

NTT 技術ジャーナル

ISSN 0915-2318 平成2年3月5日第三種郵便物認可
令和3年9月1日発行 毎月1回1日発行 第33巻第9号(通巻390号)

9 SEPTEMBER
2021
Vol.33 No.9

特集

5G evolution & 6Gに向けた NTTドコモの取り組み

トップインタビュー

塚野 英博
NTT IOWN総合イノベーションセンタ センタ長

グループ企業探訪
トレードワルツ

from NTTデータ
NTTデータが取り組むゼロトラスト業務環境



NTT 技術ジャーナル

9 SEPTEMBER
2021
Vol. 33 No. 9

CONTENTS

4 トップインタビュー

立場は違えど「何を実現したいか」は同じ。
研究と事業の間に立って両方の領域をカバーする
存在として機能したい

塚野 英博

NTT IOWN総合イノベーションセンタ センタ長



8 特集

5G evolution & 6Gに向けた NTTドコモの取り組み

- 10 5G evolution & 6Gへの動向とめざす世界
- 16 5G evolution & 6Gに向けた透明RIS技術の研究
- 22 5G evolution & 6Gに向けたNTN技術の研究
- 28 5Gの高度化に向けたミリ波帯基地局連携技術による
高速移動環境での通信性能向上

33 *from* ★NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル

パブリッククラウドの利用に特化したセキュリティチェックツールの開発

41 挑戦する研究者たち

齊藤 志郎
NTT物性科学基礎研究所
上席特別研究員



為せば成る. 研究者よ「長期的楽観主義者」であれ

47 挑戦する研究開発者たち

永田 聡
NTTドコモ 6G-IOWN推進部 担当部長



研究開発者は「未来」の最初の種.
研究開発は未来を築く大きなエンジンにもなり得る

51 明日のトップランナー

石井 亮
NTT人間情報研究所 特別研究員



音声・言語・身体動作を複合的に扱い対話の
仕組みを解明.
「マルチモーダルインタラクション」の研究

54 グループ企業探訪

株式会社トレードワルツ
ブロックチェーン技術を活用した
貿易プラットフォームTradeWaltz®により,
貿易業務のデジタルトランスフォーメーションに貢献



58 from NTTデータ

NTTデータが取り組むゼロトラスト業務環境

Webサイト オリジナル記事の紹介 64

10月号予定

編集後記

NTT技術ジャーナルはWebで閲覧できます.

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



本誌掲載内容についての
ご意見,ご要望,お問い合わせ先

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

本誌ご購入のお申し込み,
お問い合わせ先

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

企画編集

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

発行

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

©日本電信電話株式会社2021

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます●

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

View from the Top

NTT IOWN総合イノベーションセンタ
センタ長

塚野 英博

PROFILE :

1981年富士通株式会社入社。半導体を中心に調達部門に従事。2001年同社経営戦略室長。2017年同社代表取締役副社長/CFO。CHO/CSOを歴任し、社長補佐として全部門を管掌。2019年同社副会長。2020年NTTアドバンステクノロジ顧問、およびNTT研究企画部門シニアアドバイザーを経て、2021年7月より現職。



立場は違えど

「何を実現したいか」は同じ。

研究と事業の間に立って

両方の領域をカバーする

存在として機能したい

従来のNTT R&Dの要である3つの総合研究所に加え、導入段階に近い開発を担う、NTT IOWN総合イノベーションセンタが2021年7月1日に設立されました。IOWN構想のカギを握る光信号と電気信号を融合する光電融合技術の創造と活用に向け奮闘するIOWN総合イノベーションセンタ。塚野英博センタ長に新センタ設立の目的や使命、トップに求められる資質について伺いました。

光電融合技術で世界の写像をつくり、サステナブルな社会の実現をめざす

新設されましたNTT IOWN総合イノベーションセンタのセンタ長就任おめでとうございます。まずは同センタについてご紹介いただけますでしょうか。

2019年に発表したIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想において、NTTは光電融合技術を用いた革新的なネットワーク・情報処理基盤を2030年に実

現することをめざしています。これに向けた研究開発力強化を目的として、NTT研究所が有する研究・開発リソースを結集してNTT IOWN総合イノベーションセンタ (IIC) が2021年7月に始動しました。当センタは、①IOWN構想を具現化し、移動固定融合を支える革新的なネットワークシステムの研究開発を担う「ネットワークイノベーションセンタ」、②IOWN実現に向けた革新的なコンピューティング基盤の研究開発を推進する「ソフトウェアイノベーションセンタ」、③IOWNを支える光電融

合デバイスや情報処理デバイスに関する研究開発を推進する「デバイスイノベーションセンタ」の3センタにより構成されます。

この新しい体制で私たちは、デバイス技術、ネットワーク技術、ソフトウェア基盤技術を結集し統合していくことで、技術の世界でのゲームチェンジと日本の技術力再興をめざしていきます。ICTの普及とともにボーダレス市場化はますます加速しており、ネットワーク・情報処理基盤への重要性はますます高まっています。グローバルベンダとの連携は



必要不可欠であると考えており、IOWNグローバルフォーラムや各ベンダとの共同開発などを積極的に活用して研究開発を加速していきます。

当センタはR&Dの組織ですが、名称はセンタです。私はこの命名には意味があると考えています。R&Dというと研究的な側面をイメージする傾向にありますが、センタと銘打ったのには、この感覚から開発に軸足を置くというマインドセットの変革を求められているのだと感じています。これまで研究所でも実用化をめざした開発が行われてきましたが、その軸足は研究に近い部分でした。この開発の位置付けを事業に近い部分に寄せることで、事業会社と一体となってビジネス展開を指向し、グループ外のプレイヤーにもご利用いただけるものを生み出すことが求められていると認識しています。そして、こうした活動を通して電電公社時代から脈々と築き上げてきたNTTグループの最大のミッションである社会貢献をしっかりと実現したいと考えています。

研究と開発・事業化の橋渡しをするには双方を理解している必要性を感じますが、これまでのご経験が活かしていっているのでしょうか。

私は、大学卒業後富士通株式会社に入社し、調達部門に配属され、現在に至るまで、半導体やネットワー

クのビジネスにかかわってきました。また、CFO（Chief Financial Officer）・副社長として、限られたリソースの中で新規の事業領域を経営の立場で見極めてきた経験があります。さらに、半導体やICT関連の海外ベンダのマネジメント層やキーパーソンとのコネクションも数多くつくってきました。

IOWNの実現に向けて、さまざまな技術の取捨選択や事業としての判断、そしてIOWN Global Forumをはじめ、多くのパートナーとの連携も必須であり、これらに私の経験を活かすことが期待されていると考えています。

その取り組みとして、まずは光電融合デバイス等の適用により、圧倒的な省消費電力・低遅延時間を可能とする「超強力・汎用WhiteBOX」の実現です。おそらく完成までに10年ほどはかかると思いますが成し遂げていきたいと思っています。併せてトータルオペレーションマネジメント領域においてはビジネスサポート、オペレーションサポートでの研究・開発も充実させていきたいと考えています。IOWNというビジョンに対して、こうした具体的な技術を時間軸や展開もかんがみてマッチさせながら、その実現に向けて進めていきたいと思っています。

正しいことを正しくやる

センタ長はさまざまな組織や任務のトップを経験されました。トップに求められる資質についてどのようにお考えですか。

上に立つ者ほど信念を持つことは大切であると考えています。もちろん、それが歪んでいたらいけないのですが、さまざまな交流を通じて人の話を聞き、検証して自らの信念が本当に正しいかを見つめ、確固たるものに築いていくことはできると思います。その過程において大切なのは、間違ったときにそれを認めて速やかに修正していく柔軟性でしょう。

物事の真実は1つですから、専門家等と話して仕組みや原理を理解し、自らの信念と照らし合わせて、現実化する方策を検討することの繰り返しです。こうして築き上げた私の信念は「正しいことを正しくやる」ということです。「正しい」の意味合いは立場が違えば全く違うかもしれませんが、「何を実現したいか」は立場が違って同じだと思います。一般的には「精査」という言葉がありますが、正しくやるために調査し、人の話を聞き、その決断は正しいか、あるいはそうすべきかを深く掘り下げています。これも一朝一夕にできるようになったわけではなく、さまざまな苦労や経験をしながら築き上げてきた結果だと思っています。

正しい判断をするために他者の言葉に耳を傾け、知見に触れることが大事なのですね。

直接的なコミュニケーションを図れる力もトップには必要だと考えます。私が社会人になったのは1981年で、その当時の日本の国力は上り坂でした。IT・エレクトロニクス等の分野では生産も消費も米国に次いで世界2番目のプレゼンスだったと記憶しますが、今では中国に抜かれてしまいました。この結果をかえりみると、日本も成長し続けているものの他がさらに成長している、つまり日本

が過去の栄光に胡坐をかいて変化を恐れていたようにも感じています。

また、いわゆるエクセレントカンパニーは専門性を確立して自国のシェアを持ち、かつ他国においても大きなプレゼンスを持っています。しかも、プレイしたい国の言語をビジネスレベルで使いこなしています。特にサービス領域においては言語や文化の理解が重要ですから、その国の人とできるだけ近いレベルでコミュニケーションがとれないのであればプレイしてはいけないというのが持論です。これは現地の人を採用する等という生易しいものではなくて、自分がお客さまやステークホルダと直接コミュニケーションを図れるかが重要なのです。

強いていえば日本が手を抜いたのはこの言語の部分ではないかと思えます。私は駐在に出張ベースの半年滞在も含めれば10年近くの米国での勤務経験があるのですが、最初は従業員1000人程度の工場の購買マネジャーとして派遣されました。初めのころは電話をかけるのも怖かったし、自分の意図したことを伝えられるかも不安でした。しかし、このままでは業務も遂行できないし、自分は成長できないと決意して、自分の担当するすべてのプロセスにかかわろうと広大な工場を歩き回って、現地ス

タッフ等とコミュニケーションを図りました。最初はなかなか意思の疎通が図れずにいましたが、とにかくコミュニケーションを図れるようになるとういう決意のもとに実行し、少し慣れてくると相手の顔の見えない電話も苦ではなくなり、さらに3年ほどで慣れて、自信も持てるようになりました。そこで次は積極的に失敗してもやってみようと思ったのです。なぜなら安全サイドを基準に物事を選択しては何事も始まらないからです。こうしたトライ&エラーで失敗を恐れなくなりました。

「ジョン万次郎」のススメ

信念の確立や円滑なコミュニケーションも根底には努力があるのだね。

私の座右の銘は中高一貫校で叩き込まれた「質実剛健」です。多様な文化の受容も然り、失敗も然り、自ら積極的に挑戦していかなければ何事も始まりません。この姿勢で何事にも臨んでいます。こうした信念を貫いてマネジメントのポジションに就いたのは2010年ごろですが、私はそのころから周囲に「ジョン万次郎」のススメを唱えています。換言すると「出稼ぎ」のススメです。何かしたいことがあるのなら日本の国内で考えているだけではなくて、どんどん訪ねていこうと伝えているのです。「これをやってみたい!」という志があれば、相手は一度くらい会ってくれますし、話も聞いてくれるからです。そのための日頃から人間力を養っておく必要もあると思います。中でもリベラルアーツ(教養)は大切です。絵や音楽、スポーツの話題をきっかけに話が広がることもあります。どんな話題にも呼応できる力を養う、教養を身につけるために努力できるかどうかは相手に寄せる関心の大きさがかわってくるのかもしれない。そのうえで、信念や原点を共有できると関係はどんどんと深まっていきます。たとえビジネスに直結することでも、人

として理解し合うこと、時間をかけて盤石な関係を築くことはとても重要だと、自身の経験や経営の先輩方の行動から実感しています。

新しい取引をしたい相手と共通の友人や知人がいれば「一緒に何かを始めよう」と持ち掛けることもできますし、紹介してほしいと頼むこともできます。こうした関係性はいわゆる「コミュニケーション・パス」なのです。何事も一朝一夕にはいきません。入社時から、あるいはもっと前からこのパスを手に入れられるように積み上げていかなければいけないと思います。ただ、そうして築いた結果や効果は後になってみないと分からないものなのです。結果は常に遅効性で、やったことの評価は、大げさにいえば、時間と歴史でしか証明されないものだと思います。

森羅万象において、時間は平等・公平に過ぎていきます。常に考え、行動し、さまざまなことに関心をもって自身を磨き続け、進化することが必要であると考えています。何かを諦めたり、怠るということは、自分が前に進まない・止まるということであって、時間に取り残され、自分が退化するということであると考えています。すべては脳を働かせ続けることであって、自身にとって、止まること、退化することは恐怖です。

技術者・研究者の皆さんに一言いただけますでしょうか。

科学技術の意味は、「夢」の実現や「恐怖」の緩和であるという考え方が根底にあるように感じています。こうした考え方の違いはあっても、技術者や研究者はこれまでできなかったことを実現するという使命を全うするのが仕事であると考えます。また、実現した技術を使って万人がメリットを享受できるようにする、コストダウン効果も重要なポイントです。例えば、今の時代、レコードによる究極のアナログの音を楽しもうと真空管等の従来の機材や環境をそろえると3000万円程度かかるともいわれます。素人でもその音質の違いが分かるほどの素晴らしいクオリ





研究者の努力を理解していただきたいと思います。リアルな世界で万人が技術のメリットを享受するために研究していると自負していただければと思います。その意味で、地球温暖化抑止に向けたカーボンニュートラル実現のための取り組みは、IICの大きなミッションです。
(インタビュー：外川智恵/撮影：大野真也)

※インタビューは距離を取りながら、アクリル板越しに行いました。

ティだといいますが、そう簡単に手に入れられる機材ではありません。一方で技術は進歩し、誰でもデジタルで気軽に音楽を楽しむ機会を得られるようになりました。技術を進化させ、できなかったことをできるようにすることによって、その恩恵をコストダウンを通じて万人が享受で

きる社会を実現する、それを担っているのが技術者です。

技術者・研究者の皆さんが手掛けている研究は、こうした社会貢献に寄与するもので、これを現実のものとするために日々励んでいるということ念頭に置いていただきたいと思います。また、社会にも技術者・

インタビューを終えて

本格的な夏を迎えオフィスの窓から強い日差しが照りつける中、塚野センタ長が年季の入ったアタッシュケースを持って現れました。汗を拭きながらご準備されていたのでお忙しいですか?と伺うと「これまでの半分くらいかもしれない」とおっしゃるのです。しかし、準備の傍ら部下と話す様子から、立ち上がったばかりの組織の長としての分刻みのスケジュールをこなす多忙さは十分に伝わってきました。

そんな塚野センタ長にご趣味を伺ったところ、忙しい合間を縫って農業のまねごととドライブを楽しんでおられるというのです。特にドライブでは「YOASO-BI」や「手嶌葵」等の曲をかけながら1日に300キロ近く、1人でスポーツカーを走らせながら考え事をしてリフレッシュされているとのことでした。

あれこれと余暇のお話を伺っている

中で、塚野センタ長のお人柄を表現していると思ったのが車種へのこだわりです。「私は、たとえお金があったとしても、いわゆる高級なtheスポーツカーには乗りたくないのです。やり過ぎというか、速く走れて当たり前の車で、道を感じるのはなんとなく好きじゃない。4ドアだけでも中身(性能)はすごいというのにすごく懂れますね」。

この感覚はまさに塚野センタ長のあり方と重なりました。インタビューでもご自身を飾ることなく、努力を積み重ねてこられた話もさらりと語られました。いわゆる格好つけることも、ドラマチックに語られることもありませんでした。忙しさはこれまでの半分くらいとおっしゃったのも同様、どこかさりげなく、格好をつけない塚野センタ長の美学を感じたひと時でした。



特集

5G evolution & 6Gに向けた NTTドコモの取り組み

日本国内では、2020年3月に5G(第5世代移動通信システム)の商用サービスが開始されたが、世界中では次世代の移動通信システムである「6G(第6世代移動通信システム)」、および2030年代の情報通信技術に関する検討の機運が高まっている。
本特集では5G evolution & 6Gに向けたNTTドコモの取り組みについて紹介する。

5G evolution & 6G

無線技術

メタサーフェス

超カバレッジ拡張

基地局連携

5G evolution and 6G

5G evolution & 6Gへの動向とめざす世界 ————— 10

6Gの研究開発に関する国内外動向やスケジュール展望,および、「ドコモ6Gホワイトペーパー」で提案した5G evolution & 6Gのコンセプトについて概説する。

5G evolution & 6Gに向けた透明RIS技術の研究 ————— 16

5G evolution & 6Gに向けて議論されている「New Radio Network Topology」において重要となるIRE (Intelligent Radio Environment) というコンセプトについて解説する。

5G evolution & 6Gに向けたNTN技術の研究 ————— 22

静止衛星,低軌道衛星,および高高度プラットフォームなどを利用したNTN (Non-Terrestrial Network) 技術や, 小型飛行機を用いた上空約3kmでの39GHz帯伝搬測定実験の内容について解説する。

5Gの高度化に向けたミリ波帯基地局連携技術による 高速移動環境での通信性能向上 ————— 28

デジタル信号処理でビームを生成・制御するデジタルビームフォーミングによるミリ波帯基地局連携技術を搭載した実験装置および屋外伝送実験について解説する。

5G evolution & 6G への動向とめざす世界

日本国内では、2020年3月に5Gの商用サービスが開始されましたが、世界中では次世代の移动通信システムである「6G」および、2030年代の情報通信技術に関する検討の機運が高まっています。本稿では、6Gの研究開発に関する国内外動向やスケジュール展望、および、「ドコモ6Gホワイトペーパー」で提案した5G evolution & 6Gのコンセプトについて概説します。

きしやま
岸山

よしひさ
祥久

すやま
須山

さとし
聡

ながた
永田

さとし
聡

NTTドコモ

まえがき

移动通信システムは、これまで約10年ごとに新世代の方式へと進化しつつ発展してきました。第1世代移动通信システム（1G）から第2世代移动通信システム（2G）にかけて（1980～90年代）は、音声通話がメインで簡単なメールができる程度でしたが、2000年代の第3世代移动通信システム（3G）から写真、音楽、動画などのマルチメディア情報を誰でも通信できる時代になり、2010年からサービスが開始された第4世代移动通信システム（4G）では、LTE（Long Term Evolution）方式による100 Mbit/sを超える無線通信技術がスマートフォンの爆発的な普及を支えました。そして、第5世代移动通信システム（5G）による商用サービスが、国内では2020年3月から提供され、最大通信速度は4 Gbit/sを超えるところまでできました。

* 本特集は「NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル」(Vol.29 No.2, 2021年7月)に掲載された内容を編集したものです。

5Gには、高速・大容量、低遅延、多数端末同時接続といった技術的特長があり、4Gまでのマルチメディア通信サービスをさらに高度化することに加え、AI（人工知能）やIoT（Internet of Things）とともに、これからの産業や社会を支える基盤技術として新たな価値を創出することが期待されています。特に、5GとAI技術の組合せは、実世界をサイバー空間上に再現し、そこから「未来予測」や「新たな知」を獲得するサイバー・フィジカル融合*¹を高度化することで、さまざまな産業分野において新規サービスやソリューションの創出につながると期待されています。このような動向は、2030年代まで継続すると考えられ、今後の5G高度化（5G evolution）および、第6世代移动通信システム（6G）が2030年代の産業や社会を支える基盤技術となるよう、研究開発を推進する必要があります。本稿では、6Gに関する国内外動向や予想されるスケジュール、および、「ドコモ6Gホワイトペーパー⁽¹⁾」で提案した5G evolution &

6Gのコンセプトを概説します。

6G 関連動向とスケジュール

6G議論の立ち上がりは、5G議論の立ち上がりと比較すると世界的に早い傾向があります。これは、5Gにおける世界的な開発競争の影響によるものと考えられています。5Gでは、2020年の8年前にあたる2012年ごろから、徐々に国内外での検討プロジェクトが立ち上がっていきました。一方、6Gの議論はフィンランドのOulu大学を中心とする「6Genesisプロジェクト」のように、2030年の12年前にあたる2018年ごろから動きが生じており、2019年には米国でも、当時のトランプ大統領が自身のツイッターで6Gへの取り組みを強化する旨を表明、FCC（Federal Communications Commission）*²がテラヘルツ波*³

*1 サイバー・フィジカル融合：現実空間（フィジカル空間）の情報をさまざまなセンサなどから収集し、仮想空間（サイバー空間）と結びつけることで、より良い高度な社会を実現するためのサービスやシステムのこと。

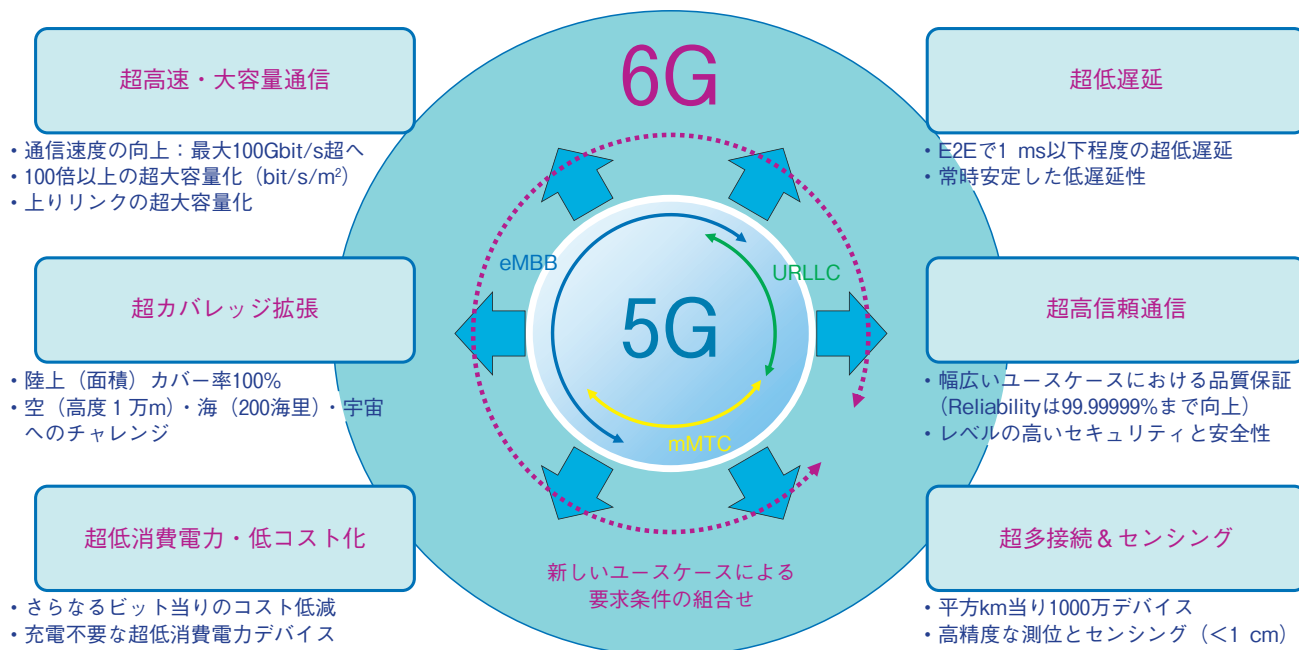


図1 6Gでめざす要求条件

を研究用途に開放する旨を公表するなど、世界的に早期から動きがみられました⁽²⁾。日本でも、総務省が2020年1月より、Beyond 5G^{*4}に関する総合戦略の策定に向けた「Beyond 5G推進戦略懇談会」を立ち上げ、2030年代の社会において通信インフラに期待される事項や、その実現に向けた政策の方向性などに関するロードマップを公表しました⁽³⁾。さらに、2020年12月には、6Gに向けた産学官の連携を強力かつ積極的に推進するため、「Beyond 5G推進コンソーシアム」が設立されました⁽⁴⁾。

NTTドコモでは、2017年ごろからBeyond 5Gに関する検討を開始しており⁽⁵⁾、2020年1月には、「ドコモ6G

ホワイトペーパー」の初版を公開し、現在3.0版までアップデートを行っています⁽¹⁾。さらに、国内外の研究機関や主要ベンダもBeyond 5Gや6G関連のホワイトペーパーなどを続々と発表しており、まさにホワイトペーパーラッシュともいえる状況です。

今後は、2030年までの6G実現に向けた、実証実験や国際標準化が進められていくと想定されます。

5G evolution & 6Gでめざす世界

以下では、「ドコモ6Gホワイトペーパー」で提案した5G evolution & 6Gのコンセプトについて解説します。

5G evolutionを経て6Gで実現をめ

ざす6つの要求条件を図1に示します。これらは5Gの性能をさらに高めた要求条件を含むとともに、5Gまでにはない新領域への挑戦も加わり、より多岐に広がるものと想定されています。以下、各々について期待されるユースケースを交えつつ概説します。

■超高速・大容量通信

通信速度の高速化および通信システムの大容量化は、移動通信システム全

*2 FCC：米国における連邦通信委員会。テレビ・ラジオ・電報・電話などの事業の許可権限を持っています。

*3 テラヘルツ波：1 THz前後の電磁波の呼称。100 GHzから10 THzの周波数を指すことが多い。

*4 Beyond 5G：5G以降の無線通信システムを表す用語として広く用いられており、「6G」とほぼ同義です。

世代にわたる普遍的な要求条件です。6Gでは、究極に速い通信速度および、多数のユーザがそれを同時に享受可能な超大容量通信の実現が考えられ、具体的には100 Gbit/sを超える通信速度および100倍以上の超大容量化の実現をめざしています。通信速度が人間の脳の情報処理速度のレベルに近づくことで、単なる映像伝送（視覚・聴覚）だけではなく、現実の五感による体感品質の情報伝送、さらには、雰囲気や安心感などの感覚も含めた「多感通信」のような拡張の実現も考えられます。このような、従来にはない超高速・大容量通信のサービスを具現化するには、ユーザインタフェースも「スマートフォン」を超える必要があります。例えば、3Dホログラムの再生を実現するデバイスや、メガネ型端末のようなウェアラブルな端末の進化が期待されます。さらに、このような新体感サービスは超大容量通信によって、複数ユーザ間でもリアルタイムに共有され、サイバー空間上での共体感や協調作業など、新たなシンクロ型アプリケーションの実現も期待されます。

また、産業向けユースケースやサイバー・フィジカル融合などのトレンドを考慮すると、さまざまな実世界のリアルタイム情報をネットワーク上の「頭脳」であるクラウドやAIに伝送する必要があるため、上りリンク^{*5}における大幅な高速・大容量化が特に重要となります。

■超カバレッジ拡張

将来の通信は空気と同様、あって当たり前のもとなり、かつ電力や水と同様、もしくはそれ以上に重要なライフラインとなり得るため、6Gでは、あらゆる場所で移動通信サービスが享受可能になるようサービスエリアを究極にまで拡大することをめざします。世界の陸上面積カバー率は100%を目標とし、それ以外の環境での通信エリアの構築や宇宙ビジネスの発展を見据え、現在の移動通信システムがカバーしていない空・海・宇宙などを含むあらゆる場所へのカバレッジ拡張をめざします。これにより、さらなる人・物の活動環境の拡大と、それによる新規産業の創出にも期待できます。例えば、ドローン宅配のような物流のユースケースや、農業・林業・水産業といった第1次産業における無人化や高度化のユースケースが有望です。また、将来的には空飛ぶ車や宇宙旅行、海中旅行など、2030年代の未来的ユースケースへの応用にも期待できます。

■超低消費電力・低コスト化

移動通信システムにおけるネットワークおよび端末の低消費電力・低コスト化は、地球環境問題などに配慮した、世界がめざす持続可能な社会の実現に向けて重要な挑戦となります。

ネットワークにおいては、今後さらに通信量が増えることを想定し、単位通信速度（ビット）当りに要する消費電力量やコストの大幅な低減をめざします。例えば、通信のトラフィック量

が100倍に増大する場合の設備投資および運用コストは、ビット当りのコストを100分の1以下に低減しなければ、高性能化と経済化を両立することができません。

さらに、将来的には無線の信号を用いた給電技術の発展やデバイスの消費電力量の低減技術によって、端末が充電不要になるような世界も期待できます。これは、サイバー・フィジカル融合の高度化によってセンサなどの端末数が増大することや、ユーザインタフェースがウェアラブルなものへと進化していくユースケースを想定すると、より必要性が高まるものと考えられます。

■超低遅延

サイバー・フィジカル融合において、AIとデバイスをつなぐ無線通信は、人間で例えると情報伝達をする神経に相当するといえます。リアルタイムかつインタラクティブなAIによるリモートサービスをより高度に実現するには、常時安定したE2E（End to End）での低遅延が基本的な要件になります。目標はE2Eで1 ms以下の超低遅延の実現です。これによって、サイバー空間からの低遅延なフィードバックによる「違和感」のないサービスを実現することができ、AIによって遠隔制御される機器やロボットが、人間に近い、もしくは人間を超えるような俊敏

^{*5} 上りリンク：端末からネットワーク方向への情報の流れ。

な動作や機微を読み取るような対応ができる世界も期待されます。例えば、声のトーンや表情などの情報からユーザの望むことを瞬時に判断し、人間と同等以上に気の利く対応をする接客などが、AIによるロボットの遠隔制御で実現されるかもしれません。さらに、このような超低遅延通信によるテレワーク、遠隔操作、遠隔医療、遠隔教育など、さまざまな分野での応用が期待されます。

■超高信頼通信

産業やライフラインのための用途に無線通信を用いる場合、その信頼性が重要な要件です。特に産業向けユースケースの中には、産業機器の遠隔制御や工場自動化など、通信の品質や可用性が安全性や生産性に大きく影響するものが存在します。したがって、必要な性能や安全性を担保するために超高信頼通信の実現は重要な要求条件であり、6Gでは5Gよりもさらにレベルの高い信頼性や高セキュリティの実現が期待されます。5Gにおける超高信頼低遅延通信 (URLLC: Ultra-Reliable and Low Latency Communications)*⁶ では、信頼度 (Reliability) として 99.9999% までの実現が検討されており、6Gではさらに一桁の改善 (99.99999%) が目標値として想定されています。

また、現在は「ローカル5G」のように、公衆網のベストエフォート型サービスとは異なる産業向けに特化したネットワーク (NPN: Non-Public

Network) が注目されており、工場などの限られたエリアでのURLLC技術が主に検討されています。一方で、将来的にはロボットやドローンの幅広い普及や、空・海・宇宙などへの無線カバレッジの拡大に伴い、より広域での高信頼通信の実現が求められるものと考えられています。

■超多接続&センシング

サイバー・フィジカル融合の高度化によって、人やモノの通信に関連する超多数のデバイスが普及していくと想定され、5Gの要求条件のさらに10倍 (= km² 当たり1000万デバイス) の究極の多接続が6Gの要求条件になるものと考えられます。人に対しては、ウェアラブルデバイスや人体に装着されたマイクロデバイスにより、人の思考や行動をサイバー空間がリアルタイムにサポートするようなユースケースが考えられます。また、車を含む輸送機器、建設機械、工作機械、監視カメラ、各種センサなど、あらゆるモノがサイバー空間と連動し、産業や交通、社会課題の解決、および人の安全・安心で豊かな暮らしをサポートするような世界の実現が期待されます。

さらに、無線通信のネットワーク自身が、電波を用いて端末の測位や周辺の物体検知など、実世界をセンシングする機能を備えていくような進化も想定されます。測位については、環境によっては誤差センチメートル以下の超高精度の実現が期待されます。無線センシングにおいても、電波とAI技術

の併用によって、高精度な物体検知に加えて物体識別や行動認識などを実現することも期待されます。

5G evolution & 6Gにおける無線技術の発展

過去の移动通信の世代から6Gまでの技術発展イメージを図2に示します。旧世代では各世代の無線アクセス技術 (RAT: Radio Access Technology)*⁷ を象徴する1つの代表的な技術が存在しましたが、4G以降はOFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)*⁸ 方式をベースとした複数の無線技術の組合せでRATが構成されており、拡張的な技術発展になっています。これは、OFDM方式をベースとした無線技術ですでにシャノン限界*⁹に近い周波数利用効率*¹⁰が実現できている一方、移动通信システムに求められる要求条件や、周波数帯、およびユースケースは継続的に拡張されているためです。

したがって、6Gでは5G evolutionを経て、さらに多くの無線技術の「組

- *6 超高信頼低遅延通信 (URLLC): 低遅延かつ、高信頼性を必要とする通信の総称。
- *7 無線アクセス技術 (RAT): NR, LTE, W-CDMA, GSMなどの無線アクセス技術のこと。
- *8 OFDM: デジタル変調方式の1つで、情報を複数の直交する搬送波に分割して並列伝送する方式。高い周波数利用効率での伝送が可能。
- *9 シャノン限界: 帯域幅とSN比より理論的に導出された、転送可能な情報の最大量。シャノンの通信路容量として知られています。
- *10 周波数利用効率: 単位時間、単位周波数帯域当りに送ることのできる情報ビット数。

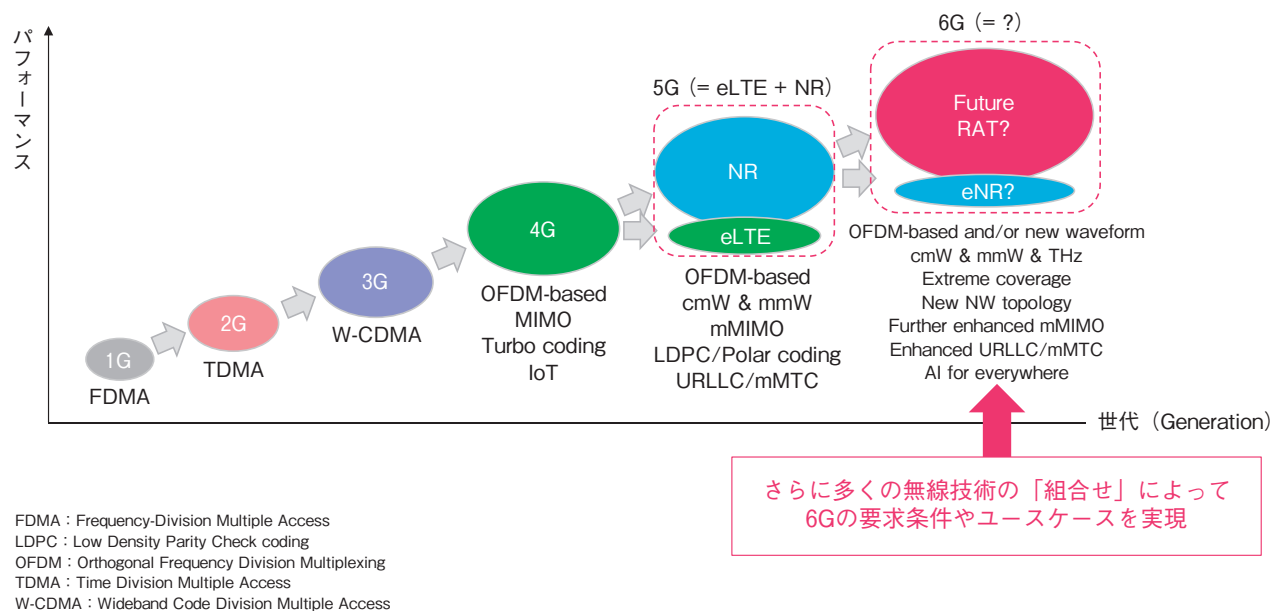


図2 移動通信システムにおける6Gへの技術発展

合せ」が必要になるとともに、前述の要求条件やさまざまなユースケースを実現していくために、移動通信以外の技術も含めた「組合せの拡張」についても考慮する必要があると考えられます。また、5GはLTEの高度化とNR (New Radio)*¹¹の組合せによって定義されましたが、5GのNRは将来の新技术導入を考慮した拡張性に優れた設計になっているため、6GのRATの定義についても今後議論が必要です。

5G evolution & 6Gに向けて検討が必要な技術領域を図3に示します⁽¹⁾。

空間領域の分散ネットワーク高度化技術 (New Radio Network Topology) では、できるだけ近い距離や見通し環境 (ロスの少ないパス) で通信すること、および、できるだけ多数の通信路

をつくり、パス選択の余地を多くする (冗長性を増やす) ことで、超高速・大容量化 (特に上りリンク) や無線通信の信頼性向上を追求します。空間領域で分散した無線ネットワークのトポロジー*¹²を構築するための分散アンテナ展開を、いかに経済的に実現するかが課題となっています。

非陸上 (NTN : Non-Terrestrial Network) を含めたカバレッジ拡張技術では、静止衛星、低軌道衛星、および高高度プラットフォーム (HAPS : High-Altitude Platform Station) の利用を視野に入れることで、山間・僻地、海上、宇宙空間までカバーすることが可能です。すでに、3GPPではこれら衛星やHAPSを用いたNRのNTNへの拡張検討が開始されています。

また、周波数領域のさらなる広帯域化および周波数利用の高度化技術では、6G向けに5Gよりさらに高い周波数帯であるミリ波や100~300 GHzのいわゆるテラヘルツ波に適した無線技術を確認します。加えて、それらを検討するうえで重要となる電波伝搬特性の明確化、伝搬モデルの構築、デバイス技術における課題解決などの検討も重要となります。

無線通信システムの多機能化およびあらゆる領域でのAI技術の活用では、

*11 NR : 5G向けに策定された無線方式規格。4Gと比較して高い周波数帯 (例えば、3.7 GHz帯や28 GHz帯) などを活用した通信の高速化や、高度化されたIoTの実現を目的とした低遅延・高信頼な通信を可能にします。

*12 トポロジー : 機器の位置関係やネットワーク構成。

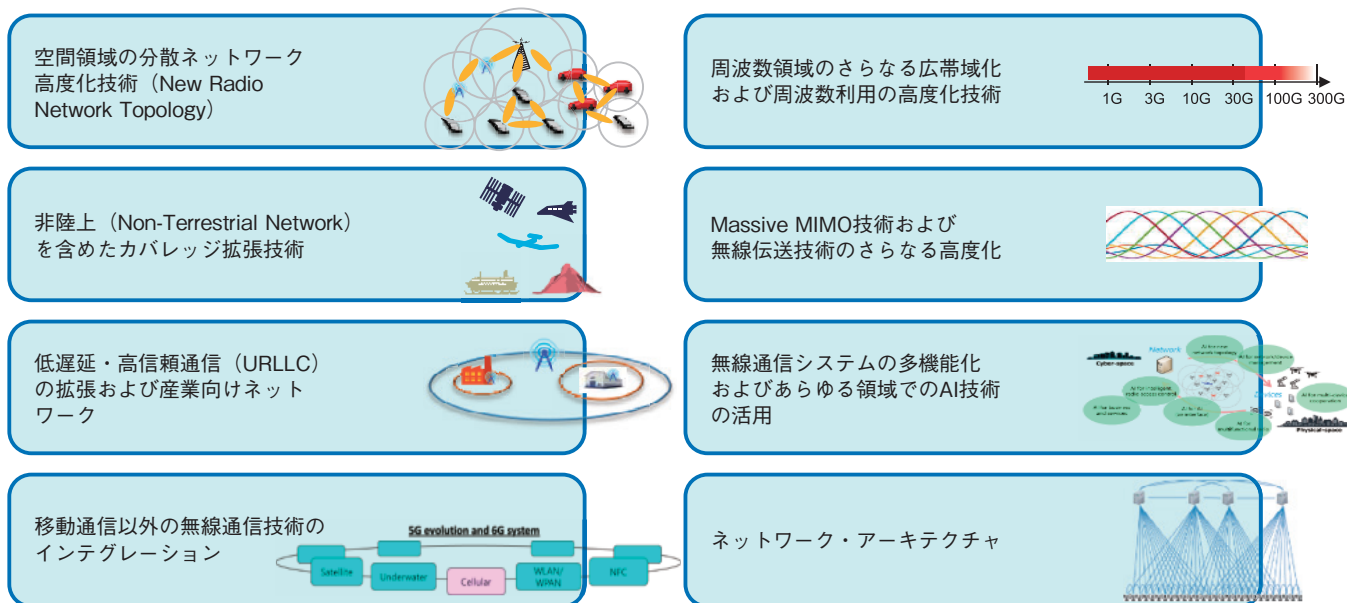


図3 5G evolution & 6Gに向けて検討が必要な技術領域

電波で測定した情報に加えて、映像や多様なセンシング情報をAI技術で解析し、無線通信制御の高度化、高精度な測位・測距、物体検出、無線給電などに活用します。

加えて、6Gではネットワーク全体における機能配置の最適化、装置の汎用化も考慮しながら、将来の要求条件のさらなる高まりや市場変化の速さに追従するため、ネットワーク・アーキテクチャの抜本的な見直しも含めた検討が必要であり、その設計にも多くの課題が存在します。

あとがき

本稿では、5G evolution & 6Gに関する国内外動向やスケジュール展望、および、「ドコモ6Gホワイトペー

パー」で提案したコンセプトを概説しました。現在、Beyond 5G推進コンソーシアムや国内外における6G関連プロジェクトでの検討が精力的に進められていることもあり、引き続き、さまざまな業界の関係者や産学官における6G議論の推進に寄与していきたいと思いを。

参考文献

- (1) https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper_6g/index.html
- (2) <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/pdf/index.html>
- (3) https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000364.html
- (4) <https://b5g.jp/>
- (5) 岸山：“Beyond 5G 無線アクセス技術の初期考察,” 信学ソ大BS-2-2, Sept. 2017.



(左から) 岸山 祥久/ 須山 聡/
永田 聡

6Gに向けては、今後も世界的な技術開発の競争が続くことが予想されますが、そのような中で、私たちは人々の暮らしを豊かにするために技術をつくっているのだという本質を見失わないよう、本稿で述べた将来世界の実現をめざしていきます。

◆問い合わせ先

NTT ドコモ
R&D 戦略部
E-mail dtj@nttdocomo.com

5G evolution & 6G に向けた 透明RIS技術の研究

5Gの商用導入が世界的に開始され、現在は5Gのさらなる発展としての5G evolutionと次世代移動通信システムである6Gに向けた研究がさかんになってきています。本稿では、5G evolution & 6Gに向けて議論されている「New Radio Network Topology」において重要となるIREというコンセプトについて解説します。また、IREの実現に向けて重要になるRISと、これを構成する要素技術であるメタマテリアル／メタサーフェス技術に関して、NTTドコモの取り組み内容を述べます。

きたやま
来山だいすけ
大祐*はま
濱ゆうと
優人みやち
宮地けんすけ
健介きしやま
岸山よしひさ
祥久

NTTドコモ

まえがき

NTTドコモは、2020年3月より第5世代移動通信システム（5G）の商用サービスを開始しました。これによりVR（Virtual Reality）/AR（Augmented Reality）/MR（Mixed Reality）などのXR*¹の応用やIoT（Internet of Things）デバイスによる産業／インフラの高度化など、さまざまな分野への5G技術の適用に期待が高まっています⁽¹⁾。このような状況の中、NTTドコモは5Gで利用されるミリ波*²帯の電波を用いて、高速・大容量、低遅延、高信頼などの5Gの可能性を実証してきました^{(2), (3)}。

一方、これらの検証を通して、セルラ方式の無線通信でミリ波帯を有効活用するうえでの課題も明らかになりました。ミリ波帯は電波伝搬の直進性が強く、その振舞いが光に近くなるため、遮蔽物の陰への回り込み（回折）が小さくなります。そのため基地局アンテ

ナから見通し外となる場所をどのようににエリア化するかが、ミリ波帯をセルラ方式の無線通信で活用するうえでの鍵となります。

本稿では5G evolution & 6G実現に向けた重要課題の1つであるミリ波帯のエリア形成について、有望なアプローチとして注目されているIRE（Intelligent Radio Environment）の概念を示し、IREの実現に必須となるRIS（Reconfigurable Intelligent Surface）とその要素技術であるメタマテリアル*³・メタサーフェス*⁴技術について、NTTドコモの取り組み内容を通して解説します。

IREとRIS

■ IRE

近年、ミリ波帯における見通し外力バレッジの課題に対して、電波環境を適応的・動的に制御しようと試みるIREに向けた研究がさかんになっています⁽⁴⁾。NTTドコモが発表した第6世代移動通信システム（6G）に向けたホワイトペーパー⁽¹⁾においても、ネットワークとの接続経路を増やすような新しい無線ネットワークのかたち

「New Radio Network Topology」が提言されており、その中で電波環境の制御が議論されています。遮蔽物により電波が遮られてしまうという課題は、送受信機技術の進化だけでは解決が困難であり、新たな無線ネットワーク体系を構築する必要があります。

そこで、従来考えられていた無線環境は制御不可能であるという仮定から脱却し、制御可能な要素とみなすことで無線ネットワークの大幅なパフォーマンス向上をめざす検討が精力的に行われています。このようなアプローチは、これまでの無線ネットワーク体系との概念的な違いを強調するために、「インテリジェント無線環境（IRE）」や「スマート無線環境（SRE）」

*1 XR：VR、AR、MRといった仮想空間と現実空間との融合で新たな体験を提供する技術の総称。

*2 ミリ波：周波数帯域の区分の1つ。30 GHzから300 GHzの周波数であり、5Gで利用される28 GHz帯を含めて慣習的にミリ波と呼ばれます。

*3 メタマテリアル：電磁波に対して自然界の物質にはない振舞いをする人工物質のこと。

*4 メタサーフェス：波長に対して小さい構造体を周期配置して任意の誘電率・透磁率を実現する人工媒質（メタマテリアル）の一種で、構造体の周期配置を2次元とした人工表面技術。

* 本特集は「NTT DOCOMOテクニカル・ジャーナル」（Vol.29 No. 2, 2021年7月）に掲載された内容を編集したものです。

※ 現、NTT先端集積デバイス研究所

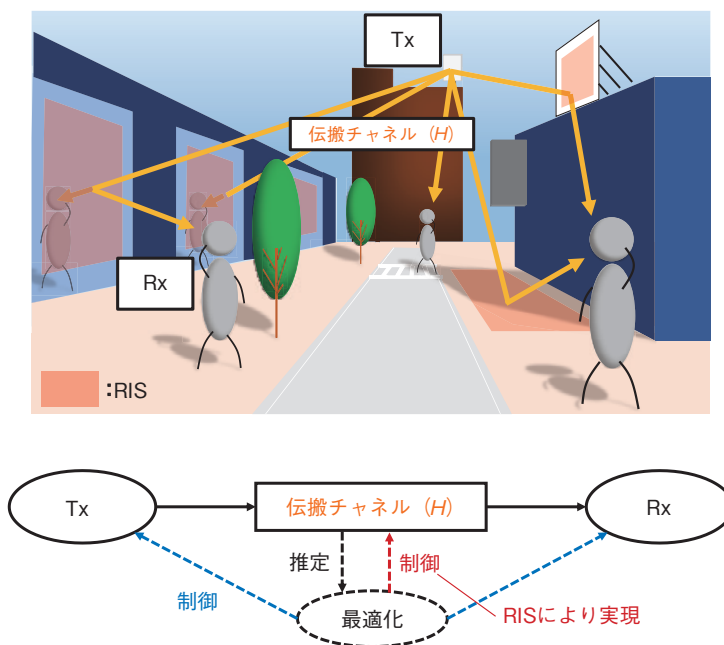


図1 IREの概念図

Smart Radio Environment)」と呼ばれています。IREの概念図を図1に示します。IREにおいては、例えば遮蔽物がある場合には、送信機 (Tx: Transmitter)、受信機 (Rx: Receiver) だけでなく伝搬チャネル^{*5} (H)も含めた最適制御をすることで、遮蔽物の迂回が可能な伝搬ルートを確認します。

■ RIS

RISは、前述した IREを実現するための重要技術です。RISは電磁波を散乱する多数の素子で構成され、面的な散乱特性の分布を設計・制御可能な「メタマテリアル・メタサーフェス技術」が利用されることが多いです。またメタサーフェスは薄い板形状であり、ベース材料の選択次第では柔軟性があるシートの形状で作製することも可能なため、構造物に沿ったかたちでの設置が可能です。このため、既存の構造物の形状を維持したまま電波の散乱特性を制御できます。RISは一般的に、以下の動作を定期的に繰り返すことにより無線環境を適応的に制御すること

が想定されています。

- ① RISの動作を決定するために必要な無線チャネルの特性を推定
- ② 所望の伝搬チャネルが得られるように、推定された情報に基づいてRIS表面の散乱強度・位相分布を制御

本手順の具体的な実装についてはさまざまなアプローチが研究されています。なお、RISと同様の技術を指す用語としてLIS (Large Intelligent Surface) や、反射波の制御のみに着目したIRS (Intelligent Reflecting Surface) などがあります。

(1) RISサイズの影響

基地局 (BS: Base Station) - 移動局 (MS: Mobile Station) 間が見通しではなく、反射板やリピータ^{*6}などで電波を中継する場合 (BS - 反射板など - MS)、パスロス^{*7}が「BS - 反射板など」と「反射板など - MS」の2回発生します。伝搬による電波のエネルギー密度の低下量は波源に近いほど大きくなります。そのため、合計の経路長が同一であったとしても、「BS

- MS」のパスに比べて「BS - 反射板など - MS」のパスのほうが、通常パスロスが大きくなり受信電力の低下を招きます。この傾向はRISに対しても当てはまります。

RISを介するパスロスは通常の金属反射板と同様にそのサイズに影響されますが、RISの場合はサイズだけでなく位相制御の方法によってもパスロスが異なります。そこでまずは、RISサイズが受信電力へ与える影響について、RISを介することにより生じる2回のパスロス (二重パスロス) と同一経路長の直接波のパスロスとの関係を解析した結果を基に紹介します⁽⁵⁾。本解析では、以下について計算しました。

- ・ BS - MS間の距離が200 mで直接波を受信する場合
- ・ BS - RIS間の距離が100 m、RIS

^{*5} 伝搬チャネル: 無線通信の個々の通信路。ここでは各送受信アンテナ間の通信路。通信路の特性は伝達関数 H により表現されます。

^{*6} リピータ: 基地局/移動局からの信号を電力増幅して移動局/基地局への送信を行う物理層の中継機器。

^{*7} パスロス: 送信電力と受信電力との差分から推定される伝搬経路損失。

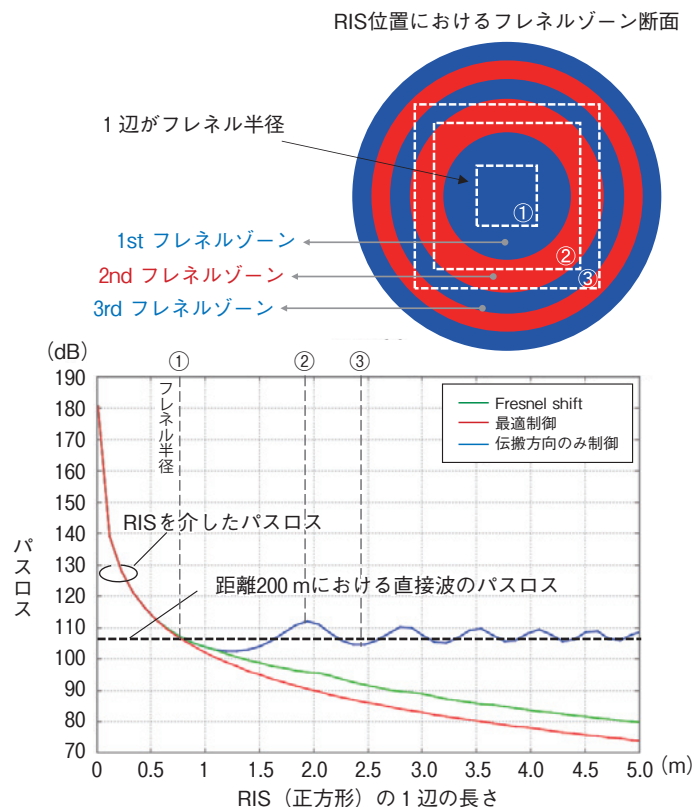


図2 RISサイズとパスロスの関係

– MS間が100 mで、RISを介したパス以外は存在しない場合（合計の経路長200 m）

計算機シミュレーションによって求めた、28 GHz帯におけるRISサイズと各径路におけるパスロスの関係を図2に示します。なお、本計算では、RISの形状を正方形、反射率を100%とし、BS - RIS - MSは同一直線上にあると仮定します。実際は同一直線上にはならず、RISをBS/MSに対して角度を付けて設置することが想定され、その際は角度が付いた分、実効的な面積が小さくなります。

特殊な位相制御を実施しない伝搬方向のみの制御（図2の青線）に着目すると、RISがあるサイズ（図中①）より小さい場合には同一経路長の直接波のパスロスに対してRISを介した二重パスロスが著しく大きいことが分かる一方で、①よりRISサイズが大きくな

ると、二重パスロスが同一経路長の直接波のパスロスに漸近していく様子が確認できます。なお、後述するMSの受信電力が最大となるようにRISを最適制御した場合の二重パスロスが図2の赤線となり、この最適制御をした二重パスロスと直接波のパスロスが同一となる図中①のRISサイズを解析的に求めると、RISの1辺の長さがフレネル半径^{*8}となります。図に示すとおりRISを最適制御しない場合であっても、直接波のパスロスと同等のパスロスとなるRISサイズはフレネル半径とほぼ一致しており、RISが本サイズよりも大きければ同一経路長の直接波と同等の電力を受信できることとなります（図2の青線）。

なお、RISサイズが増加して二重パスロスが直接波のパスロスに漸近していく過程でパスロスが増減するのは、奇数次と偶数次のフレネルゾーン^{*9}

を介した信号が受信点において互いに打ち消し合うことに起因します。

(2) RISによる位相制御の効果

BS - RIS - MSの伝搬パスを、RISを構成する素子ごとに分解して考え、受信点において各パスの波の位相が一致するようにRISを位相制御することにより、BS - RIS - MS経路の受信電力を最大化できます（図2の赤線）。このように最適制御をすることにより、受信電力が直接波パスの値に収束することなくRISサイズと正の相関を持つようになります。なお、RISサイズが

*8 フレネル半径：第1フレネルゾーン（*9参照）の半径。

*9 フレネルゾーン：送受信点間の最短距離（ここではRISを介した最短距離）に対して経路長差が半波長以下、つまり信号の位相差が π (rad) 以下となる範囲を第1フレネルゾーンと言います。経路長差が半波長の $n-1$ 倍以上で n 倍以下の範囲を第 n フレネルゾーンと言います。同一フレネルゾーンを介する信号は互いに強め合って合成されます。

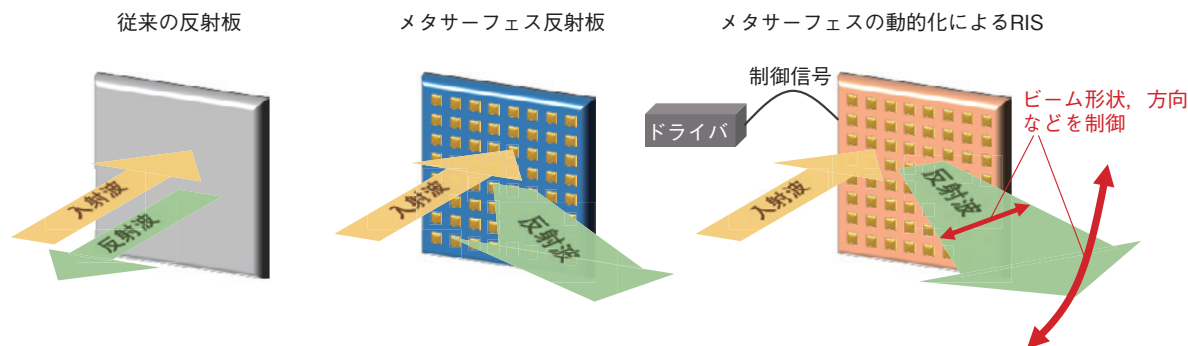


図3 メタサーフェス技術を用いたRISの概念図

フレネル半径程度以下であれば、従来の方向のみの制御（図2の青線）と最適な位相制御による差はほとんどみられないため、方向のみの制御で十分です。

RISを受信電力の観点で最適制御する場合は、RISの各素子における位相変化量を最適な値に設定する必要があります。制御が複雑となる可能性があります。そこで、より簡易な制御の実現に向けて、方向のみの制御に対して、 $0/\pi$ (rad) の2値の位相補正のみを加えることで受信電力を大幅に改善する手法についても紹介します。図2に示したように、方向のみ制御の場合、RISサイズの増大に伴ってパスロスは増減を繰り返します。そこで、この原因となっている偶数次のフレネルゾーンを介した波の位相を π (rad) シフトさせる (Fresnel shift) ことで受信電力が著しく改善します（図2の緑線）。このFresnel shift法は、いずれの距離に位置するユーザに対して、最適制御した場合と同様にRISサイズに応じた受信電力の向上が可能であることが分かります。

透明RISの実現に向けたメタサーフェス技術の検討

前述したとおりメタマテリアル・メタサーフェス技術は、RISを実現するためによく利用される技術です。

メタマテリアルは、電磁波に対して

その波長よりも十分に小さい構造を周期的に配置することで、その人工周期構造体を実効的に負の屈折率を有する材料として振る舞うなど、通常の物質では実現できない特性が得られることから、2000年ごろからその技術が精力的に研究されています⁽⁶⁾。当初、メタマテリアル技術の実証はマイクロ波帯（5 GHz）にて行われましたが、2010年ごろからはミリ波・テラヘルツ波^{*10}帯での検討がさかんになってきています⁽⁷⁾。これは、ミリ波・テラヘルツ波帯のメタマテリアルを構成する素子構造が、mm～ μ mオーダと既存の製造プロセスで容易に作製可能なサイズであること、従来の無線通信で利用されている周波数帯と同様に、金属の電気抵抗をほぼ無視できる周波数領域であることなどが要因と考えられます。

なお、メタマテリアルが3次元の人工周期構造であるのに対して、2次元の人工周期構造体はメタサーフェスと呼ばれることが多いです。メタサーフェス上の反射位相分布を制御することで、反射波の伝搬を制御することができます（図3）。

現在、メタマテリアル・メタサーフェス技術は、各種研究機関の6G向けホワイトペーパーにおいて重要な技術として記載されています。

そこで以下では、NTTドコモにおけるRISの実現に向けたメタサーフェス

技術の取り組み内容について解説します。

■透明動的メタサーフェス

NTTドコモでは、2018年から見通し外におけるミリ波のエリア構築に向けて、動的な制御を考えない静的なメタサーフェス反射板について検討しています⁽⁸⁾。しかし、この際に検討したメタサーフェス反射板は、設置場所・基地局位置・対策箇所から算出される入射・反射角に応じて反射位相分布を設計する必要があり、また反射板の裏が新たな見通し外になるといった課題がありました。加えて反射板は、街中の景観に溶け込むような意匠であることも求められます。

そこで、私たちはAGC株式会社の協力の下、RISのプロトタイプとして、高い透明性を維持しながら電波の反射・透過を動的制御可能な「透明動的メタサーフェス」を開発・検討しています⁽⁹⁾（図4）。メタサーフェス基板を透明化したものに透明なガラス基板を重ね、ガラス基板を微動させることで、入射電波を透過するモード、電波の一部を透過し一部を反射するモード、すべての電波を反射するモードの3パターンを動的に制御することを可能としました。

従来のメタマテリアル・メタサーフェ

*10 テラヘルツ波：1 THz前後の電磁波の呼称。100 GHzから10 THzの周波数を指すことが多い。

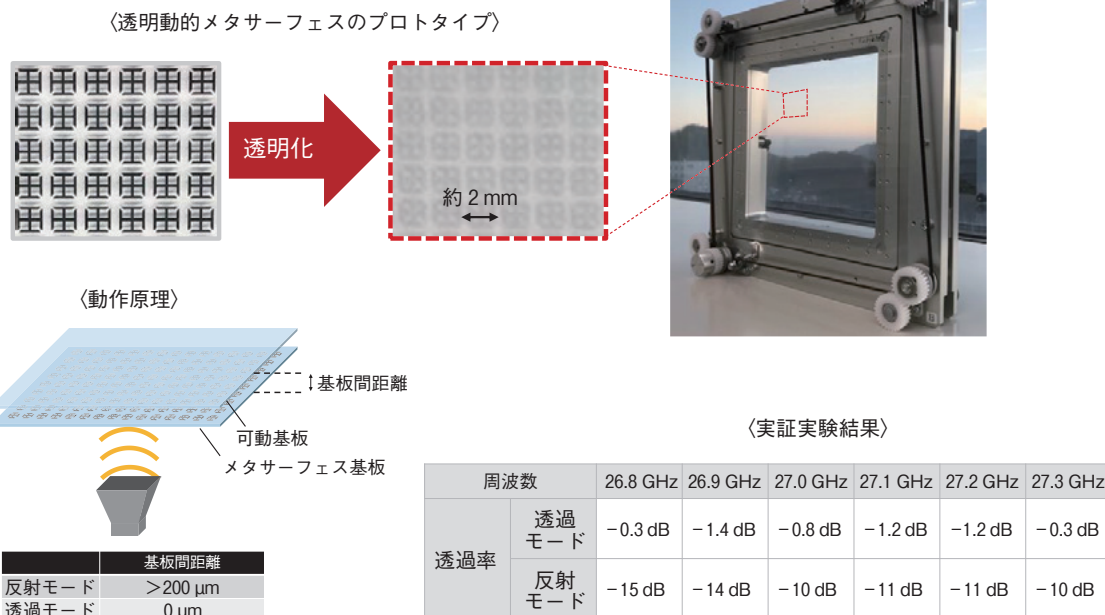


図4 透明動的メタサーフェスの取り組み

動的化手法としては、金属パターンの抵抗・電気容量成分を、半導体素子を用いて制御する方法が主流でした。今回の透明動的メタサーフェスの動的化手法は、半導体素子を用いたこれまでの手法に対して、「透明性を維持したまま動的制御が可能」「基板の面積積化が容易」という優位性があり、設置の際に景観や既存のデザインへの影響を抑えることができます。

実証実験においては、透過モードの際に透過率約-1.4 dB以上、反射モードの際に透過率-10 dB以下（これより計算される反射率：-1 dB以上）の性能を400 MHz以上の帯域で達成できることを確認しています（図4）。

今後は、透明RISの実現に向けて透過・反射方向の制御機能の実装などさらなる高機能化を検討していきます。

■透明メタサーフェスレンズによる窓の電波レンズ化

ミリ波帯の電波は、現在LTEで使用されている周波数帯や、Sub6^{*11}帯の電波と比較し、直進性が高く、減衰

しやすいという特徴があります。そのため、屋外基地局アンテナから発信された電波は建物の窓ガラスに到達するまでに減衰し、さらに減衰した微弱な電波は広がることなく屋内に入り込むため、屋外基地局アンテナによる屋内のエリア化は困難となります。

そこで、屋内側から窓ガラスに貼付け可能なフィルム形状で、窓ガラスを通るミリ波を屋内の特定の場所（焦点）に集めることができる「透明メタサーフェスレンズ」をAGC株式会社と共同で開発しました⁽¹⁰⁾。窓ガラス全面を通る微弱な電波を焦点に集めることで電力を高めることができるため、焦点位置にリピータやリフレクタ^{*12}、RISなどのエリア改善ツールを置くことで、屋外の基地局アンテナによる建物内のエリア化が実現できると考えています（図5）。本メタサーフェスレンズを用いた実証実験では、焦点における受信電力が通常の透過ガラスを用いた場合に対して24 dB以上向上することを確認しています。

さらに、焦点を動的に制御する機能についても検証しました。従来、電波の透過・反射波方向を制御する際は、同一の素子を均一に配列することでメタサーフェスを構成し、素子ごとに異なる制御信号を与えることで実施しました。今回の動的メタサーフェスレンズでは、4種類の構造の異なる素子を適切に配置することで、全素子に同一の制御信号を与えたとしても、焦点位置を切替えられること（今回は単焦点⇄2焦点の切替え）を実証しました（図5）。単焦点モードにおいては、焦点1の受信電力が焦点2の受信電力に対して11 dB高い結果となっており、焦点1のみが焦点として機能しています。一方で、2焦点モードにおいては、焦点1と焦点2の両焦点にて、単焦点モードの焦点2によりも受信電力が6

*11 Sub6：周波数帯域の区分の1つ。3.6 GHzから6 GHzの周波数を持つ電波信号。

*12 リフレクタ：本稿では、従来の金属反射板やメタサーフェス反射板を含めてリフレクタと呼称します。

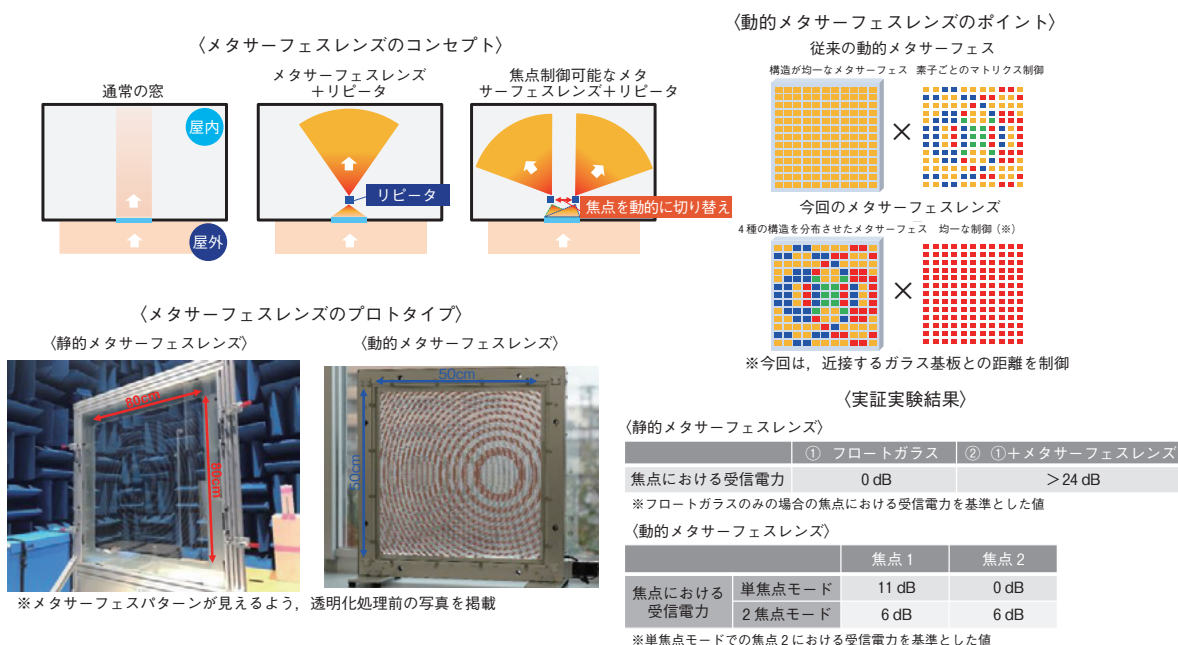


図5 透明メタサーフェスレンズによる窓の電波レンズ化

dB 高くなっており、焦点が2つ形成されていることが分かります。制御が簡単にできることで、大きな面積のメタサーフェスレンズでも焦点を動的に制御できる可能性があります。

あとがき

本稿では、5G evolution & 6G 実現に向けた課題の1つであるミリ波帯における見通し外力バレッジについて、有望なアプローチとして、無線環境の適応的な制御を試みるIREの概念を示し、IREの要素技術であるRISとその基となるメタマテリアル・メタサーフェス技術について解説しました。ある有限の面積を有したリフレクタやRISで伝搬環境に影響を与える場合、その面積が波長に対して大きいほど、つまり周波数が高いほど制御性が増します。ここで解説した技術は5Gのみならず、利用周波数がより高くなると予想される6G以降の無線システムにおいても、エリア構築における基盤技術の1つになることが期待されます。

今後は、本稿で解説したRIS技術の

実環境における効果の実証に取り組むとともに、6Gに向けて、RISのさらなる高周波数化を検討していきます。

参考文献

- (1) https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper_6g/index.html
- (2) D. Kitayama, K. Tateishi, D. Kurita, A. Harada, M. Inomata, T. Imai, Y. Kishiyama, H. Murai, S. Itoh, A. Simonsson, and P. Okvist: "High Speed Mobility Experiments on Distributed MIMO Beamforming for 5G Radio Access in 28-GHz Band," IEICE Trans. Commun., Vol.E102-B, No.8, August 2019.
- (3) D. Kurita, K. Tateishi, D. Kitayama, A. Harada, Y. Kishiyama, H. Murai, S. Itoh, A. Simonsson, and P. Okvist: "Indoor and Field Experiments on 5G Radio Access for 28-GHz Band Using Distributed MIMO and Beamforming," IEICE Trans. Commun., Vol.E102-B, No.8, August 2019.
- (4) M. D. Renzo, A. Zappone, M. Debbah, M. S. Alouini, C. Yuen, J. de Rosny, and S. Tretjakov: "Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces: How It Works, State of Research, and The Road Ahead," IEEE Journal on Selected Areas in Commun., Vol.38, No.11, pp.2450-2525, Nov. 2020.
- (5) D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz: "Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity," Phys. Rev. Lett., Vol.84, No.18, pp.4184-4187, May 2000.
- (6) D. Kitayama, M. Yaita, and H.-J. Song: "Laminated metamaterial flat lens at millimeter-wave frequencies," Opt. Express, Vol.23, pp.23348-23356, Sept. 2015.

- (8) D. Kitayama, D. Kurita, K. Miyachi, Y. Kishiyama, S. Itoh, and T. Tachizawa: "5G Radio Access Experiments on Coverage Expansion Using Metasurface Reflector at 28 GHz," 2019 IEEE APMC, pp.435-437, 2019.
- (9) NTTドコモ報道発表資料: "世界初、28GHz帯5G電波の透過・反射を動的制御する透明メタサーフェス技術の実証実験に成功," Jan. 2020.
- (10) NTTドコモ報道発表資料: "メタサーフェス技術により窓ガラスの電波レンズ化に世界で初めて成功," Jan. 2021.



(左から) 来山 大祐 / 濱 優人 / 宮地 健介 / 岸山 祥久

今回紹介した技術はパートナーとの密な連携により創出されました。これからもNTTドコモR&D、NTT R&D、そしてパートナーとの連携を推進し、本技術により5G evolution & 6Gの発展に貢献していきます。

◆問い合わせ先

NTTドコモ
R&D戦略部
E-mail dtj @nttdocomo.com

5G evolution & 6G に向けた NTN 技術の研究

5G evolution & 6Gでは、空・海・宇宙を含むあらゆる場所でのユースケースを想定した「超カバレッジ拡張」が検討されています。これまでの移動通信ネットワークでは十分にカバーできなかったエリアへ高品質な通信サービスを提供するためには、GEO、LEO、およびHAPSなどを利用したNTN技術が有望です。本稿ではこれらの技術や、小型飛行機を用いた上空約3 kmでの39 GHz帯伝搬測定実験の内容について解説します。

ほかその

外園

あさい

浅井

ゆうき

悠貴

たかひろ

孝浩

きしやま

岸山

よしひさ

祥久

NTTドコモ

まえがき

第5世代移動通信システム（5G）が地方創生や地域課題解決に向けた重要技術として期待されている中、その恩恵を享受可能な通信エリアをあらゆる場所に拡張していくことが、5Gの高度化（5G evolution）および第6世代移動通信システム（6G）の時代における重要課題となります⁽¹⁾。NTTドコモは、ドローンや「空飛ぶ車」、船舶、宇宙ステーションなど、これまでの移動通信ネットワークでは十分にカバーできなかった空・海・宇宙を含むあらゆる場所への「超カバレッジ拡張^{*1}」実現をめざした研究開発に取り組んでいます。

超カバレッジ拡張の実現に向けては、衛星や高高度プラットフォーム（HAPS：High-Altitude Platform Station）^{*2}を用いた非陸上ネットワーク（NTN：Non-Terrestrial

Network）^{*3}技術に着目しています。本技術では、地理的制約を受けない衛星およびHAPSを介した通信により、山間・僻地、海上、宇宙空間までをエリアカバーすることができます。

本稿では、5G evolution & 6G実現に向けた重要課題の1つである超カバレッジ拡張について解説します。具体的には、有望なアプローチとして注目されているNTN技術の概念、HAPSによる無線システム技術のユースケースと技術課題について示し、小型飛行機を活用した電波伝搬測定にかかわる取り組み内容を解説します。

5G evolution & 6Gでめざす 超カバレッジ拡張とNTN技術

超カバレッジ拡張の実現に向けては、少なくとも数十km程度以上の長距離無線伝送を高効率に実現する技術が必要になると考えられています。

図1のように、①静止衛星（GEO：Geostationary Orbit satellite）、②低軌道衛星（LEO：Low Earth Orbit satellite）、および③HAPSの利用を

視野に入れることで、山間・僻地、海上、空、宇宙空間までカバーすることが可能になり、通信サービスをこれらの地域にも提供することができます⁽²⁾。

① GEOは、高度約3万6000 kmの軌道上にある静止衛星です。衛星から地上局アンテナ間の片道電波伝搬時間が約120 msと比較的長いものの、3～4機で地球全体をカバーし、かつ常時通信が可能であることから、現在でもモバイルバックホール^{*4}として地上ネットワークを補完しています。6G

*1 超カバレッジ拡張：基地局が移動局端末との通信を行うことができるエリアを、現在の移動通信システムがカバーしていない空・海・宇宙などを含むあらゆる場所へ拡張すること。

*2 高高度プラットフォーム（HAPS）：ソーラープレーン型の航空機や飛行船などを利用して、成層圏環境での運用が想定される空中プラットフォーム。

*3 非陸上ネットワーク（NTN）：衛星やHAPSなどの非陸上系媒体を利用して、通信エリアが地上に限定されず、空・海・宇宙などのあらゆる場所に通信エリアが拡張されたネットワーク。

*4 バックホール：移動通信ネットワークにおける、多数の無線基地局とコアネットワークとの間の高速大容量な情報伝送をサポートする固定回線を表します。

* 本特集は「NTT DOCOMOテクニカル・ジャーナル」（Vol.29 No. 2, 2021年7月）に掲載された内容を編集したものです。

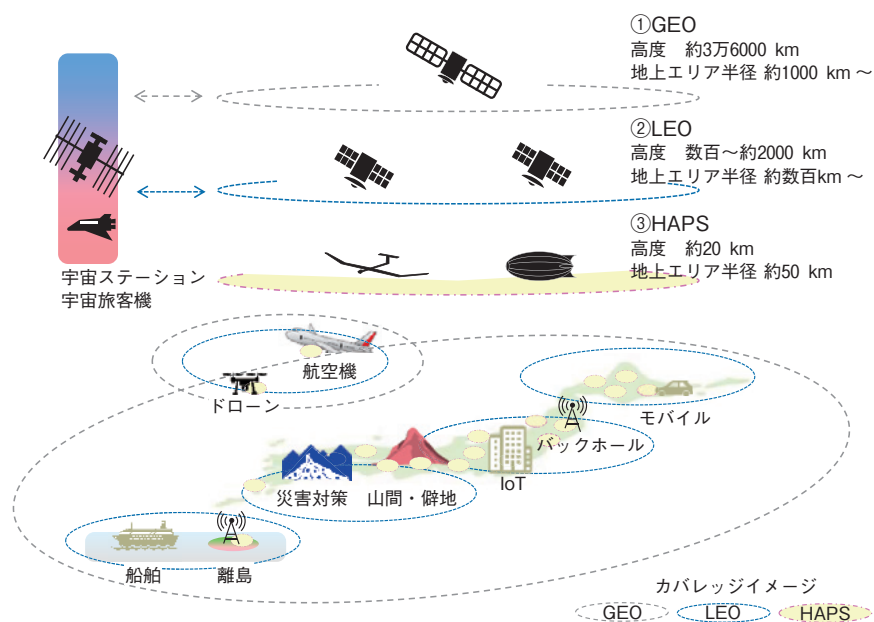


図1 衛星やHAPSを用いる空・海・宇宙へのカバレッジ拡張イメージ

時代ではさらなる大容量化が必要となることから、衛星の電力・周波数をマルチビーム間で最適化することでシステム容量を向上させる超高スループット衛星（VHTS: Very High Throughput Satellite）の実現が検討されています⁽³⁾。

② LEOは、高度数百～約2000 kmの周回軌道上にある衛星であり、GEOと比較して低高度、かつ片道電波伝搬時間が数msという低遅延の特長を活かし、現在は衛星携帯電話や衛星センシング^{*5}で利用されています。衛星製造コストの低廉化やMIMO（Multiple Input Multiple Output）^{*6}などの適用による通信容量の拡大、また将来的に複数の衛星が協調してネットワークを構成する衛星コンステレーションにより、大容量低遅延バックホールとしての利用が期待されています⁽⁴⁾。

③ HAPSは、高度約20 kmで一定の場所に常駐することができ、陸上にセル^{*7}半径約50 km以上

のカバレッジエリアを形成できることから、昨今再注目されています⁽⁵⁾。LEOと比較してさらに低高度であるため、セル半径にもよりますが片道電波伝搬時間約0.1 ms程度とさらに低遅延を実現できます。したがって、災害対策はもちろんのこと、5G evolution & 6Gで想定される多くの産業向けユースケースにも有効だと考えられます。

3GPP（Third Generation Partnership Project）では、これら衛星やHAPSを用いたNR（New Radio）^{*8}のNTNへの拡張検討が開始されています⁽⁶⁾。

HAPSのユースケースとネットワーク構成および制御技術

NTTドコモは、5G網を含む地上ネットワークとHAPSによる成層圏ネットワークが柔軟に連携できる通信方式やネットワークアーキテクチャの研究開発に取り組んでいます^{(7), (8)}。本研究開発では、今後の5G evolution & 6Gで想定される幅広いユースケー

スを柔軟にサポートすることに加えて、災害発生時の柔軟な回線制御の実現や、開発・運用コストなどの面から現実的なHAPSを活用する通信システムの実現を目的とした検討を行っています。

■HAPSのユースケース

図2に示すとおり、5G evolution & 6Gの時代に向けては、HAPSを用いて電波の中継あるいは基地局として電波を発射することで、さまざまなユースケースを実現することが期待されます。ユースケースは、バックホール用途としてサービスを提供する固定系と、端末へ直接、もしくはRepeaterやRelayを中継してサービスを提供する移動系の両方が考えられます。特に広帯域なミリ波^{*9}帯の電波を利用することで、さまざまな産業やイベントなどの用途で要求される高速大容量かつ低遅延な回線を、光ファイバなどの有線網の有無に依存せず、海上・空中・僻地など場所を選ばずタイムリーに提供することが期待されています。

HAPSシステムの要求条件はユースケースごとにさまざま、それぞれに求められる通信速度や帯域幅は異なります（図3）。固定系と移動系のあらゆるユースケースに対応できる柔軟な通信方式とシステムが望ましいです。

例えば、5G基地局へのバックホー

*5 衛星センシング：衛星に搭載している測定器によって、宇宙から大気や地表の状況を観測する技術。

*6 MIMO：同一時間、同一周波数において複数の送受信アンテナを用いて信号の伝送を行い、通信品質および周波数利用効率の向上を実現する信号技術。

*7 セル：移動通信ネットワークのサービスエリアを構成するエリア分割の単位。

*8 NR：5G向けに策定された無線方式規格。4Gと比較して高い周波数帯（例えば、6 GHz帯以下や28 GHz帯）などを活用した通信の高速化や、高度化されたIoTの実現を目的とした低遅延・高信頼な通信を可能にします。

*9 ミリ波：周波数帯域の区分の1つ。30 GHzから300 GHzの周波数であり、5Gで使用される周波数である28 GHz帯を含めて慣習的にミリ波と呼びます。

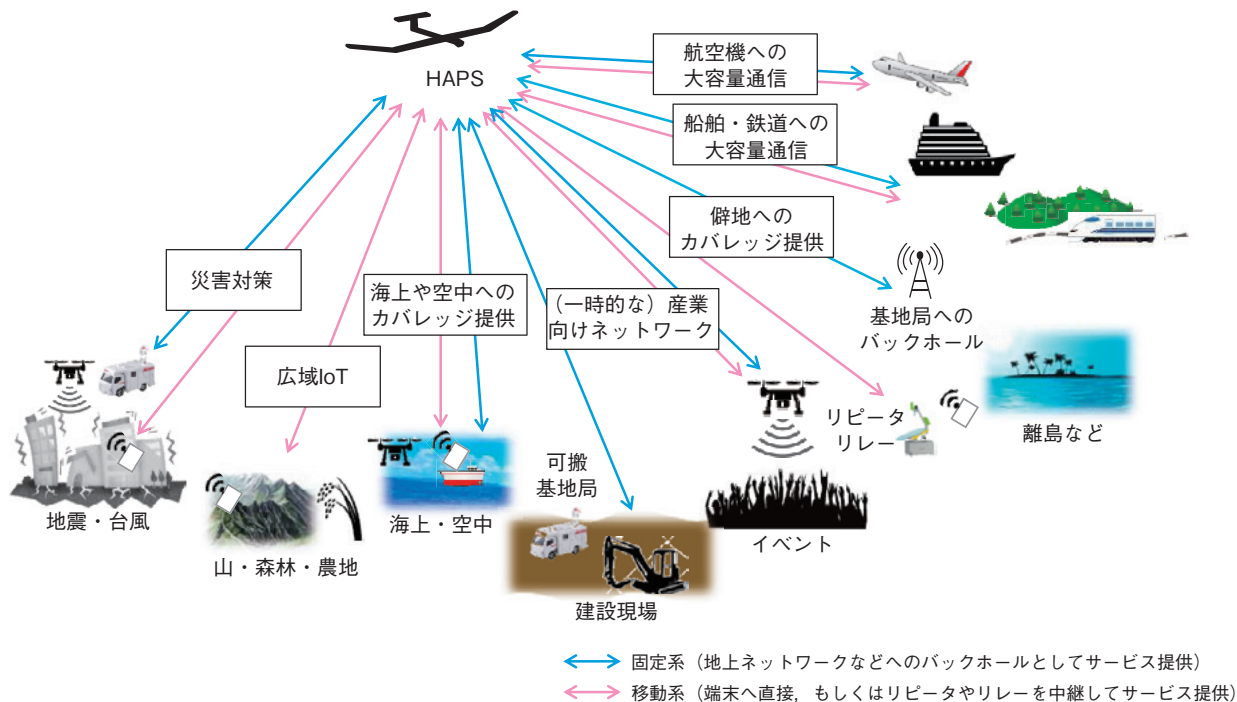


図2 HAPSで期待されるさまざまなユースケース



図3 HAPS ユースケースごとの要求条件

ル用途での通信速度は、1 サービスリンク^{*10}当り 1 Gbit/s以上が最低限必要であると考えられます。さらに複数のサービスリンクを同時提供するためには、フィードリンク^{*11}の通信速度はさらに速く（数 Gbit/s から数十 Gbit/s）、かつ可能な限り天候などの影響によらず安定している必要があります。

また、平常のビジネス用途から災害発生時のパブリックセーフティ^{*12}用

途への柔軟な回線制御も必要です。現状の災害対策は、音声通話やSMSなど最低限の通信品質を想定したのですが、将来的には災害現場における遠隔制御や映像伝送、ドローンとの通信など、ある程度高速通信が必要なユースケースも考えられます。さらに、災害対策に向けては、一部の装置が使えなくなっても動作することを想定したネットワーク構成と制御技術を検討す

ることが必要です。

■5G 網と連携したネットワーク構成と制御技術

(1) HAPS 搭載局の分類

HAPSを5G基地局へのバックホールに用いる場合のネットワーク構成と制御技術において、HAPS搭載局の分類に着目して検討を行っています。HAPS搭載局を大別すると、①中継局として地上から受信した通信信号を、必要な周波数変換などを行ったうえで地上へ折り返し送信する「中継型」と、②5G網の基地局装置もしくはその一部をHAPSへ搭載する「基地局型」に分けられます。

① 中継型の場合は、搭載装置が比較的少なく、HAPS搭載局のサイズ・重量・消費電力の制限が厳

*10 サービスリンク：NTN通信システムの中で、衛星またはHAPSと端末間の通信経路を指します。

*11 フィードリンク：NTN通信システムの中で、衛星またはHAPSと地上基地局（ゲートウェイ）間の通信経路を指します。

*12 パブリックセーフティ：防災、警察、消防、救急などの公共安全。

しい場合に有効です。

② 基地局型の場合は、アンテナ装置の搭載に加え、多くの基地局機能をHAPSへ搭載するほどHAPS側でさまざまな制御が可能になり、かつフィーダリンクの情報量を削減できます。一方、搭載機能が増えるほど搭載局のサイズ・重量・消費電力が大きくなります。一般的には、開発コストや運用面を考慮すると、より多くの基地局機能を地上ネットワーク側に配置するのが望ましいですが、HAPSに搭載することで災害の影響を受けにくいメリットもあります。また、性能面を考慮すると、HAPS搭載局側にもある程度の機能、少なくともミリ波を用いる場合はビーム制御の機能を持たせる必要があるものと考えられます。さらに、HAPS搭載局におけるサイズ・重量・消費電力、搭載局の開発・運用コスト、固定通信と移動通信でのHAPSプラットフォーム共通化、GEO/LEOとの連携など、5G網にHAPSシステムを組み込む際に考慮すべき幅広い要件を総合的に検討する必要があります。

(2) 5G 網と連携したネットワーク
構成例

5G 網と連携したネットワーク構成

における「基地局型」の一例として、O-RAN (Open RAN) ^{*13}アライアンス仕様⁽⁹⁾を参考にした5G 基地局のDU (Distributed Unit) ^{*14}とRU (Radio Unit) ^{*15}をHAPSに搭載する構成を図4に示します。この構成では、CU (Centralized Unit) ^{*16}を地上の災害に強い地点に設置することで可用性を確保し、フィードリンクにおいてHAPSがCUから受け取った情報を、サービスリンクにおいて地上の小型基地局装置(中継局)へ5G無線を介して伝送することで、有線のバックホールを使用せずに可搬5G基地局の利用が可能となります。また、この構成では中継局を介さずにHAPSから5G端末へ直接通信を提供することも可能です。さらなる拡張としては、地上側で複数のCUを用いることによって悪天候や災害発生時の影響を軽減するサイトダイバーシチ^{*17}の実現や、端末が通信のエリアを移動した際に通信先のHAPSを切り替えることでモビリティサポート^{*18}も実現できます。

図4の構成以外にも、スタンドアローン^{*19}な5G基地局をHAPSに使用する構成や、5G無線の中継装置(Repeater)をHAPSに搭載する「中継型」の構成も有力な候補として検討

しています。各構成において、モビリティサポート、サイトダイバーシチ技術および周波数共用技術^{*20}などと合わせて、GEO/LEOとの連携や装置重量・消費電力などHAPSへの搭載要件を考慮した総合的な検討が今後必要です。

小型飛行機を用いた39 GHz帯 伝搬測定実験

5G evolution & 6Gにおける上空からの通信エリア化の実現に向けて、

- *13 O-RAN：5G時代においてさまざまなサービスを効率的に提供することを目的として、オープン化とインテリジェント化された無線アクセスネットワーク。
- *14 DU：無線基地局のリアルタイムなデータリンク層制御などを行う機能部。
- *15 RU：無線基地局の無線部。
- *16 CU：無線基地局のノンリアルタイムのL2（Layer 2）機能、RRC（Radio Resource Control）機能などを実装する集約ノード。
- *17 サイトダイバーシチ：雨や障害物により電波の減衰が大きいときに、複数の地上局を切り替えることで、通信品質を向上させる技術。
- *18 モビリティサポート：端末が通信のエリアを移動した際に、通信が途切れる前に接続先の基地局を切り替えることで、通信を継続可能とする技術。
- *19 スタンドアローン：既存のLTE/LTE-AdvancedとNRをLTE-NRDCを用いて連携して運用するノンスタンドアローンに対し、NR単独で運用する形態。
- *20 周波数共用技術：2つのシステムが同じ場所でも同一周波数を利用するときに発生する干渉の影響を抑え、周波数共用を可能とする技術。本稿では、主にHAPSシステムと地上移動通信システム間の周波数共用を想定しています。

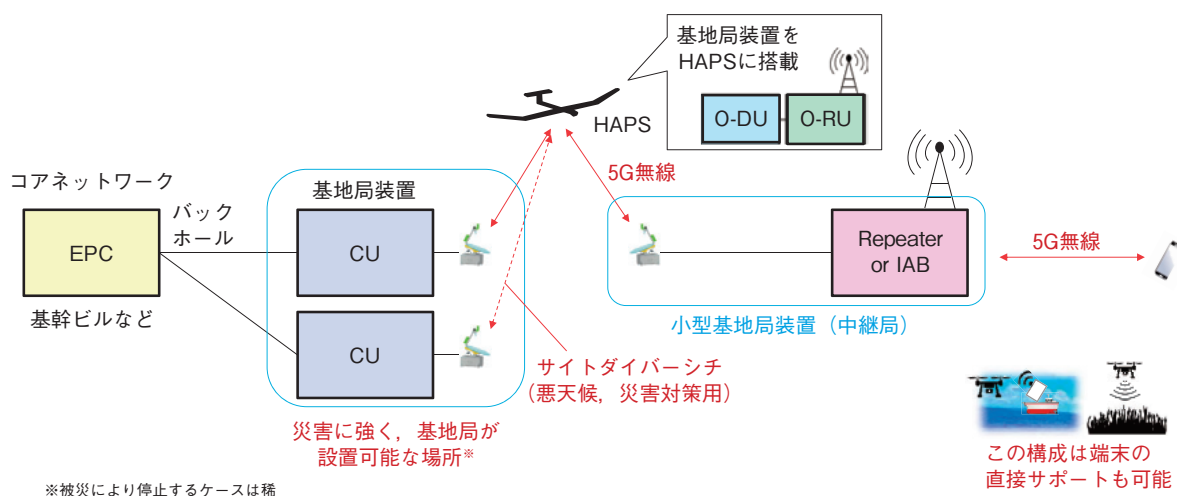


図4 HAPSをバックホールに用いる場合の連携構成例

2021年2月15～26日まで、小型飛行機を活用して、市街地（神奈川県小田原市）、山林（丹沢）、離島（伊豆大島）での電波伝搬測定の実証実験を実施しました⁽¹⁰⁾。HAPS実機を利用する前の初期実験として、地上から上空約3 km先の小型飛行機に搭載した受信装置に向けて、5Gでの高速通信に適したミリ波（39 GHz帯）、および比較のためミリ波よりも電波が飛びやすい低い周波数（2 GHz帯）を利用した電波伝搬を測定しました。市街地では建物などの障害物や反射波の影響、山林では地形や樹木の影響、離島では海上からの低い仰角や雲の影響などを測

定しました。その結果、「さまざまな環境による39 GHz帯と2 GHz帯の電波の飛びやすさ」や「飛行機の旋回が電波の飛びやすさへ与える影響」などが明らかになりました。

■測定環境と測定項目

上空伝搬測定の実験イメージを図5に示します。市街地、山林、離島を電波の送信地点とし、半径1 kmから2 kmで旋回する小型飛行機を受信地点としました。送信地点から見た小型飛行機（受信地点）への仰角は、高度20 kmで旋回するHAPSのユースケースと同等になるように決定しました。具体的には、市街地と山林のユースケー

スでは高度20 kmに対しカバレッジ半径50 kmを想定し（仰角：21.8°）、離島のユースケースでは高度20 kmに対しカバレッジ半径200 kmを想定しました（仰角：5.7～11.5°）。また、見通しの環境に加えて、図6に示すように各ユースケースにおける建物や樹木などの遮蔽物を挟むかたちで、受信電力の測定を行いました。

送信アンテナは飛行機の旋回範囲がビーム幅^{*21}以内に含まれるような製品を選定し、飛行機の旋回中心に向けて方向を固定します。一方、受信アンテナは機装フレーム内に格納され、底面には伝搬損失^{*22}がほとんど生じないように設計された厚さ3 mmのポリカーボネイト製レドーム^{*23}が接着されています。また、初期実験として、送受信アンテナは共に追尾機能を持たず、受信アンテナを飛行機の底部に固定して設置します。

■評価

(1) 概要

実験の結果、遮蔽物のない見通し環境の場合は、ほぼ机上計算と同じ最大受信感度が得られる一方で、建物や樹木を挟んだ場合は、39 GHz帯の受信電力の損失は比較的大きいことが明らかとなりました。このような遮蔽物の影響を、サイトダイバーシティなどを用いて軽減することを検討する必要があります。また、降雨がない場合においては、雲の影響は比較的小さいことが確認できました。

さらに、今回の実験では小型飛行機の位置や飛行姿勢によらず、同じ指向性パターンアンテナを用いて送受信を行ったため、飛行機の旋回の影響で

*21 ビーム幅：アンテナの最大利得から-3 dB以内の利得を持つアンテナの放射角度。

*22 伝搬損失：送信局から放射された電波の電力が受信点に到達するまでに減衰する量。

*23 レドーム：アンテナを保護する囲い。電波を透過しやすい材料でつくられています。

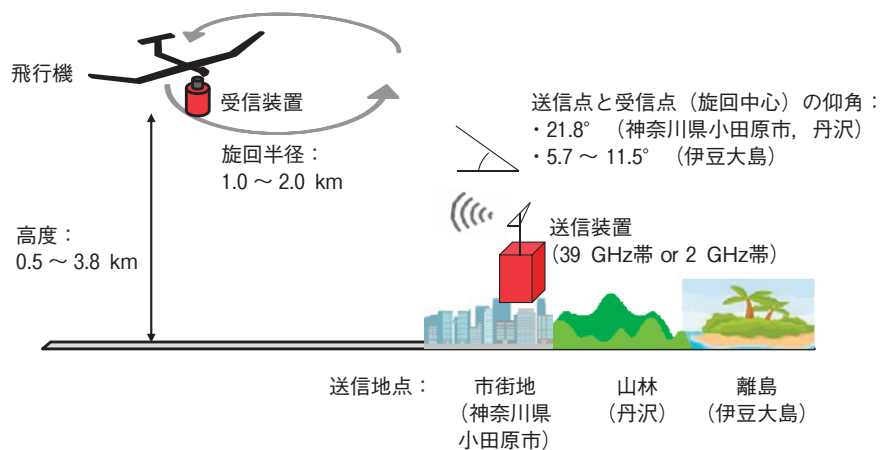


図5 上空伝搬測定の実験イメージ



(a) 市街地での実験における建物



(b) 山林での実験における樹木



(c) 山林での実験における山



(d) 離島での実験における雲

図6 さまざまな障害が存在する実験環境

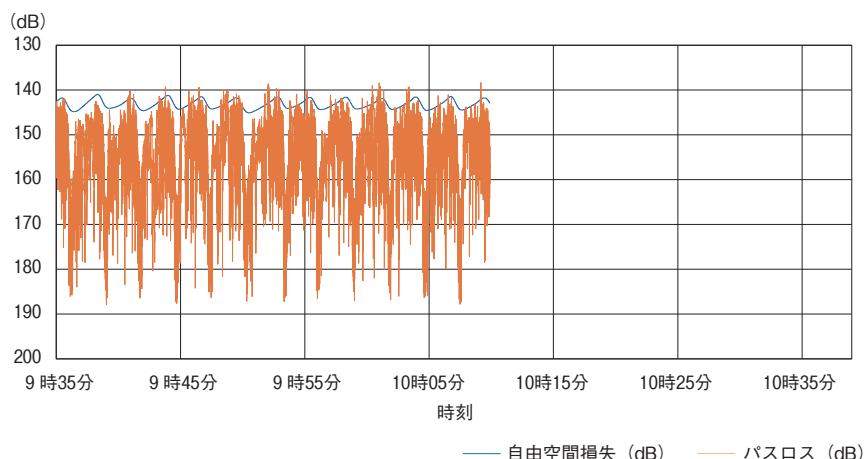


図7 神奈川県小田原市（見通し）／旋回直径2 km時における39 GHz帯の伝搬損失時系列データ

アンテナの角度が変化することにより、受信電力が大きく変化することも明らかとなりました。この実験結果により、将来のHAPS実用化に向けては、このような旋回による影響を抑えて一定の受信電力を保持する制御技術が重要であることを確認できました。

(2) 小田原における実験結果

測定結果の具体例として、市街地のユースケースを想定した実験について述べます。神奈川県小田原市の見通し環境にて、旋回直径2 kmで飛行したときのデータとして、39 GHz帯伝搬損失の時系列データを図7に示します。39 GHz帯の最大受信感度を図7の自由空間損失から計算すると、机上計算からの誤差が約1.2 dBと小さく、おおむね机上計算どおりでした。一方、時系列データは飛行機の旋回に応じ大きく変動しており、受信電力の平均値は最大値から約17 dB減少し、中央値^{*24}は約14 dB減少しています。この原因として、送受信アンテナの指向性利得の変動や偏波損^{*25}、そして機体の底

面が送信点からみて逆側を向いたときの機体自体による電波遮蔽が、大きく影響していることが考えられます。

また、建物による遮蔽環境における39 GHz帯伝搬損失は、見通し環境と比べ測定結果の平均値で約17 dB、中央値で約19 dBであり、2 GHz帯伝搬損失は、平均値で約8 dB、中央値で約9 dBで、周波数が高いほど建物による遮蔽環境における伝搬損失が高いことがいえます。

あ と が き

本稿では、5G evolution & 6Gにおける重要課題の1つである「超カバレッジ拡張」に向けた取り組みとして、NTN技術、特にHAPSのユースケースとネットワーク構成および制御技術について解説し、HAPSのユースケースを想定して実施した小型飛行機による上空電波伝搬試験の結果を示しました。今後もNTTドコモでは、超カバレッジ拡張の実現に向けたNTN技術開発、HAPSネットワーク実現に向けた技術開発、実証実験および標準化活動の推進に取り組んでいく予定です。

本研究開発の一部は、総務省「電波資源拡大のための研究開発（JPU

000254）」によって実施しています。

参考文献

- (1) https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper_6g/index.html
- (2) 鬼沢・立田・北・山下：“固定無線、衛星通信システムにおける最近の研究開発について,” 信学技報RCS2019-32, pp.53-58, May 2019.
- (3) J. Bejarano, C. Nieto, and F. Piñar: “MF-TDMA Scheduling Algorithm for Multi-Spot Beam Satellite Systems Based on Co-Channel Interference Evaluation,” IEEE Access, Vol.7, pp.4391-4399, Dec. 2018.
- (4) B. Di, H. Zhang, L. Song, Y. Li, and G.Y. Li: “Ultra-dense LEO: integrating terrestrial-satellite networks into 5G and beyond for data offloading,” IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.18, Issue 1, pp.47-62, Dec. 2018.
- (5) <https://hpsalliance.org/>
- (6) 3GPP, RP-193234: “Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN),” Dec. 2019.
- (7) 鈴木・北之園・高盛・森田・岸山・外山・三浦: “高高度プラットフォーム(HAPS)による5G網と連携した38GHz帯の無線通信システム開発—5G網の高速大容量バックホール回線に係る検討—,” 2021信学総大B-3-1, March 2021.
- (8) 外園・岸山・浅井・鈴木・北之園: “高高度プラットフォーム(HAPS)による5G網と連携した38GHz帯の無線通信システム開発—HAPSネットワーク構成と制御技術の検討—,” 2021信学総大B-3-2, March 2021.
- (9) ウメシユ・矢島・内野・奥山: “O-RANフロントホール仕様概要,” NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル, Vol.27, No.1, pp.43-55, April 2019.
- (10) NTTドコモ報道発表資料: “上空からの通信エリア化に向けた39GHz帯の電波伝搬測定実証実験,” March 2021.



(左から) 外園 悠貴 / 岸山 祥久 / 浅井 孝浩

これまでの移動通信ネットワークではカバーできなかった空・海・宇宙を含むあらゆる場所への「超カバレッジ拡張」実現に向けて、衛星やHAPSを用いたNTN技術の研究開発に取り組んでいます。

◆問い合わせ先

NTTドコモ
R&D戦略部
E-mail dtj@nttdocomo.com

*24 中央値: 有限個のデータを昇順(または降順)に並べたとき、中央に位置する値のこと。

*25 偏波損: 電波が空間を伝搬するときの電界の振動方向(偏波)によって、受信アンテナの受信電力に損失が生じること。

5Gの高度化に向けたミリ波帯 基地局連携技術による高速移動 環境での通信性能向上

現在、5Gの商用サービスが提供されていますが、将来の多様な需要に応じるためには、5Gのさらなる高度化が必要です。その検討の一環として、高速で移動する複数端末への広範囲でのミリ波帯高速通信の提供が考えられています。高速移動環境では、複数の基地局を連携させることによる広範囲でのエリア構築が必要です。さらに、複数端末との同時通信を実現するには、各端末に送信した信号がお互いに干渉しないように、干渉を抑圧する必要もあります。そこで、デジタル信号処理でビームを生成・制御するデジタルビームフォーミングを基地局に適用することで、端末間の干渉を抑圧しながら複数の基地局を連携させるミリ波帯基地局連携技術を考案し、屋外伝送実験により広範囲において高い通信速度が実現できることを明らかにしました。

おくやま

奥山

のなか

野中

たつき

達樹

のぶひで

信秀

すやま

須山

あさい

浅井

さとし

聡

たかひろ

孝浩

NTTドコモ

まえがき

第5世代移動通信システム(5G)では、6 GHz以下の周波数帯や、28 GHzといったミリ波^{*1}帯を用いた高速通信の実現が進められています。ミリ波のような高周波数帯の大きな伝搬損失^{*2}を補償するため、Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output)^{*3}を用いたビームフォーミング(BF: BeamForming)^{*4}技術が5G無線アクセス技術として研究されてきました。

NTTドコモでは、3.7、4.5、28 GHz帯を用いて5Gの商用サービスを展開しています。ここで、28 GHz帯は利用可能な帯域幅が3.7、4.5 GHz帯よりも広く、高速通信が期待できる一方で、直進性の強さや伝搬損失の大きさ

から、広いエリアにおいて安定的に高速通信を提供するうえでは技術的な課題が存在します。しかし、今後5Gのさらなる高度化を図るためには、ミリ波帯の活用が重要となります⁽¹⁾。

本稿では、デジタル信号処理によりBFを行うデジタルBFを実装した複数の28 GHz帯実験用基地局装置を利用し、高速移動する複数の端末に対して、端末間で発生する干渉を抑圧しながら、基地局を連携させることで、広範囲に高速通信を提供できることを屋外伝送実験により実証したので、その実験結果について解説します。

デジタルBFによるミリ波帯基地局 連携技術を搭載した実験装置の概要

■高速移動環境へのデジタルBFと 基地局連携の適用効果

ミリ波帯の活用による、さらなる高速通信の実現に対しては、解決すべき次のような課題があります。

- ① 同時に複数の端末と通信する(マルチユーザMIMOを実現する)ことで、基地局当りの通信速度の向上が期待できるが、端末間で発生する干渉の抑圧が必要となる。
- ② 例えば、時速100 kmで高速道路などを移動中の車両内の端末に

- *1 ミリ波：周波数帯域の区分の1つ。30 GHzから300 GHzの周波数であり、5Gで使用される28 GHz帯を含めて慣習的にミリ波と呼ばれます。
- *2 伝搬損失：送信局から放射された電波の電力が受信点に到達するまでに減衰する量。
- *3 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。
- *4 ビームフォーミング(BF)：送信信号に指向性を持たせることで、特定方向の信号電力を増加・低下させる技術。複数のアンテナ素子(RF装置)の位相制御により指向性を形成するアナログビームフォーミングと、ベースバンド部において位相制御するデジタルビームフォーミングが存在します。

* 本特集は「NTT DOCOMOテクニカル・ジャーナル」(Vol.29 No. 2, 2021年7月)に掲載された内容を編集したものです。

対して基地局が通信を行うとき、通信を広範囲に提供するためには複数基地局の連携が必要となる。

端末間干渉を抑圧する方法にはさまざまな手法があり、例えば、異なる端末への信号をそれぞれ異なるビームを用いて送信する方法があります。しかし、当然ながらビームどうしの干渉も発生するため、干渉が適切に抑圧されずとは限りません。また、ミリ波帯は伝搬損失が大きいため基地局当りのサービスエリアを狭げにくく、端末が高速移動する環境では、端末がそのエリア内に存在する時間が短くなるため、基地局の切替りが頻発します。

以上のことから、高速移動する複数端末に対して高速通信を提供するためには、端末間干渉を抑圧しつつ、基地局の切替り時においても安定して高速通信を維持していくことが重要です。そこで、本稿では、基地局の機能としてアナログ回路によるBF（アナログBF）を実装するのではなく、デジタルBFをミリ波帯で利用するMassive MIMO実験装置を開発しました。

一般的には、アナログBFの動作は、あらかじめ定められたビーム候補から利用するビームを基地局が選択します。そのため、ビーム方向の情報のみがあれば良く、装置構造を簡単化できるというメリットがある一方、電波伝搬状況に最適化されているわけではないという課題があります。

それに対してデジタルBFでは、電波伝搬状況に応じて最適なビーム形状（数や方向）を算出して通信を行います。そのため、通信品質の向上が期待できる一方で、伝搬路情報の推定が必要であり、端末が高速移動する環境では電波伝搬状況の変動が激しく、それへの追従が難しいという課題があります。ただし、デジタルBFでは、デジ

タル信号処理で実現されるため、ビームの生成・制御において、端末間の干渉抑圧を組み込むことや、複数端末が存在する環境で最適なBFを行うことも可能であり、今後、通信性能を向上していくうえでは重要な技術です。

また、基地局連携として、デジタルBFのために利用する伝搬路情報から得られる情報（受信電力や送信可能な空間多重数など）を活用し、通信に利用する基地局を瞬時に切り替える、あるいは、複数の基地局から同時に送信するといった制御を行うことで、エリア内での安定的かつ高速な通信が実現できると考えられます。

■デジタルBFの概要

デジタルBFは、アナログBFと異なり、ビームをデジタル信号処理により生成・制御します。アナログBFでは、各アンテナ素子に接続された移相器^{*5}と増幅器^{*6}を活用し、各アンテナ素子から放射される電波の重ね合わせにより、特定方向に強い電波の指向性を形成します。ただし、電波の重ね合わせであるために、ある方向のビーム形状は常に同一となります。一方、デジタルBFでは、基地局と端末間の伝搬路情報を利用し、もっとも受信電力が高くなるような重み係数を算出し、それを送信する信号にデジタル信号処理で乗算することでビームを形成します。そのため、デジタルBFでは端末が静止していたとしても、端末の周辺環境が変動した場合には、その変動に応じて最適なビームを再形成することができます。また、デジタル信号処理であるため、複数の信号のMIMO多重や、端末間の干渉抑圧も高精度に実現可能です。

ただし、デジタルBFを実現するためには、基地局と端末間の伝搬路情報を詳細に把握する必要があります。こ

の伝搬路情報は伝搬路行列から推定されます。伝搬路行列は、行数が端末のアンテナ素子数（素子数）、列数が基地局の素子数です。5Gでは基地局は超多素子アンテナとなるため、膨大なサイズの行列を推定することが求められます。加えて、端末やその周辺環境の時間変動が穏やかであれば、伝搬路情報の推定も可能であると考えられますが、高速移動環境などの時間変動が激しい場合には、推定した時点と実際に信号を送信する時点での伝搬路情報にかい離が生じ、必ずしも最適なビームを形成できずとは限りません。

そこで、推定する行列サイズを縮小しつつデジタルBFの利点を得ることを目的に、多素子アンテナであらかじめ定めた方向に複数のビームを形成しておき、その複数のビームと端末との間の伝搬路情報を推定する技術を採用しました⁽²⁾。このようにすることで、推定すべき行列のサイズを、端末素子数×基地局素子数から、端末素子数×ビーム数にまで削減することができます。端末素子数×ビーム数の行列を用いてデジタル信号処理を行うことで、全素子を利用する場合からの品質劣化を最小限にしつつ、短時間での伝搬路情報の推定、およびビーム形成・制御や端末間の干渉抑圧などのデジタル信号処理を可能とし、高速移動環境であってもデジタルBFによる伝送を実現しました。

■実験装置の概要

開発した実験装置の基地局と端末の外観を図1に示します。

基地局は、240素子のMassive MIMO

*5 移相器：アンテナにおいては、各アンテナ素子に掛けられる位相を変える回路のことを指します。

*6 増幅器：信号を増幅させる回路のことを指します。

アンテナがベースバンドユニット (BBU: BaseBand Unit)^{*7}に接続されます。このBBUにおいて、デジタルBFのウェイト計算が行われます。また、集約装置 (CU: Central Unit)^{*8}には複数のBBUが接続され、CUが複数基地局の連携における制御機能を担っています。

端末については、縦15素子のアンテナアレー^{*9}を4枚有します。4枚のうち、参照信号^{*10}の送信には2枚のみの30素子を利用しますが、受信時には4枚利用することで受信利得を向上させることが可能です。これらのアンテナアレーは無線部^{*11}を経てBBUに接続されます。

本実験装置では、端末が定期的に送

信する参照信号を活用し、基地局において伝搬路情報を推定します。その推定結果からデジタルBFウェイトの生成を行い、最大で端末当り2ストリームの信号を送信します。端末は、2ストリーム合計で最大705 Mbit/sのスループットを達成できます。また、端末は、ストリームを受信したらBBUにおいて受信フィルタ^{*12}を計算し、送信された信号を検出してスループットの測定を実施します。

ミリ波帯屋外伝送実験の概要と結果

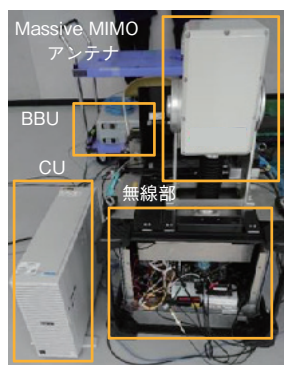
■実験環境

複数端末が高速で移動する屋外環境において、複数基地局を連携させた場

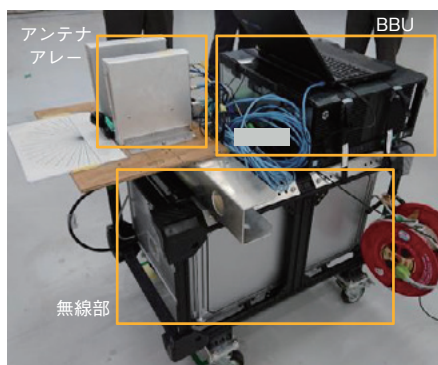
合のスループットを評価するための伝送実験を実施しました⁽³⁾。その実験模様を図2に示します。3台の基地局を利用し、各基地局はトラックの荷台部分に仮設しました。また、端末は合計2台を用い、高速移動させるため、1端末をそれぞれ1台の車両に設置しました。このとき、基地局と端末のアンテナ高はどちらも2.2 mです。

実験構成を図3に示します。2台の端末は時速90 kmで等速移動し、3台の基地局の横を通過します。3台の基地局はそれぞれ0, 200, 400 mの位置に設置しました。このとき、各端末へは2ストリームずつ送信するものとし、たとえば、さらに、各ストリームを異

- *7 ベースバンドユニット (BBU): 基地局を構成する装置の1つで、携帯端末との通信時に送受信される情報のデジタル信号処理を行う装置。
- *8 集約装置 (CU): ベースバンドユニットと接続され、無線リソース制御を行う装置。
- *9 アンテナアレー: 複数のアンテナ素子やアンテナパネルを並べて配置したアンテナ群。
- *10 参照信号: 基地局から端末に設定される既知信号。
- *11 無線部: フロントホールを介してベースバンドユニットと接続される無線装置。
- *12 受信フィルタ: MIMO通信では、複数アンテナによる送受信により複数ストリームの送信や、所望信号の受信電力向上が可能となります。一方で、複数アンテナの送受信により、複数ストリームの情報は複雑に重なり合った状態で受信されるため、その重なりを緩和し所望信号の推定を行いやすくするために使用されるフィルタのこと。



(a) 基地局



(b) 端末

図1 実験装置



図2 実験模様

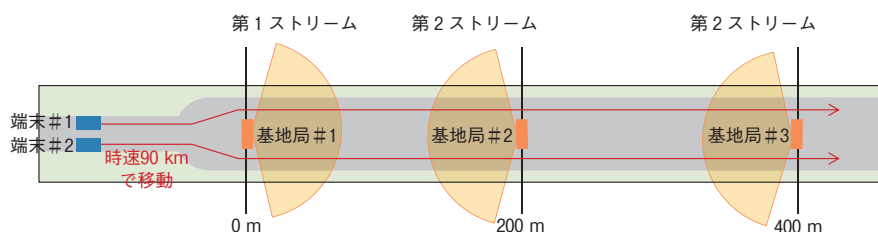


図3 実験構成

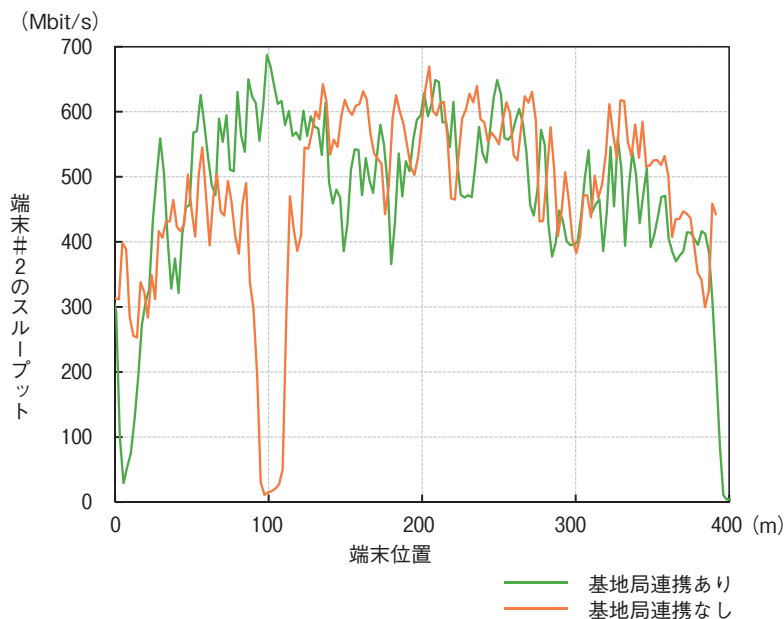


図4 基地局連携の効果

なる基地局から送信する分散MIMO技術を適用しました。具体的には、基地局#1は常に各端末の第1ストリームを送信するものとし、基地局#2と基地局#3は第2ストリームを送信します。このように複数の基地局から異なるストリームを送信することで、各基地局からの伝搬路情報の相関が下げられ、MIMO空間多重されたストリームの分離が容易になります。さらに、基地局連携技術として、基地局#2と基地局#3を高速に切り替える、あるいは、基地局#2と基地局#3から同時に送信する、という2種類の方法を実装しました。本実験では、端末が時速90 kmで高速移動したときの下りリンクスループットを評価しました。

■実験結果

(1) 基地局連携の検証実験

基地局連携の効果を確認するため、図3における基地局#2を利用しない（基地局連携しない）場合と、すべての基地局を利用する（基地局#2と基地局#3が連携する）場合とを比較しました。基地局連携の効果のみをみるため、本実験では端末#2のみを利用し、それを時速90 kmで移動させました。また、基地局#1は第1ストリームを、基地局#2あるいは基地局#3は第2ストリームをそれぞれ送信するものとし、基地局連携を行う場合は、基地局#2と基地局#3のうち、CUが伝搬路情報から通信品質を向上できると判断した基地局からストリームを

送信するものとししました。

端末位置が0～400 mにおけるスループットを図4に示します。同図から、基地局連携を行わない場合、100 mの位置で大きくスループットが劣化していますが、基地局連携を行うことで劣化させずに通信できていることが分かります。これは、基地局#2が200 mの位置に設置され、基地局連携（基地局高速切替え）を行ったことで、ある基地局の通信性能が劣化し得る環境や端末位置であっても、異なる基地局からの通信を行えた効果です。このように、基地局連携により、エリア内で広範囲に高速通信を実現できることが確認できました。

(2) 2端末多重時の基地局連携（基地局高速切替え）実験

基地局#2と基地局#3を通信品質に応じて高速に切り替えた場合の、2端末それぞれの2ストリーム合計のスループットを図5に示します。基地局#2のアンテナアレーは図3の左方向を向いているため、端末は200 m付近で基地局#2から基地局#3へ切り替えていると考えられます。そこで、200 m付近のスループットを確認すると、端末#1、端末#2のどちらの場合も、スループットの大きな劣化はみられず、比較的安定して基地局の切替えが実現できています。

以上の結果から、2台の端末が時速90 kmで高速移動する環境であっても、デジタルBFにより端末間干渉を抑圧することで2台の端末との同時通信を実現しつつ、基地局切替えによりエリア内において安定して高いスループットを達成できることが分かります。

(3) 2端末多重時の基地局連携（基地局同時送信）実験

基地局#2と基地局#3を同時送信させた場合、第2ストリームの送信に

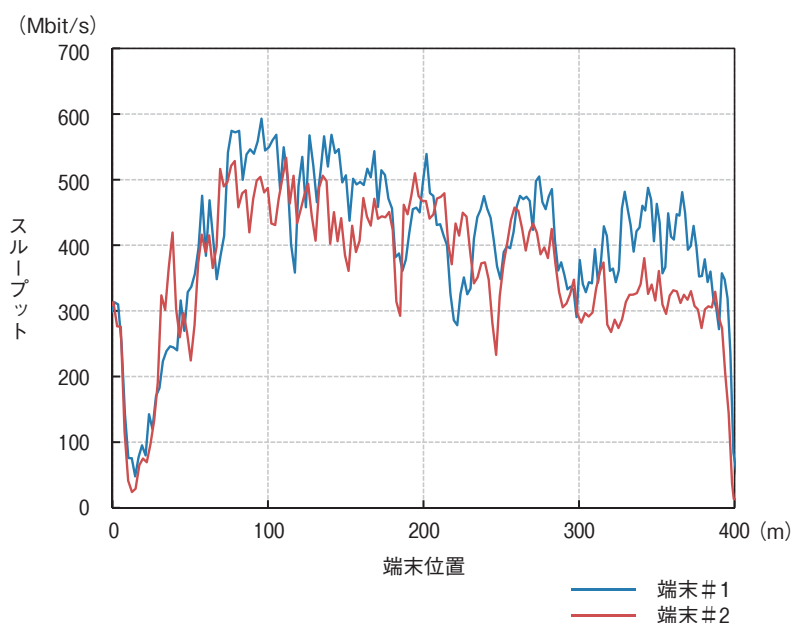


図5 時速90 kmでの基地局高速切替え時のユーザスループット

に関して、基地局#2と基地局#3が同時に同一信号を送信しているため、端末での受信電力の向上が期待できます。

測定結果から、0～200 mの範囲のスループットでは、同時送信は問題なく動作していることが確認できました。さらに、例えば0～50 m付近にかけてスループットが多少ではあるものの向上しており、これは、同時送信により受信電力が向上するとともに、周辺環境によって一方の基地局からの信号の通信品質が劣化したとしても、他方の基地局からの信号が存在するため、全体としての通信品質の劣化を抑えられたものと考えられます。ただし、50 mから200 mの位置では、スループットが高い値を維持していません。これは、本環境では見通し波が支配的ということもあり、基地局#2と基地局#3の信号が重畳されている電波が、互いに打ち消し合うような位置となることもあるためです。しかし、同時送信により高速移動環境でのスループットを安定化できていると考えられます。

以上の実験結果から、基地局連携として同時送信させる場合の有効性が実証されました。

あとがき

本稿では、5Gのさらなる高度化に向けて、ミリ波帯でのデジタルBFの適用により複数端末間の干渉抑圧を行うつつ、基地局連携技術の適用により広範囲で安定したスループットの提供をめざした研究開発について解説しました。デジタルBFによる基地局連携技術を実装したミリ波帯実験装置を開発し、屋外伝送実験により、時速90 kmで高速移動する2台の端末間の干渉を抑圧しつつ、3台の基地局を利用し、基地局間的高速切替え、あるいは、基地局の同時送信を行う基地局連携技術により、広い範囲で安定して高いスループットを提供できることを明らかにしました。今後は、さまざまな基地局の設置方法での基地局連携技術の効果を検証していく予定です。

本稿には、総務省からの委託を受けて実施した「電波資源拡大のための研

究開発 (JPJ000254)」の成果の一部が含まれています。

参考文献

- (1) https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper_6g/index.html
- (2) S. Yoshioka, S. Suyama, T. Okuyama, J. Mashino, and Y. Okumura: "Digital Beamforming Algorithm for 5G Low-SHF Band Massive MIMO," IEICE Trans. on Commun., Vol.E102-B, No.8, pp.1371-1381, August 2019.
- (3) https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/info/news_release/topics_210330_00.pdf
(実験動画 URL: <https://youtu.be/q86dRrs0rSw>)



(上段左から) 奥山 達樹 / 須山 聡
(下段左から) 野中 信秀 / 浅井 孝浩

今回紹介した内容以外にも、より一層高速で移動する複数端末への安定した通信提供に向けた技術検討や、多様な環境に応じた基地局配置の検討等が必要です。今後も研究に力をそそぎ、快適な通信環境の構築をめざしていきます。

◆問い合わせ先

NTT ドコモ
R&D戦略部
E-mail dtj@nttdocomo.com

挑戦する 研究者たち CHALLENGERS



齊藤 志郎

NTT 物性科学基礎研究所
上席特別研究員

為せば成る。研究者よ 「長期的楽観主義者」 であれ

経済・社会構造の歴史的なパラダイムシフトが起きています。こうした中、量子情報技術は将来の経済・社会に大変革をもたらす源泉、革新技術として注目を集め、日本のみならず米国、欧州、中国等、世界各国が量子技術の研究開発を国家戦略の1つに位置付けています。量子技術の発展に大きく貢献する齊藤志郎上席特別研究員に、研究活動の進捗と研究者としての姿勢を伺いました。



量子技術の発展に資する新規デバイスの研究

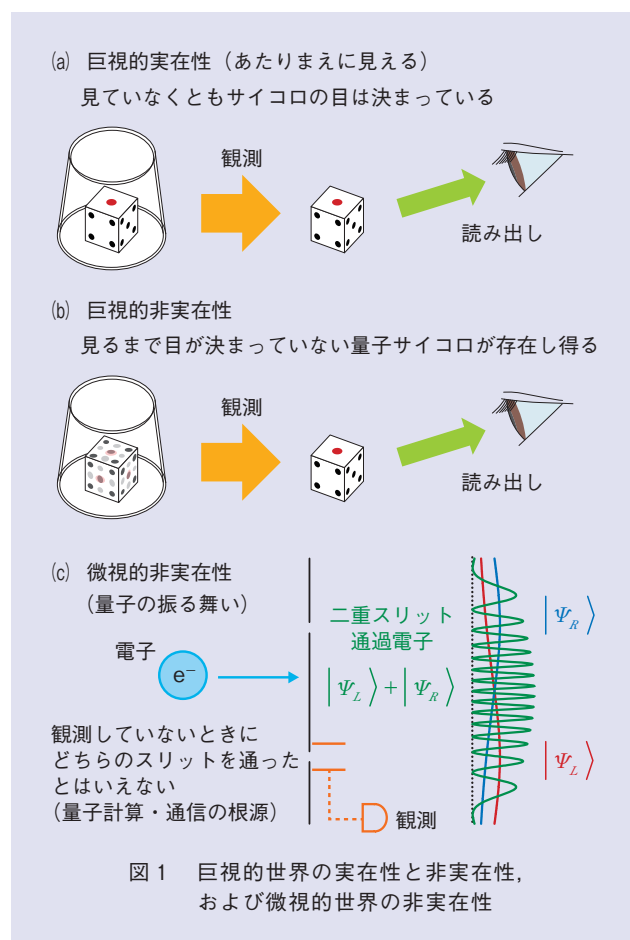
現在手掛けている研究について教えてください。

半導体デバイスからレーザー、磁気共鳴診断装置（MRI）にいたるまで、さまざまな装置には量子力学が応用されていますが、その中で私が手掛けているのは超伝導量子回路を用いた量子情報技術の研究です。量子情報技術とは、外部からのノイズに弱く寿命の短い量子状態を上手に制御し、従来技術では到達し得ない高性能な機能を実現する技術です。

これまで、量子性を持つ超伝導素子によって構成される超伝導量子回路は、量子コンピュータ実現に向け

て精力的に研究が進められてきた中で、量子状態制御技術が向上し、近年では、量子コンピュータ以外にも量子センサ等の量子デバイスへの応用も検討され始めています。

超伝導量子回路研究の原点は、「量子力学の世界で現れる非実在性が巨視的世界で現れるか」という疑問で、これを解明、実証することで、エネルギーを消費せずに超並列計算が可能となる量子コンピュータや、これまでの限界を超えた高感度のセンシングが可能な量子センサの実現につながっていきます。実在性・非実在性とは、例えばカップの中でサイコロを振ると、外からは見えなくてもサイコロの目は確定しています（実在性）が、量子の世界ではカップの中ではすべての目



の重ね合わせ状態が実現されていて、カップを開けて確認した瞬間に初めて目が決まる現象（非実在性）が存在します（図 1）。実例では、1 個の電子を飛ばして 2 つのスリットを通過させる実験を繰り返し、ある位置にあるスクリーンで測定すると、縞模様を形成するように電子が集まります（干渉縞）。これは、1 個の電子を飛ばした場合でも、それぞれのスリットを通過した電子の重ね合わせ状態が実現され、干渉効果により電子の集まる場所が決まるためです。ところが個々の電子がどちらのスリットを通過したかを測定すると、干渉縞が消えます。スリットの通過を測定した瞬間に

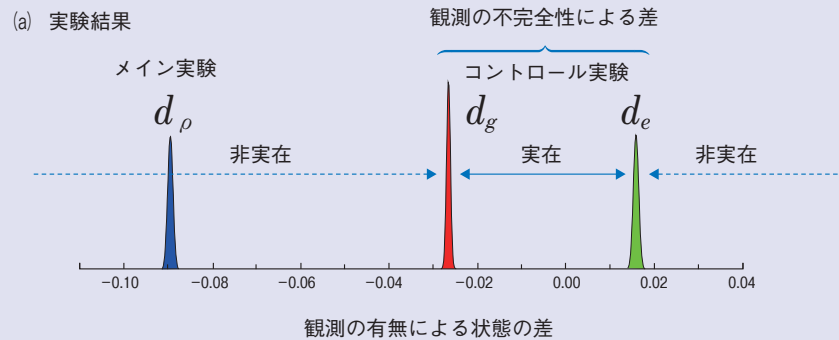
電子の飛ぶ方向が確定し、干渉縞を形成する方向へは飛んでいかないという非実在性によるものです。こうした電子や原子など nm サイズのミクロな世界においては非実在性が確認されるのですが、マクロな世界において非実在性が現れるかということが超伝導量子回路研究の原点です。

先駆的かつ世界的な成果を上げていらっしゃると伺いました。最近の成果をご紹介します。

2016年に米国イリノイ大学と共同で、超伝導磁束量子ビットを用いることによって超伝導電流における実在性の破れの実証に成功しました（図 2）。巨視的世界も量子力学に従っているのであれば非実在性が現れると考えられます。巨視的世界でも非実在性が現れるのか、それとも量子力学に適用限界があり巨視的世界では非実在性が現れないのか、という問題（巨視的実在性問題）は量子力学の黎明期からある未解決問題の 1 つでした。超伝導磁束量子ビットには 170 nA（毎秒 10^{12} 個の電子の流れに相当）の電流が流れています。今回の成果はこの電流で非実在性が現れることを示したもので、量子力学が電流状態という巨視的なスケールまで適用できることを実証したことは基礎物理分野に大きく貢献すると考えられます。また、超伝導磁束量子ビットが真の量子性を用いる量子デバイスとして働き得ることを保証します。この成果は英国科学誌『Nature Communications』オンライン版で公開されました⁽¹⁾。

そして、2019年には超伝導磁束量子ビットを用いて少数電子スピン（電子の粒が回転している状態）を含む微小体積の試料に対して分析を行える電子スピン共鳴の実証に成功しました（図 3）。

これは戦略的創造研究推進事業 チーム型研究（CREST）「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」の支援を受けた研究（超伝導量子ビットを用いた極限量子センシング）です⁽²⁾。電子スピン共鳴は物質中の電子スピンの性質を調べるための分析手法の 1 つで、分子構造



(b) 電流状態の量子重ね合わせ

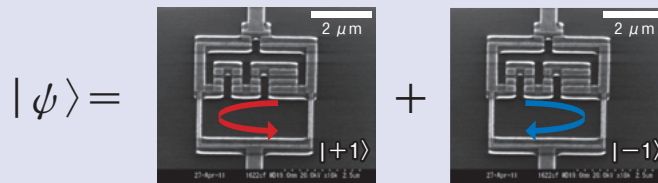
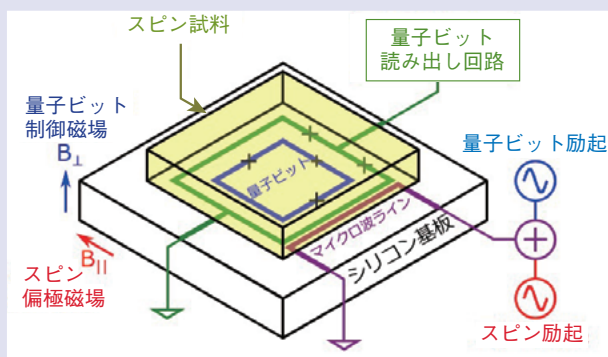
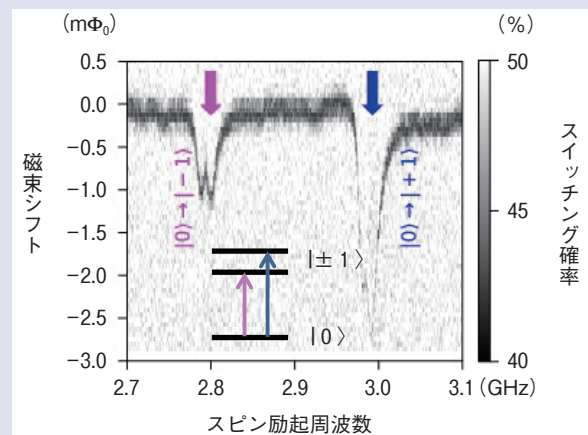


図2 実験結果と電流状態の量子重ね合わせ



(a) 磁束量子ビットを用いた局所電子スピン共鳴装置



(b) ダイヤモンド中の窒素空孔 (NV) 中心に起因する電子スピン共鳴スペクトル。挿入図はNV中心のエネルギー準位

図3 電子スピン共鳴の実証



の解析等に広く使われています。しかしながら、通常の電子スピン共鳴装置で分析を行うには 10^{13} 個程度の大量の電子スピンを含んだ試料が必要で、試料の体積も数ミリリットル必要となります。そのため、分析を行える試料には制限があります。超伝導磁束量子ビットは高感度な磁場センサとして機能します。私たちは、この磁場センサを用いて小さな磁石としての性質を持つ電子スピンを検出することで電子スピン共鳴が行えることを示しました。その結果0.05ピコリットルの試料中の400個程度の電子スピンの検出に成功しました。微小体積中に少数スピンを含む試料に対する新たな電子スピン共鳴法を開発したことは、材料分析の手法として基礎科学分野から材料評価・生体分析・医療応用まで、幅広い分野に貢献すると考えられます。この成果は2019年に英国科学誌『Communications Physics』オンライン版で公開されました⁽³⁾。その後、2020年には検出体積0.006ピコリットル、検出感度20電子スピンまで到達しています⁽⁴⁾。

また現在は、2020年12月に立ち上げたばかりの国家プロジェクト、ムーンショット型研究開発事業「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」において、「超伝導量子回路の集積化技術の開発」を進めています⁽⁵⁾、⁽⁶⁾。



原点は巨視的量子現象へのキュリオシティ

領域の広がりや充実度をどのような気持ちで眺めていらっしゃいますか。

先駆的に取り組んでいた立場から領域全体を眺めてみると、この分野の進化は急激に速まっていると感じています。はじめはこじんまりと、ゆっくりとした活動でしたが、この分野の可能性が見出されると、アカデミアや企業の研究者、そして超伝導だけではなく、多岐にわたる分野の優れた研究者がこの分野に集まってきています。高温超伝導が

流行した時期に、量子回路の研究者が一次的に高温超伝導を研究し、再び量子回路に戻って劇的に発展させるといったような、さまざまなパターンで非常に面白い流れを形成しています。

巨視的重ね合わせによる非実在性への疑問からスタートして2016年には現象論だけではなく、数学的にもこれを証明することができました。この間に量子技術が成熟して、量子分野は世間から注目を浴びる存在になりました。20年前は超伝導量子回路の研究者は数えるくらいでしたが、今ではものすごい数のグループが研究していて新しい論文が日々発表されています。ただ、論文を読んでいると欧米とのリソースの差を感じます。特に量子コンピュータ分野では米国が優勢でGoogleやIBM等が大きく投資しています。

こうした状況をかながみると、量子分野の研究において日本はタッグを組んで世界に臨まなければならないと考えます。各拠点で独自に取り組んでいては世界に取り残されてしまいますから、特筆すべき研究テーマを各拠点が担い、こうした得意分野を集結させて世界に対抗していくことが必要になります。

そして、この分野の先駆的な役割を果たしてきた私は、さらに先を行く、将来的に役立つ研究をしようと考えています。ムーンショット型プロジェクトの量子誤り訂正への参画はその一例です。海外と比較して、資金面でも人材面でもリソースはおそらく1桁は少ないかもしれませんが、新しい取り組みを魅力的にアピールし、成果をも材料にして優秀な研究者に集まっていただく絵図を描くことが私の役割だと考えています。

このような絵図を描くにあたり、私は先に挙げたCRESTやムーンショットで新しいプロジェクトに参画できたことは非常に大きな意味があると感じています。量子分野が非常にホットで魅力的なのは分かると思いますが、中でもNTTならではの魅力を示していくことが重要だと考えているからです。

加えて、この領域は今、新しい発想でどんなことができるかを考えるフェーズにあるように感じています。領域全体の発展を考えたとき、実際に研究を進めていく研究者にはあまりプレッシャーをかけず、ある程度、自由度を持たせておく必要があると感じています。そうでなければ発想も脆弱になるうえ、それがこの領域全体の発展にも影響すると思っています。

NTTに入社してから20年間、量子を追究し続ける支えとなったのは何でしょうか。

出発点は巨視的量子現象へのキュリオシティ（好奇心）です。大学時代は超伝導を研究していましたが、巨視的量子現象を追究する環境や技術がありませんでしたので、その環境や体制に憧れてNTTに入社しました。

私が好奇心に支えられてきたように、研究者にとって、その分野に何があるか分からない、こういうものが好きだから取り組むという動機は重要なのです。

例えば、私が量子分野に傾倒する一番の理由は、学生時代に、世界で初めて超伝導回路で量子重ね合わせを実証した中村泰信先生（現・東京大学）の研究に憧れたことです。巨視的な領域で重ね合わせをつくるという「不思議」に夢中でした。

現在、中村先生は日本の量子コンピュータ研究を取りまとめるお立場ですが、私も異なる角度から量子コンピュータ研究に取り組むことができるようになりました。ある時、中村先生が「特別講義で妙にいろいろ細かく聞いてくる学生がいるな」と思っていたが、実はそれが齊藤君だった」とお話しされていましたが、それくらい中村先生の研究に憧れていました。こうした思いを胸に、NTTに実習で来てくれる学生に、研究は面白い世界だと伝えることを心掛けています。

そして、研究を支えるのは「為せば成る」という考え方もかもしれません。研究者は「長期的楽観主義者」でなければやっていけないと思います。「為せば成る」と常に思い、

必ず解決できると信じて研究を進めてきましたが、入社してからしばらく成果を出せなかった時期があります。量子ビットの寿命が短くて、重ね合わせにならない状態が続いていたころです。それでも「為せば成る」、改良を続ければ寿命が延びると信じて、コツコツとサンプルや測定系の改良を続けていたときに真夜中の実験室で重ね合わせを示す振動が見えました。初めてデータを確認できたときは本当に感動しました。誰もいない体育館のような広い実験室で飛び跳ねて喜びました。こういう成功体験をすると次もできるのではないかという期待がますます大きくなると思います。



テーマを設定する際は現状分析、新方式や新規性を見出せ

研究テーマを定める際に心掛けていることを教えてくださいませんか。

私はこれまでの経験を踏まえ、新たなテーマを設定する際にはまず現状分析、そして新方式や新規性を見出せるようなテーマを検討しています。例えば自らの強みや研究領域で他の研究者の動向を把握し、自らの強みと比較して新しいものが打ち出せる方向性を検討しながら、進むべきテーマを絞り込んでいくことが重要だと思います。

研究フェーズや研究分野にもよりますが、現在の超伝導回路分野はかなり広範囲ですから、その中の各領域がどこまで進んでいるかをサーベイする必要があります。論文数もかなりの量ですからすべてを把握することは難しいかもしれませんが、それでもきちんと把握しておかなければ無駄な方向へ進んでしまう、あるいは成果を出しても評価を得られないことがありますからないがしろにはできません。

私ははじめは巨視的重ね合わせに向けてとにかく手を動かして、トライ・アンド・エラーを繰り返しながら追究していました。しかし、時間は無限にはありませんから効率的に把握するために、超伝導量子回路の分野で進んでいる



グループが出している論文をレファレンスも含め読んで、おおむねの方向性をつかむようにしています。特にレファレンスにはその分野の関係論文がほとんど集約されているので、概要を把握するのには非常に便利です。

それから、自分が興味を持つことをテーマにすることで、私が興味を持っている巨視的重ね合わせにおいては量子ビットの寿命を延ばす必要があるのですが、量子ビットの寿命が最近また延び始めたのを見て興奮している自分に「やっぱり好きなんだ」と実感しました。

このエモーショナルに気付くと同時に、正しいことや新しいことへ興味を抱けることも重要です。例えば、私はボゾニックコードという新しい方向性を模索していますが、蓄積してきた量子ビットの知見を活かして新しいシステムを構築しています。築いてきた礎はしっかりと活かし、新しいものに目を向けられる姿勢を備えることも大切にしたいです。

若い研究者の皆さんに一言お願いいたします。

若い研究者の皆さん。人とのつながりを大切にしましょう。人とつながることで新しい知識が得られ、全く異なる分野の研究者とのコラボレーションは新しい方向性を見出せることがあるからです。例えば、ムーンショットのプロ

ジェクトでボゾニックコードを実現しようと、私たちが保有している超伝導量子ビットを入れる容器（キャビティ）を開発している研究者とのコラボレーションを模索していたところ、別の研究会での立ち話をきっかけにコラボレーション先とつながることができました。

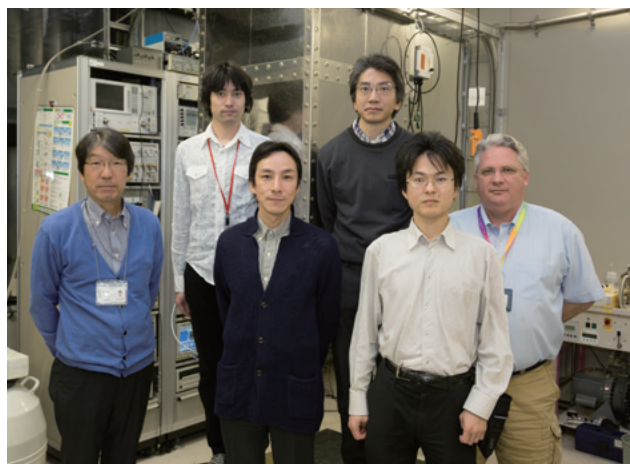
また、超伝導量子ビットのコヒーレンス時間（量子ビットに保存された量子情報が消失してしまう時間のスケール）の限界を改善するために、素材としてのダイヤモンドの利用を検討していたときに、当時の上長が会議の昼食で隣に座った研究者と何気なく始めた会話から、その方はダイヤモンドの専門家であることが分かり、その先生のアドバイスに従ったら素晴らしい成果につながったことがありました。これらの経験から、私は研究者の集まるところに顔を出すことや人とのつながりの重要性を感じています。NTTの内外を問わず、他者との交流を大切にしていきたいと思います。

それから、研究活動においては目的に縛られる必要はありません。出口はさまざまですし、いろいろなスピンアウトがあって良いと思います。研究テーマに90%ぐらいを注ぎ込み、残りの10%は全然関係ないことを考えるスタンスで臨めば幅が広がるのではないのでしょうか。

繰り返しになりますが、自分が何をしたいかを対象は関係なくアピールしましょう。日常の何気ない会話の中にもチャンスは転がっています。好奇心を胸に、自分の興味のある研究テーマを追究していきましょう。

参考文献

- (1) https://www.rd.ntt/brl/latesttopics/2016/11/latest_topics_201611042223.html
- (2) https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah28-2.html
- (3) https://www.rd.ntt/brl/latesttopics/2019/03/latest_topics_201903291915.html
- (4) R. P. Budoyo, K. Kakuyanagi, H. Toida, Y. Matsuzaki, and S. Saito: "Electron spin resonance with up to 20 spin sensitivity measured using a superconducting flux qubit," Appl. Phys. Lett., Vol. 116, No. 19, 194001, 2020.
- (5) <https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/index.html>
- (6) https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/67_yamamoto.html



挑 戦 する 研 究 開 発 者 たち CHALLENGERS



永田 聡

NTT ドコモ
6G-IOWN 推進部 担当部長



研究開発者は 「未来」の最初の種。 研究開発は未来を築く 大きなエンジンにも なり得る

NTTドコモは2020年、5G（第5世代移動通信システム）のサービスを開始しました。IoT時代において5Gはその重要な基盤としてコミュニケーションを変化させ、新たなビジネスの進展に貢献すると期待されています。5Gサービスが注目を集めている裏側で、研究開発者はすでに次世代、6Gを見据えて動き出しています。10年ごとに大きく進化しているモバイル通信ネットワークの国際標準化会議の実際と研究開発者の姿勢について5G規格の国際標準策定の立役者、永田聡担当部長に伺いました。



議長職には技術力だけでなく
人柄や信頼感等も求められる

現在の研究開発の内容から教えていただけますでしょうか。

私は5G国際標準化と6G、次世代の通信技術を中心に研究活動を展開し、3GPP(3rd Generation Partnership Project)の議長職を務めています。世界中どこでも固定電話や携帯電話、インターネット等の通信ができますが、これは、端末やネットワーク等の仕様、通信手順等に関する国際的な仕様（国際標準）があり、それに従うことで可能となります。3GPPは、こうした国際標準のうち3G以

降の国際標準策定に取り組んでいるグループで、現在約40カ国から400近い企業、団体、大学が参画しており、年間合計で延べ5万人程度の研究者、技術者が会議に参加しています。その中でも私がこれまで議長を務めたTSG-RAN WG1 (Technical Specification Group Radio Access Network Working Group 1) は規模が一番大きいグループです（図1）。会合は1カ月または2カ月に1回程度のペースで開催され、TSG-RAN WG1 の場合は年間6回程度、多いときで1回につき約700人が参加します。会議には参加者から、国際標準化に向けた課題や標準に関する技術提案等のドキュメント（寄書）が提出されます。



近年、3GPP標準化の会合に参加する人の数が増える傾向にあり、それに伴い寄書の数も増えており、一度の会合で1000件を超えるようになりました。

こうした寄書は会合の場でプレゼンテーションされ、議論の後に合意がなされることとなりますが、必ずしも参加者の利害が一致するわけではないので、それぞれの利害を調整して標準としてまとめ上げていくことが議長の大きな仕事です。

参加者や寄書の数が多くなるということは、議論の収束に労力と時間を要することになり、場合によっては標準化作業の進捗が悪くなる危険性がありますので、私は問題点・課題を会合前に洗い出し、解決策を並べ、それを会合中に参加者で共有し整理していくことで議論を取りまとめています。ほかにも、議論が堂々巡りになりつつあるときや、対立する意見について両者譲らず膠着状態にあるときには、早めに議論をストップし冷却期間を設けるとともに、論点を整理して再議論の期日を指定するなどの試行錯誤を繰り返

返しながら議論交渉を進めています。

大変なお仕事ですね。ところで議長職への選出はどのようになされているのですか。

議長職はそれぞれのグループの中で候補者をつのり選挙によって選出されます。議長職には背景となる技術力だけではなく、参加者間の利害調整を行うことも必要であるため、交渉力や調整力に加え人柄や信頼感等が求められていると感じます。

こうした信頼感、理解力、交渉力、調整力のいずれもどの場面においても重要ですが、特に、理解力は議会の前に寄書等の分類をする際に、調整力・交渉力は会議前から会議中のメール等での連絡において、常に必要となります。実際の議論の場においては、意見の対立やすれ違いを整理して、必要に応じて全く違う意見やアイデアを照らし合わせることも行いながら調整して結論を導き出すのですが、

Project Co-ordination Group (PCG)		
TSG RAN Radio Access Network	TSG SA Service & System Aspects	TSG CT Core Network & Terminals
RAN WG1 Radio Layer 1 (Physical layer)	SA WG1 Services	CT WG1 User Equipment-Core Network protocols
RAN WG2 Radio layer 2 and Radio layer 3 Radio Resource Control	SA WG2 System Architecture and Services	CT WG3 Interworking with External Networks & Policy and Charging Control
RAN WG3 UTRAN/E-UTRAN/NG-RAN architecture and related network interfaces	SA WG3 Security and Privacy	CT WG4 Core Network Protocols
RAN WG4 Radio Performance and Protocol Aspects	SA WG4 Multimedia Codecs, Systems and Services	CT WG6 Smart Card Application Aspects
RAN WG5 Mobile Terminal Conformance Testing	SA WG5 Management, Orchestration and Charging	
	SA WG6 Application Enablement and Critical Communication Applications	

図 1 3GPP の組織構成

それらが参加者の信頼に足り得る決断、行動かどうかは常に見られていると実感します。

世界各国、各社それぞれの経済圏やエコシステムにおいてさまざまな価値観、アイデアや思惑がありますから、個々の立場や背景を考慮して1つの仕組みをつくるのは困難です。これに対して本当に良いものをつくろうという熱量や熱意、情熱が議長職に求められていると思います。



大切なのは未来を予想するのではなく「つくり上げていく」というスタンス

5Gが商用化されて1年半ほどたちますが、次世代を見据えた研究開発はもう始まっているのでしょうか。

移动通信システムの場合、1Gから5Gに至るまで、約10年の周期で新しい技術が商用化されていますが、ちょうどその時期は、次の世代の技術の検討が始まる時期でもあります(図2)。私がNTTドコモに入社したときはまさにそのタイミングで、3Gの商用化とともに4Gの技術検討が立ち上がった時期でした。それから約20年、5Gが商用化されるのとはほぼ時を同じくして6Gの技術検討が始まりました。

現在、世の中は正解のない時代を迎えていると言われていたりします。技術は加速し、高度経済成長期と比べても世界における日本の立ち位置は変化しており、人々の生き方、生きがいや幸せは多様化しているのかもしれません。ある意味、全員がめざすべき1つの明確な目標がない時代に突入しているのではないかと思います。こうした状況

下において、10年かけてつくり上げる技術が、時代、未来にどれほどあっているかという難しさもあります。

私は研究開発においてユーザ目線で考えているか、自分たちがどのような社会、未来をつくり上げたいと考えているかを意識しながら検討を進めています。「未来は予想するものではなくつくり上げていくもの」というスタンスで、そのための研究開発です。

おそらく、この先もコミュニケーションに関する人々のニーズは、形は変わるかもしれませんがなくならないでしょう。少子高齢化、相対的貧困と格差、自然災害などの社会課題を見据えながら持続可能な社会、未来をつくり上げていくことが私たちの使命であると考えます。

研究開発をするうえで心掛けているユーザ目線での検討や未来・社会の価値創造を実現するために、日々どんな努力をされているのですか。

現在は自動車、医療、ロボット、宇宙、ゲーム・アニメ業界等、多様な業界の方々と各業界での課題感や各自が描きたい未来を議論する場を数多く設けるようにしています。多くの業種、業界の皆様は移动通信システムを使っていただけになりつつある一方、各業界に何が起きているのか、現場のご意見を直接伺うことの大切さを感じているからです。さらにいえば、既存の業界、業種の垣根がどんどんとなくなっており、組合せや異業種間の交流の重要性を強く感じていることも別の理由として挙げられます。

また研究開発を進めるうえで、自身がどのような視座、





考えて検討を進めているかを意識することは大切だと思います。6Gの検討では、現時点での社会に存在する課題を1つひとつ解決することで未来をあぶりだしていくforecast的な考え方と、各自の理想、究極の姿を考えながら未来を描くbackcast的な考え方の双方を考慮しながら研究開発を進めるようにしています。

こうした場でさまざまな業界の方々と話していると、未来についての強い思いを持った方々が数多くいらっしゃることを実感します。一方、技術が加速している時代において、技術によって提供されるものに対する人の恐れや不安も感じます。例えば、人がAIに支配されてしまうのではないか、ロボットに仕事を奪われてしまうのではないか、などです。技術、サービスを提供する側が、どのように人、社会に寄り添っていくか、また、技術、サービスのあり方が問われているようにも感じます。人の心や社会・未来を感じつつ、人として、大人として次世代、子どもたちにどのような未来を紡いでいくべきかを大切に考えていきたいですね。



自ら価値や意味をつくり上げられる領域であり、やるべき領域が増えている

研究開発者には、夢や理想と現実の両方を勘案できる能力が求められるのですね。

既存の業界の垣根がどんどんなくなり、組合せが求められる時代では、研究開発者、研究開発に求められるものが変化していることを感じます。異なる分野、例えば哲学、心理学、宗教、考古学などの皆様とのコミュニケーションに加え、AI、ロボット、バイオテクノロジーなど最先端の技術動向を常にトラッキングし、さまざまな業種、技術との掛け算をし続けていく感覚が大切ではないかと思います。

また、日本では研究開発者や技術者、科学者になりたいという人の数が少ないように感じる一方、GAFAM、BATHを含む企業が一国レベルの経済規模を持ち、新しいものや大きな仕組みをつくって社会を変革しています。こうした状況下において、研究開発の意義や、楽しさを発信、啓蒙していくことも必要ですし、腕の見せ所ともいえます。

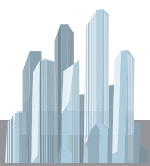
研究開発は創りたい「未来」の最初の種にもなり得るし、大きなエンジンにもなり得ます。「0」から「1」をつくり上げる、何かを生み出すことに挑戦できる意義のある仕事です。「0」から「1」を生み出すことは非常に難しいことですが、「0」が「1」になったときにものすごく心が躍りますね。そして、どんな「1」をつくったのかがとても大事です。振り返ってみると、私にとっての印象深い「0」から「1」は4G、5Gになるのかもしれませんが、非常に重い責任を感じています。なぜならば新しい技術を世に送り出した研究開発者、サービス提供者には、その理由や意義、社会的責任を問われるからです。だからこそ、ユーザ目線で研究開発をしているか、どのような社会、未来をつくり上げたいと考えているかを意識してテーマを探し、情熱を持って進めることが重要だと思います。

後進の研究開発者の皆さんに一言お願いいたします。

仕事を進めていくうえでその意義や内容に悩むことがあるかもしれませんが、研究開発は自ら価値や意味をつくり上げることができる領域だと思います。研究開発者として自身が何をしたいか、何を創り上げたいかを考えて、形にしていくことにやりがいを感じてくれたらうれしいです。

プレッシャーを感じたり、壁にぶつかることがあるかもしれませんが、そんなときには、NTTグループに集まっている世界的に優秀な研究開発者とのコミュニケーションや、全く違う業界の皆様との交流をしつつ進んでいただければと思います。

失敗なんてありません。そこで得られたものは財産になりますから、若いうちから挑戦し続け経験を重ねることに意義があると思います。NTTグループにはチャレンジできる伝統、土壤があると思います。まずは自分が研究開発者として何を感じ、どんな意義を持ち、どういう将来を描いていくかをしっかりと築き上げていくことが大切です。あとはとにかく経験していくことです。長い目でみれば失敗は大いなる財産です。失敗した数が財産になると思って自分の思いを信じ挑戦し続けてください。



石井 亮 特別研究員

音声・言語・身体動作を複合的に扱い対話の仕組みを解明。

「マルチモーダルインタラクション」の研究

IOWN構想の3つの主要技術分野の1つである「デジタルツインコンピューティング(DTC: Digital Twin Computing)」. 外面だけではなく、意識や思考などヒトの内面を含む分身をデジタル世界に構築するには、ヒトが行うコミュニケーションの仕組みの理解・モデル化が不可欠です。今回は、音声・言語・身体動作などのマルチモーダル情報を扱い、心理状態の伝達メカニズムなど人間のコミュニケーションの機序の解明をめざす石井亮特別研究員にお話を伺いました。

◆PROFILE：2008年日本電信電話株式会社入社。NTTサイバースペース研究所(2008年～2012年)、NTTコミュニケーション科学基礎研究所(2012年～2016年)、NTTメディアインテリジェンス研究所(2016年～2021年、うち2019年～2020年はカーネギーメロン大学客員研究員)、NTT人間情報研究所(2021年7月～)、NTTデジタルツインコンピューティング研究センタ(2021年1月～)に所属。



コミュニケーションは音声や身振り手振りなど複数のモダリティの相互作用により成り立っている

◆「マルチモーダルインタラクション」とはどのような研究分野なのでしょう。

人が他者と対話をするときには、声や言語だけでなく視線、表情、身振り手振りなど複数のモダリティ、すなわち「マルチモーダル情報」を発信します。それらは、複合的に利用され、人どうしで相互に影響を与えながら情報伝達を行います。このような、マルチモーダル情報を利用した相互作用を「マルチモーダルインタラクション」と呼んでいます。このインタラクションにおいて、特に重要なのは、発信されるマルチモーダル情報が統合的に扱われている点です。例えば、対話中に「ふざけるな」という発言が出てきたとします。文字だけをみると、発言者が怒っているのか冗談を言っているのかわかりません。しかし、声色や顔の表情を見てみると、声色は柔らかく、表情は満面の笑顔であれば、これは冗談を言っているのだらうということが分かります。このようなマルチモーダル情報を総合的に扱って、人の伝達する意図・メッセージの理解、これらの情報伝達の相互の伝達メカニズムの解明やモデル化を行うことが大きな研究トピックの1つです。さらにこのような認識・モデルを基盤として、人どうしのコミュニケーションの支援や、人と対話システムの円滑なコミュニケー

ションを実現することもマルチモーダルインタラクションの大きな研究トピックです。

本領域で私は、現在の心理状態を発信するための音声・言語・身体動作の表出生成メカニズムを解明しモデル化する「A) マルチモーダル表出生成」、また逆に表出された音声・言語・身体動作から送信者の心理状態を推定する「B) マルチモーダル心理状態推定」、そのような心理状態が受信者にどのように認知されたかを推定する「C) 受信者の認知状態推定」といった、マルチモーダル情報の表出・認識メカニズムを多面的に扱う研究を行っています(図1)。さらに、応用研究として、送信者の心理状態と受信者の認知状態の差異を認識して、送信者の心理状態を受信者に正しく伝達することをサポートする「D) 心理伝達支援手法」などに関する研究を行っています。

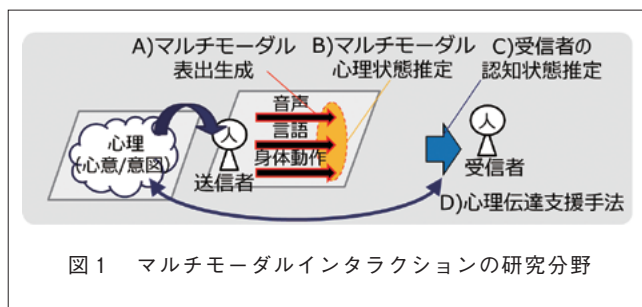


図1 マルチモーダルインタラクションの研究分野

◆具体的にはどのようなものが研究対象となるのでしょうか。

例えば、NTTコミュニケーション科学基礎研究所在籍時の私のテーマであった、「次の発話者と発話タイミングの予測」です。将来的に対話システムが、人と対話を行う中で適切なタイミングで話すためには、システムが次に誰が話すべきなのかを適時予測する必要があります。そこで、視線や頭の動き、発話前の呼吸などの人の微動作から次に誰がいつ発言するかを予測するモデルを構築しました。特に、対話中の人の呼吸動作を計測し、発話行動と関連付けて分析する研究は当時なかったため、この研究成果をまとめた論文はマルチモーダルインタラクション分野のトップ会議であるACM International Conference on Multimodal Interaction (ICMI)のベストペーパーを受賞しました。

その他、テレビ会議システムの映像を三次元化しユーザの視線や身体動作の自然なインタラクションを促進する「窓越しインタフェースMoPaCo」、話者の音声・言語から身振り手振りを自動生成する「身体動作生成技術」、対話中の音声・言語・画像情報から参加者の性格やコミュニケーションスキルなどを高精度に推定する「性格特性・スキル推定技術」、など、社内外の研究者と密に連携しながらマルチモーダルインタラクションに関連するさまざまな研究を行っています。

◆現在の課題は何でしょうか。

昨今、盛んに研究・利用されている機械学習技術を、マルチモーダルインタラクションの分野に適用して、人の伝達する意図の理解、情報伝達の相互の伝達メカニズムの解明やモデル化を行うことは有用なアプローチの1つです。機械学習技術適用においては、大量のデータ利用が前提となりますが、人のコミュニケーションを扱ううえで、シチュエーションの違い、人数、文化、人間関係、場所など、多くの要因によって大きく変わるコミュニケーション様式の多様性等によりデータ収集に多大な労力を要するといった、データ取得の困難性が大きな課題になります。

例えば、対話シーンのデータを収集する場合、まずは発言内容のデータを収集するために（前処理として音声認識技術を利用することもあります）、音声を聞きながら〇〇秒～〇〇秒まで××と発言したといった発話区間と発話言語を手書き起こすことを行います。表情、視線、身体姿勢に関しては、人画像を自動処理してある程度はデータ化できますが、モダリティによっては認識精度が十分ではないために、画像1枚1枚を手で確認しながら、例えば、「誰が誰を見ているか」を確認して視線行動をラベリングしていきます。1秒間の動画は多くの場合、30枚程度の静止画像で構成されていますから、これらを手力でやるとなると相当な時間と手間がかかります。このように、人の対話のマルチモーダル情報を含むコーパスデータ（ここでは対話研究のためのデータ群）を構築するためには多大な労力がかかるため、すべてのデータを収集できずに、ある特定のシーンの少量のデータを用いて研究を行うことしかできないことが多くあります。

現状、研究者の間では、少し大げさな表現ですが、「データが集まれば研究は7、8割がた終わり」といわれるほど、データの

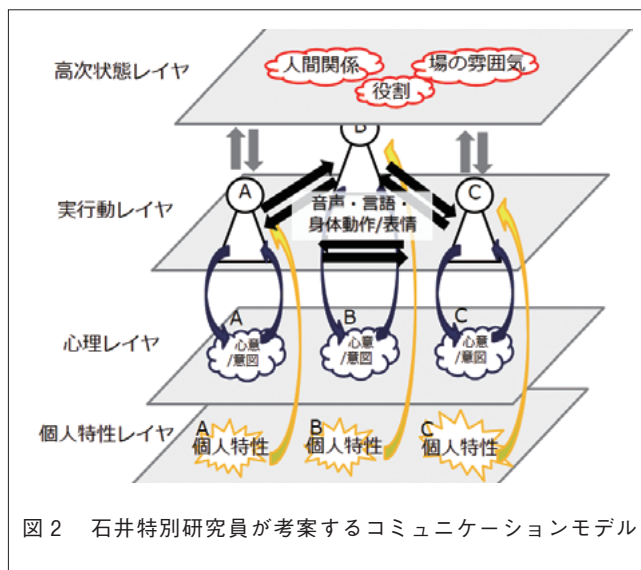
収集はとても重要で膨大なコストがかかる作業です。人の対話の大量データを効率的に集めることは大きな課題ですが、これがなされれば、この分野の研究は一気に進むものと期待しています。

コミュニケーションを取り巻く 森羅万象のモデル化をめざす

◆今後の研究の方向性について教えてください。

新たな試みとして、人間のコミュニケーションの機序を究極的に理解するために、コミュニケーションの森羅万象をモデリングする研究を推進しています。現状のコミュニケーションのモデリング技術は、人の行動を入力Xとして、人の感情、個人特性、場の状況といった1つの状態を出力Yとして定義し、その関係性のみを解明することに取り組んでいます。このような個々の研究は非常に興味深く面白い研究ですが、人のコミュニケーション全体のメカニズムの解明、モデリングという視点からみると、ごく一部の事象を切り取って扱っているにすぎません。私は、人のコミュニケーションで起きているさまざまな事象の関連性を統合的に解明、モデル化することへの取り組みを始めています。

一例ですが、人は音声・言語・身体動作といったマルチモーダル情報を実際の行動として表出（発信）するわけですが、そのような表出に至るまでには人の内部に心意・意図があるはずです。また、個人には性格、価値観といった個人特性があるはずです。さらに、対話の場において、人は人間関係や役割、雰囲気に応じて影響を受けながら、対話を施行しているはずです。図2はこのような関係性を簡易に図示した例です。ここでは、人間関係、役割、場の雰囲気などの状態を保持する「高次状態レイヤ」、音声・言語・身体動作といったマルチモーダル情報を実際の行動として発信・受信する「実行動レイヤ」、人の内部にある心意・意図「心理レイヤ」、性格、価値観といった情報を保持する「個人特性レイヤ」



イヤ」といった4つのレイヤに分けてコミュニケーションの万象をモデル化しています。

前述のとおり、実行動から次の行動を予測、実行動から個人特性や人間関係を個別に推定するといった研究は従来から多くありましたが、本来、コミュニケーションは4つのレイヤが相互に関係性を持ち統合的に動作しているモデルとして考えることができます。さらに図2はある一時刻でのコミュニケーション状態を示したのですが、このモデルは時間の経過とともに時系列に変化していくことでしょう。

こうした各レイヤどうしの相互関係性、時間変化を扱って、いわば「究極のコミュニケーションの森羅万象」をモデル化することが現在の目標です。

◆本技術によりどのようなことが可能になるのでしょうか。

究極のコミュニケーションの森羅万象モデルが実現されれば、対話の状況をシステムが高度に理解することはもちろん、将来の状況を予測・シミュレートすることができると考えています。これにより、主に3つのことが可能になると期待しています。

1番目は人のコミュニケーションのリアルタイム支援です。対話中に、例えば誰かが少し不機嫌になっていたらフォローするか、1人がずっと話していたら「〇〇さんはどう思いますか？」と話者の切り替えを試みるといったシステムによるファシリテーションを行い、場を和やかにしてコミュニケーションの促進に寄与することが実現されます。

2番目は、究極の対話システムの実現です。対話システムが、人と同様に対話相手やコミュニケーションの状況を理解して、適切にコミュニケーションを取れるような存在になります。

3番目は、人のコミュニケーション能力のトレーニングです。現在、「褒め方の上手さの推定、トレーニングを自動化する」研究に取り組んでいます。「人を褒める」ことは大切なスキルで、どう褒めてよいのか悩んでいる方も多いと思います。コミュニケーションの森羅万象モデルでは、人が対話相手を上手く褒められていたかを、対話相手の心意・意図、特性、場の状況、対話相手の特性といった多様な観点から評価することを可能にします。評価結果により、「〇〇な対話状況で、△△な性格の対話相手か

××な意図を持っているのだから、もっと□□なところを褒めてあげたほうが良い関係を構築できますよ」といったような、アドバイスをシステムが行うことで、人のコミュニケーションスキルを高めることができるアプリケーションを創出することをねらっています。

◆研究者をめざす方々へのメッセージをお願いします。

私は、めざしたいもの・実現したいものは学生時代からほとんど変わっていません。現在の研究テーマは自分のライフワークだと思っていて、かなりの思い入れがあります。やはり自分のめざしたいものを、人生をかけて取り組む、あきらめないということが大切なのではないかと思います。大学、企業、さまざまな環境で研究開発を行う機会があると思いますが、必ずしも自身が100%満足できる環境は存在しないと思います。時には、自身のめざす方向とマッチしない研究テーマに取り組まなければいけない状況も起こり得ると思います。そのような環境の中で、不平不満による研究意欲や自身の能力開発行動が消極的になってしまったとしたら、それは非常にもったいないことだと思います。今与えられている状況の中で、自身の最終目標に到達するために学べることは何か、どうしたら効率的に成果を出せるか、どうしたら自分自身の能力を活かして成功できるか、ということを一生涯考えるべきです。そして、1つひとつ結果を積み上げていくことがとても大切だと思っています。そうする中で、必ず自分自身のやりたい研究テーマを行うチャンスはめぐって来るとは思いますし、また自分自身でそういう研究テーマを立ち上げるチャンスもあるはずで

また、「人を巻き込む」ことも大切だと思います。私は現在、社外の研究者と4件の共同研究を進めていて、社外にも自身の研究を共に推進してくれる強力な仲間がたくさんいます。1人だけでやれることは非常に限られています。自身のめざすもの、実現したいものを一緒になって実現できる仲間をつくっていくことは非常に大事だと思います。

「マルチモーダルインタラクション」という研究分野は、人が好き、コミュニケーションに興味がある人に向いていると思います。マルチモーダルインタラクションは、人文学、工学の幅広い学術分野が関連する学際的な分野です。よって、1つの専門領域さえあれば、それだけで良い技術を生み出すことはできませんし、幅広い専門性が求められます。このような幅広い領域での専門性を習得するのは容易ではありません。そして、本分野はまだまだ発展途上の新しい領域です。このような分野を開拓し研究者として成功するためには、人のコミュニケーションのメカニズムを理解したい、新たなインタラクション技術で世の中を変えていきたい、という強い思いが重要だと思います。今は必ずしも専門的な知識がなかったとしても、そんな強い思いを持って研究に取り組めば、成功できる研究分野だと思っています。



(今回はリモートにてインタビューを実施しました)



ブロックチェーン技術を活用した 貿易プラットフォームTradeWaltz®により、 貿易業務のデジタルトランスフォーメーション に貢献

トレードワルツはブロックチェーン技術を活用した貿易プラットフォームTradeWaltzにより、貿易業務のデジタルトランスフォーメーションに貢献する会社だ。貿易に登場する多くのステークホルダーの思いを1つにして、日本、そしてアジアの貿易プラットフォームのデファクトスタンダードをめざす。その思いを小島裕久社長に伺った。



トレードワルツ 小島裕久社長

多岐にわたるステークホルダーとともに 貿易プラットフォームを構築

◆設立の背景と目的、事業概要について教えてください。

貿易取引に関する手続きでは、多数のプレイヤーの間で紙書類、FAX、PDF等のアナログな情報のやり取りが世界的に多い現状があります。特に日本はその傾向が強く、貿易取引に膨大な時間を要しています。世界銀行グループの調査では、2019年9月現在で日本はOECD加盟国36カ国中31位の効率性となっています。

こうした課題解決を目的に、荷主、銀行、保険、物流といった貿易業務に携わる日本の各業界のリーディングカンパニーと、ITベンダのNTTデータの計13社により、ブロックチェーン技術を活用した貿易情報連携プラットフォームの実現に向けた「貿易コンソーシアム」が2017年8月に発足しました。

貿易コンソーシアムで国内外における実証実験やプラットフォームの試行運用を重ねた後、NTTデータが事業準備会社として2020年4月に株式会社トレードワルツを設立しました。コンソーシアム参画企業のうち7社が共同出資を行い、2020年11月から事業を正式に開始しています。

トレードワルツは、貿易プラットフォーム「TradeWaltz®」を運用し、SaaS（Software as a Service）形式でお客さまに提供しています。貿易のステークホルダーである荷主、銀行、保険会社、物流会社、税関等は社内でデジタル化を進め、自社システムを持ちますが、そのシステム・データがステークホルダー間では情報連携されていませ

ん。そのため、貿易業務においては、ステークホルダー間の情報連携のため、書類のやり取りが多数発生しています。書類の大半は紙ベースであり、郵送やFAX、バイク便等で送受され、受領者は自社のシステムに転記しており、書類ミスにより、手続きが手戻ることもあります。そこで、TradeWaltzの提供するAPI（Application Programming Interface）により各社のシステムとTradeWaltzを接続し、関係書類の送受、保管をTradeWaltz上で電子的に行うことで、これらの業務の効率化を図ることができます。「やり取りされる情報の正確性はどうなるのか」という点に関しては、ブロックチェーン技術を活用することによりドキュメントの原本保証と不正改ざん防止を行うため、データを安全かつ真正に取り扱うことができ、電子帳簿保存法等の法律にも対応可能です。

◆多岐にわたるステークホルダーを取りまとめた新しい事業を行うのはあまり例がないようですが、

日本ではサービス企画のために同一業界内や少数の業界間でコンソーシアムを形成するケースはありますが、本事業を生み出した貿易コンソーシアムのような、多くの業界にまたがるコンソーシアムは日本国内ではあまり例がないと思います。

もともとの起こりは2017年ごろ、NTTデータが貿易業務全般に時間やコストがかかっていることに着目し、関連書類を電子化・連携するシステム・サービスの検討をしたところから始まりましたが、貿易関連企業に話を聞くと皆同様の課題感はあるものの、業界横断的な調整へのハードルが高く、そこがボトルネックだと分かりました。そこ

で、貿易業界では中立の立場となるNTTデータが事務局となり、貿易コンソーシアムを立ち上げ、13社の参画をいただいたところから事態が動きました。

コンソーシアムでは参画企業の貿易に関する課題をディスカッションする中で、貿易には、業界をまたがる共通課題が多くあることに気付き、課題解決方法をシステムに限らず、オペレーションや事務処理プロセスの部分まで踏み込んで検討しました。議論の中でシステム化に着手し、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)のプロジェクトへの参画を通じた実証実験や、シンガポールやタイにおける実証実験、コンソーシアム外の企業も参加する試行試験等を通して、貿易プラットフォームTradeWaltzのコア部分を開発、事業として展開を始めました。なお、母体となる貿易コンソーシアムは、現在トレードワルツが事務局となって継続しており、2021年8月現在で61団体が参画しています。

トレードワルツのように、多岐にわたる業界が協力して開発・提供しているプレイヤーは国内にいないため、貿易コンソーシアムへの参画者やTradeWaltzの利用者を増やすことで、日本のデファクトスタンダードとしての位置付けを獲得していきたいと考えています。

貿易プラットフォームの デファクトスタンダードをめざす

◆貿易は相手国があるのですが、外国の状況はどうなのでしょう。

海外にも貿易プラットフォームはあります。欧米の場合、TRADELENS、CONTOUR、MarcoPolo、we.trade等の民間主導の貿易プラットフォームがあり、金融業務、海運業務といった個別業務を対象として欧州、米国、中近東、アフリカ等広域にわたり、事業展開する傾向にあります。

アジアにおいては、シンガポールのNTP、韓国のTrade Hubのように政府主導の貿易プラットフォームがあり、すべての貿易業務コーディネーションを対象として、自国内を中心とした事業展開をする傾向にあります。昨今では日本のTradeWaltzや、TradeWaltzが立ち上げをサポートしているタイのNDTPなど民間発で、すべての貿易業務をコーディネーションするプラットフォームも出てきています。

相手国から自国までの貿易関連業務をエンド・ツー・エンドにて、貿易プラットフォーム上で処理するためには、Amazonのように単一のプラットフォーム内において全世界の処理を行うか、国や産業ごとに持つプラットフォーム間を連携してエコシステムで全世界をカバーする必要があります。貿易の場合、各国の思惑やかかわる産業プレイヤーが多様な中、単一のプラットフォームが貿易関連業務やデータを独占的に対応することは現実的に不可能だと思います。ですので、プラットフォーム間連携によるエコシステム形成が貿易完全電子化を成し遂げる有力な手立てであり、国際会議などでは「相互接続性=interoperability」という単語が流行になっています。ただし、データ項目やデータ連携・保管に関する仕様の統一など技術的課題や標準化の課題、電子書類の法的な担保などの法律的課題もあり、まだまだプラットフォーム間連携は2-3個の間での連携、あるいはPoCレベルにとどまっています。

トレードワルツとしては、既存プラットフォームとは「競争」ではなく「協業・連携」を図り、プラットフォーム不在の地域に対しては、TradeWaltzの技術提供・フランチャイズ・展開を行い、貿易エコシステムの創造に挑戦していきたいと考えています。

◆今後の展望についてお聞かせください。

まずはTradeWaltzの輸出・輸入に関する基本サービスを2021年度中に開発完了し、初期のお客さまにしっかりと価値を体感していただきたいと思っています。そのうえで、お客さまのニーズの強さや法改正の状況に合わせ、付加価値機能を順次リリースしていきます。現在も、多数の企業様にご関心をいただいておりますが、貿易コンソーシアム参画企業やサービス利用企業の輪を広げ、オールジャパンでTradeWaltzを日本の貿易プラットフォームのデファクトスタンダードとして成長させていきたいと思っています。

その先には、アジアでのプラットフォーム展開・連携によってアジアのデファクトスタンダード化を、そして有力なプラットフォームとの連携により、グローバルレベルの貿易デジタルトランスフォーメーションを実現していきたいと思っています。

貿易業務のデジタルトランスフォーメーションをめざして可能性を追求

取締役CEO室長 兼 グローバル&アライアンス事業本部長
染谷 悟 さん

◆担当されている業務について教えてください。

現在はCEO室とグローバル&アライアンス事業本部を管掌しています。

トレードワルツには、①広報や人事採用などを行うCEO室、②広報で興味を持っていたお客さま候補へのコンサルティ



染谷悟さん

ングや協業候補先との連携を行うグローバル&アライアンス事業本部、③お客さまへの営業や契約を行うマーケティング&セールス本部、④システム開発・契約先へのサービス提供を行うプロダクトカスタマーサクセス本部、⑤会社全体をサステナブルに発展させるコーポレート&戦略本部の5つの部署があります。

ここではCEO室を紹介します。CEO室は、社長の外交面での分身を担う組織として立ち上がり、社長特命という社内向けの部署横断的・特殊な仕事以外は、基本的に「トレードワルツの仲間づくりをする部署」と定義しています。

私たちが仲間にしたいのはまず1番にお客さまです。広報活動を通じ、まずは貿易業界の方々にTradeWaltzを知っていただき、興味を持っていただけたらと考えています。また、長期的にTradeWaltzを支えてくださる貿易コンソーシアムの会員企業様も大切な仲間です。会員企業様へ適宜情報提供や意見交換をさせていただく中で、貿易プラットフォームに必要な業務機能を検討しています。

そして日本や海外の政府機関も、私たちが味方につけ

たい仲間です。貿易は各種の法制度や公的機関とのかかわりが多く、それらを所管する経済産業省、財務省、法務省、国土交通省、外務省、内閣府等と連携して取り組む必要があります。また、貿易では相手国があるので、海外政府や国際標準団体との連携も必要となります。

最後に、一番身近な仲間である社員、この仲間を得るために行っていることが採用活動です。当社には親会社からの出向社員、当社が採用したプロパー社員、業務委託社員のほか、週1～5日で働く「兼業・副業」社員もいます。「兼業・副業」は採用活動の一環として募集し、当社のビジネスやビジョン等に興味を持っていただけた490名から、17名を採用しました。多様なビジネススタイル、考え方、知見を持つ方たちと当社のフルタイム社員が連携する中で、プラットフォーム展開に日々新しい示唆が提供されています。

◆ご苦労されている点を伺えますか。

一番はシステム開発だと思います。トレードワルツは幸いなことにメディア等から注目をいただき、立ち上がったばかりのスタートアップとしては、分不相応なほどお客さま候補や協業候補先からご連絡をいただいております。たくさんの方が可能性がみえてきています。一方で立ち上がったばかりの弊社リソースは有限であり、開発できるボリュームは限られています。その中で私たちがお客さまヒアリングを通じ、大多数のお客さまに喜んでもらえる最小限度の機能「MVP」は何か、基本・コア機能として自社実装すべきはどこか、開発スピードを上げるためにどのような開発体制を敷くべきか、今後付加価値機能をどの時期に、どれをリリースしていくのか、といった部分を決めていく作業は苦労しています。一通りは決まりましたが、先のスケジュールに関しては取り巻く環境の変化に応じて見直しをかけていく必要があります。今後も苦労は絶えないと思います。

◆今後の展望について教えてください。

本誌は技術をメインにしていると伺ったので、最後はAPI、ブロックチェーンに続く「IoT」の技術活用に関して展望を述べたいと思います。トレードワルツはPlug and Play Japanが主催するIoT分野のアクセラレータープログラムに京セラコミュニケーションシステム株式会

(KCCS) と共同して行うIoT実証について、2021年6月に採択されました。これはKCCSが開発する位置情報プラットフォーム「IoTトラッカー」で把握した貨物のリアルタイムの位置情報をTradeWaltzの貿易取引情報にかけ合わせるという取り組みです。皆さんもAmazonで何かを注文したときに、商品がどこの集荷所まで到着したか、通知してくれる機能を使ったことがあるかもしれませんが、あれをB2Bの貿易の世界にリアルタイム情報で持ち込むイメージです。国際物流で荷物のトレースが可能となれば、各物流事業者の契約履行状況の把握や、スマートコントラクトでの自動決済など、将来的に物流自動化の可能性が広

がります。

TradeWaltzが進める貿易完全電子化の取り組みは、実務者の手元の作業を効率化するだけでなく、その先に電子化された“データ”を起点とした新たなビジネスモデル・ユーザ体験への可能性を広げます。世界中をつなぐ貿易という大きなフィールドで、トレードワルトツはNTTグループの皆様とともに、日本発のデジタルトランスフォーメーションにチャレンジしていきたいと思います。

トレードワルトツ ア・ラ・カルト

■“一風変わった”デザイナーズオフィス

トレードワルトツは、丸の内の登記オフィスとは別に、WEEKという、1フロアを曜日単位で借りられる新しいタイプのオフィスを利用しているとのこと。コロナ禍の影響で毎日出社することが当たり前ではなくなりつつある今、同じオフィススペースを朝晩消毒しながら、曜日単位でレンタルできるシェアオフィスです。取材にお伺いすると、入口を入ったところにバーコーナーのあるラウンジ、その奥にガラス張りのオフィススペース、左側にはガラス張りの会議室があり、各所に趣向が凝らされたデザイナーズオフィスでした。屋上からは東京タワーを目の前に望むことができ、俳優さんやモデルさんの撮影が行われることもあるようです。コロナ禍で「オフィスに集まる」ことが特別になりつつある中、その時間をラグジュアリーにするという意図があるとのことでした。

■バラエティーに富む人材

トレードワルトツに集まるメンバーはバラエティーに富んでいます。種々の業界から集まる出向社員のほか、プロパー社員、派遣社員、コンサルタントはもちろんのこと、7月から集まった兼業・副業の方が多いことが特徴で、全体の約40%を占めるそうです。その方々の本業もバラエティーに富んでおり、海外の大型プラットフォーム、省庁の方、企業の経営幹部、タレント、クリエイターと多士済々で、シンガポールから参加しているメンバーもいるとか。ワークスタイルやバックグラウンドが異なる多くのメンバーのマネジメントは大変である一方で、事業に対してそれぞれ新しい視点からとらえ、考え、提案してもらえるという大きな魅力があるとのこと。兼業・副業の方の中には1～2カ月働いてみて、トレードワルトツを本業にしたいという方もいるようで、新しい採用手法の1つになるかもしれません。

■“顔を合わせなくても仕事は進む”働き方改革の推進

トレードワルトツは本業の社員もリモートワークが主体で、フレックス制、出社は週1～2回で席もフリーアドレスであり、兼業・副業のメンバーには勤務時間という概念さえないとのこと。会社設立のころは少人数で、お互いに顔を合わせていたようですが、全社員が参加する会議は週1回でリモート可能なため、7月以降で全社員が物理的に顔をそろえたことはないそうです。それでも、各自それぞれの環境で仕事を進め、リモート会議やチャットツールなどを積極的に利用することで、コミュニケーション不足を解消。コロナ禍でも安心して仕事に取り組める環境が整えられていました。

NTTデータが取り組むゼロトラスト業務環境

働き方改革やデジタルトランスフォーメーション（DX）の推進で、企業は従業員に対して場所や端末によらず業務実施可能な環境を提供する必要ができました。NTTデータでは、従来からシンクライアントを活用してセキュアな執務環境を確保してきましたが、それに加え、より快適なコミュニケーション手段や開発環境提供のため、ゼロトラスト技術を活用してセキュリティを確保したFAT環境の導入を開始しました。ここではこの取り組みについて説明します。

はじめに

現在、NTTデータグループには世界53カ国・地域、225都市、約13万3000人の社員がいます。M&Aにより急速な拡大をしており、海外従業員は全従業員の約78%に達しています。ここでは、デジタルトランスフォーメーション（DX）^{*1}・働き方改革やグローバル化というキーワードを中心に、急速なグローバル化でNTTデータが直面した課題とその対策として実施した、ゼロトラスト技術を用いたセキュアな執務環境の導入について紹介します。

^{*1} 経済産業省の「デジタルトランスフォーメーションを推進するためのガイドライン」（DX推進ガイドライン）では、「企業がビジネス環境の激しい変化に対応し、データとデジタル技術を活用して、顧客や社会のニーズを基に、製品やサービス、ビジネスモデルを変革するとともに、業務そのものや、組織、プロセス、企業文化・風土を変革し、競争上の優位性を確立すること」と定義しています。

「Digitalを活用した働き方の改革」の必要性

2021年9月1日にデジタル庁が設立され、デジタル社会の形成を図るため、行政機関をはじめとする各方面のデジタル化推進の政策が本格化しています。厚生労働省が主幹となり「働き方改革」の実現に向け、さまざまな取り組みが進められています。日本経済団体連合会は、「企業の働き方改革」を支援するさまざまな活動を行ってきました。

NTTデータグループは、M&Aを急速に拡大してきたため、海外従業員は全従業員の約78%に達しており、多様な人材が業務に携わっています。NTTデータでは、コロナ禍以前より「Digitalを活用した働き方の改革」を中期経営計画にも掲げ、どのように実現するかを検討していました。特に「いろいろな端末で」「どこからでも」を実現する、「新たな業務環境」をめざし構築を推進する必要があると考えていました（図1）。



図1 「Digitalを活用した働き方の改革」を実現させるために必要なこと

グローバルに対応したセキュリティガバナンス

M&Aにより新規にグループに参加した企業のIT環境はさまざまです。NTTデータグループ全体では、情報共有のための共通ネットワークが整備されていますが、共通ネットワークに接続する各拠点のセキュリティレベルには格差がありました。NTTデータグループ全体のセキュリティ対策レベルを調査すると、海外グループの平均値が本社水準の約半分という結果となりました。セキュリティレベルの低い拠点がサイバー攻撃の踏み台となり、グローバル全体が脅威にさらされることとなります。このため、グローバル全体のセキュリティレベルをいかに底上げしていくかが課題でした。

また、リージョンごとの法律や商習慣の違いもあります。例えば、日本流のセキュリティ対策は、アジア太平洋（APAC）にとっては過剰であり、北米・欧州連合（EU）にとっては時代遅れととらえられており、セキュリティ対策の方針統一が困難でした（表）。

NTTデータグループのガバナンスの考え方

NTTデータグループにおけるガバナンスのあり方を考えるにあたっては、サイバーセキュリティ対策の考え方と、グローバルガバナンスの両面からアプローチを行いました。

サイバー攻撃は、攻撃者側が圧倒的に有利という非対称性を持っています。脆弱性は日々新しいものが発見されており、攻撃手法も日々変化しています。クラウドサービスの活用においては特にその傾向が顕著です。こういった情勢にあって、防御側（企業）がすべての攻撃を防ぐことは不可能です。「攻撃は受けるもの」として考え、セキュリティ対策のトレンドは「防災」から「減災」へシフトしています。これまでの防御に加えて、検知および対応・復旧の対

策を如何に適切に行うかがより重要になります。NTTデータグループでもこの点を踏まえて対策を実施しました（図2）。

一方のグローバルガバナンスについては「リージョン最適型」の組織モデルを採用しました。M&Aにより拡大したグループ会社は業種も業態もさまざまであり、一方的なガバナンスの統合は困難です。商習慣の違いやGDPR（General Data Protection Regulation）等の規制への対応とグローバル経営効率化の観点から、グローバルHQ（Head Quarter：日本のNTTデータ）が策定したポリシーに基づきリージョンHQでルールを策定し、グローバルHQが監査を実施するような体制としました。また、その決定にあたっては世界各地域のグループ会社のCISO（情報セキュリティ最高責任者）が集まり、セキュリティ対策の策定や運用についてグローバルで連携を図りながら合意形成を進め、各社が納得したうえで施策を推進してきました（図3）。

グローバル全体でのセキュリティ対策の統一

グローバル全体でガバナンスを向上させるため、ソリューションの導入にあたっては以下の5点を要件としました。

- ① コスト（最重要要件はコストである）
- ② マルチテナント（会社単位で、分析を可能とする。M&Aによる会社の増減を考慮する）
- ③ 場所（グローバルで購入ができる製品であること）
- ④ 言語（グローバルでサポートが可能であること。英語は必須）
- ⑤ 機能（NTTデータが実施しているリスク分析の結果、重大リスクに該当するリスクに対して、適切な機能を持っていること）

グローバル各社の強みを活かし、海外グループ会社で導入済みの先進的なソリューションを採用し、APACへは

表 リージョンにおけるセキュリティ対策の違い

	APAC	日本	欧米
重視するポイント	コスト>セキュリティ	無停止>セキュリティ	セキュリティ>無停止
管理対象の機器数	少ない ・拠点は少数 ・管理が容易	中程度 ・拠点は多いが国内 ・人手による管理がギリギリ	多い ・拠点は複数国に渡る ・人手による管理限界を超えている
商用ネットワークと社内ネットワークの分離	混在	分離	混在

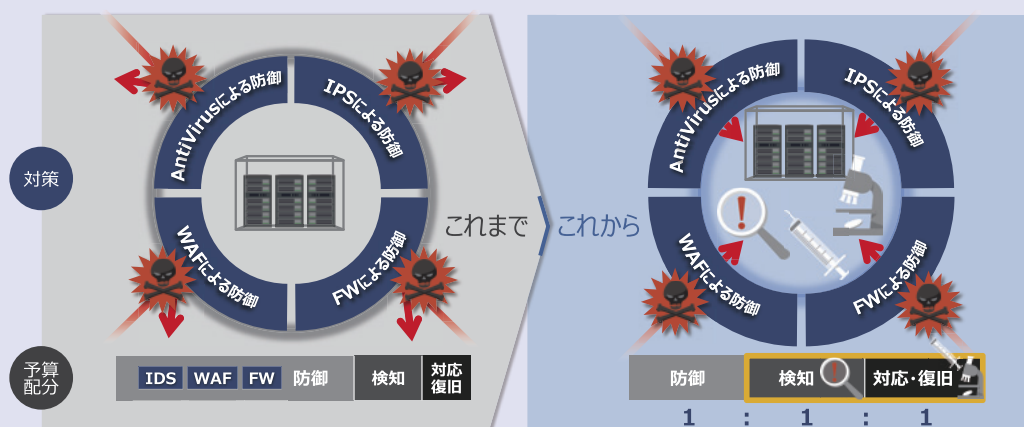


図2 今後のセキュリティ対策は「検知」「対応・復旧」がより重要に

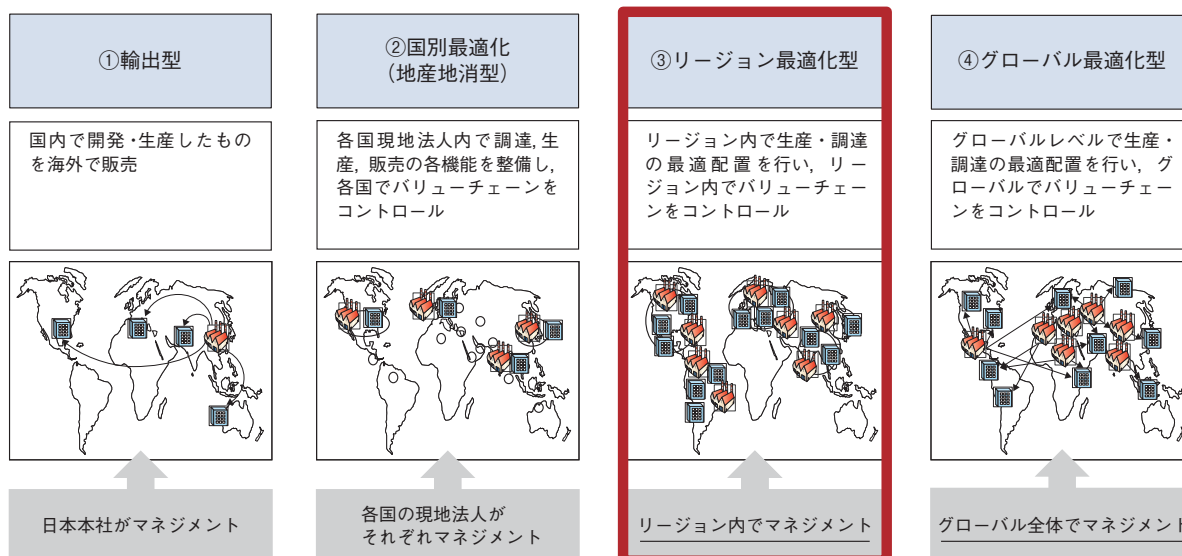


図3 グローバルビジネスの主なパターン

HQの実績・ノウハウの展開を実施するかたちで、短期間で効果的な対策の導入を進めました。実際にNTTデータグループで採用したソリューションとNIST（National Institute of Standards and Technology）のサイバーセキュリティフレームワークとのマッピングを図4に示します。

グループシナジーの創出

単にソリューションを導入するだけでは、セキュリティレベルは向上しません。並行してガバナンスの統一も必要となります。

従来は、グローバルHQが定めたルールをベースとしたガバナンスを行っていましたが、「リージョン最適化型」を実現するため、グローバルスタンダードとなるようにポリシーの見直しを実施し、グローバルセキュリティポリシー

セキュリティ技術 ラインアップ		特定 Identify	防御 Protect	検知 Detect	対応 Respond	復旧 Recover
Identity	ID管理 2要素認証	✓ okta	✓			
Cloud Proxy	暗号化通信の監視 クラウドの利用制御		✓ zscaler	✓		
Mail Security	メール詐欺対策 標的型メール対策		✓ proofpoint	✓		
EDR (Endpoint Detection and Response)	ファイルの振舞検知 端末管理の自動化	✓	✓ CROWDSTRIKE	✓	✓	✓
UEBA (User and Entity Behavior Analytics)	怪しい 振る舞いの検知			✓ exabeam	✓	
グローバル SOC/CSIRT	24時間365日の 初動対応			✓	✓	✓

図4 グローバル全体のガバナンス向上に向けた要件

はグローバル全体で共通化しました。ポリシーでは、グループ全体の保つべきセキュリティ水準を明確にし、ポリシーに基づく具体的なルールについては商習慣への対応や規制遵守のためリージョン単位で作成する方針としました。現在は、世界6カ所（Japan, China, APAC, Italy, Spain, U.S.A.）に監視体制を確立し、グローバル全体でリージョンごとに体制を整備しています。

また、グローバルでのポリシーおよび対策の統一にあたっては、コストや要員の面から、現実問題として対応が難しいグループ会社も存在しました。この問題については、HQによるライセンス一括購入（ボリュームディスカウント）によるコスト削減や、一部拠点の作業をHQで巻き取りつつ、ノウハウやテンプレートを各社に展開することで拠点負担軽減・セキュリティレベル担保を図りました。

インシデント対応レベルを統一し、共通の仕組みのうえで「対応」「復旧」手順を統一することで、グローバルで戦略的な人材・ノウハウ還流を実現し、グループシナジーを生み出しつつグローバル全体でのセキュリティの底上げをすることに成功しました。

NTTデータグループのゼロトラスト

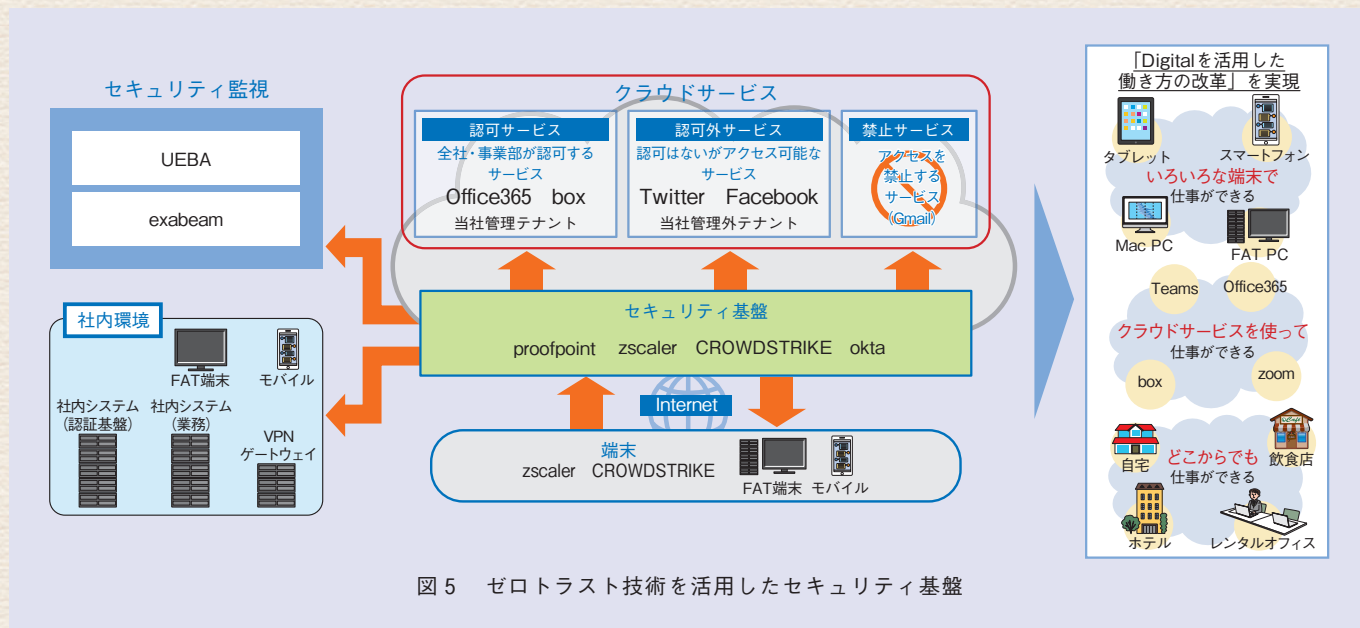
前述の施策と合わせてセキュリティ対策の管理方針を、「ルールに依存した管理」を「システムによる管理」に移行することで、さらなるガバナンス強化を実現しました。

DXの推進にあたっては、クラウドサービスなどのデジ

タル技術を活用することが前提となります。従来のNTTデータのルールでは、クラウドサービスの利用については原則禁止であり、業務上必要なケースに限り逸脱申請により許可していました。また、クラウドサービス利用に関するログ取得が不十分でセキュリティ監視が不可能なケースでは、チェックリストで逸脱がないことを本人に確認するといった性善説に立った対応を実施しており、私物PCなどからのアクセスも防ぐことが困難でした。今回の取り組みでは、クラウドプロキシやクラウド連携可能な認証サービスを活用することで、適切な利用者・端末のみアクセス許可し、クラウド利用上のログ取得も取得しながら十分な監視が可能となりました。

その他、セキュリティ基盤の効果をいくつか例示します。

- ・従業員が社内利用禁止のクラウドサービスを不正利用して機密情報を持ち出ししようとするようなケースにおいて、クラウドプロキシが未認可のサービスへの接続を遮断することで、情報漏洩を防ぐ。
- ・セキュリティ対策が適切に取られたオフィス以外ではアクセスしてはいけないクラウドサービス上の情報に対して、社外からアクセスしようとした場合でも、認証サービスにて接続元IPアドレス制限を有効にすることで接続を拒否する。
- ・攻撃者が不正取得したID/パスワードでクラウドサービスを利用しようとした場合でも、認証サービスにて二要素認証を有効化することで、従業員に成りすましたアクセスを防ぐ。



・EDRやメール対策により端末へのマルウェアの混入を防ぎつつ、仮にマルウェアに感染して端末が乗っ取られた場合でも、UEBA（User and Entity Behavior Analytics）^{*2}により通常のユーザと異なる振る舞いを検出する。

クラウド利用のためのセキュリティ技術を活用することで、端末からクラウドサービスへのアクセスに対するセキュリティ確保するセキュリティ基盤を構築しました。セキュリティ基盤を活用することで、従業員の働く場所や端末によらず適切なセキュリティを確保してクラウドサービスを利用させる「ゼロトラスト」のセキュリティ対策を実現しています。この仕組みにより、NTTデータグループはデジタル化・働き方・環境の変化との両立を実現しました（図5）。

NTTデータのノウハウをお客さまへ

NTTデータグループがグローバル全体で推進してきたゼロトラストを活用したDX化・働き方改革の取り組みについて説明しました。導入にあたってはさまざまな課題がありましたが、グループ全体で協議しながらもスピード感を持って解決してきました。

DX化・働き方改革は、当社に限らずどの企業でも直面している課題です。本取り組みのノウハウを最大限活用し、

すでにいくつかのお客さまに対して、コンサルティングやソリューション導入の支援を実施しています。また、当社が提供するBizXaaS Office[®]でもBMWS（BXO Managed Workspace）という名称でゼロトラストのセキュリティ基盤提供を開始しています⁽¹⁾。

今後も、当社グループ内に蓄積したノウハウを速やかにお客さまに活用していただけるよう、改善を進めていきます。

■参考文献

(1) <https://www.bizxaas.com/application/office/bmws/>

◆問い合わせ先

NTTデータ

技術革新統括本部 システム技術本部 セキュリティ技術部

TEL 050-5545-6976

E-mail Shusuke.Maeda@nttdata.com

^{*2} UEBA：ログ等を分析してユーザや端末などの通常の挙動を機械学習し、不正アクセスにつながる疑わしい挙動を検出する仕組み。