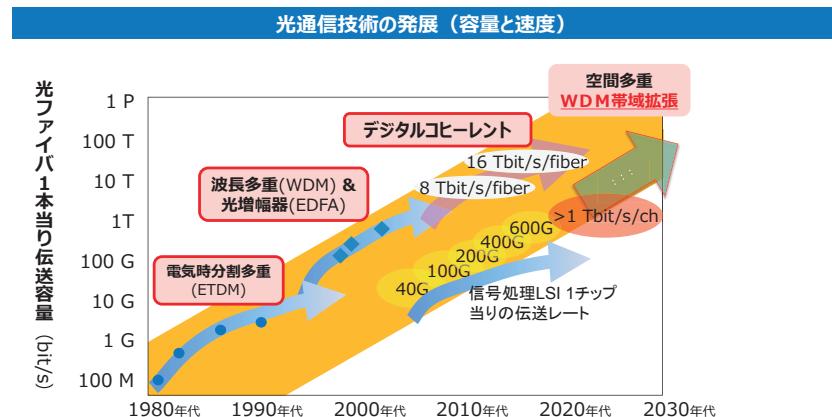


図3 光伝送技術の変遷

現在進行形で続々と生まれている新しいインターネットサービスやモバイル機器の高性能化に伴って、これからも通信量は加速的に増大していくことが予測されています。その中で、既存帯域C帯およびL帯を用いたデジタルコヒーレント方式の研究が大きく進展しており、大容量化の理論限界がみえる領域まで高度化が進んでいます。この通信量のさらなる増加に備えて研究されているのが「空間多重」や「WDM帯域拡張」と言われる方式です。後者は、C帯より波長の短いS帯や、シングルモード光ファイバ

の特性から使用が難しいと考えられてきたL帯より波長の長いU帯を新たに波長多重に使用することで、通信容量の大容量化を図ろうというものです。しかし、これには複数の大きな課題があります。新たな波長帯に対応した送受信機や光増幅中継の開発が必要になります。帯域によっては使用する材料から検討が必要になる部品があります。また、U帯から長波長の領域では光ファイバの材料である石英ガラスの特性上、大きな減衰があり、さらに、使用する波長帯域を増やしていくと、光ファイバの持つ非線形性に起

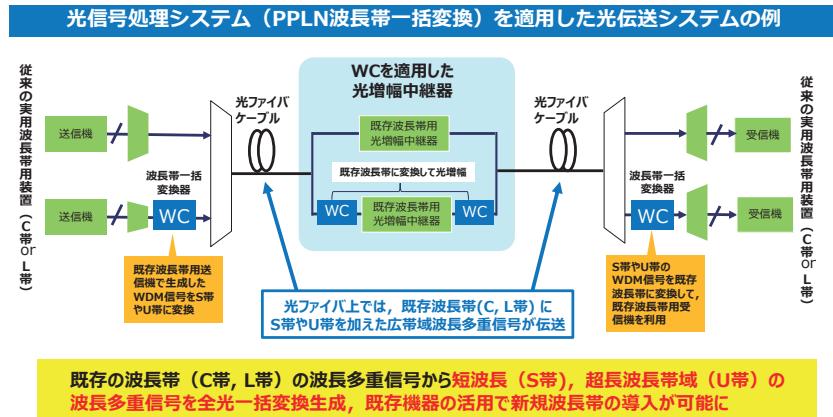


図4 PPLN波長帯一括変換による波長資源拡大

因して生じる波長帯間でのエネルギー遷移が無視できなくなり、それぞれの波長帯で均一な信号品質を保って伝送することが困難になります。

ここでようやく私の研究の話になりますが、前述の問題を解決するために「波長帯一括変換」という、光の波としての性質（コヒーレンシ）を利用した光信号処理技術を適用することを考えています。この技術では、NTT独自の高効率なPPLN（周期分極反転二オブ酸リチウム）導波路と呼ばれる光デバイスを適用しており、複数の光信号を光のまま別の波長帯に一括して変換するものです。これにより、U帯やS帯のWDM信号の送受信や光増幅中継を、C帯やL帯の既存波長帯用装置を用いて実現することができます。この技術によって現状の光ファイバや中継器を活用して波長多重可能な帯域を増やすことができさらなる大容量化が期待できます（図4）。また、波長帯間でのエネルギー遷移の課題に對しては、理論モデルに基づくシミュレーション技術をNTT独自に改良し、波長帯域を拡張した際に生じるパワー遷移を含めた信号伝送条件を最適化することが可能になりました。2024年3月には、これらの技術を適用して、C帯、L帯にU帯を加えた3波長帯域を用いて、100 Tbit/s/sの伝送容量で800 kmの大容量・長距離光増幅中継伝送に成功しています。さらに、2025年3月にはS、C、L、U帯に加えて、名前が未定義であったX帯のさらに長波長領域（X帯と命名することを提案）に波長帯域を拡張し、160 Tbit/s、1000 kmの実証実験を行い、さらなる大容量化と長距離化に成功しています。これらは、全くの新技術だけで実現されたものではなく、これまでブレークスルーを起こした、「電気時分割多重」、「波長多重」、「光増幅器」や「デジタルコヒーレント」、そして現在の「波長帯一括変換」を含む「WDM帯域拡張」技術の積み重ねであり、これらを融合したものが私の取り組んでいる「コヒーレント光増幅中継伝送方式」になります。

#### ■この研究で苦労された点や今後の課題点を教えてください。

光伝送システムの研究は、部品や装置、光ファイバ、デジタル信号処理など多岐にわたる要素技術の研究者や装置ベンダー、ひいてはネットワーク事業者までさまざまな人たちとコミュニケーション

を取りながら進めます。その中で、「光伝送には光ファイバ特性としてC帯やL帯を使うのが最適で、新たな波長帯を使うのは難しい」という考え方から、新たな波長帯拡張の有効性・必要性を理解してもらう必要がありますが、これが簡単ではないということです。さらに、波長帯一括変換のような光信号処理を用いた光伝送システムは、今まで実用化された例はありません。学会や論文など学術領域では波長帯域拡張の必要性を論理的に説明することは可能ですが、しかしながら、実際の光ネットワークへ導入するためには、すでにC帯やL帯での伝送を前提とした成熟した運用やエコシステムが構築されているところに、新たな波長帯の適用を提案して、採用してもらう必要があります。これが今まさに苦労している点です。

新たな波長帯を適用した波長多重光伝送技術は、現状は実験室において原理実証ができたという段階です。重要な要素技術である波長帯一括変換技術に関しては長期信頼性確立に向けて検討を進めている状況であり、その有用性をアピールしながら、実用化に向けて必要なハードルを着実かつ迅速に1つひとつクリアしていくことが大事だと考えています。

#### ■「WDM帯域拡張+PPLN波長帯一括変換」と、「空間多重」との融合で新たな地平へ

#### ■この技術の今後の展望や目標などを教えてください。

実験段階で検証している伝送距離800～1000 kmというのは、現在日本でもっともネットワークトラフィックの高い東京-名古屋-大阪のルートをカバーできるものです。まずは、この区間の大容量化に資する技術としてWDM帯域拡張を適用したいと考えています。また、X帯より長い波長帯や、S帯よりも短い波長のO帯やE帯などの活用もできるのではないかと考えています。現在、NTTが推進しているIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想においても、その基盤となるオールフォトニクス・ネットワークにおけるペタビット級リンク容量の実現には、「空間多重」技術と合わせて、「WDM帯域拡張」をキー技術として位置付けており、それらの融合が重要になります。さらに、

波長帯一括変換技術によって使用できる波長帯域（波長資源）が増えることで、豊富な波長資源を使ったフレキシブルなネットワーク実現に向けて大きな貢献ができると考えています。

#### ■NTTに入社したきっかけや経緯などを教えてください。

少し個人的な話になるのですが、1997年にNTTがスポンサーをしていた音楽グループのライブで、メンバーがPC上で遠隔の小学生や中学生と動画通話するというフェニックスシステムのCMが流れたのを見て衝撃を受けたのがNTTを意識し始めた瞬間でした。また、ロサンゼルスから東京のスタジオへ、複数のISDN回線を使って音声データを送っているという話も聞き、通信技術の持つポテンシャルに驚かされて、より通信に興味を持つようになりました。その音楽グループの影響で、シンセサイザーに興味を持ったこともあり、将来デジタル楽器に携わる仕事に就きたいと考えていたので、早稲田大学の応用物理学科に進学しました。高校・大学時代は音楽と並行して、インターネットを通じたオンラインゲームに興じていたこともありましたから、急速に進歩・発展していく通信の世界とも無縁というわけではありませんでした。当初はデジタル楽器の製作会社に就職できたらいいと漠然と考えていましたが、いざ就職を考えたとき、趣味である音楽を仕事にすることに疑問を持ち、同じくらい興味があった通信に照準を定めました。そのため、大学・大学院では大容量光ファイバ通信をテーマとして扱う研究室に入りました。この研究室で光ファイバ通信の最新動向などを調べていくと、NTTの研究成果に圧倒される部分がありました。そこで、就職するならNTTが第一候補と考えて、2006年に大容量光ファイバ通信に関する研究がしたいという希望を伝え、入社することができ、希望の部署に配属していただいたという次第です。そして、大容量長距離光伝送技術の研究や光アクセスネットワークなど、NTTでの研究生活を10年以上続け、2019年に工学博士号を取得し、現在も引き続き大容量・長距離光伝送技術の研究開発に携わっています。

#### ■研究するうえで大切にされていることなどはありますか。

研究者としては「最初のマイルストーンを踏む」ということと「自分の想像する半歩先を想定して行動する」という2点です。具体的にはほかの方たちがやっていない領域にいち早く到達することが重要だと考えています。当然、同じ研究をされている研究者もこの広い世界にはいますから、自分が目標と考えることはその方たちも同じように考えているはずと想定して、さらにもう一段高い目標を二段構えで持つことが大事だと思います。それによって「最初のマイルストーンを踏む」確率も上がるわけです。

そういうわけで、入社したてのころ、NTT未来ねっと研究所の所長からいただいた「初登頂をめざすのは良いが登る山を間違えないように」という言葉も、いつも心の片隅に持って大切にしています。「登る山を間違える」というのはある種の比喩なのですが、具体的に私の研究領域でいえば、大容量かつ長距離を両立することが最終的な目標（山頂）であり、どちらか一方だけを追求していくのは、誤った山を登ることになります。

#### ■現在所属されているNTT未来ねっと研究所について教えてください。

NTT未来ねっと研究所は、「通信大容量化技術を用いて今まで不可能だったサービスや社会を実現すること」を基本理念として通信技術の飛躍的な性能向上と新たな利用領域を開拓し、実用化のベースに乗せていくことがミッションとなっています。光通信や無線通信の物理レイヤの伝送システム研究を行う部署もありますし、ネットワークや通信方式など上位レイヤの研究を行う部署もあり、幅広い研究を行っていますし、さまざまな分野のスペシャリストがそろっていますので、各グループで連携した研究開発を高いレベルで行えることが特徴です。歴史のある研究所であるため研究のノウハウが豊富にあり、最先端の設備もそろった環境として働きやすい研究所だと思います。

#### ■読者や学生、ほかの研究者の方などへのメッセージをお願いします。

学生たちに向けては、その時どきの流行りの研究にとらわれず、自分のやりたいと思ったことをやったほうが良いと思います。すでに発表されて注目されている研究成果は、実際ほとんど終わっていることが多いですし、ライバルも必然的に多くなります。今下火になっている分野の研究でもいつ脚光を浴びることになるかは誰にも分かりませんし、その研究をしている人が他に誰もいなければ、スポットライトを浴びるのはその人しかいません。初のマイルストーンを踏むという意味でも、流行りに左右されずに自分のやりたいことを見定めることが大事です。

私は大容量光ファイバ伝送が専門ですが、学生時代は数学や天体宇宙など、現在とは全く違った研究やバックグラウンドを持った研究者も友人に多くおり、中には現在は、私と同じ研究に携わっているという方もいます。光通信に興味を持っている方は、もし今の研究が別ジャンルのものであってもぜひ一緒にNTTで働いたらと考えています。

共に光通信を研究開発している方たちには、現在、光通信分野は日本が強い技術領域の1つであると思っていますので、お互いに技術レベルを高め合いつつ、競合するだけでなく時には協力し、世界をリードする関係を続けられたらと願っています。



（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 OREX SAI

<https://orexsai.com/jp/>



### “真のOpen RAN”を世界へ提供, OREX® のグローバル展開

モバイルネットワークのオープン化が世界各国で進む中、NTTドコモグループは新たな挑戦としてOREX SAIを2024年に設立、OREXブランドのもとOpen RANのグローバル展開を加速させています。NTTドコモの先進的なOpen RANのノウハウとNECのグローバルなシステムインテグレーションの実績を融合し、世界の通信事業者のニーズに合わせた、効率的でコスト競争力のあるイノベーティブなネットワークを提供しています。今回、小林宏代表取締役CEOに、設立の背景から事業の強み、注目のプロジェクト、そして将来展望について伺いました。



OREX SAI  
小林宏代表取締役CEO

#### NTTドコモとNECの強みでOpen RANをグローバルに展開

##### ■設立の背景と会社の概要について教えてください。

OREX SAIは、2024年にNTTドコモと日本電気(NEC)の合弁会社として設立されました。当社の沿革ですが、まずNTTドコモが世界各国の移動通信事業者とともに2018年2月にO-RAN Allianceを設立し、2020年3月に世界初の全国規模でのOpen RAN 5G(第5世代移動通信システム)サービスを商用化しました。また2023年2月にはサービスブランド「OREX®」を立ち上げ、海外通信事業者の実証実験を支援するなど、モバイルネットワークのオープン化に向けて取り組みを加速してきました。

一方、NECは国内外でOpen RANの納入実績が豊富であるほか、NTTドコモの5G仮想化基地局(vRAN)のベンダにも選定されるなど、世界50カ国・地域以上での事業基盤やグローバルでのケイパビリティがあり、高いSI力を保有しています。

両社はこれまでOREX PARTNERSとともにOpen RANの実現に向けて協業してきましたが、海外展開の本格化に伴い、現地での製品・サービス提供体制の強化が課題でした。そこで、NTTドコモのOpen RANのノウハウとNECのフットプリントを活用し、迅速な事業基盤の整備をめざしてOREX SAIを設立しました。NTTドコモグループの一員として、Open RANの関連機器やソフトウェアの販売、モバイルネットワークの企画、構築、保守、運用に加え、SMO(Service Management and Orchestration)やvRANの技術提供とSI支援を実施しています。

OREX®は、ドコモと多様なグローバルベンダが連携して提供する、Open RANサービスブランドです。世界で初めてOpen

RANでの大規模5Gサービスを提供したドコモの通信技術を活かし、お客さま1人ひとりの課題に合わせ、最適なvRANからソフトウェア、カスタマーサービスまで一貫して提供します。

OREX SAIはOpen RAN構築をグローバルに展開していく中核企業として、私自身もNTTドコモのネットワーク本部長として培った知見をもとに、通信事業者のめざす未来を理解し、課題や困りごとに寄り添いながら、共に成長を実現していきます。

#### OREX Packagesの提供、インドネシアをはじめとした世界各地での挑戦

##### ■主力サービスについてお聞かせください。

近年、DX(デジタルトランスフォーメーション)や生成AI(人工知能)の進展で、モバイルネットワークは多様なサービスや膨大なデータ通信を支える基盤として不可欠な存在となりました。一方で、気候変動や災害リスクの増大により、ネットワークのレジリエンスと持続可能性が求められています。こうした中、通信事業者はネットワークの柔軟性向上、コスト削減、迅速なサービス展開といった課題に直面しています。

Open RANは、従来の携帯電話基地局のアーキテクチャをオープン化した無線アクセスネットワークのことです。具体的には、基地局の機能を分割し、それぞれのインターフェースをオープンな仕様にし、相互接続性を実現しています。従来の携帯電話基地局では、同じベンダの機器どうしがしか接続できない「クローズドな」システムが主流でしたが、Open RANでは、異なるベンダの機器やソフトウェアを自由に組み合わせができるようになります。これにより、通信事業者は自社のニーズに合わせて最適な

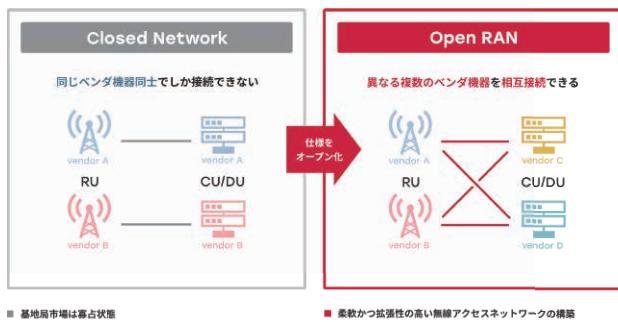


図1 Open RANとは

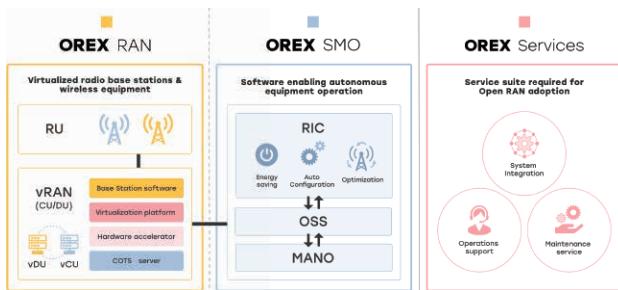


図2 OREX Packages

機器を選択できるため、ベンダ間の競争を促進させ、効率的でコスト競争力のあるモバイルネットワークを構築できるようになるとともに、調達リスクの軽減にもつながります（図1）。

OREX SAIの主力サービスである「OREX Packages」は、Open RANのエンド・ツー・エンドソリューションで以下の特長があります。まず汎用サーバ自体の調達コストを削減します。また装置を仮想化（vRAN）し集約することにより「TCO（Total Cost of Ownership）」を削減します。

また当社のSMOはAIを活用し、vRANの統合管理を高度に実現しています。基本機能に加え、特徴的な効果として、①ソフトウェア制御とデータ活用による消費電力50%削減、②構築段階でのワークフロー自動化による稼働60%削減、③運用段階での故障検知・自動復旧による復旧時間70%削減など、が挙げられます。今後は3rd Party連携を通じ、さらなる機能拡充と性能向上をめざしています。

現在、各社と実証実験等を行い、OREX SAIのOpen RANはもはや実験室内での技術にとどまらず、商用利用が可能なレベルにあることが証明され、各社と商用化に向けて具体的な協議を推進しているところです。

「OREX Packages」として、OREX PARTNERSからOpen RANの構築に必要なすべてのネットワーク機器・ソフトウェアを調達し、システムとしての動作検証を経て、通信事業者のニーズに応じた、最適なモバイルネットワークを企画から構築、運用、保守まで含めたフルスタックサービスで提供しています（図2）。

## ■直近のホットなプロジェクトを教えてください。

これまで、さまざまなフィールドトライアルの実績を活かし、Open RANソリューションをモバイル通信事業者向けに商用導入する協議を推進してきました。その派生形として、Open RANベースのFWA（Fixed Wireless Access）ソリューションの事業開発を固定通信事業者向けに実施しています。

2025年3月、インドネシアの通信事業者PT Solusi Sinergi Digital Tbk（SURGE社）との複数年にわたる商業契約を締みました（写真1）。

SURGE社はネットワークライセンスを持つサービスプロバイダで、広範な光ファイバインフラと当地企業としての専門性を活かし、ブロードバンドサービスの展開と運用をリードしています。ここでは、Open RANを活用した5G固定無線アクセス（FWA）ソリューションを開発し、2030年までに最大2万サイトの構築をめざします。インドネシアは約9300万世帯を抱える島しょ国家で、その地理的制約が通信インフラ整備を困難にしています。これにより手頃な価格で信頼性の高いインターネット接続が普及せず、結果としてデジタル・デバイドが生じ、教育・医療・経済の不均衡を生んでいます。

OREX SAIとSURGE社は、この提携を通じて、十分なサービスが提供されていない地域での通信基盤を拡大し、最大4000万世帯に高速インターネットアクセスを提供することをめざしています。本パートナーシップのビジョンは以下のとおりです。

まず、各世帯までのラストワンマイルの通信を確保するため、OREX SAIのOpen RAN技術のノウハウを活用した5G FWAソリューションを提供します。次に、多くのユーザがインターネットにアクセス可能な低価格（月額10万インドネシアルピア程度、約1000円）のサービスについて、販売・構築・保守・運用を支援してきます。また最大100 Mbit/sの高速インターネットや無制限のデータ通信、無料のモデムレンタルも検討するなど、低所得層にも配慮したサービスを提案し、インドネシア政府のビジョンでもあるデジタルインクルージョンを技術的に支援してきます。さらに、OREX SAIは先進的な5G FWA RANシステムや保守サービスを提供し、SURGE社は電柱、駅舎、光ファイバ網などのインフラを提供するなど、両社でインフラ開発に向けた体制の検討を実施します。

## ■世界各地での実証実験と商用展開について教えてください。

OREX SAIは設立以来、世界各地で精力的にフィールドトライアルを実施し、着実に商用化への道筋をつけています。

## ■カンボジア：4G Open RANと人材育成

2024年10月、総務省の「令和6年度カンボジアにおける4G Open RAN展開に向けた実証の請負」に選定され、カンボジア



写真1 OREX SAIとインドネシアのSURGE社が複数年の商業契約を締結

で4G Open RANの実証実験を開始しました。OREX SAIは大型商業施設に4G Open RANを構築し、通話やデータ通信について検証するとともに、NTT DATA Malaysia提供の商用施設向けAIソリューションも合わせて検証した結果、安定的に実現可能であることが実証されました。

またCADT (Cambodia Academy of Digital Technology)においてOpen RANに関するワークショップを開催し、現地人材育成にも貢献しています。

#### ■フィリピン：Globe TelecomとのOpen RAN実証実験

フィリピンでは、OREX SAIと現地通信事業者Globe TelecomがOpen RANの実証実験を共同で実施することを検討しています。両社は、Open RAN技術の性能評価や導入の可能性に向け必要な検証を行い、フィリピンの通信インフラ発展に向けて協力していきます。

#### ■シンガポール：商用展開に向けた戦略的提携

2024年8月、シンガポールのStarHub社とOpen RANの商用化に向けたトライアルを実施しました。このトライアルでは、商用5GコアとOpen RANの接続検証を実施したほか、スピードテストにおいては非常に高いスループットと低遅延等が観測され、Open RANソリューションが商用レベルの性能を備えていることを確認しました。

この成果を背景に、2025年3月、同社と戦略的パートナーシップを締結しました。StarHub社の「Cloud Infinity」と4G/5Gマクロネットワークの両方にOpen RANソリューションを共同で商用展開する計画で、StarHubの法人向けプライベート5Gネットワークとコンシューマ向けサービスの両面で協力しています。シンガポールという先進的な通信市場におけるOpen RANの商用化は、アジア太平洋地域全体への展開において重要なマイルストーンとなります。

#### ■カタール：5G SA Open RAN

カタールでは、中東・北アフリカ・アジアなどグローバルに展開する通信事業者OoredooグループのOoredooカタール本社において、5G Open RAN SAのフィールドトライアルに成功しました。このトライアルは、本社内の屋内環境においてOpen RANソリューションを実証する、カタール初の画期的な試みでした。

#### ■ペルー：スタジアムで映像配信

ペルーでは、OREX SAIが現地通信事業者Entelペルーと連携し、日本とペルーの官民協力の枠組みのもとOpen RAN実証を実施しました。今回の取り組みでは、スタジアムにおいてドコモビジネスのライブ配信プラットフォームを活用し、Open RAN技術に加え、5Gにおいては低遅延で高品質な映像配信サービスを提供できることを実証しました。海外展開に向けては、ネットワークだけでなくユースケースを示していくことも重要だと考えています。

#### ■今後の展望についてお聞かせください。

OREX SAIは、Open RANのグローバル展開をさらに加速し、

世界中の通信事業者に最適なネットワークソリューションを提供することで、通信インフラの進化と社会課題の解決に貢献します。モバイルネットワークの進化に不可欠な技術としてOpen RANを位置付け、世界中の通信事業者に向けて導入支援を展開します。またNTTドコモの技術力とNECのグローバル実績を融合し、高品質かつ柔軟なネットワークの構築を実現します。さらに、OREX PARTNERSとは密に連携し、新技術の導入を通じて、顧客ニーズに応じたOpen RAN構成を柔軟に設計し提供していきます。そして、技術革新と運用効率の両立を図り、導入後の安定運用まで一貫して支援し続けることにより、通信の常識を変える新たなエコシステムを構築します。また、より多くの人々が快適につながる社会をめざし、イノベーションを通じて、教育・医療・経済の機会均等に貢献し、人々が自分の能力を最大限発揮できる世界をつくっていきたいと考えています。

#### 担当者に聞く

#### インドネシアプロジェクトで安定したサービスの提供をめざす

プロダクトデベロップメント部  
Senior Manager

大竹 健司 さん



#### ■担当されている業務についてお聞かせください。

私はOpen RAN製品の開発管理やインテグレーション管理を担当しています。その中で現在は特に、インドネシアのSURGE社向けのFWAプロジェクトに注力しており、NTTドコモのvRAN技術を現地で展開中です。目標は、OREX SAIとSURGE社にとって初のFWAプロジェクトを1年以内に立ち上げサービスを開始することです。かなりタイトなスケジュールであるため、さまざまな課題を迅速に解決し、工事や試験をスムーズに進める必要があります。毎日が挑戦の日々となっています。

まずビジネス面での課題ですが、FWAの価格帯は非常に安価である中、固定回線ゆえに高いスループットが要求されており、コストとネットワーク品質とのバランスがシビアとなります。短期スケジュールの中で、各種要求を協議し解決を図っているところです。また技術的な課題は、FWAの方式ならではのハンドオーバーとなります。例えば、FWAはモバイル事業の携帯電話と異なり、端末が固定されハンドオーバーが発生しないなど特殊な技術的要件に対する検討が必要になります。さらに1.4 GHz帯のn50という世界初の周波数を使用し当該周波数は上りと下りで通信の仕様が異なり、現在、接続に苦労しているところです。そして、SURGE社はFTTHの経験はあるものの、モバイルネットワークの知識が少ないため、仮想化されたOpen RANという最新技術

を提案する際にその内容を丁寧に説明し、理解していただくのに時間を要しています。

そういう中でも、チーム全体でコストの調整や周波数利用の最適化、お客さまとの対話を重ね、課題を1つずつクリアしています。

### ■今後の展開についてもお聞かせください。

今後は、このインドネシアプロジェクトで安定したサービスの提供に成功し、技術力の高いOREX SAIの名前を世界に広めていきたいですね。そして、インドネシアをはじめ世界各国でのフィールドトライアルで得た知見を他国のプロジェクトへも展開し、FWAの需要拡大にこたえていきたいです。さらに将来的には、OREX SAIの製品を使った一般的モバイルネットワークの提案にも挑戦し、FWAとモバイルネットワークの両輪でビジネスを成長させたいと考えています。

## 密接なコミュニケーションでSURGEプロジェクトをスムーズに進める

PT OREX SAI Indonesia  
Sales Manager

フェルナンド  
パンジャイタン さん



### ■担当されている業務についてお聞かせください。

私はインドネシア現地法人のPT OREX SAI Indonesiaで営業

## OREX SAI ア・ラ・カ・ル・ト

### ■多様な視点が織りなすOREX SAIのチーム力

OREX SAIは、NTTドコモとNECの両社をはじめさまざまな企業から参画している社員で構成されており、国籍も日本だけでなく米国、中国、インド、トルコ、インドネシア出身のメンバなど多数在籍しています。異なる企業文化や業務スタイルを持つメンバが一緒に働くことで、日々の業務の中に多様な視点が生まれています。例えば、同じ課題に向き合う中でも、アプローチの仕方や優先順位の付け方に違いがあり、「そんな考え方もあるのか」と気付かされることが少なくないことがあります。自分たちの“当たり前”を見直すきっかけにもなり、チーム全体の思考の幅が広がっていくことを実感されているようです。また議論の中で互いの強みや得意分野が自然と浮き彫りになり、それを補いながら、より良いアウトプットをめざす姿勢が生まれているとのこと。異なるバックグラウンドを持つメンバどうしが、互いに刺激を受けながら高め合っていく—そんな関係性が、チーム全体の成長を後押ししているようです。この多様性が、OREX SAIのイノベーションを加速させる原動力となっているのではないでしょうか（写真2,3）。



写真2 OREX SAI オフィス



写真3 PT OREX SAI Indonesia メンバ

を担当しており、親会社であるOREX SAIとの連携のもと、インドネシア国内でのSURGEプロジェクトを進めています。主にSURGE社との期待値のすり合わせや、自社とSURGE社との橋渡し、さらにプロジェクトで発生するさまざまな課題への対応を実施しています。

現在の課題としては、SURGE社との議論の中でさまざまな修正点が見い出され、それを1つひとつ丁寧にクリアしていくことです。課題に対応するためにも、お客さまとの直接的かつ詳細なコミュニケーションを重視しています。具体的には、お客さまとは密なコンタクトを保ち、修正点の背景をまず理解し、関連情報の収集と分析に努めます。これはSURGE社だけに限らず、関連する政府機関、さらには現地のニュースソースからも情報を集め、インドネシアの最新状況を把握し、顧客からの真の要求や現実的な計画の見通しを、日本の本社へ正確に伝え、これが日本側の期待値と乖離せぬようにコミュニケーションを図っています。

### ■今後の展開についてもお聞かせください。

このプロジェクトはOREX SAIにとって初のインドネシアでのFWAプロジェクトです。成功すれば、デジタル・デバイドを埋める大きな一歩となります。そのためお客さまや関係者との間で情報の齟齬が生じぬよう、直接的で密接なコミュニケーションを取りながらプロジェクトをスムーズに進めていくのが成功の鍵です。特に、日本の同僚や上司に対して、インドネシアの文化的、社会的な違いを説明し、現地の状況への理解を深めていただくことは、プロジェクトの円滑な運営に不可欠です。今後も現地のリアルな情報を本社と共有し、SURGE社との信頼を築いていきたいと思います。

# レジリエンス時代の耐震性能評価技術 —実験と解析で支える社会基盤—

地震などの災害時に社会や事業の継続を支える「レジリエンス」の重要性を軸に、NTTファシリティーズは耐震性能評価に関する実験・解析・観測のコア技術を統合し、検証精度と信頼性の高い耐震性能評価技術を通じて安全性と事業継続性の両立を実現しています。今後は耐震性能評価技術を組み込んだデジタルツインにAI（人工知能）予測を取り入れることで、災害後の復旧計画策定などの運用面にも拡大して取り組みます。本稿では、これらの技術を活用した課題解決の事例と今後の展望について紹介します。

## レジリエンスとは

現代社会において、私たちの暮らしやビジネスは、さまざまなリスクに直面しています。特に、地震のような自然災害は、予測が難しく、発生すれば社会のあらゆる機能に大きな影響を及ぼします。こうした状況下で社会に求められることは、「壊れない」ことだけではありません。災害が起きたとき、できるだけ早期に元の状態に戻り、社会や事業の活動を継続できる力——それが「レジリエンス」です。

レジリエンスとは、単なる耐震性や安全性の確保にとどまらず、被災後の早期復旧や機能維持、そして人々の安心・安全な生活や事業の継続を支える総合的な力を意味します。公共施設やデータセンタなど、社会の基盤となる建物や設備は、災害時にもその役割を果たし続けることが強く求められます。例えば、自治体の文化施設は地域コミュニティの拠点であり、データセンタは行政・産業・生活のデジタル基盤を支える役割を担う“社会の心臓部”です。これらが長期間停止すれば、経済・社会活動に甚大な影響が及ぶため、事業継続性（BCP）の観点からも、レジリエンスの確保が不可欠です（図1）。

従来の耐震設計は、主に建物の構造体（骨組み）の安全性に焦点が当てられてきました。しかしながら、実際に地震が発生した場合、構造体よりも非構造部材（天井・内装・設備機器・配管・ケーブルラック・支持架台など）のほうが先に損傷します。非構造部材の損傷は、人的被害や機能停止、避難の妨げ、復旧の長期化な

ど、事業継続に直結するリスクとなります。それにもかかわらず、非構造部材の性能検証は、設計図面上の仕様確認や一般的な指針の準拠にとどまることが多く、十分な対策が講じられていない場合も少なくありません。

当社は、こうした社会的な課題に対して、事業継続性の観点を最優先に据え、現場で本当に必要とされる対策や検証に取り組んでいます。これまで主に構造体の安全性を中心に技術を磨いてきましたが、近年は、非構造部材にも積極的に目を向け、これまで培ってきた実験や解析などの耐震性能評価技術を用いて積極的な提案に努めています。

私たちは、社会や事業の継続を守るために、現場の声や実際の被害事例を重視し、柔軟な発想と実証的なアプローチで、従来の枠にとらわれない取り組みを進めています。この姿勢こそが、当社がめざすレジリエンスへの貢献の本質であり、社会の安心・安全を支えるための責任だと考えています。

## 当社のコア技術

レジリエンスを確保するためには、災害時に建物や設備がどのように挙動し、どこにリスクが潜んでいるのかを正しく把握することが不可欠です。また、単なる設計図面上での確認や一般的な指針への準拠だけでは、事業継続性を担保するには不十分な場合もあります。当社はこれらの課題に対し、【実験】・【解析】・【観測】という3つのコア技術を持つ国内でも数少ない企業として、それ

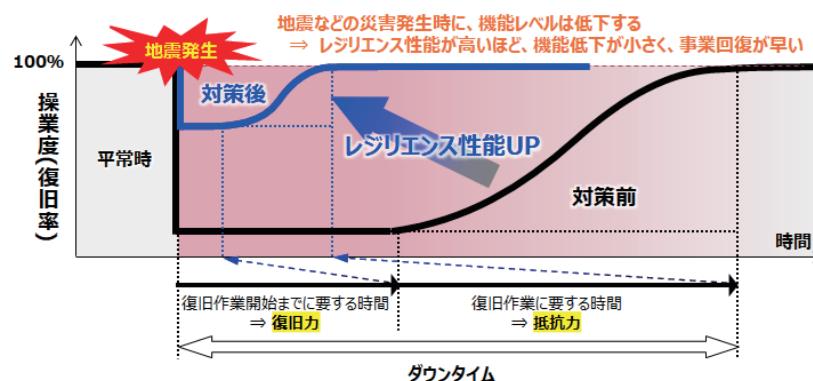


図1 レジリエンスの考え方

らを統合的に組み合わせることで、耐震性能検証の精度と信頼性を高め、より顧客の立場に立った提案やレジリエントな街づくりの実現に務めています（図2）。

まず、【実験】は、実際に起こり得る現象を直接的に再現し、部材や設備が地震などに対してどのように揺れるかを把握する技術です。当社が保有する3次元振動試験システム「DUAL FORCE（デュアルフォース）」<sup>\*1</sup>は、2010年に導入した4代目の振動台で、発生の危険が高まる東海・東南海地震などの巨大地震によってもたらされる長周期地震動の再現が可能な特長を持つ振動台です。実際に、導入翌年の2011年には、東北地方太平洋沖地震（M9.0）で長周期地震動が発生しました。当社ではこれまで「DUAL FORCE」を用いて、幅広い対象物に対して数多くの振動実験を実施してきました。以下にこれまで検証してきた対象物の特徴をまとめます。

#### (1) 通信設備・空調設備などの重要インフラ機器

当社は社会の基盤を支える通信設備の耐震性確保を長年の使命としてきました。通信設備は、災害時にも情報伝達や緊急連絡など社会機能の維持に不可欠であり、その安全性は社会全体のレジリエンスに直結します。こうした通信機器や電力装置の耐震性能を実証し、近年はデータセンタの空調設備など、デジタル社会を支える新たなインフラにも対象を拡大しています。

#### (2) 天井やExp.J（エキスパンションジョイント）<sup>\*2</sup>などの非構造部材

地震時に被害が多発するおそれがある天井や支持架台、Exp.Jなどの非構造部材においても、「DUAL FORCE」の大変位・多軸加振性能を活かして実大振動実験にて検証しています。従来の設計指針では見落とされがちな損傷モードや限界状態を明らかにし、建物全体の耐震安全性や事業継続性に直結するリスクを包括的に評価しています。

#### (3) その他の対象物

上記以外にも、東北地方太平洋沖地震時に被害を受けた空調吊り設備の落下原因究明と補強策の確立を目的とした振動実験や、免震建物の通信用ケーブルの引き込み方法に関する性能確認や設計仕様の策定を目的とした振動実験などを実施してきました。これまでの豊富な実験実績と知見を基に、幅広い対象物の耐震性能

評価に柔軟に対応しています。

これらのさまざまな対象物に対して、「DUAL FORCE」を活用することで、新しい技術開発における実験的検証や従来の設計指針だけでは見落とされがちなリスクを明確にし、レジリエンスを高めるための実効性ある方策を提示し、事業継続性の確保に直結する成果をもたらします。

次に、【解析】は、建物や設備の挙動を数値モデルで再現し、さまざまな条件下での応答を予測・評価する技術です。解析は、設計段階での複数条件の比較検討や設計方針の妥当性確認、さらに実験では再現が難しいスケールや複雑な挙動の評価などにも有効な手段です。また、実験と解析の連携によって、その精度と信頼性はさらに高まります。実験で得られた結果（固有振動数や減衰特性、応答性状など）を解析モデルに反映することで、解析結果の妥当性を裏付け、設計段階や耐震評価での予測精度を向上させることができます。加えて、解析結果を基に実験条件を設定すれば、限られた試験回数の中で最大限の知見を得ることが可能です。この双方向の補完関係により、高精度な性能評価を実現することができます。

3番目の【観測】は、実建物の応答を継続的に把握し、設計や運用に反映するための技術です。当社は、全国の複数ビルに設置された加速度計や微動センサを用いて地震時や常時微動の応答データを取得し、設計モデルの精度向上に活かしているほか、実際に観測した地震動データを用いた振動実験も行っています。なお、当社が開発した「揺れモニ<sup>\*3</sup>」に連する観測の内容は、過去のNTT技術ジャーナル<sup>(1)</sup>に記載しているため、今回詳細は割愛します。

次に、実験と解析を組み合わせた検証を実施し、実際にレジリエンスや事業継続性に関する課題を解決した2つの具体的な事例を紹介します。精度の高い耐震性能評価技術を可能とし、事業者にとっては安全性の確認だけでなく、事業継続性の両立も実現した事例です。

## 実験と解析によるレジリエンス評価

### ■事例1）公共ホールの耐震天井改修

1番目は、公共施設におけるホールの耐震天井改修に関する事例です。当ホールは竣工から約25年が経過しており、施設の老朽化や法改正への対応が求められる中、ホールの耐震化と事業継続性を両立させることができが喫緊の課題でした。また、2011年の東北地方太平洋沖地震以降、天井落下事故のリスクが社会問題化し、公共ホールにおいても「安全性の確保」と「音響性能・意匠の維持」

\*1 DUAL FORCE：当社が開発・導入した電気油圧サーボ方式3次元自由度振動台（3次元振動試験システム）のこと。

\*2 Exp.J：建物や構造物の一部に設けられる可動継手で、地震などによる構造体の伸縮や変形を吸収し、損傷や変形の集中を防ぐための装置・部材。

\*3 揺れモニ<sup>®</sup>：当社が開発・導入した建物安全度判定サポートサービス（構造ヘルスモニタリングシステム）のこと。2023年3月、一般財団法人日本建築防災協会による「応急危険度判定基準に基づく構造モニタリングシステム技術評価」を取得。

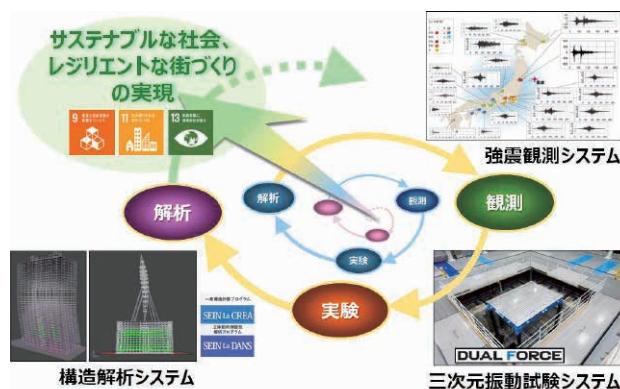


図2 当社の建築構造分野におけるコア技術

を両立した耐震改修が強く求められるようになりました。さらに、災害時には避難拠点としての役割を担う施設も多いため、被災後の早期復旧および事業継続性の確保が重要な課題となりました。

ホールの天井は3次元曲面形状であり、天井裏には設備ダクト等が複雑に配置されているため、下地鉄骨との干渉が生じ、吊り金物の構成も複雑化していました。その結果、設計図と現況に乖離があり、現況に即した解析モデルの作成が困難な状況でした。

そこで、天井下地鉄骨全体をモデル化するにあたり、部材間の干渉や施工上の課題を事前に把握する必要があると判断し、BIMや3Dスキャナ技術を活用して天井裏の複雑な現況モデルを精密にモデル化しました。これにより、3Dモデルを用いた解析を通じて、鉄骨部材や接合部の強度検証を行うことが可能となりました。

当ホールでは、さらなる信頼性向上のため、天井材の振動実験も実施しました。実験では、「DUAL FORCE」で地震波を再現し、天井材の地震レベルに応じた耐震性能を把握することで、設計の有効性を確認しました。また、「DUAL FORCE」の性能を活かし、水平加速度約1.0 G、鉛直加速度約0.5 Gの3方向同時加振を行って検証を行い、吊り材や下地材、接合部の挙動や損傷モード、限界状態を詳細に把握し、現実的な地震荷重下での耐震性能を確認しました。さらに、実験で得られたデータを基に、解析にて固有振動数や減衰特性、応答性状を把握しながら、天井と壁の取合い部には適切なクリアランスを設定しつつ、音響性能への影響を最小限に抑える施工方法を実現しました（図3）。

この耐震天井改修では、実験と解析を組み合わせて検証を実施することで、設計の合理化と耐震性能検証を実現するとともに、提案から設計、施工まで一貫したプロセスを構築し、地震後の迅速な対応や運用面も整備し、復旧時間の短縮と事業継続性の向上に寄与しました。この取り組みは、レジリエンスを具体的にかたちにした先進事例となり、公共施設における事業継続性の確保に対する有効性を示すものとなりました。

### ■事例2）データセンタの空調設備機器に関する耐震性能検証

2番目は、データセンタに用いる空調設備機器の耐震性能検証に関する事例です。データセンタは、昨今社会インフラの中枢を担う施設として、事業継続性の観点から極めて高い信頼性が求められています。その中でも、空調設備はIT機器の安定稼働を支える生命線であり、地震における設備の損傷や停止は、即座にサービス停止やデータ損失といった重大なリスクに直結します。特に、大型の空調設備機器や屋上設置型ユニットは、建物内の設置位置ごとに異なる床応答を受けやすく、たとえ免震建物であっても、免震直上階や屋上架台などでは入力の增幅の影響を受けやすく、従来の経験則や一般的な指針だけでは正確にリスクを評価することはできません。こうした背景から、当社は「設計段階で空調設備の耐震性能を定量的に評価し、意思決定に直結できること」を課題として設定しました。

この課題に対し、現実の挙動を直接的に把握するための唯一の手段として、当社の「DUAL FORCE」<sup>\*1</sup>を用いた実大振動実験を実施しました。実際の空調設備機器を対象に、地震時の挙動を忠実に再現し、機器本体の最大加速度や相対変位などの応答性状を詳細に把握する実験を行いました。実験では、ユニットの質量・重心・支持剛性など、どの要因が応答性状に寄与するのかを明確にするとともに、従来の設計指針だけでは把握が困難なリスクを抽出し、耐震性能の評価に必要な基礎データを取得することができました。

次に、実験だけでは補えない領域を解析で補います。実験での知見を拡張し、建物—機器—結合部の挙動を数値モデルで再現し、多様な条件下での応答予測を実施しました。実験で得られた固有振動数や減衰特性をモデルに反映することで、解析の精度は飛躍的に向上します。さらに、解析は実験では再現が難しい複雑な連成挙動を評価でき、パラメトリックスタディを通じて、精度の高い検証を実現できました（図4）。

#### 実験技術



#### 解析技術

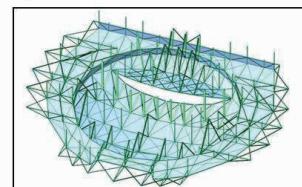


図3 公共ホールの天井耐震改修におけるコア技術の提案

#### 実験技術



#### 解析技術



図4 空調設備機器の耐震性能検証におけるコア技術の提案

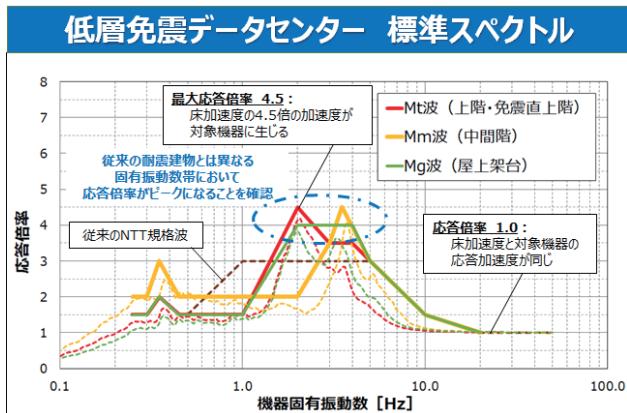


図5 低層免震データセンターにおける標準スペクトル

さらに、より高度な検証を実現できる工夫として、実際に建物内の設置位置ごとに異なる床応答を示す実状に対して、低層免震データセンタの設計例を分析し、実験や解析に用いる床応答波を作成しました。具体的には、免震直上階および上階、中間階、屋上架台の3区分を定義し、3種類の地震応答標準スペクトルを作成しました（図5）。これにより、設置位置によって応答がどの程度変化するかを定量的に確認し、特に機器の固有振動数と床応答が一致する場合には、床加速度の約4.5倍もの加速度の増幅が生じることを新しい知見として確認しました。

こうした取り組みの成果として、当社は空調設備機器の耐震性能検証ツールを開発しました。このツールは、設計や建物運用開始後の評価に活用でき、機器仕様や建物条件などを入力することで、空調設備機器の耐震性能を簡易に検証することができます。この取り組みは、単なる耐震性能の把握にとどまらず、事業者が「どこまで安全か」「どこにリスクが残るか」を定量的に把握でき、事業継続の実効性をより高めるための判断が可能になります。当社は、実験と解析による統合的な検証を通して、信頼性の高い性能評価を実現し、将来のレジリエンス設計をリードする取り組みをめざします。

## 今後の展望とビジョン

当社の使命は、災害に強く、早期復旧が可能な社会基盤の実現です。これまで、実験と解析を軸に、非構造部材を含む耐震性能の検証や、事業継続性を支える仕組みづくりに取り組んできました。しかし、レジリエンスの要求は年々高度化し、単なる耐震設計の枠を超え、設計から運用・復旧までを一貫して支援する仕組みが不可欠になっています。

今後は、実験と解析の高度化に加え、観測技術との連携をさらに強化します。地震時における実建物の構造体の応答だけでなく、非構造部材や設備機器などの応答にも着目し、それらを設計モデルにフィードバックすることやレジリエンス評価の提案に用いることで、建物のライフサイクル全体での活用をめざします。これにより、地震直後の健全度診断や復旧優先順位の判断を迅速化し、



図6 コア技術とデジタル技術の融合

事業者による事業回復の早期実現を可能にします。さらに、AI（人工知能）やデジタル技術の活用も重要な要素です（図6）。観測データと設計モデルを統合したデジタルツインを構築し、AIによる建物応答の推定や予測を組み込むことで、検証精度と信頼性の向上に加え、パラメトリック解析やリスクマネジメントにより、より合理的な設計判断を実施します。また、デジタルツインを建物の所有者や利用者が活用することで、事前の備えや訓練計画の策定に役立て、復旧時間の短縮や事業継続性の実効性を高めることにつなげます。

当社は、これらの技術を統合し、設計から運用までを一貫して支援するレジリエンスなプラットフォームの構築をめざします。そこでは、構造や設備の応答データなどの技術指標と事業継続にかかる運用情報などの経営指標を連携ならびに可視化し、事業者・設計者・施工者・建物管理者などが共通の基準で意思決定できる環境を提供します。

当社は今後も、レジリエンスや事業継続性の観点から、建築分野における新たな価値を創出し続けます。災害に強く、早期復旧が可能な社会基盤を支えるため、技術とデジタルの融合による次世代のソリューションを追求し、安心・安全な社会の実現に貢献していきます。

### ■参考文献

- (1) from : “建物安全度判定サポートサービス「揺れモニ<sup>®</sup>」の展開,” NTT 技術ジャーナル, Vol.36, No.3, pp.85-87, 2024.

### ◆問い合わせ先

NTTファシリティーズ  
サービスイノベーション部 研究開発部門 建物ソリューション担当