

# NTT 技術ジャーナル

10

OCTOBER

2025

Vol.37 No.10

## 特集

### 革新的な次世代エネルギー技術の創出 に向けた取り組み

### PSTNマイグレーションの15年の営み

——固定電話サービスの今後の安定的提供に向けたIP網への移行

トップインタビュー

上原 一郎

NTTインフラネット 代表取締役社長

グループ企業探訪

NTTアーバンソリューションズ総合研究所

from NTTドコモ

web3データの特徴をとらえたレコメンドエンジンの開発



4 トップインタビュー

## 人は宝. 社員と社会を照らし続ける トップでありたい

上原 一郎

NTTインフラネット 代表取締役社長



8 特集1

## 革新的な次世代エネルギー技術の 創出に向けた取り組み

- 10 NTT宇宙環境エネルギー研究所における次世代エネルギー研究の現状
- 13 フット・ビット連携を通じたデータセンタの再生可能エネルギー利用量最大化に向けた取り組み
- 17 雷から人や設備を守り, エネルギーを活用する落雷制御・充電技術
- 21 光の技術を駆使した宇宙太陽光発電
- 25 核融合 (フュージョンエネルギー) の実現に向けて——AIとデータサイエンスによる知の融合
- 30 主役登場 マハムド ファーハン NTT宇宙環境エネルギー研究所



32 特集2

## PSTNマイグレーションの15年の営み ——固定電話サービスの今後の 安定的提供に向けたIP網への移行

- 34 PSTNマイグレーションの営み
- 39 IP-IP接続のための新規機能開発・検証——安定切替に向けた品質向上
- 43 PSTNからのネットワーク移行・固定電話発信切替——安全な切替STEPと事前準備
- 48 電話網トラフィック制御運用方法の変革——保守・運用のシンプル化



53 挑戦する研究者たち

可児 淳一

NTTアクセスサービスシステム研究所 上席特別研究員

情報通信サービスの進化を加速する新たな光アクセスネットワークの研究でIOWN APNの発展に貢献する



特集

57 明日のトップランナー

高木 敦士

NTTコミュニケーション科学基礎研究所 特別研究員

脳の運動制御メカニズムが導き出す新たな遠隔操作ロボット技術の展望



For the Future

62 グループ企業探訪

株式会社NTTアーバンソリューションズ総合研究所

想いをかさねて未来をひらく。地域想合研究所



特別企画

66 from NTTドコモ

web3データの特徴をとらえたレコメンドエンジンの開発

挑戦する研究者たち

70 Webサイト オリジナル記事の紹介

11月号予定

編集後記

挑戦する研究開発者たち

明日のトップランナー

グループ企業探訪

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

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

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



from



NTTインフラネット  
代表取締役社長

## 上原 一郎 Ichiro Uehara

### PROFILE

1988年NTTに入社。2013年NTTネオメイト代表取締役社長、2017年NTT西日本取締役ビジネス営業本部長、NTTビジネスソリューションズ代表取締役社長、2019年7月NTT西日本代表取締役副社長を経て、2023年6月より現職。



# 人は宝。社員と社会を照らし続けるトップでありたい

情報通信インフラ関連業務をととして培った技術力とパートナーの皆様との共創を通じて、設備の老朽化、労働力不足、環境問題、災害対策など、社会のさまざまな課題に挑戦するNTTインフラネット。日本の社会インフラ全体の最適化と持続可能性に大きく貢献する取り組みに注目が集まります。新しい時代における社会インフラの構築・運用を手掛ける上原一郎NTTインフラネット代表取締役社長に事業展開とトップとしてのあり方を伺いました。

### NTTインフラネットが興す 「社会インフラ革新」

NTTインフラネットの事業とビジョンについて教えてください。

NTTインフラネットは日本における通信の地下基盤インフラを支える企業として1999年に設立され、約四半世紀にわたり事業を展開してきました。私たちはもともとNTTグループが持っているとう道や地下管路などの通信基盤を管理しています。管路のみでも、その規模は全長で約67万kmにも及び、全国の上水道の総延長並みの長さがあります。

現在、これらの通信基盤を維持・運用する技術・知見を、情報通信分野のみではなく、電力、ガス、水道など、インフラ事業者や自治体の保有する社会インフラに活用していく「ソーシャルインフラ・イノベーション」を推進しています。「ソーシャルインフラ・イノベーション」を事業として展開するにあたり、大きく2つの柱を立てました。1つはインフラエンジニアリング

事業で、無電柱化工事や再生可能エネルギー自営線構築などの社会基盤ビジネスにおいて、自治体をはじめとする道路管理者などと連携して設計、工事とこれに伴う各種調整を行います。もう1つはスマートインフラ事業で、デジタルトランスフォーメーション(DX)によってスマートメンテナンスなどのインフラ管理ビジネスや電子地図などの空間マネジメントビジネスを推進します。この2つの事業が両輪として機能していくことで、「ソーシャルインフラ・イノベーション」につながっていきます。

背景として、設備の老朽化、災害リスク、技術者不足、予算不足など、私たちも含め多くのインフラ事業者や自治体が同様の課題を抱えている現状があります。NTTインフラネットは、電力、ガス、水道などの他のインフラ事業者とのコミュニティを形成しており、私たちの基盤設備の運用・維持に関するアプリケーションやリソースのシェアリングによって、共通の課題を解決できるのではないかと考えました。そして、インフラ個々ではなく、社会インフラ全体

としての視点から考え、協業することで社会インフラの課題解決に取り組み始めたのです。

情報通信分野のインフラに関する事業はほぼ飽和状態にある中で、「ソーシャルインフラ・イノベーション」として他の分野を含んだアプローチにより、私たちの強みを活かした新たな事業展開につなげることができると考えています。

### 社会課題を担うNTTスピリットを感じる取り組みですね。順調に進んでいますか。

順調な面と苦戦している面、両方あります。順調な部分としては、「ソーシャルインフラ・イノベーション」について他の事業者や自治体から賛同を得られ、私たちのシステムやリソースのシェアリングがうまく機能し始めていることです。一方で、自治体や事業者によって設備状況・環境が異なり、取り組みがスケールしていない点やDXを推進していくうえで重要となるデータ共有が理想的なカタチにまで至っていない部分もあります。

昨今は都市開発が進み、技術開発のスピードも速くなる中で、現場では、既存のインフラをどう維持・活用していくのか、そして、新しいインフラをどのように構築するのかを検討し、最適化を図っています。例えば、インフラエンジニアリング事業の中でも近年増加している無電柱化工事において、通信や電力の既存設備を有効活用する既存ストック工法を推進することで、工期短縮やコスト削減を達成しています。また、無電柱化工事は電柱を保有する電力会社やガス管を埋設しているガス会社などのインフラ事業者のみならず、周辺住民や警察まで含めた合意調整に時間がかかるのですが、「PFI事業方式」や「包括委託方式」のスキームにより、道路管理者に代わってNTTインフラネットがこれらの調整業務を実施することで、大幅な工期短縮を実現しています。

一方、スマートインフラ事業の代表的な例として、NTTインフラネットは「立会受付Webシステム」を提供しており、多くのインフラ事業者への工事立会の申請をワンストップかつデジタルで受け付けることで、インフラ事業者や自治体の事前調査や調整協議の負担を軽減しています。これまでに60のインフラ事業者がこのシステムを利用し、月約10万件の工事立会を受け付けています。さらに、通信インフラ以外の分野でも、通信インフラを点検する「スマートメンテナンスツール」を下水道インフラに活用して点検を実施していただき、下水道の老朽化と技術者の減少への自治体の対策の1つとなっています。

また、現在、私たちは、経済産業省が中心となって推進している「デジタルライフレイン全国総合整備計画」に参画しています。その中で、「インフラ管理DX」プロジェクトは、地下構造物の位置情報を高精度3Dの絶対座標で把握するプロジェクトです。地下構造物の2次元位置情報は過去からGIS (Geographic Information System) やCADによって管理されてきているため、ある程度把握できていますが、地下構造物の3次元モデルの位置情報は整備がされていません。これを高精度に3次元化し、各種インタフェースを統一していくことで、採掘工事の際に掘削機械の操作画面に地下設備の埋設状況を視覚的に表示



することで安全性を向上させたり、災害発生時に各インフラの被害状況や復旧情報を集約し、防災アプリの画面に表示することで復旧計画の迅速化を図ることができます。こうした取り組みをとおして、暮らしやすい街の未来を築くことに私たちの技術やノウハウを活かしていきます。

### 新パーパス「新しい社会のインフラをつくり、次の時代につなぐ」

NTTインフラネットは順調に成長されていますね。社長就任から2年が経ち、手ごたえを感じていらっしゃいますか。

NTTインフラネットはここ数年、増収増益で成長しています。前述のとおり、これまで私たちの事業はNTTの情報通信に関する仕事でしたが、現在は外部の仕事、特に「ソーシャルインフラ・イノベーション」による社会貢献が主要業務となっています。すでに2年前にNTT向け事業の売上と外部向け事業の売上が逆転し、この傾向が顕著になってきました。この2年間、社員の皆さんにこの新しい方向性を理解してもらい、同じ方向を向いて進んでいくことにやりがいを感じています。

こうしたNTTインフラネットの役割の変化をとらえて、さらなる前進をめざして、パーパスの制定に取り組みました。パーパス制定にあたり、社員から意見をもらい、議論を重ねてきました。こうして制定され

た新しいパーパスが、「新しい社会のインフラをつくり、次の時代につなぐ」です。シンプルな言葉ですが、その背景にはさまざまな意味があります。

「新しい社会のインフラ」とは、いうまでもなく単なる情報通信インフラではなく、社会全体のインフラを考えることです。そして、既存のものをそのままつくり変えるのではなく、持続可能なかたちにして、未来に「つなぐ」ことが重要です。そして、インフラというとハードウェアが中心のイメージがありますが、プラットフォームやアプリケーションなどのソフトウェア面、さらには発注方法や工事方法など新しい仕事のやり方や仕組みも含んでいます。

新しいパーパスについて単に文言を共有するだけでなく、社員と一緒に言葉の意味を考え、共通の価値観を醸成していくために、全国の事業部や47都道府県にある支店を回って社員との対話会を開催し、パーパスの意味や意義について対話する機会を設けています。対話会では、現場の「リアル」も踏まえて議論しながら、既存の分野を越えた取り組みについて実例を聞くことがあります。例えば、複数のインフラ事業者にまたがる業務をワンストップで受けたり、通信インフラ点検のノウハウやシステムを他のインフラに活用したり、領域を越えた柔軟な発想による取り組みを聞くことも嬉しいですね。自治体などとの間に築いてきた信頼関係があるからこそ、領域を越えた

工夫やチャレンジができているのだと思います。

**主体性を持って仕事に臨まれる社員の活躍、嬉しいですね。社員を率いる際に大切にしていることがあれば教えてください。**

NTTインフラネットは真面目な会社だと思います。良い意味でNTTグループの設備部門ならではの特徴なのでしょうね。大規模なプロジェクトで完成までに長い期間かかることもあり、基盤系の継承されてきた技術やノウハウを活用し、真摯に仕事に向き合う社員が多いと感じています。

さて、前職のNTT西日本副社長時代は、社長という相談相手がいいましたが、社長の立場になると最終的に自分がこの会社の将来を考えなければならないという違いがあります。心のどこかで「自分が最後の砦」、最終意思決定者だという意識が強まりました。こうした実直な社員を率いていくためにも、意思決定の際には実際に仕事をしている人たちの声や考え方を重視します。特に大型プロジェクトは外部とのやり取りが多いので、お客さまの考えや、世の中がどう動いているかを踏まえて判断しています。将来的に会社をどう成長させるかという点も社長として重要なテーマで、現在の事業をベースに選択するのか、全く新たな方向性を考えるのかという難しさもありますが、

意思決定の際には「心は熱く、頭は冷静に：Cool head, but warm heart」をモットーに臨みます。志や情熱を持って取り組むことは非常に重要で、うまくいかないと思って工夫をしながら頑張っていると突破口が見つかることがあるものです。一方で、冷静に考えることも大切だと実感していますから、バランスを取りながら進めています。

**新しいプロジェクトに自ら手を挙げて養った情熱。数々の災害対応を経て知った冷静な判断力の重要性**

**情熱的であり、冷静でありたいというお考え、ご姿勢に至った経歴をお聞かせいただけますか。**

私は1988年にNTTに入社しました。ちょうど昭和の最後の年で、バブル経済期に差しかかるころでした。会社も電電公社からNTTに変わって3年という時期で、さまざまな分野で新しいチャレンジが進んでいました。私は設備分野で、光ファイバを全国に展開する仕事からスタートしました。当時はメタルケーブルによる電話サービスが中心だった時代で、光ファイバをどう導入して活用していくかという課題に取り組んでいました。そこでは、光ファイバは高速通信が可能であり、競争力があるという考えの下、NTTが設備を保有してサービ

スを提供するという設備競争を経験しました。その後、法人営業を経験し、法人や地域のお客さまとのコラボレーションが進み、さまざまなパートナーとして連携していく中で、私たちが保有する設備や人材をどう活用していただくかという視点を大切にしてきました。現在は設備関連の会社に戻ってきましたが、これらの経験を踏まえて、単独の設備を活かすというよりも、インフラ全体をどうしていくかを考えるという観点で仕事に臨んでいます。

NTT入社以来約40年の歩みにおいて、「情熱的であり、冷静である」この考えに至ったきっかけが2つあります。

1つは入社数年後に新しい技術やプロジェクトにかかわる機会があったことです。電電公社からNTTになって新しいことに挑戦する流れの中で、自らが志を持ち手を挙げて、「最新技術を活用して未来の電話局をつくるプロジェクト」や「子会社での事業推進」など新しい取り組みに臨んできたこと。もう1つは災害対応です。1995年の阪神・淡路大震災や2011年の東日本大震災、2016年の熊本地震などへの対応の中で、NTTのDNAである「サービスを復旧させ、つないでいく」という使命と、時代によって変わる社会の要請（避難所への臨時電話提供からWi-Fi提供など）を経験してきました。災害時に何をすべきか、被災されたお客さまにどう向き合うか、日常と異なる環境下で最適な判断が求められる立場を数多く経験し、情熱を持ちつつ冷静な判断力を備えておくことの大切さを実感しました。

**今後の展望や技術者へのメッセージについて教えてください。**

まずはパーパスにある「次の時代につなぐ」という視点で、設備や社会インフラ全体をつなぎながら、「ソーシャルインフラ・イノベーション」の実現に取り組んでいくことはもちろん、NTTインフラネットという会社自体が成長しながら後輩や未来につなげていくことが大切です。

そのためにも、人材育成が重要だと考えています。人は本当に宝であり、私は社長とは「社員や社会を照らす存在」だと思います。将来の進む方向を照らし、皆が頑張れるように社員を照らし、輝かせていくことが私の役割です。現場で社員の声に耳を





傾けたり、以前の会話を覚えていて声をかける、このような一見小さな行動が社員の自信や組織としての力を引き出すと信じています。トップという立場上、そういう影響力があるという自覚を持って社員や社会を照らせるよう努めていきたいです。

また、社会におけるNTTグループへの期待は非常に大きいと感じています。2030年の実現をめざして展開しているIOWN (Innovative Optical and Wireless

Network) 構想においては、その内容を体感できる大阪・関西万博のNTTパビリオンも好評です。NTTの先端技術への評価は高く、それが日本の国力や社会変革につながるという期待があるのは確かでしょう。また、インフラ事業者や自治体からの信頼感、「最後は頼りになる」と評されている自負もあります。このプレゼンスの価値は非常に大きいと思います。R&DフォーラムなどにおいてNTTの技術や取り組み

に触れていただき、研究者やスタッフが積極的にコミュニケーションを図っていくことで、先端技術への評価とともにアライアンスを組んで一緒に取り組みたいという私たちの思いも伝わっていくはずです。これからもNTTグループとしての強みを活かしながら、社員とともに挑戦し続け、社会とともに未来を創っていききたいと思います。

(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

「お久しぶりですね！今日もよろしくお願ひします！」明瞭で力強い声。初めてお会いした6年前と変わらない爽やかな笑顔で迎えてくださった上原社長。インタビュー中は視線を逸らすことなく、まっすぐに目を見てビジョンや信条を語ってくださいました。

前回と同様に、小麦色に日焼けをされていましたのでマラソンをお続けになられているのかと伺ったところ、「コロナ以降、レースへの参加が減り、毎朝に定期的にランニングや散歩など、緩やかに体を動かしています」とのこと。また、映画や演劇鑑賞もお続けだと言います。最近、鑑賞されたのは『国宝』。3時間という長編映画でも飽

きさせない作品だったと評されました。

そんな上原社長は「社員や社会を照らす」存在として日々努力を重ねていらっしゃるようです。例えば、老若男女、幅広い年齢層と円滑なコミュニケーションを図るため、特に若手を照らし、理解するためにどんなことをしていらっしゃるかと伺いました。すると「若手世代と同じくらいの息子たちに、自分の考えはこの表現で伝わるかと尋ねたりしていますね。彼らは彼らなりに、上司と同世代の私から学び取っているかもしれませんね」と、ビジネスシーンではあまり見る機会のない一面もすんなりと教えてくださいました。上原社長のフランクさや表裏のないお話ぶりに、信頼を勝ち取り、人々を安心させるあり方を学ばせていただきました。



# 革新的な次世代エネルギー技術の創出に向けた取り組み

本特集では、地球環境の再生と持続可能かつ包摂的な社会の実現に向けた革新的技術の創出に向けて、NTT宇宙環境エネルギー研究所で取り組んでいるエネルギー関連の研究開発に焦点を当て、地球環境の未来を変えるさまざまな取り組みの最新状況を紹介する。

## NTT宇宙環境エネルギー研究所における次世代エネルギー研究の現状

10

設立から5年が経過したNTT宇宙環境エネルギー研究所の最新の成果と将来展望を紹介する。

## ワット・ビット連携を通じたデータセンタの再生可能エネルギー利用量最大化に向けた取り組み

13

生成AI（人工知能）の普及により急増するデータセンタ（DC）の電力需要に対し、再生可能エネルギー（再エネ）の有効活用するための、ワット・ビット連携に関する技術の全体像などについて紹介する。

## 雷から人や設備を守り、エネルギーを活用する落雷制御・充電技術

17

通信設備を雷から守る技術を大きく発展させ、重要インフラや街への落雷そのものをなくすだけでなく、落雷させた雷をエネルギーとして活用する落雷制御・充電技術について紹介する。

エネルギー

ワット・ビット連携

落雷制御

宇宙太陽光発電

核融合(フュージョンエネルギー)

## 光の技術を駆使した宇宙太陽光発電 21

宇宙で得たエネルギーを地上へ無線で送る宇宙太陽光発電の要素技術の1つであり、エネルギーを高効率で受信し電力変換する高強度ビームエネルギー変換技術について説明する。

## 核融合（フュージョンエネルギー）の実現に向けて ——AIとデータサイエンスによる知の融合—— 25

次世代のクリーンエネルギーとして期待されている核融合の実現に不可欠な高温プラズマを精密に制御するために、AIやデータサイエンスを活用して、観測データから現在の状態を瞬時に推定する技術や数式モデルを導出する技術について紹介する。

## 主役登場 マハムド ファーハン NTT宇宙環境エネルギー研究所 30

エネルギーとICTの最適融合により持続可能な未来を切り拓く



# NTT宇宙環境エネルギー研究所における次世代エネルギー研究の現状

NTT宇宙環境エネルギー研究所は、地球環境の再生と持続可能かつ包摂的な社会の実現に向けた革新的技術の創出を目的に誕生し、設立から5年が経ちました。これまでのNTTの研究所にはない型破りな研究テーマに取り組み、具体的な成果も出始めてきました。本稿では、特にエネルギー関連技術に焦点を当て、地球環境の未来を変えるさまざまな取り組みの現状について紹介します。

キーワード：#エネルギー、#環境、#宇宙

まえだ ゆうじ こうざい まさき  
 前田 裕二 / 香西 将樹  
 いけだ たかし いわた ひでのり  
 池田 高志 / 岩下 秀徳  
 こやま あきら さくらい あつし  
 小山 晃 / 櫻井 敦

NTT宇宙環境エネルギー研究所

## はじめに

NTT宇宙環境エネルギー研究所は、従来の環境エネルギーの枠にとらわれることなく、宇宙という高い視点、広い視野で私たちの住む地球や社会環境を見つめ直し、地球環境の再生と革新に貢献することをめざし、2020年7月に新設されました。

当研究所のビジョンは次のとおりです。

「地球環境の再生と包摂的かつ持続可能な社会の実現に向け、革新的な次世代エネルギー技術としなやかな環境適応技術の創出をめざすとともに、環境負荷ゼロに貢献する」。

このビジョンを通じて実現したい具体的な社会像は、私たちの住む社会が地球環境に与える影響をプラスマイナスゼロにするのと同時に、私たち社会が地球環境の変化により受ける影響を受容できる、超レジリエントでしなやかな社会です。このような社会の実現に向け、当研究所では、圧倒的

にクリーンで高効率な次世代エネルギー技術やCO<sub>2</sub>変換技術等のサステナブルシステム技術を含む「環境負荷ゼロ技術」、ならびに地球環境および社会についての超高精度未来予測とリスク回避・低減を実現するプロアクティブな「環境適応技術」という2つの軸(図1)で、「地球の未来、宇宙(そら)から」を基本コンセプトとして研究開発に取り組んでいます。

当研究所で取り組む研究テーマは、従来のNTTの研究所にはないテーマが多いため、研究者数も発足当初は40名以下でした。このため、研究員の増強や外部の研究機関との連携強化に力を入れてきました。特に、外部アピールおよびリクルート強化を目的に立ち上げた、当研究所オリジナルのサウンドメディア“Beyond Our Planet”<sup>(1)</sup>(図2)については、積極的な新規記事の執筆を継続することで総記事数100件超、月間PV数10万超を達成し、研究所の認知拡大に大きく貢献しており、コンテンツの質も

高め外部から多くの評価をいただいています。

研究所設立から5年を迎え、継続的な人員増強および外部連携強化により、研究員は90名を超え、また40を超える外部機関との連携を通じ、研究成果も創出し始めました。本特集では、特にエネルギー関連技術に焦点を当て、その現状と今後の取り組みについて紹介します。

## 再エネ利用の最大化に向けて～ワット・ビット連携～

近年急速に普及する生成AI(人工知能)の活用は、AIの学習や推論を行うサーバ等を大量に収容するデータセンタ(DC)の消費電力を大幅に押し上げています。2024年時点での世界のDCの消費電力は約415TWhと見積もられており、これは全世界の消費電力の約1.5%に相当します。2030年にはDCの消費電力は2倍以上に増加し、約945TWh、全世界の消費電力の約3%を占めると推計されています<sup>(2)</sup>。

脱炭素社会の実現に向けては、この急増する消費電力に対して、いかに再生可能エネルギー(再エネ)を最大限に利用していくかが重要な課題となっています。日本においても2020年に宣言された「2050年カーボンニュートラル実現」を目標に、太陽光・風力を中心とする再エネの比率引き上げが進められています。しかし、再エネは天候や季節による出力変動が大きいいため、電力の需要と供給の地理的・時間的ミスマッチが生じているのが現状です。



図1 研究テーマ全体像

このため、発電量が需要を上回ると再生エネの出力制御（発電抑制）が発生し、再生エネの利用効率の低下や投資回収の難化を招いています。特に、北海道や九州など再生エネ資源が豊富な地域では、需要地との距離が長いこと大規模な送電インフラ整備が必要となりますが、コストや工期、環境影響の面で制約が大きいという問題があります。

このような状況において、AI普及で急増するDC需要を背景に、電力（ワット）と通信（ビット）を一体で整備・運用し、経済成長と脱炭素を同時に実現するための政策コンセプトが「ワット・ビット連携」です。経産省と総務省は、DC需要拡大と通信トラフィック増に対応しつつ、膨大な電力を要するDCの迅速整備を進めるには、電力・通信・DC事業者が連携して適地を選定し、インフラを効率的に整える必要があるとの認識から、両省は2025年3月に「ワット・ビット連携官民懇談会」を立ち上げ、官民の関係者による議論の末、6月に「取りまとめ1.0」を公表しています<sup>(3)</sup>。

取りまとめでは、大きく「足元のDC需要への対応」、「新たなDC集積地点の実現」、「DC地方分散・高度化の推進」の3つに分けて取り組みを整理しています。当研究所ではその3番目のDC地方分散・高度化の推進を支える技術として、地域の発電状況に応じたDC処理負荷の分散制御技術や再生エネ導入量に応じた新設DCの配置最適化

技術に取り組んでいます。本特集記事『ワット・ビット連携を通じたデータセンタの再生可能エネルギー利用率最大化に向けた取り組み』でその詳細を紹介します。

### 災いを恵みに～雷制御・充電技術～

雷は人々の生活に大きな被害をもたらしてきました。NTTグループでも通信設備をはじめ膨大な設備で落雷による故障が多く発生しています。長期にわたる落雷対策研究の成果が通信ビルや通信設備に施されていますが、現状でも雷被害はなくなっていません。そこで、当研究所は従来の落雷被害対策から方向転換し、落雷そのものを抑制する落雷制御技術の実現をめざしています。

従来の雷対策としては、避雷針を用いる手法が広く使われていますが、避雷針によって雷を受ける範囲は限定的であり、また、風力発電の風車や屋外のイベント会場といった避雷針を設置すること自体が困難なケースも存在します。そこで、当研究所では近年発展の著しいドローンを用いて、避雷針の代わりにドローンを利用するドローン誘雷についての研究を進めています。

誘雷とは、雷雲下で意図的に雷を誘発し、安全な場所へ誘導するもので、これにより重要設備や都市への落雷を防ぐことを目的としています。誘雷ドローン研究の中核は、

雷直撃にも耐える耐雷ドローンと、電界変動を利用して雷を誘発する技術であり、耐雷ドローンは軽量アルミ製のケージで雷電流を本体から迂回させ、雷を模擬した人工雷でも故障しない性能を確認しています。また、ドローンと地上をワイヤで接続しスイッチ操作で電界分布を変化させることで、雷を誘発する誘雷技術の研究も行っています。

ドローンによる誘雷が実現可能であることを実証するため、2021年の冬から冬季雷の多い地域で自然雷を補足する実験を繰り返し行い、4年目の2024年12月13日、ついに島根県で世界初のドローンによる意図的な雷の誘発に成功しました。2025年4月18日に報道発表<sup>(4)</sup>を行ったところ、過去に例をみない件数の取材依頼や問合せを受け、当研究所の技術力の高さをアピールするとともに、本テーマに対する社会の興味、関心が非常に高いことを改めて確認することができました。

また、誘雷した雷電流は、現状はそのまま大地に流していますが、それをさらに有効活用するべく、雷充電技術についても検討しており、これまで圧縮空気によるエネルギー蓄積方法の有効性を確認しています。本特集記事『雷から人や設備を守り、エネルギーを活用する落雷制御・充電技術』でその詳細を紹介します。

### 宇宙エネルギーの利用～宇宙太陽光発電～

地球規模での脱炭素化とエネルギー安全保障の確保に向け、長期的かつ安定的な電源技術の開発が求められています。現在、再生可能エネルギーとしてもっとも普及している太陽光発電ですが、これは日照条件（昼間のみ、天候や季節影響あり）や、雲の影響で発電量が大きく変動してしまうという問題があります。

これに対して、1968年、米国のPeter E. Glaser博士が宇宙太陽光発電（SSPS：Space Solar Power Systems）構想を提唱しました<sup>(5)</sup>。これは地表から約3万6000km上空の静止軌道上の人工衛星に搭載し



図2 オウンドメディア

た巨大な太陽光パネルで太陽光エネルギーを変換し、送電アンテナから地上に設置した受電アンテナに送電、地上で再度電力に変換してエネルギー源として利用する構想です。静止軌道上では夜にならないため、24時間ほぼ連続で発電が可能であり、さらに太陽光強度も地上より強く安定していることから、再生可能エネルギーでありながら安定的に大きなエネルギー（1 GW、原子力発電所1基分程度が目標）を供給し続けることが可能な次世代のグリーンエネルギーとして期待されています。

しかしながら、その実現に向けては技術面、安全面、経済面で多くの課題を解決していく必要があります。1970年代はNASAを中心にSSPSの研究開発を行っていましたが、1980年代に財政的な理由で撤退し、現在は日本が研究開発をリードする立場にあります。

当研究所では、技術面の課題を解決するべく、太陽光エネルギーを効率良く変換する「太陽光励起レーザ技術」、変換されたエネルギーを地表に伝送する「長距離エネルギー伝送技術」、地表で高強度のエネルギーを電力に変換する「高強度ビームエネルギー変換技術」などの研究開発に取り組んでいます。これらの技術は最終目標であるSSPSへの適用だけでなく、地上におけるレーザ無線給電システムへも適用可能であり、離島や被災地への遠隔地からの電力供給や、ドローンや高高度無人機（HAPS：High Altitude Platform Station）のような移動体への無線電力供給技術への適用が期待されています。これらの詳細については、本特集記事『光の技術を駆使した宇宙太陽光発電』で紹介いたします。

## 究極のエネルギー～フュージョンエネルギー～

核融合（フュージョンエネルギー）は、軽い原子核どうしが融合して重い原子核になる過程で莫大なエネルギーを放出する現象で、太陽の中心で起きている現象です。超高圧・高密度の太陽の中心で起きている

現象を地球上で人工的に実現することは困難を極めますが、実現できればグリーンでほぼ無尽蔵なエネルギー源となり得ることから注目されています。核融合は核分裂とは異なる真逆の反応であり、ガスコンロのように燃料供給が止まればすぐに消えるため安全（核分裂のような連鎖反応ではない）、高レベル放射性廃棄物はない、また燃料も海水から無尽蔵に取り出せるなどの特徴があります。

核融合による発電は、2050年ごろの商用化を視野に各国で研究が進められています。当研究所では、量子科学技術研究開発機構（QST）およびITER国際核融合エネルギー機構と連携し、「核融合炉最適オペレーション技術」として、IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）とAI/ML（機械学習）技術を活用した高速・リアルタイム制御システムを研究しています。

世界でもっとも進展しているトカマク方式では、プラズマ自身に流れる電流によって閉じ込め磁場を形成するため、プラズマ中に電流を流し続ける必要があります。しかし、その電流や圧力に起因する不安定性が発生するため、その不安定性を未然に予測し、制御することが求められます。そこで、当研究所では混合専門家モデル（MoE：Mixture of Experts）という逐次変化する状況に応じて最適なAIモデルを重み付けして統合する手法を適用し、プラズマを高精度で予測する技術を確認しました。

本技術を世界最大のトカマク型超伝導プラズマ実験装置JT-60SAの実際のプラズマ閉じ込め磁場に適用し評価したところ、磁場構造に依存するプラズマの位置や形状を実際のプラズマ制御に必要な精度で再現することに世界で初めて成功しました。本成果は2025年3月17日にQSTと連名で報道発表を行い<sup>(6)</sup>、共同研究の成果のJT-60SAへの実装の見通しを得ることができました。その詳細については、本特集記事『核融合（フュージョンエネルギー）の実現に向けて——AIとデータサイエンスによる知の融合』で紹介いたします。

## おわりに

当研究所は、コア技術の確立と外部連携の強化を進め、革新的な次世代エネルギー技術の創出に向けて大きな成果をあげてきました。続く特集記事では、本稿で紹介した4つのトピック「ワット・ビット連携」「雷制御・充電」「宇宙太陽光発電」「フュージョンエネルギー」について、最新の取り組み状況を説明します。

これらはいずれも地球環境の再生と持続可能社会の実現に直結する取り組みです。今後は、研究成果の社会への導入をめざし、外部との共創をさらに深化させることで、「環境負荷ゼロ」かつ「レジリエントな社会」の実現に向けて歩みを進めていきます。

## 参考文献

- (1) <https://www.rd.ntt/se/media/>
- (2) <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai/energy-demand-from-ai>
- (3) <https://www.meti.go.jp/press/2025/06/20250612001/20250612001.html>
- (4) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2025/04/18/250418a.html>
- (5) <https://www.science.org/doi/10.1126/science.162.3856.857>
- (6) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2025/03/17/250317a.html>



（後列左から）香西 将樹 / 岩下 秀徳 / 櫻井 敦 / 小山 晃（右上）  
（前列左から）前田 裕二 / 池田 高志

経験者採用を行っています。私たちの挑戦に興味のある方はぜひお問い合わせ願います。一緒に地球の未来を変革しましょう。

## ◆問い合わせ先

NTT 宇宙環境エネルギー研究所



# ワット・ビット連携を通じたデータセンタの再生可能エネルギー利用量最大化に向けた取り組み

生成AI（人工知能）の普及により急増するデータセンタ（DC）の電力需要に対し、再生可能エネルギー（再エネ）の有効活用が課題となっています。NTT宇宙環境エネルギー研究所では、DC処理負荷の動的分散制御とDCの配置最適化という2つのアプローチで、ワット・ビット連携を通じた再エネ利用量の最大化に取り組んでおり、本稿では、その背景と課題、技術の全体像などについて解説します。

キーワード：#ワット・ビット連携、#データセンタ、#再生可能エネルギー

マハムド ファーハン<sup>†1</sup>

諏訪部 元樹<sup>†1</sup> / 林 俊宏<sup>†1</sup>

中西 一生<sup>†2</sup> / 森沢 祐介<sup>†2</sup>

NTT宇宙環境エネルギー研究所<sup>†1</sup>

NTT技術企画部門<sup>†2</sup>

## 背景

近年、生成AI（人工知能）をはじめとする大規模データ処理の普及により、データセンタ（DC）の電力需要は急速に増大しています。とりわけ自然言語処理モデルや画像生成モデルなどの高度な学習・推論処理は膨大な演算資源を必要とし、従来に比べて桁違いの電力を消費します。例えば、ChatGPTを提供するOpenAI社の言語モデル「GPT-3」の場合、学習に要するエネルギー量は1287 MWh<sup>(1)</sup>に達し、これは原子力発電所1基が1時間に供給する電力量に匹敵する規模です。今後の生成AIのさらなる普及に伴い、DCの電力需要は一層拡大すると予想されています。

社会全体では、脱炭素化に向けた機運の高まりとともに、太陽光や風力など再生可能エネルギー（再エネ）の導入が急速に進んでいます。日本政府は第7次エネルギー基本計画<sup>(2)</sup>において、再エネを主力電源として最大限導入する方針を掲げ、電源構成に占める再エネ比率を2022年度の21.8%から2040年度には40~50%へ引き上げる目標を示しています。NTTグループにおいても、「NTT Green Innovation toward 2040」<sup>(3)</sup>を環境エネルギービジョンとして掲げ、2030年におけるモバイル（無線基地局）やDCのカーボンニュートラル実現に向けて、再エネの導入を積極的に推進しており、拡大するDCの電力需要に対して再エネの有効活用が見込まれます。

しかし一方で、再エネを十分に活用できないという問題が顕在化しています。再エネの導入ポテンシャルは広大な土地や自然

条件に恵まれた北海道・東北・中国・九州といった地域に偏在する一方、DCは通信遅延の観点や保守対応の利便性から、大都市圏である東京や大阪周辺に集積しています。この結果として、再エネの導入ポテンシャルとDCの電力需要とで地理的なミスマッチが発生しています。また、太陽光発電や風力発電は、気象条件や季節、時間帯によって発電量の変動が大きい特徴を有しています。対照的に、DCは24時間365日、一定の稼働が求められるため、電力需要の変動は少ない傾向にあります。これにより、時間的なミスマッチも併発しています。

この地理的・時間的なミスマッチにより、再エネを含む電力供給が需要を上回る地域・時間帯では、電力系統の安定運用を目的とした再エネの出力制御（再エネの発電抑制）が実施されています。図1に日本における再エネの出力制御量の推移を示します。2024年度には20億kWh以上の再エネ

電力が出力制御の対象となっており、特に導入ポテンシャルの高い九州や東北に集中していることが分かります。今後、再エネ導入量がさらに拡大していく中で、この出力制御の発生は避けて通れない問題となります。したがって、このような再エネとDCの電力需要とのミスマッチを解消し、再エネを最大限に活用するための技術の確立や制度の改革などが鍵となります。現状では、地域間での電力融通を実現するための送電網の整備計画<sup>(4)</sup>が示されていますが、数兆円規模の莫大な投資と、10年単位の多くの時間を要するものであり、またそれだけでは再エネの最大限活用や電力の安定供給をなし得ることができません。電力供給側だけでなく、DCなどの需要側も再エネの発電状況に合わせて柔軟に運用し需給バランスを調整することで、ミスマッチを解消する新たな仕組みの構築が求められています。

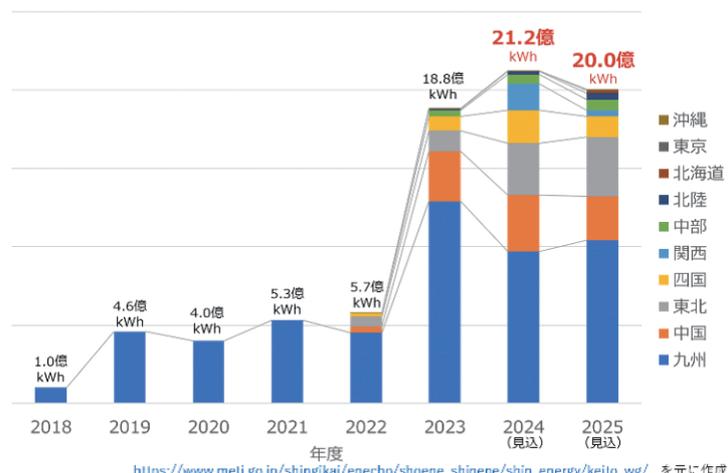


図1 日本における再エネの出力制御量の推移

## ワット・ビット連携の概念と意義

こうした背景に対し、エネルギー（ワット）と情報通信（ビット）を高度に連携させることで、電力と情報通信のインフラ整備を一体的に進め、持続可能で効率的な社会基盤を築くことをねらった新たな概念が「ワット・ビット連携」です。これは2025年2月に示された「GX2040ビジョン」で提唱され、総務省・経産省、電力・通信事業者などで構成される官民懇談会において、その実現に向けた方針や進め方の整理が進められています<sup>(5)</sup>。

2025年6月12日には具体的な議論の成果として、表に示す3つの方向性が提示されました。1番目の「足元のDC需要への対応」については、クラウド型に代表されるような大都市部の大規模DCにおける電力ひっ迫への即応策として、ウェルカムゾーンといった電力系統余力があるエリアへの大規模DCの立地推進や、柔軟な運用に関する研究開発およびその基盤構築について議論されています。オールフォトニクス・ネットワーク（APN）などを活用し大規模DCへのアクセス性能とエネルギー効率の両立を図る次世代ネットワーク基盤の整備などが想定されます。2番目の「新たなDC集積拠点の実現」については、大都市以外での中核DC（複数の大規模DCが集積する中核拠点）整備を想定し、電力インフラの拡張ポテンシャルや再エネの導入可能性、運用に必要な通信インフラの確保や交通アクセスの良さ、災害リスクなどを総合的に勘案した新たな大規模DC集積拠点の選定が議論されています。3番目の「DC地方分散・高度化の推進」は、需給バランスの調整力を高めるうえで重要な施策と位置付けられています。再エネの導入ポテンシャルが大きい地方部にコンテナ型などの小中規模DCを分散配置し、処理負

荷の分散・制御を通じて再エネ電力の利用量を向上させることで、電力系統のひっ迫緩和や出力制御の削減が期待されます。

NTT宇宙環境エネルギー研究所では、大規模・小規模DCの地方分散や運用高度化の推進を支える技術開発として、再エネの発電状況に応じたDC処理負荷の分散制御と、再エネ導入地域に応じたDC配置に関する2つの取り組みを進めており、以降では、これらの具体的な研究内容について紹介します。

### 取り組み①：DCの処理負荷分散に向けたエネルギー・ICTリソース統合制御

再エネの発電状況に応じてDCの電力需要を調整できれば、需給の最適化と再エネの活用拡大が可能になります。例えば、再エネが余る地域・時間帯では、他地域のDCから処理負荷（WL：ワークロード）を移動させて再エネを活用し、不足時にはWLを他地域のDCで処理させることで、再エネ利用率を高めることが期待されます。しかし、DCのWLを柔軟に移動させることは容易ではありません。移動には通信品質、コスト、セキュリティといった多面的な制約が伴います。さらに、電力需要や再エネ発電量は時間変動するため、電力需給の状況に応じた制御が必要となります。

このように、DCの電力需要を再エネの発電状況に応じて適切に調整するためには、時間変動するDCの電力需要や再エネ発電量を高精度に予測し、即時にDC間でのWL配置などを最適に制御するといった、高度な要素技術の確立や技術連携が課題となります。こうした課題の解決に向けて、当研究所を含む複数のNTT研究所横断で、再エネの発電状況に応じた柔軟な負荷調整を実現する、エネルギー・ICTリソース統

合制御技術の研究を進めています。その全体像と要素技術を図2に示します。これは、全国各地に分散配置され、APNを介して接続されたDCにおいて、ICTリソースや再エネ・蓄電池などのエネルギーリソースを一体的に連携させる技術です。再エネ発電状況に応じてDCのWLや蓄電池の充放電を柔軟に制御することで、再エネの有効活用と電力需給バランスの最適化を図ることを目的としています。

この統合制御は予測・最適化・制御の3ステップで構成され、各ステップはオーケストレーション基盤<sup>\*1</sup>によって連携・管理されます。まず、全国各地の気象予測や過去実績を基に、再エネ発電量やDCごとの電力需要量を高精度に予測します。次に、その予測結果を基に、DCごとのWLや蓄電池の充放電量などのエネルギー需要を再エネ利用量が最大となるよう最適化し、さらに、その需要を満たすためのWL配置計画やWL移動時のネットワーク経路を最適化します。最後に、得られた最適化計画に基づき、仮想環境上のWLの移動や蓄電池の制御を実行します。これにより、再エネを最大限活用したDCの運用が可能となります。

当研究所ではこのうち、翌日の再エネ発電量やDC電力需要量の予測結果を基に、複数の拠点の中でWLの種類・移動先・量・時間、およびDCに併設する蓄電池の充放電量を決定する最適エネルギー需要設定技術に取り組んでいます。WL移動については、通信ネットワークを介して再エネの豊富な地域のDCにデータを送り計算処理を実施することで、電力需要をシフトさせることができることから、再エネと電力需要との地理的ミスマッチの解消が期待されま

\*1 オーケストレーション基盤：ICTリソースの配備や管理を実現するための基盤。

表 ワット・ビット連携官民懇談会の方向性

方向性	概要	実現時期
1 足元のDC需要への対応	・電力インフラ整備を待たず既存の系統設備を活用した、短期的なDC需要への対応	2030年頃
2 新たなDC集積拠点の実現	・計算資源の効率的運用のため、電力・通信インフラを整備し新たな複数の大規模DC集積拠点を造成	～2030年代前半
3 DC地方分散・高度化の推進	・将来的な環境変化も見据え、DC地方分散の推進とDC運用の高度化を検討	～2030年代後半

※ 「ワット・ビット連携官民懇談会 取りまとめ1.0」より抜粋



図2 エネルギー・ICTリソース統合制御の全体像

すが、高いリアルタイム性が求められるWL（例えば、リモートデスクトップやAI推論タスクなど）は翌日に繰り越すことができないため、時間的ミスマッチの解消にはつながりません。一方で、蓄電池の充放電については、充電した再エネ電力を翌日に放電するなど、再エネと電力需要との時間的ミスマッチの解消には有効ですが、蓄電池に貯めた再エネを電力系統を介して別のDCへ融通することは、系統増強のコストや送電ロスの影響により難しく、地理的ミスマッチの解消にはつながりません。当研究所では、これら両者を組み合わせて地理的・時間的ミスマッチを同時に解消し、再エネ利用量の最大化を実現するためのエネルギー需要の最適化モデルについて研究を進めています。

本最適化モデルは、再エネ発電量とDC電力需要量の時系列データおよび蓄電池の初期充放電をインプットし、WL移動量と蓄電池の充放電量を再エネ利用率が最大となるよう最適化してアウトプットする強化学習モデルです<sup>(6)</sup>。本モデルの特徴は2つあり、1つは制御対象であるWL移動量と蓄電池充放電量に関する独自の報酬関数を定義し、重み付き和として統合することで、両者の同時最適化を可能とする点です。もう1つは入力データの時間窓の設計により、数日先までの予測値を含めて学習することで、例えば「当日は晴天でも翌日は雨天が予測される」ような場合でも、WLを受け入れずに蓄電池の充電を優先するといった、先を見越した判断を可能とする点です。こ

れらの特徴により、年間を通じて再エネ利用量が最大となるWLおよび蓄電池の制御方針を出力します。

DC3拠点でのシミュレーションを通じて、最適化モデルの効果を確認した一例を紹介します。まずは、再エネ発電量としては晴天と曇天の日射量をランダムに組み合わせた365日分の数万パターンのデータ、DCの電力需要としては代表的なDCの需要カーブ1パターン<sup>(7)</sup>のデータを学習データとして、最適化モデルを構築しました。このとき、シミュレーションの条件は実設備を参考に決定し、再エネとして採用した太陽光発電（PV）の発電量は1.8 MW、DCの最大消費電力は1 MW、蓄電池容量は5 MWhとし、さらに、3拠点とも同じ条件としました。なお、3拠点は北海道、東京、九州と気象条件が異なる拠点にしました。次に、構築したモデルに対して、3拠点の365日の日射量および上記DCの需要カーブを入力し、WL移動量および蓄電池の充放電量を最適化しました。最後に、

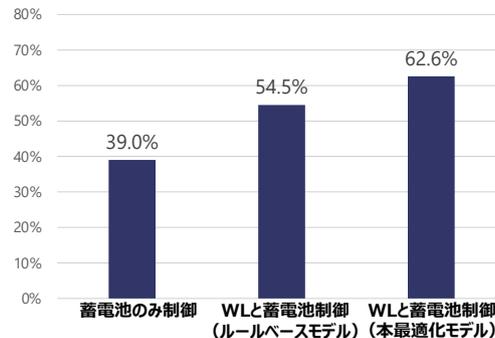


図3 再エネ利用率シミュレーション結果

蓄電池だけ制御した場合と、WLと蓄電池をルールベース<sup>\*2</sup>のモデルで制御した場合、WLと蓄電池を本最適化モデルにより最適制御した場合とで、再エネ利用率を比較しました。比較結果を図3に示します。蓄電池だけの制御と比較して、WLと蓄電池をルールベースで制御するだけでも再エネ利用率は15%以上向上し、さらに本最適化モデルによる制御により追加で8%以上の再エネ利用率向上が確認できました。特に、瞬時的な再エネ率の最大化を考慮するルールベースのモデルに比べ、本最適化モデルは年間を通じた再エネ率の最大化を学習し、先を見越した制御が可能となり、さらなる再エネ率の向上を実現しました。

\*2 ルールベース：時間ごとに需給バランスを計算し、再エネ余剰となる場合は他拠点からのWL受け入れおよび蓄電池充電、再エネ不足となる場合はWLを他拠点に移動および蓄電池放電するといったルール。

## 取り組み②：今後のDCの整備に向けた配置最適化

カーボンニュートラルに向けた再エネの拡大を進めていく中で、どこにDCを整備すべきかという判断は、これまで以上に複雑かつ困難になりつつあります。現状では、DCが東京・大阪を中心とした大都市圏に集中し、土地の取得容易性やビジネス性を主軸に整備計画が策定されています。しかし将来のDCの地方分散化を見据えて、再エネの導入ポテンシャルや電力インフラの状況、地域間ネットワークの性能など、より多様な観点を加味したうえで、戦略的に配置計画を立案する必要があります。

このように、複数の観点を総合的に評価した配置計画を立案するには、多様な地域条件をさまざまな評価軸でとらえ、最適なDC候補地の選定を定量的に支援する技術の確立が課題となります。こうした課題の解決に向け、当研究所では戦略的なDC整備判断を実現するDC配置最適化技術に関する研究を新たに立ち上げました。前述したエネルギー・ICTリソース統合制御は動的な負荷の最適化であるのに対して、本件はより中長期的視点での静的な配置最適化を目的とした取り組みです。

本技術では、まず地域ごとに異なる評価項目（例：地価や建設単価、再エネ発電ポテンシャル、電力系統混雑度、通信回線の品質・遅延、災害リスクなど）をスコア化し、それぞれの項目に重み付けを行うことで、複数の候補地の中から最適なDC配置パターンを客観的に評価・選定できる意思決定支援モデルの実現をめざしています。例えば、土地・建設にかかわる初期コストは、地域ごとの地価データや建設単価から評価し、再エネに関する要素はNEDOなどの気象オープンデータや発電ポテンシャルの時系列データから推定されます。また、電力系統の混雑度は、公開されている接続容量や逆潮流実績などを参考に指標化し、通信ネットワークの要件はAPN接続時の伝送遅延や地域間における光ファイバ敷設状況などを反映します。これらの情報を活用し、現実的な整備計画の策定に資する設計をめざします。

こうした評価項目の整備と精度向上を進めながら、再エネ活用・通信性能・トータ

ルコストといった複数要素を柔軟にトレードオフできる評価モデルの設計をめざします。将来的には、ユースケースや運用者のニーズに応じて、評価軸や重み付けを自在に調整できる意思決定支援アルゴリズムを開発し、最適なDC整備の実現を支えることを目標としています。

## 今後の展望

本稿で紹介した当研究所の2つの取り組みは、いずれもワット・ビット連携を通じて、再エネとDCの電力需要の需給バランスを最適化し、再エネを無駄なく使うことで利用量の最大化を図ることを目的としており、それぞれ異なるアプローチから、再エネと需要との地理的・時間的ミスマッチの解消に挑む技術です。今後は、それぞれの技術の深化とともに、より現実的な導入に向けた環境整備が求められます。

取り組み①は、複数の技術要素を横断的に組み合わせることで成立します。例えば、再エネや電力需要の高精度予測技術、最適化アルゴリズム、仮想環境上での制御実行、オーケストレーション基盤など、いずれかが欠けても実現は困難です。そのため、今後はこれら各技術要素のさらなる高度化を進めるとともに、複数の研究部門・専門領域間での連携を促進し、実用的な運用基盤の構築をめざします。

一方、取り組み②については検討段階にあるものの、実装に向けた課題が多くあります。特に、インプットとなるデータは、再エネ発電ポテンシャル、土地コスト、通信環境、系統混雑、保守要員分布など多岐にわたるため、これらを広く網羅するには、地域の電力会社や通信事業者、行政機関等との連携を前提としたデータ共有の仕組みの構築が不可欠です。また、最適化における目的関数も一様ではなく、重視する要素（再エネ活用、初期投資、通信性能など）は想定するユースケースや運用者の価値観等によって大きく左右されます。したがって、単一のスコアリング基準ではなく、利用目的に応じて柔軟に評価軸や重みを切り替えられるアルゴリズム設計が今後の鍵となります。

今後もNTT宇宙環境エネルギー研究所では、ワット・ビット連携を通じて再エネ

の有効活用を進め、持続可能な社会の実現をめざしたエネルギーとICTの融合に取り組んでいきます。DCにとどまらず、無線基地局など通信インフラ全体へと適用領域を拡張することで、エネルギーの地産地消や分散型社会の実現を後押しし、電力と通信の両面から社会全体のグリーン化を加速させていきます。未来のネットワークとエネルギーのあり方を見据え、環境と調和する持続可能な社会を支える技術基盤の構築に取り組んでいきます。

## 参考文献

- (1) <https://hai.stanford.edu/ai-index/2023-ai-index-report>
- (2) [https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/pdf/20250218\\_02.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20250218_02.pdf)
- (3) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2021/09/28/210928a.html>
- (4) [https://www.occto.or.jp/kouikikeitou/chokihoushin/files/chokihoushin\\_23\\_01\\_03.pdf](https://www.occto.or.jp/kouikikeitou/chokihoushin/files/chokihoushin_23_01_03.pdf)
- (5) [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/001014454.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/001014454.pdf)
- (6) 諏訪部・香西・秋山：“データセンタのワークロード配置と蓄電池の充放電制御の長期最適化,” 2024信学ソ大, B-9-03, 2024.
- (7) M. Macías: “SLA negotiation and enforcement policies for revenue maximization and client classification in cloud providers,” Future Generation Computer Systems, Vol. 41, pp. 19-31, Dec. 2014.



(上段左から) マハムド ファーハン/  
諏訪部 元樹/ 林 俊宏  
(下段左から) 中西 一生/ 森沢 祐介

「ICT×エネルギー×最適化」をキーワードにさまざまな研究テーマや実証実験などに取り組んでいます。新たな技術確立や社内外との連携を通じて、再生可能エネルギー利用率最大化や、NTTグループのカーボンニュートラル達成に貢献します。

## ◆問い合わせ先

NTT宇宙環境エネルギー研究所  
企画担当



# 雷から人や設備を守り、 エネルギーを活用する落雷制御・充電技術

NTT宇宙環境エネルギー研究所では、これまで培ってきた通信設備を雷から守る技術を大きく発展させ、重要インフラや街への落雷そのものをなくし、落雷させた雷はエネルギーとして活用する落雷制御・充電技術に関する研究を行っています。本稿では、ドローンを使用して自然雷を誘発、誘導するドローン誘雷実験、さらに、雷サージ電流を利用して雷のエネルギーを貯蔵する圧縮空気の生成実験の内容を紹介します。

キーワード：#雷、#ドローン、#雷充電

ながお あつし  
長尾 篤  
まるやま まさと  
丸山 雅人

NTT宇宙環境エネルギー研究所

## はじめに

雷は人類社会に大きな被害をもたらしてきた自然現象の1つです。雷が電気であることを証明した1752年のベンジャミン・フランクリンの凧の実験は有名ですが、このように古来より雷被害防止のために多くの研究がなされ、その成果としてNTTグループの通信設備をはじめとする今日の重要設備にはさまざまな雷対策が施されています。しかしながら、世の中の膨大な数の設備すべてに完璧な対策を施すことは困難であり、今日においても雷被害はなくなっておりません。その被害額は国内だけでも年間1000億から2000億円と推定されています<sup>(1)</sup>。

そこでNTT宇宙環境エネルギー研究所では、落雷を前提とした従来の対策技術から大きく踏み出し、落雷そのものをなくす落雷制御技術の実現に向けて舵をきりました。落雷制御技術とは、雷雲下において意図した場所・タイミングで雷を誘発するとともに、発生させた雷を捕捉して安全な場所に誘導する技術です。これにより、重要設備等への落雷を限りなくゼロに近づける

ことを目標としています。さらには、意図した場所に誘導した雷をそのまま大地に逃がすだけでなく、そのエネルギーを有効活用するための雷充電技術についても検討しています。

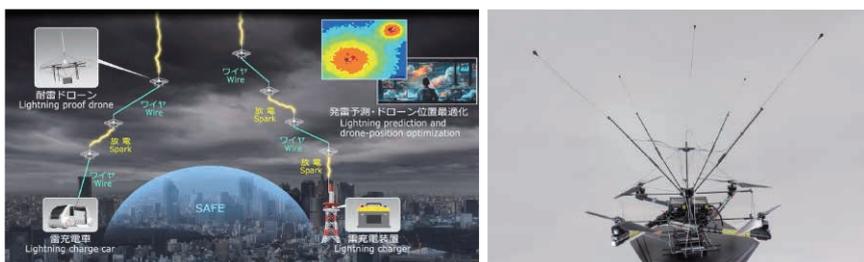
本稿では、ドローンを利用した落雷制御技術(図1(a))、および雷充電技術の最新の研究状況について紹介します。以降では、ドローンを利用した落雷制御技術に関し、耐雷性能を持たせたドローン(耐雷ドローン)の開発、意図的に雷を誘発し、安全な場所に誘導する誘雷技術の検討、さらに実際の雷雲下に耐雷ドローンを飛行させて実施した自然雷実証実験の模様を紹介します。また、雷充電技術の基礎検討の一例として、雷エネルギーを圧縮空気に変換して蓄積する方式の検討状況を紹介いたします。

## ドローンを利用した落雷制御技術の研究状況

意図的に雷を誘発し誘導する落雷制御技術については、これまでさまざまな手法が検討されてきました。もっとも代表的な

ものは、接地したワイヤをロケットにより高速度で高度数100 mまで打ち上げるロケット誘雷であり、成功事例も多く、雷発生メカニズムや雷防護の研究に貢献してきました<sup>(2)</sup>。また大出力レーザーを空中に照射して空気をプラズマ化させ、これを電路として雷を誘導するレーザー誘雷技術についても成功事例が報告されています<sup>(3)</sup>。しかしながら、これらを重要設備や街を守るという用途で用いる場合には、実施場所が限定され、機動性に乏しいという課題があります。ロケット誘雷は火薬を用いることから安全面の管理が非常に重要であること、また誘雷に失敗した際には打ち上げたロケットとワイヤが地上に落ちてくるというリスクがあるため、実施可能な場所は限定的です。またレーザー誘雷は大規模なレーザー設備を要するためその移動は困難です。一方で、日時によって発生場所が異なる雷から多くの重要設備を効率的に守るためには、実施場所の自由度が高く、雷雲の動きに応じて機動的に場所を変えながら実施可能な手法が必要です。そこで、NTT宇宙環境エネルギー研究所では上記課題を解決する落雷制御の方法として、重要ビルや設備、街の上空に飛行させることが可能なドローンを使用したドローン誘雷技術に関する検討を行っています<sup>(4)</sup>。

ドローンを使用した落雷制御を行うためには、雷が直撃しても故障や誤作動することなくドローンが飛行し続ける必要があります。また、将来的に重要ビルや設備を高確率に雷被害から守るため、積極的にドローンへ雷を誘発する必要があります。そのた



(a) 落雷制御・充電技術のめざす世界

(b) 耐雷ドローン

図1 落雷制御・充電技術

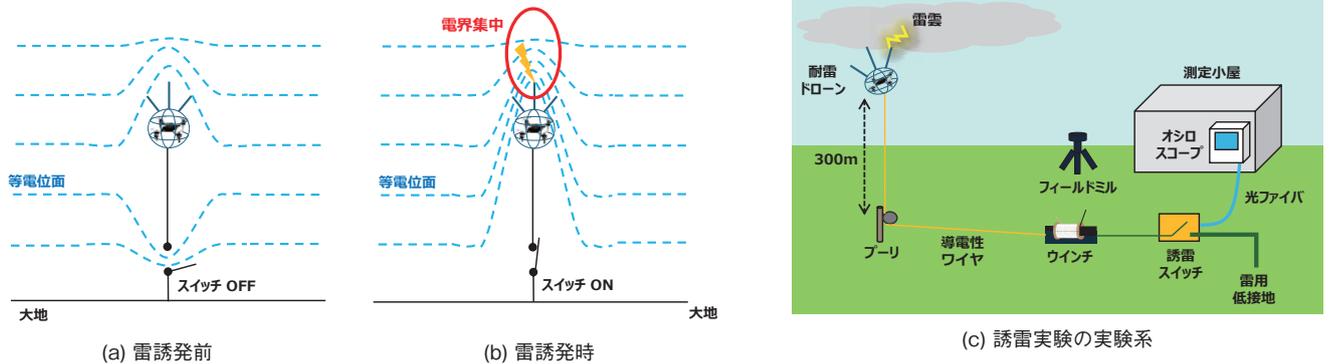


図 2 雷誘発技術の原理と実験系

め、NTT宇宙環境エネルギー研究所では雷が直撃しても故障や誤作動を起こさない「ドローンの耐雷化技術」、意図的にドローンへ雷を誘発するための「電界変動を利用した雷誘発技術」という2つの要素技術を検討しています。さらに、これらの要素技術を実証するため、実際の雷雲下で耐雷ドローンを飛行させて、雷を誘発・誘導する実証実験を実施しました。

■ドローン耐雷化技術

一般的な航空機では雷に対する対策が施されており、落雷があっても飛行が可能になるよう設計されています。一方で、ドローンは悪天候下での飛行を想定しておらず、搭載重量(ペイロード)も航空機と比べると小さいため、雷対策は施されていません。そのため、ドローンに雷が直撃すると損傷・墜落、または何らかの誤作動が想定されます。そこで、ドローンに雷が直撃しても誤作動・故障せず、市中のドローンに具備することができる、耐雷ケージの設計手法を考案しました。

図1(b)に示す耐雷ドローンは、耐雷ケージを軽量かつ丈夫なアルミパイプで製作し、ドローンに雷が直撃した際に流れる大電流を金属導体部分へ迂回させることで、ドローン本体に雷電流が流れることを防止します。また、アルミパイプの本数を増やすことで1本당りに流れる雷サージ電流を小さくすることができるため、耐雷ケージ自体の劣化や破損を軽減することができます。さらに、雷電流を放射状に流すことで、大電流により発生する強磁界を互いに打ち消し合い、ドローンへの磁界影響を低下させます。

落雷時の耐性を確認するため、試作した耐雷ドローンに対して人工雷の印加試験を実施しました。その結果、150 kAの人工雷(自然落雷の98%以上をカバーし、自然雷の平均値の5倍に相当)を印加した場合においても、ドローン本体には故障や誤作動が発生しないことを確認しました。

■電界変動を利用した雷誘発技術

地上からワイヤを引いた耐雷ドローンを雷雲下に飛行させることで、空飛び避雷針として雷防護効果を発揮します。一方で、それだけでは防護可能なエリアは限定的です。そこで、より広いエリアを落雷から守るためには、積極的にドローンへ雷を誘発することで雷雲内の電荷を断続的に中和し、さらにドローン以外への落雷を予防することが重要と考えています。

積極的に雷を誘発するため、飛行させたドローンと地上間の導電性ワイヤにスイッチを設け、そのON/OFFによってドローン周囲の電界強度を変化させる手法を考案しました。雷雲の接近に伴い周囲の電界強度が上昇した際に、ホバリング中のドローンと大地をスイッチによって最適なタイミングで導通させると、ドローンと大地は瞬時に等電位となり、急激にドローン周囲の電界強度が上昇します。その結果、ドローンと雷雲の間で放電現象が起こり、雷の誘発を促すことができると考えられます(図2(a)(b))。

■ドローン耐雷化・雷誘発技術の実証実験

ドローン耐雷化技術、および電界変動を利用した雷誘発技術の実証を行うため、2024年12月~2025年1月の期間、島根県浜

田市山間部の標高900 m地点でドローンを使用した誘雷実験を実施しました。島根県を含む日本海側のエリアは、世界的にも珍しい冬季に雷が多く発生するエリアであるため、実験場所として島根県を選定しました。なお、冬季雷は夏季雷と比較して雲高度が低く、飛行させたドローンと雷雲との距離が近いことから、ドローン誘雷実験には適した環境と考えられます。

本実験では、フィールドミル\*と呼ばれる装置を使用して、雷雲が発生させる電界を常時観測し、雷雲の接近に伴い付近の電界強度が高くなったタイミングで耐雷ドローンを飛行させ、雷の誘発を試みました。図2(c)に実験系を示します。本実験では、耐雷ドローンの耐雷ケージ部と、地上に設置した誘雷スイッチは導電性ワイヤにより接続されています。また、ドローン飛行時に強風でワイヤが流されることを防ぐため、導電性ワイヤはウインチによって常時遠隔操作で、巻き取り可能かつ強く引っ張ることが可能な構造としています。さらに、誘雷スイッチについては遠隔操作でON/OFFが可能であるとともに、雷雲接近時にはこのスイッチの両端に高電圧がかかることを想定し、高電圧に耐えられる構造としました。誘雷スイッチにおける電流、電圧、およびフィールドミルで観測した電界強度については、それぞれ測定小屋内のオシロスコープで同時観測を行い、耐雷ドローンへの雷誘発前後の波形を確認できる測定

\* フィールドミル：大気電界を測定する計測器。

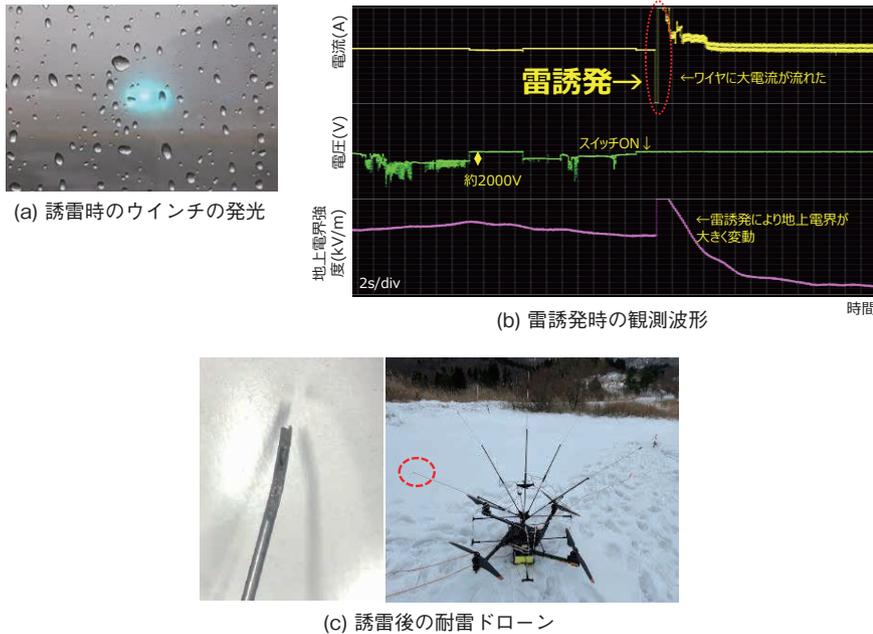


図3 ドローン耐雷化・雷誘発技術の実験結果

系を構築しました。

なお、作業者および測定器の雷に対する安全性を考慮し、雷雲接近時の実験は測定小屋および作業用車両の中で実施しました。また、電流、電圧、電界強度の測定は光ファイバケーブルを使用すること、測定小屋内の電源確保は耐雷トランスを使用することで、万一測定小屋や測定機器類、付近の電力線等の設備へ落雷した場合でも、雷電流が小屋内へ侵入するのを防げる実験系を構築しました。

2024年12月13日の雷雲接近時、周囲の電界強度が上昇したタイミングで、ワイヤを接続した耐雷ドローンを高度300 mまで飛行させ、地上に設置した誘雷スイッチを遠隔操作でONにすることで、耐雷ドローンと大地を導通させました。その直後、破裂音とともにドローン付近の雷雲および地上のウインチ部の発光を確認しました(図3(a))。測定データからは、破裂音・発光と同時にワイヤに大電流が流れたこと、また周囲の電界強度が大きく変化したことを確認しました(図3(b))。これらの結果より、誘雷スイッチの操作により意図的に落雷を誘発させることに成功したことが確認できました。一方で耐雷ドローンについては、

耐雷ケージの上部に取り付けた避雷針の先端部が損傷したものの(図3(c))、ドローン本体に故障や誤作動等は発生せず、また耐雷ケージ本体にも損傷等はなく、安定して飛行を継続しました。

本実験結果より、世界初のドローン誘雷に成功したことが確認できました。これにより、ドローンを使用して重要設備を雷から守ることが原理的に可能であることを示しました。

### 雷充電技術の最新状況

ドローンを利用して意図した場所へ誘導した雷については、エネルギーとして有効活用を検討しています。しかしながら雷は、1ミリ秒にも満たない時間で数100 kAという極めて大きな電流が流れる現象であるため、既存のバッテリー等では充電が不可能です。また、反応時間の早いコンデンサを用いる充電手法も提案されていますが、上記のような大電流とそれに伴い発生する高電圧に耐えるためには、莫大な数のコンデンサを並列、直列に接続する必要があります。なおかつ爆発を防ぐため、素子1つひとつの制御が必要となることから、コストが極

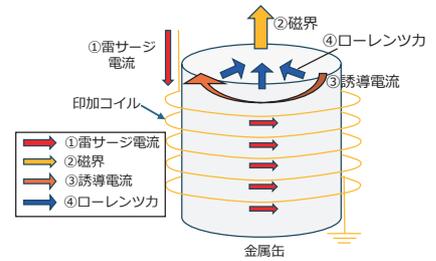


図4 圧縮空気生成の原理

めて高くなります<sup>(5)</sup>。そのため、雷の電気エネルギーを他のエネルギーに変換して蓄積する技術を研究しています。ここでは、基礎検討の一例として、雷エネルギーを圧縮空気<sup>(6)</sup>に変換して蓄積する方式の検討状況を紹介します。

#### ■圧縮空気を用いた雷充電の基礎検討

雷を利用した圧縮空気の生成方法として、雷サージに伴う電磁誘導により金属缶を圧縮する手法を検討しました。図4にその原理を示します。内部に金属缶を配置したコイルに①雷サージ電流を流すと、コイル内部に②磁界が発生します。このとき、金属缶の表面には雷サージ電流とは逆向きの③誘導電流が流れます。②磁界と③誘導電流によって金属缶には内向きの④ローレンツ力が働き、缶が潰れることで密閉された金属缶の内部には圧縮空気が生成されます。生成した圧縮空気は、高耐圧のタンク等を使用して貯蔵します。さらに、貯蔵した圧縮空気を任意のタイミングに開栓することで、タービンなどを回転、発電を行います。

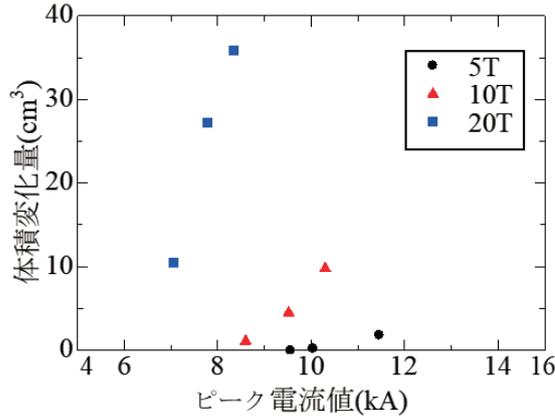
本稿では、雷サージ電流を用いた圧縮空気の生成に関して、人工雷サージの印加による基礎検討の結果を紹介します。

#### ■圧縮空気を用いた雷充電のフィジビリティ確認

雷エネルギーを用いた圧縮空気の生成可否、および印加電流値と圧縮量の相関性を確認するため、雷サージ試験機を用いた実験を行いました。実験では雷インパルス電流(8/20  $\mu$ s)を印加コイルに流し、その際に印加コイル内部に設置したアルミ缶の体積変化量を測定することで、圧縮空気の生成可否を確認しました。このとき、印加電圧は25 kV、27.5 kV、30 kV、印加コイル



(a) 圧縮したアルミ缶



(b) 体積変化量

図5 圧縮空気を用いた雷充電の実験結果

の巻き数は5, 10, 20回としました。また、圧縮空気の生成量を確認するため、雷サージ印加前後の体積変化量について、アルミ缶内部に水を入れることで計測を行いました。

実験の結果、雷サージの印加によってアルミ缶は図5(a)のように圧縮されたことから、雷サージ電流により圧縮空気が生成できることを確認しました。また、このときのピーク電流値と体積変化量を比較した結果を図5(b)に示します。図5(b)より、体積変化量はピーク電流値に正比例し、印加コイルの巻き数が多いとピーク電流値は低くても、体積変化量が大きくなることを確認しました。本実験結果より、印加電流値に比例して得られる圧縮空気の生成量が増加したことから、雷エネルギーを蓄積する方式の1つとして、圧縮空気への変換が有効であることを確認できました。

### まとめと今後の展望

本稿では、NTT宇宙環境エネルギー研究所が取り組んでいる、重要インフラや街への落雷そのものをなくす落雷制御技術と、雷エネルギーを活用する雷充電技術の進捗状況を紹介しました。ドローンを利用した落雷制御技術については、実際の雷雲下での実験により、ドローンを利用した落雷誘発・誘導に世界で初めて成功し、開発した

耐雷ドローンが自然雷にも耐えることを実証しました。また雷充電技術については、雷エネルギーを電気から別のエネルギーに変換して蓄積する技術の1つとして、圧縮空気へ変換する方式の実現可能性を確認しました。

今後、落雷制御技術については、ドローンを使用して重要設備を雷から守るシステムの実用化を見据え、前述の①雷誘発、②雷誘導に加え、③雷予測についても研究開発を加速していきます。①雷誘発に関しては、実用化に向けては成功率の向上が不可欠です。そのため、現在取り組んでいる電界変動を利用した誘発技術に関し、誘発時(スイッチON直後)に発生する一連の現象を電磁界・流体シミュレーション等も活用して定量的に把握することで、雷誘発の成功要件の解明をめざします。これと並行して、実験により成功事例を積み重ね、そのデータから成功要件を抽出する帰納的アプローチも進めます。②雷誘導については、より耐雷性能の高いドローンの実現をめざし、耐雷ケージ設計法のさらなる研究を進めます。加えて、実用化時に想定される導電性ワイヤの取り扱いや、ドローン運用(離着陸、充電・バッテリー交換、ワイヤ装着)の自動化といったハードウェア面の課題についても、外部組織と連携し、課題の克服をめざします。さらに③雷予測については、従来よりも時空間的にピンポイントで発電

位置・時刻を予測する技術の研究を進めます。雷充電技術については、将来的な雷エネルギー利用に向け、現在検討中の圧縮空気を用いた方式を中心に、より効率的に充電可能な手法の検討を進めていきます。

### 参考文献

- (1) 高度情報社会の雷害問題調査専門委員会：“高度情報社会の雷害問題の実情と研究課題,” 電気学会技術報告第902号, 2002.
- (2) 手嶋・波多・Wu・高木・Wang・高木：“ドローンを用いた人工誘雷技術開発の基礎的研究,” 電気・電子・情報関連学会東海支部大会, E4-3, 2018.
- (3) A. Houard, et al. : “Laser guided lightning,” Nat. Photon., Vol.17, pp.231-235, 2023.
- (4) 丸山・王・栢田・長尾・池田・上田・高田・大橋・黄・ウ・高木：“ドローンからの導線投下による人工誘雷実験,” 日本大気電気学会, S2-1, 2023.
- (5) A. Mohan: “Feasibility of storing lightning energy being discharged through a lightning arrester by a capacitor,” IJITEE, Vol. 9, No.10, August 2020.
- (6) 猿田・佐藤・中道・戸島・久保：“圧縮空気エネルギー貯蔵システム,” 神戸製鋼技報, Vol.70, No.1, pp.42-46, July 2020.



(左から) 長尾 篤 / 丸山 雅人

本稿では、ドローンを使用して自然雷を誘発、誘導するドローン誘雷実験の世界初成功の結果、さらに、雷サージ電流を利用して雷のエネルギーを貯蔵する圧縮空気の生成実験の結果について紹介しました。

### ◆問い合わせ先

NTT宇宙環境エネルギー研究所  
企画担当

# 光の技術を駆使した宇宙太陽光発電

宇宙太陽光発電は、宇宙で受けたエネルギーを地上へ無線で送る次世代のエネルギー技術で、天候や昼夜の影響を受けず安定した電力供給が可能です。NTT宇宙環境エネルギー研究所では、太陽光励起レーザ技術、長距離エネルギー伝送技術、高強度ビームエネルギー変換技術の研究開発を進めています。本稿では、波長1064 nmのレーザ光に対応した光電変換素子を開発し、1 cm<sup>2</sup>で世界最高水準の変換効率を達成した成果を報告します。

キーワード：#宇宙太陽光発電、#レーザエネルギー伝送、#光電変換素子

とろうみ ようへい  
**鳥海 陽平**  
あおぬき しょう  
**青貫 翔**  
たかはし まどか  
**高橋 円**

NTT宇宙環境エネルギー研究所

## 宇宙太陽光発電とは何か ——地球の未来を照らす宇宙のエネルギー

地球温暖化、化石燃料への依存、資源の枯渇、そして環境汚染——これら、21世紀に生きる私たちが直面している社会問題の解決策として近年注目されているのが「宇宙太陽光発電（SSPS：Space Solar Power Systems）」と呼ばれる技術です。これは、図1にイメージを示したとおり宇宙空間に設置した巨大な発電衛星で集めたエネルギーを地球に無線送電するという未来的構想です。NTT宇宙環境エネルギー研究所ではこの宇宙太陽光発電の研究開発を進めています。

### ■宇宙で発電し、地球に送るメリット

宇宙太陽光発電が注目される最大の理由は、その「発電環境」にあります。地上に設置された太陽光パネルは、天候や昼夜の影響を受けやすく、出力の安定性に課題があります。一方、宇宙空間では大気による減衰がなく、太陽から届く光をダイレクト

に受けられることに加え、静止軌道（高度約3万6000 km）では、太陽光がほぼ24時間365日照射され、地上が夜間や悪天候であったとしても発電できるため、図2のとおり地上と比べて単位面積当り最大で約10倍の太陽エネルギーを受け取ることができると試算されています。

### ■無線で送るエネルギー：レーザ方式とその優位性

宇宙で得たエネルギーを地上に送るには、当然ながら「電線」を使うことはできません。無線でエネルギーを送る方式として、長年にわたり検討されてきたのはマイクロ波方式ですが、近年ではレーザ方式が新たな選択肢として脚光を浴びています。レーザ光はマイクロ波に比べて波長が短く、高い指向性を持つため、より小型の装置で精密なエネルギー伝送が可能です。例えば、マイクロ波方式による宇宙太陽光発電では、宇宙側・地上側ともに数km規模のアンテナが必要とされます。一方、レーザ方式では、送受信装置を数10 m規模に抑えることが可能となり、システムの小型化・低コ

スト化が期待されます。さらに、レーザビームは直進性が非常に高いため、受信装置を都市部や工場の近傍といった消費地の近くに設置することが可能です。

### ■波長選定——3つの重要な観点

宇宙から地上へレーザ光で電力を送るには、レーザの「波長」の選定が極めて重要です。特に以下の3つの観点が重要となります。

- ① レーザ光が大気中をどの程度透過できるか
- ② その波長における光電変換素子の変換効率
- ③ ビームの広がりやすさ

まず、大気中の透過率は波長によって大きく異なります。例えば、0.9~1.1マイクロメートル（μm）の波長帯では、大気透過率が95%程度と非常に高く、長距離伝送でもエネルギー損失を抑えることが可能です。このため、宇宙太陽光発電では、この高透過率の波長帯を利用することが有利とされています。次に、光電変換素子の性能はレーザの波長に大きく依存します。一般



図1 宇宙太陽光発電のコンセプト図

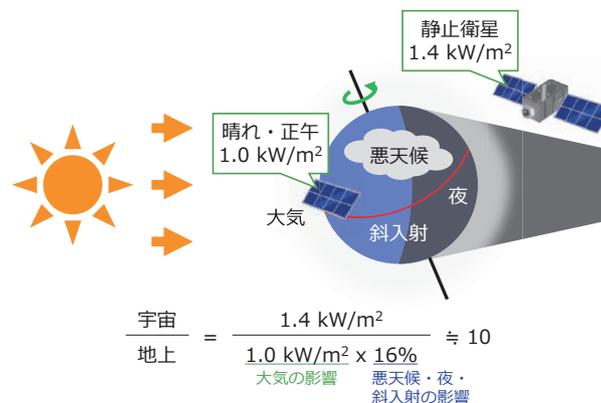


図2 宇宙太陽光発電で得られるエネルギー量の見積もり

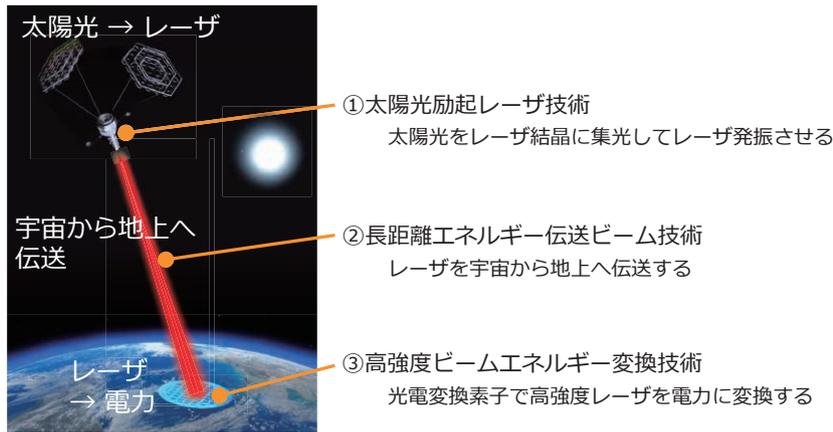


図3 宇宙太陽光発電実現に必要な3つの技術

的に、波長が短いほどエネルギー変換効率は高くなりますが、大気中の散乱や吸収の影響も大きくなるため、変換効率と大気透過性のバランスをとることが求められます。加えて、レーザー光の広がり具合も重要な要素です。伝送距離が約3万6000 kmにも及ぶ宇宙太陽光発電では、ビームの拡散を最小限に抑える必要があります。このような観点から、出力波長が約 $1\mu\text{m}$ で、かつ指向性の高いレーザーが有望視されています。ただし重要なのは、宇宙太陽光発電においては、地上型のファイバーレーザーのような電源駆動型ではなく、「太陽光励起型レーザー」の利用が前提とされている点です。太陽光励起レーザーは、太陽光を直接ポンピング光源として用い、発振する仕組みを持つため、宇宙空間でのエネルギー源として非常に適しています。現在の研究では、これらのレーザーの出力波長を約 $1\mu\text{m}$ 付近に調整することが可能であり、大気透過性や光電変換素子の効率とも整合性の取れた設計が進められています。このように、宇宙太陽光発電における波長選定は、レーザーの発振方式、大気との相互作用、そして光電変換素子との適合性を総合的に評価したうえで行う必要があります。

#### ■安全性は確保できるのか

レーザー方式による宇宙太陽光発電に対する懸念の1つが、強力なレーザー光を用いたエネルギー伝送に関する「安全性」です。一般に高出力のレーザーを人体に照射されると、失明や火傷といった深刻な健康被害を引き起こす可能性があります。宇宙太陽光

発電では、宇宙から地上に向けて高エネルギーのレーザー光を照射するため、万が一にもレーザーが人間や動物（例えば鳥など）に当たることがあってはなりません。実用化に向けては厳密な安全設計が求められます。具体的には、地上の受光装置は誤照射を防ぐために密閉構造とし、周囲には高感度のセンサを配置して、万一ビームが逸脱した場合には即座にレーザー照射を停止できるシステムが組み込まれます。さらに、航空機や鳥などの飛行物体を監視する仕組みも導入され、空域の安全が確実に確認された場合にだけエネルギー伝送を開始するよう設計されます。こうした多重の安全対策により、レーザー方式の高い指向性とエネルギー密度という特長を活かしながら、安全かつ柔軟な運用が可能となります。

#### ■コストは見合うのか

技術的に実現可能であっても、経済的に見合わなければ社会実装には至りません。現在の段階で宇宙太陽光発電が抱える最大の課題は、この「経済性」にあります。例えば、火力発電（天然ガス）の平均発電コストは、1 kWh当り約10円程度です。NASAによる試算<sup>(1)</sup>によれば、今後2050年には地上での太陽光発電コストは2.6円/kWh程度に低下する一方で、SSPSの発電コストは打ち上げ・衛星建設・地上設備を含め90円/kWh程度になり、地上での太陽光発電と比べて35倍になります。これだけを見ると競争力は著しく低いように思われます。しかし、ここ数年で状況は変わりつつあります。再利用型ロケットや小型衛星、

軽量太陽電池の開発が進んだことで、1 kg当りの宇宙輸送コストは2000年代までは1万USドル水準でしたが、スペースXのFalcon 9では1 kg当り約3000USドルを実現しています。このようなコスト低減の動きが続けば、宇宙太陽光発電のライフサイクルコストも今後大きく下がる可能性があります。現時点では火力発電とのコスト比較において差はありますが、長期的な技術進展により現実的な選択肢となることが期待されています。

#### ■私たちの暮らしにどんな影響を与えるのか

宇宙太陽光発電が実用化されれば、私たちの生活は大きく変わるかもしれません。まず、災害時でも空から電力を送れるという特性は、非常時のレジリエンスを劇的に高めます。さらに、送電インフラが整備されていない離島や山間部、あるいは開発途上国においても、受信設備さえ整備すれば安定した電力供給が可能になります。また、温室効果ガスを排出せず、環境負荷が極めて小さいという点から、脱炭素社会の柱となるエネルギー源として国際的にも戦略的価値が高くなると予想されます。

#### ■NTT宇宙環境エネルギー研究所の取り組み

宇宙太陽光発電の実現には、宇宙で得られた太陽光エネルギーをいかに効率良く地上で活用するかという観点から、大きく3つの技術的課題を克服する必要があります。第一に求められるのは、宇宙空間で集めた太陽光を高効率にレーザー光へ変換する太陽光励起レーザー技術です。宇宙では地上よりも豊富な太陽エネルギーを得られますが、限られた資材で装置を構築・打ち上げる必要があるため、変換効率の高さが極めて重要です。未変換のエネルギーは熱として放出されるため、効率が低ければ放熱機構の負担も増大してしまいます。宇宙太陽光発電と聞くと、宇宙空間に設置したソーラーパネルで電力に変換して、電気を用いてレーザー光をつくと誰しも想像します。しかし、よりシンプルに宇宙空間において太陽光を直接ポンピング光源として用い、電力を介さずにレーザーを発振する太陽光励起レーザーと呼ばれる技術の検討を私たちは進めています。これまで変換効率の向上を目的に

Nd/Cr:YAGやNd/Ce:YAG\*といった有望な結晶材料を試作し、共振器構造の設計および地上での太陽光励起による発振評価実験を進めてきました<sup>(2)</sup>。

次に重要なのが、宇宙で発振されたレーザー光を約3万6000 km離れた地上に向けて、正確かつ効率的に伝送する長距離エネルギー伝送技術です。レーザー光は指向性に優れますが、長距離の伝送ではビームが徐々に広がり、大気を通過する際には「大気擾乱」と呼ばれる空気の揺らぎの影響を受け、受光パネルへ正確に届かないリスクがあります。これらの影響を抑えるための光学素子や光学設計の開発を進めています。回折光学素子などを用いて長距離エネルギー伝送に適したレーザービームの設計を行い、地上水平方向で長距離伝送試験を実施してきました<sup>(3)</sup>。

そして最後に、高強度で到来するレーザー光を別のエネルギーに変換する高強度ビームエネルギー変換技術です。設置環境や用途によっては水素や熱など輸送・貯蔵に適したエネルギー形態への変換も選択肢となりますが、まずは電気への変換を想定し光電変換素子の研究開発を進めています。発電コストの低減に向けた変換効率向上をめざし、半導体材料の組成検討や、レーザー光に適した受光パネル設計などに取り組んでいます<sup>(4)</sup>。

これらはいずれの技術も宇宙太陽光発電実現において重要な技術ですが、本稿では特にこれまで紹介機会の少なかった高強度ビームエネルギー変換技術について詳細に説明します。波長1064 nmのレーザーに対応した光電変換素子の開発と、それによって得られた世界最高水準の変換効率の成果について報告します。

## レーザー受光用光電変換素子の技術開発

### ■光エネルギーを電力に変換するためのデバイス技術

光電変換素子は、光エネルギーを電気エネルギーに変換するためのデバイスです。もっとも身近な例は太陽光発電に使われる太陽電池で、光を受けると電気を発生させ

ます。ほかにも、光通信に使用されるフォトダイオードのような応用もあり、用途によってさまざまな種類があります。宇宙太陽光発電システムでは、宇宙空間で得られたエネルギーをレーザーに変換し、それを地上に向けて送るといった手法が検討されています。そのため、強いレーザー光を効率良く電気に変換できる光電変換素子が必要になります。ここで重要なのは、従来の太陽光を対象とする太陽電池と、高エネルギー密度を持つレーザー光を受ける光電変換素子とは求められる性能や設計思想が大きく異なる点です。太陽光は波長範囲が広く、比較的エネルギー密度が低いのに対し、レーザー光は単一波長で強い指向性を持ち、高出力なエネルギーを送ることができます。このため、レーザー光用の光電変換素子にはレーザー波長への最適化に加え、より強いエネルギーを受けるための耐熱性や高強度の入射光への適応性が求められます。しかし現在のところ、大出力のレーザー光に特化した光電変換素子の開発例は多くなく、十分な変換効率を実現できる素子はまだ限られています。この分野での新しい技術開発は、宇宙太陽光発電の実現に向けて極めて重要です。

### ■レーザー光に対応した光電変換素子材料の比較と課題

宇宙太陽光発電には1  $\mu\text{m}$ 帯のレーザー光が適していると前述しました。波長約1  $\mu\text{m}$ のレーザー光に対応した光電変換素子の材料としては、いくつかの候補が挙げられます。現在の太陽電池市場の約95%を占め、スマートフォンなどにも使われているシリコン(Si)をはじめ、III-V族半導体であるインジウムガリウムヒ素リン(In-

GaAsP)、インジウムガリウムヒ素(In-GaAs)、インジウムアルミニウムガリウムヒ素(InAlGaAs)などがあります。そのほか、軽量でフレキシブルな性質を持つCIGS系(カルコパイライト系)や、近年急速に注目を集めているペロブスカイト型の材料なども有望視されています。中でもIII-V族半導体は、特に高品質な素子をつくるのが可能で、他の材料と比べて高い光-電力変換効率が期待できます。実際に、他の研究機関ではInGaAsを使って波長1064 nmのレーザー光に対して、変換効率が50.6%に達したという報告もあります。しかし、これら研究開発中の光電変換素子はミリメートル規模の非常に小さい素子でつくられており、大面積の光電変換素子を開発することが宇宙太陽光発電システムを実現するために不可欠です。

### ■1064 nmレーザー対応InGaAsP光電変換素子の試作と性能評価

NTT宇宙環境エネルギー研究所では、波長が1064 nmのレーザー光に特化したInGaAsP光電変換素子を1  $\text{cm}^2$ の面積で作製しました。図4に試作した素子の外観写真を示します。この素子では、厚さ約2  $\mu\text{m}$ のInGaAsP層によって光を吸収し、電力として取り出します。表面には、金と銀を積層した電極を形成し、半導体プロセスで一般的なリフトオフ法を用いてパターン化しました。光の吸収を妨げないよう、表面電極の面積をできるだけ小さくする工

\* Nd/Cr:YAG, Nd/Ce:YAG: イットリウムとアルミニウムの複合酸化物( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ )から成るガーネット構造の結晶にネオジムとクロムやセリウムを添加することで、太陽光の波長帯の光の吸収性を高めたレーザー発振媒質用の結晶。

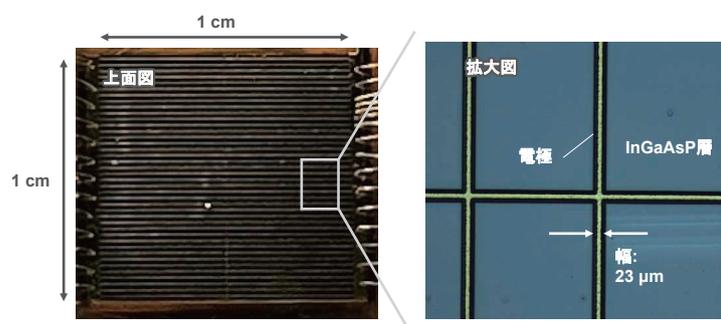


図4 試作した1  $\text{cm}^2$ の光電変換素子の拡大写真

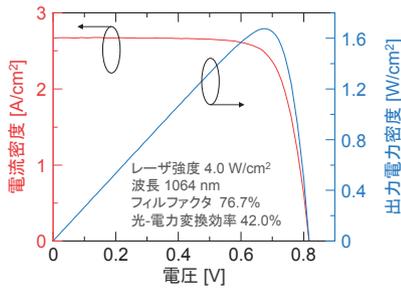


図5 試作した1 cm<sup>2</sup>の光電変換素子の測定結果

夫がなされています。具体的には、電極幅は23 μmで、電極によって影になる部分は試料表面全体の7%に抑えられています。また、電極の厚さは約10 μmと、一般的な光電変換素子に比べて約50倍の厚みを持ちます。これは、大出力レーザーに対応するため、電極抵抗を低減し、変換効率の低下を抑えるねらいがあります。素子の表面には、シリコン窒化物とシリコン酸化物を積層した反射防止コーティングも施しました。実験では、市販の波長1064 nmのファイバレーザーを用い、凸レンズでレーザーのビーム径を1 cmに調整し、95 cm離れた位置から照射しました。図5にその測定結果を示します。光電変換素子の光-電力変換効率はレーザー入射強度が増加するにつれて向上し、1 cm<sup>2</sup>当り4 Wのレーザー入射強度のときに最大で42%に達しました。この値は、これまでの1 cm<sup>2</sup>規模の光電変換素子において世界でもっとも高い値です。光-電力変換効率に大きく影響する「フィルファクタ」と呼ばれるパラメータの評価も行いました。フィルファクタは、光からどれだけ効率良く電力を取り出せたかを示す指標です。今回の素子では、1 cm<sup>2</sup>当り3 Wの入射強度で最大76.9%のフィルファクタが得られました。電極を厚くする前の素子では、2 Wで最大値を記録していたため、電極の厚みを増すことで高強度照射時の効率低下を防げたことが分かります。さらに、フィルファクタと電気抵抗の関係についても検討しました。電気抵抗が大きいと電流が流れにくくなり、変換効率下がってしまいます。解析の結果、電気抵抗は1 cm<sup>2</sup>当り4 Wの入射強度で $1.3 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}^2$ と評価され、従来のデバイスと比較して約20%減少しました。

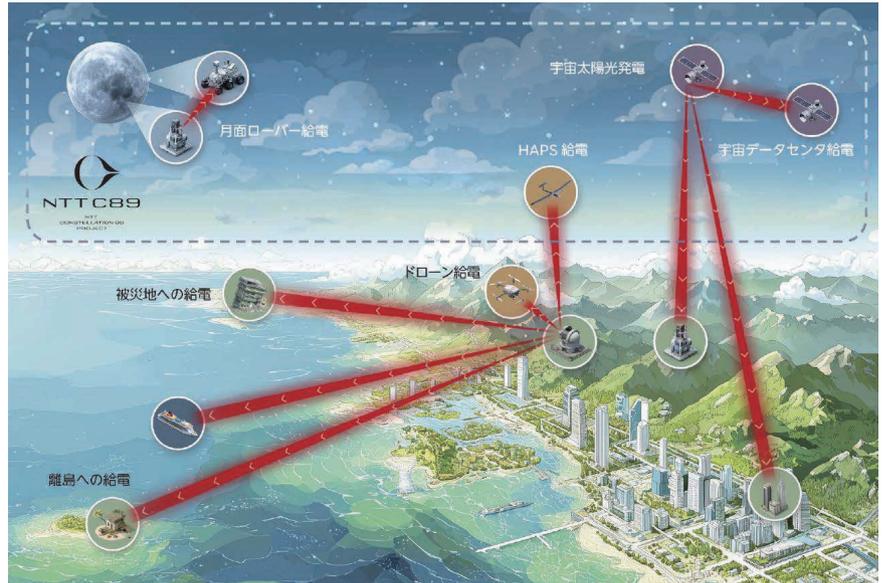


図6 宇宙太陽光発電，レーザーエネルギー伝送の利用シーン

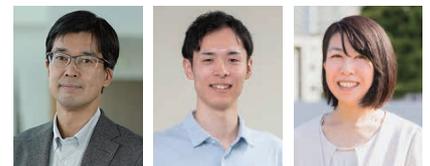
### 今後の展望

NTT宇宙環境エネルギー研究所では、光電変換素子の技術開発に加え、太陽光励起レーザーや長距離エネルギー伝送ビーム技術の研究も並行して進めており、宇宙太陽光発電の実現に向けた研究開発を推進しています。各要素技術の性能向上に加えて、それらを組み合わせた実証実験にも取り組んでいきます。本研究で得られた成果は、宇宙太陽光発電システムにとどまらず、地上におけるレーザー無線給電システムへの応用も期待されています。具体的には、図6に示すように従来電力ケーブルの敷設が困難であった離島や被災地などの遠隔地への電力供給、さらにはドローンや高高度無人機 (HAPS) など移動体への無線給電技術としての展開も見込まれます。今後も、私たちは持続可能な社会の実現に向けて、研究開発を加速していきます。

#### 参考文献

- (1) <https://project.nikkeibp.co.jp/ms/atcl/19/news/00001/03922/?ST=msb>
- (2) 鈴木・鳥海・落合・田中・長谷川・元廣：“宇宙太陽光発電に向けた太陽光励起レーザー用単結晶の作製・特性評価。”レーザー学会研究会報告 = Reports the on topical meeting of the Laser Society of Japan RTM23, pp. 1-6, July 2023.
- (3) N. Ochiai, Y. Toriumi, K. Kashiwakura, S. Ota, K. Yamaguchi, Y. Mando, Y.

- Takeuchi, M. Takahashi, and Y. Tsumura: "Demonstration of 15% Efficient Optical Wireless Power Transmission Over 1 km With Atmospheric Turbulence," *Electron. Lett.*, 2025. doi:10.1049/ell2.70379.
- (4) S. Aonuki, T. Oshimo, K. Tabata, T. Yamada, J. Suzuki, R. Aoyama, S. Uchida, K. Akahane, N. Ochiai, Y. Suzuki, K. Kashiwakura, K. Nishioka, M. Arai, Y. Toriumi, and M. Takahashi: "42% conversion efficiency in 1-cm<sup>2</sup>-area InGaAsP laser power converters," 53rd IEEE PVSC, Montreal, Canada, June 2025.



(左から) 鳥海 陽平 / 青貫 翔 / 高橋 円

NTT宇宙環境エネルギー研究所では、持続可能な社会と安心な暮らしを実現するため、宇宙太陽光発電をはじめとする革新的な技術の研究開発を推進していきます。

#### ◆問い合わせ先

NTT宇宙環境エネルギー研究所  
環境負荷ゼロ研究プロジェクト  
次世代エネルギー技術グループ



# 核融合（フュージョンエネルギー）の実現に向けて ——AIとデータサイエンスによる知の融合

核融合は次世代のクリーンエネルギーとして期待されていますが、実現には高温プラズマの精密な制御が不可欠です。近年、AI（人工知能）やデータサイエンスを活用することで、観測データから現在の状態を瞬時に推定する技術や数式モデルを推定する技術が開発されており、新たな制御方法の開発が進んでいます。NTT宇宙環境エネルギー研究所は量子科学技術研究開発機構（QST）などと連携し、AI・データサイエンス技術を融合した制御技術の研究を推進しており、異分野協創によるエネルギー革新に挑戦しています。

キーワード：#核融合エネルギー、#AI、#データサイエンス

こじま とみひこ しらさわ ゆいた  
児島 富彦 / 白澤 唯汰  
よねだ りょうた たかはし まどか  
米田 亮太 / 高橋 円

NTT宇宙環境エネルギー研究所

## 核融合とは何か？そして、なぜ今注目されているのか

私たちが日々使っている電気やエネルギー。その多くは石油や石炭といった化石燃料によってつくられています。気候変動問題や資源の枯渇が世界的な課題となる中、「次世代エネルギー」として注目されているのが「核融合エネルギー」です。核融合（Nuclear Fusion）<sup>\*1</sup>とは、太陽の中心で起こっている自然現象であり、軽い原子核どうしが融合することで莫大なエネルギーを生み出す反応です。核分裂と異なり、核融合では爆発的な反応や放射性廃棄物がほとんど発生しないため、「クリーン」で「安全」、そして「持続可能」なエネルギー源として期待されています。特に近年、地球温暖化への対応やカーボンニュートラルの達成に向けて、再生可能エネルギーと並んで核融合が国際的に注目を集めています。

## 日本における核融合の国家戦略とJ-Fusion構想

日本は世界有数の核融合研究の先進国として、長年にわたりこの分野をリードしてきました。2024年3月には、核融合エネルギーの社会実装に向けた産官学連携の枠組み「フュージョンエネルギー産業協議会（J-Fusion）」が設立され、2030年代の発電実証、2050年以降の商用炉実現を見据えた国家的な戦略が加速しています。この協議

会には、大学・国立研究機関に加え、NTTを含めた民間企業も参加しており、核融合の社会実装をめざした「オールジャパン体制」が構築されています。

## 実現に向けた課題と情報科学が切り拓く新しいアプローチ

核融合を地上で実現するためには、1億度を超える超高温状態のプラズマ<sup>\*2</sup>を安定して閉じ込め、かつリアルタイムで精密に制御する必要があります。これは非常に高度な技術が求められるチャレンジです。特に近年、実験で得られるデータ量は飛躍的に増加しており、人手や従来の手法では処理しきれない情報が蓄積されています。そこで、これまで通信や情報処理の分野で発展してきたAI（人工知能）やデータサイエンスの力を応用することで、核融合研究に革新をもたらそうとしています。本稿では、NTT宇宙環境エネルギー研究所が量子科学技術研究開発機構（QST）などと協力して進めている、「AIによる磁気平衡予測」と「スパースモデリングによる数式モデルの推定」といった最新技術について紹介します<sup>(1),(2)</sup>。

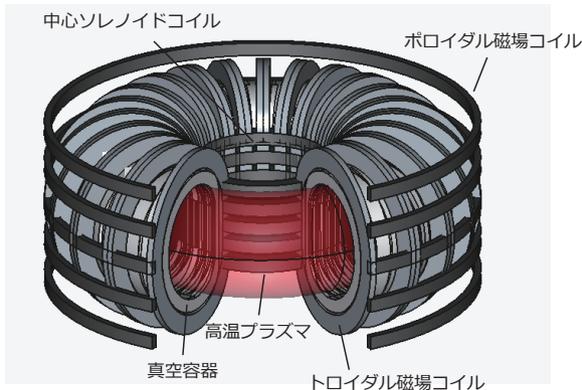
### ■リアルタイムで予測する：AIによる磁気平衡予測

(1) リアルタイム制御の課題

日本を含む多くの国で研究されている「トカマク型核融合装置<sup>\*3</sup>」（図1(a)）では、プラズマを磁場の力でドーナツ状に閉じ込

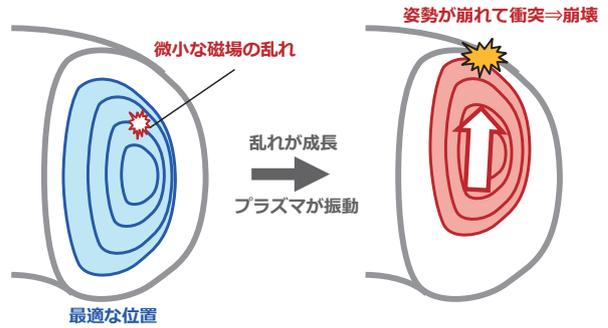
める仕組みが採用されています。しかし、プラズマは非常に不安定な性質を持っており、その位置がずれると、装置にダメージを与える可能性もあるため、常に高精度の制御が求められます（図1(b)）。さらに、プラズマ中の粒子は非常に高速（1億度のプラズマでは秒速90万m程度）で運動しているため、安全な運転を行うには、状態の把握から制御までを非常に短時間で行う必要があります。このリアルタイム制御<sup>\*4</sup>のためには、まず現在のプラズマがどこにあり、どのような形状をしているのかを正確に知る必要がありますが、高温プラズマからは可視光線が発生しないため、カメラを使った精密な制御は行えません。そこで、磁場や電場といった情報からプラズマの情報を推定し、その情報を基に電磁コイルに流れる電流を調整して磁場を制御し、プラズマを理想的な位置に保ち続けるオペレーションが行われます（図2）。現在のプラ

- \*1 核融合：軽い原子核どうしが融合してより重い原子核をつくる際に、大量のエネルギーを放出する反応。太陽や恒星のエネルギー源。
- \*2 プラズマ：原子が電離して電子とイオンに分かれた状態。固体・液体・気体に次ぐ「第4の状態」と呼ばれます。
- \*3 トカマク型核融合装置：ドーナツ型の真空容器に磁場をかけてプラズマを閉じ込める装置の1つ。外部に設置された超伝導コイルでつくる強力な磁場とプラズマ中に流れる電流がつくる磁場によってプラズマを一定空間に閉じ込めます。
- \*4 リアルタイム制御：状態の変化に即応して制御信号を出す技術。核融合プラズマではミリ秒オーダーの応答速度が必要。



真空容器の外側に配置したコイルによって作られる磁場と、プラズマ中に電流を流すことにより作られる磁場を組み合わせ、高温プラズマを閉じ込める装置

(a) トカマク型核融合装置 (イメージ)



(b) プラズマの不安定性による自己崩壊の例

図1 トカマク型核融合装置とプラズマの不安定性による自己崩壊の例

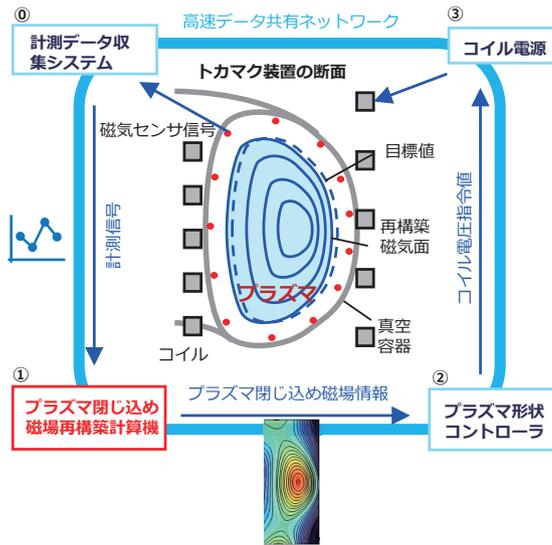


図2 トカマク型装置におけるプラズマ形状制御システムの全体構成

ズマの状態を知るために、核融合装置の内側の壁には多数の磁気センサ<sup>\*5</sup>が取り付けられており、設置箇所における磁場の情報が読み取られます。磁場は人間の目には見えませんが、センサがその強さや方向を電

気信号として感知します。これらの信号を使って真空容器内の磁場の空間的な分布を逆算することで、プラズマがどこにあるのかを把握するのです。この作業を「再構築」と呼びます(図2①)。

(2) AI導入の意義と可能性

再構築では、マクスウェル方程式などの電磁気学の法則に基づいたプラズマ物理の計算式を使い、膨大な計算を段階的に行い

ます。その後、目標値と再構築された磁場の空間分布のズレを計算し、目標値に近づけるための次の制御値を算出します(図2②)。そして、コイル電源に指令を出し(図2③)、コイルの電流値を変更して磁場を制御します。

この再構築手法は物理法則に基づく計算であるため高精度な推定が可能ですが、1つ大きな問題があります。それは時間がかかるという点です。例えば、計測器の信号から磁場の空間的な分布を再構築するのに数100msを要する場合があります。プラズマはほんの数10msで状態が変わってしまうため、これでは対応が間に合いません。現在は、プラズマの外側の磁場分布だけを正確に計算する手法が取られており、リアルタイムでのプラズマ形状の再構築が行われていますが、プラズマが安定するかどうかを判断するためには、プラズマ内部の空間分布の情報も必要になります。そこで私たちが取り組んでいるのが、AIを活用した新しい再構築手法の開発です。AIは、複雑な方程式を段階的に解かなくても、データから直接パターンを学び取り、答えを瞬時に出すことができる強力なツールです。

\*5 磁気センサ：真空容器周辺に設置され、磁場の強さや方向を電気信号として測定する装置。

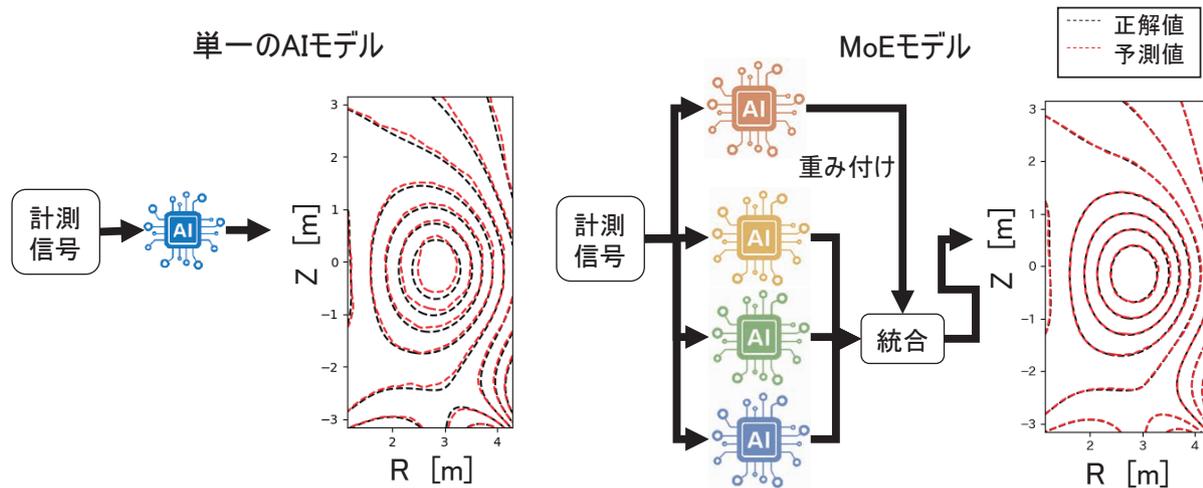


図3 単一モデルとMoEモデルによる磁場構造の予測比較

### (3) AIモデルの課題と進化

NTT宇宙環境エネルギー研究所ではQSTと共同研究を実施し、磁気センサの信号を入力として与えることで、瞬時にプラズマの磁場分布を予測するAIモデルを開発しました<sup>(3)</sup>。最初は単一のニューラルネットワークモデルを使用しましたが、実験装置のように動きが激しく変化する状況では、予測精度が不十分でした。定常状態、つまりプラズマが一定時間変動しない状況ではそれなりに正しく動作しましたが、加熱や電流制御などでプラズマがダイナミックに変化すると、予測が追いつかなくなるのです。この課題を乗り越えるために、共同研究において「混合専門家モデル (MoE: Mixture of Experts) \*<sup>6</sup>」という仕組みを取り入れました。これは複数のAIをチームとして扱い、それぞれのAIが得意な状況で活躍できるようにする考え方です。例えば、プラズマの形状が安定しているデータや、形状が極端に変化するようなデータなどを大量に用意し、複数のAIを同時に学習させます。その際に、状況把握・指令制御AIがどのAIに学習させるかを決定することで、最終的に「ゆっくり変化するプラズマが得意なAI」や「急激に動くときに強いAI」など、いくつかのモデルが出来上がります。そして、実際の状況に応じて「今

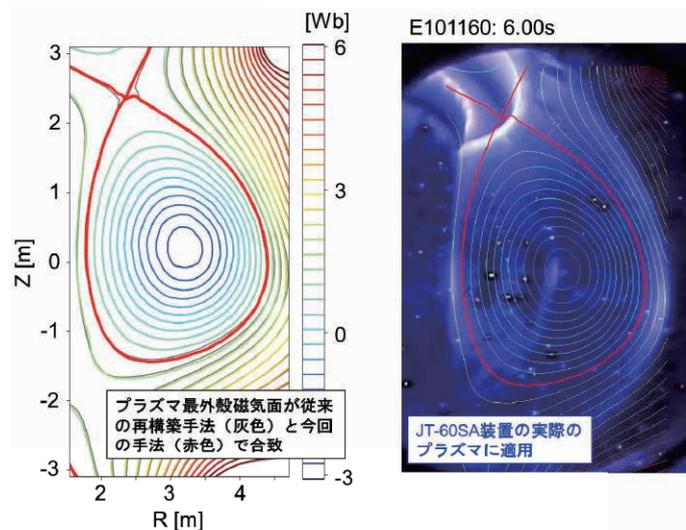


図4 従来法との比較と実プラズマへの適用による磁気面再構築結果

はこのAIを多めに使おう」「この2つの意見をバランスよく混ぜよう」と判断することで、MoE全体として柔軟かつ高精度な予測が可能になります。しかも、計算は1回で済むので、高速化が見込まれます。

### (4) 実証実験での成果と展望

図3は単一のニューラルネットワークで予測した結果と、MoEを用いた予測結果の比較です。単一のネットワークでは、予測(赤の等高線)と正解(黒の等高線)に乖離がみられるのに対し、MoEでは非常によく一致していることが分かります。こ

のMoEによる磁束の再構築手法を、実際の「JT-60SA \*<sup>7</sup>」という装置に適用しました。JT-60SAは、QST那珂フュージョン科学技術研究所にある世界でも最大級のトカマク型核融合実験装置であり、将来の発電炉を見据えて先進的な核融合プラズマの実

\*<sup>6</sup> 混合専門家モデル：複数のAIモデルの推論結果を状況に応じて足し合わせて出力するモデル。それぞれのモデルが得意な場面を分担することで精度と柔軟性を両立します。

\*<sup>7</sup> JT-60SA：日本と欧州が共同で建設した現時点で世界最大のトカマク型核融合実験装置。

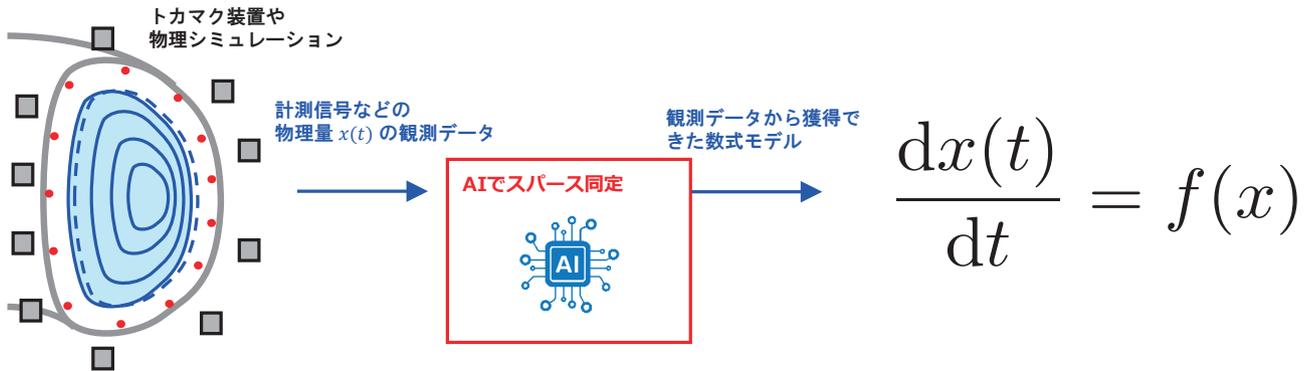


図5 スペース同定による数式モデルの構築の流れ

験が行われています。この装置に取り付けられた磁気センサのデータを入力とし、MoEを使った予測を試した結果、従来の物理モデルと比べても遜色のない精度で、プラズマの位置や形状を再現できることが分かりました。特に、AIによる予測で、プラズマの半径が数mにも及び中で1 cm程度の誤差に収まったのは、世界で初めての成果です(図4)。また、これまでは再構築によって主にプラズマの「境界」のかたちを予測していましたが、MoEの応用によって内部の電流や圧力といった「中身」の構造までも予測できる可能性がみえてきました。これにより、不安定性を起こす前に予兆を検出し、事前に制御するという高度な制御方式が実現するかもしれません。

AIと物理の融合による新しい制御技術は、これからの核融合研究を加速させる大きな力になります。正確さを重視した物理モデルと、柔軟性とスピードに優れたAIを組み合わせることで、私たちは未知の領域に踏み出しつつあります。未来のクリーンエネルギーの実現に向けて、今後もこのように多分野の知識と技術を融合させて取り組みを進めていきます。

■データから物理を読み解く：スパースモデリングによる知の獲得

(1) AIによる予測とスパースモデリング

AIによる高速・高精度な磁気平衡予測が、核融合炉のリアルタイム制御技術に新たな可能性をもたらしつつあります。その一方

で、私たちはもう1つの視点から、プラズマ現象の理解を根本から深める試みも進めています。それが「スパースモデリング<sup>\*8</sup>」と呼ばれるデータサイエンスの手法を用いて、対象の現象の数式モデルを獲得することです。本研究はNTTコンピュータ&データサイエンス研究所との連携の中で生まれました。

スパースモデリングとは、物事を少ない要素で近似する試みです。大量のデータから本当に重要な要素やルールなどをみつけることに役立つデータサイエンスの手法として知られています。例えば、低解像度の画像から高解像度の画像を作成すること、X線CT画像やブラックホールの観測データに基づく再構成など、さまざまな科学分野で使われていて、効果があることが実際に確かめられています。社会に存在する膨大なデータである自然界の観測データや遺伝子データ、マーケティング市場におけるユーザ情報など同様に、時間や空間によって複雑に変化するプラズマに対しても有効な手法だと期待されています。

(2) スパース同定による数式モデルの推定

私たちのチームでは、スパースモデリングの1種である「スパース同定<sup>\*9</sup>」と呼ばれる方法を使っています。これは、観測された時間変化のデータが従っている数式(微分方程式)が少数の要素から構成されているという仮定のもと、観測データを使って

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x)$$

その数式を推定するものです。これまでなら、複雑な現象には高度な理論やシミュレーションが必要でしたが、スパース同定を使えば、観測データから直接、意味の分かりやすい数式モデルを推定することができます。さらに私たちは、「オラクル性<sup>\*10</sup>」と呼ばれる統計学の性質に着目しました。オラクル性は、データの量が増えれば増えるほど、その推定値がより正確に、そしてより簡潔に(つまり余計なものを省いて)正しい答えに近づいていく性質です。この性質をスパース同定に導入することで、より正確な数式モデルの獲得が可能になります。

(3) スパース同定と「オラクル性」による数式モデルの構築

実際に私たちは、プラズマの温度や密度といった観測データを用いて、オラクル性を持つスパース同定を適用し、データが従う簡易な数式モデルを自動的に抽出することに成功しています(図5)。ここで得られる数式モデルは、既存の理論に基づいて定式化されたものとは異なり、観測された現象の背後にある構造を、最小限の数式項

\*8 スパースモデリング：データの本質を少数の要素で説明することをめざす手法。ノイズに強く、解釈性の高いモデルが得られます。

\*9 スパース同定：観測データに対して、それを支配する微分方程式を、最小限の数式項で自動的に推定する技術。

\*10 オラクル性：推定手法が、十分なデータがあれば「真のモデル構造」を正確に特定できるという性質。統計学的な性能保証の一種。

で表現するものです。このような数式モデルは、予測精度の高さに加えて、物理的な意味の解釈がしやすく、計算コストの低減といった点でも大きな利点があります。

このように、観測データから直接微分方程式を導き出す手法には、いくつかの重要な利点があります。まず、微分方程式は時間や空間に関する変化を記述できるため、将来の状態を予測したり、現象を制御する際に役立つ点です。次に、スパース同定によって得られる数式モデルは、AIのような「中身が見えにくい」ブラックボックス型の手法とは異なり、各項に物理的な意味があるため、解釈しやすく説明性にも優れているということです。さらに、データを基に数式モデルを構築することで、従来の理論では見逃されていた構造や新しい発見につながる可能性もあります。こうした数式モデルは、既存の物理モデルと比較しやすく、仮説の検証や研究の発展にも貢献できるのが特徴です。これらの数式モデルをリアルタイムで生成・更新することができれば、プラズマの振る舞いを予測したり、制御に活かしたりする応用も視野に入ってきます。例えば、瞬間的な観測データから微分方程式を推定し、それを使って今後の動きを予測し、適切なフィードバック制御につなげる、といった高度な運転支援技術の実現も期待できます。

#### (4) 得られた成果と展望

スパース同定による自動的な数式モデル構築のアプローチは、物理学、化学、生物学、医学など、さまざまな分野での応用が進んでいます。今後はさらに複雑な現象に対しても本質的な構造を見出せるツールとして、その重要性はますます高まっていくと予想されます。私たちはこの技術を、核融合発電という最前線の課題に適用することで、NTTならではのデータサイエンス

の力を最大限に発揮しようとしています。将来的には、得られた数式モデルとプラズマ物理に基づく従来モデルとの比較・統合や、リアルタイム同定と予測制御の融合、さらには装置運転の最適化支援といった多様な展開を想定しています。

観測データから現象の本質を引き出すこの新しい手法は、AIによる予測技術と並んで、将来的に核融合研究を支える重要なアプローチの1つとなる可能性があります。私たちは、データと物理学とをつなぐ橋渡しとしてのスパースモデリングにより、核融合の実現に向けたさらなる一歩を着実に進めていきます。

### クリーンエネルギー社会の実現へ に向けた共創の道筋

エネルギーは私たちの生活や社会の基盤を支える重要な資源です。地球温暖化や資源の枯渇といった課題が深刻化する中、太陽と同じ原理で膨大なエネルギーを生み出す「核融合」は、人類にとって革新的かつ持続可能な選択肢として期待されています。しかし、その実現には超高温プラズマを安定的に制御するという、極めて難易度の高い技術課題を乗り越える必要があります。NTT宇宙環境エネルギー研究所は、その挑戦に対し、AIやデータサイエンスといった情報分野の知見を応用することで、新たなアプローチを提示しています。AIによる磁気平衡<sup>\*11</sup>のリアルタイム予測や、スパースモデリングによる数式モデルの推定といった技術は、核融合制御の高度化や物理解の深化に貢献しています。従来の手法ではとらえきれなかったプラズマの動きや構造を、柔軟かつ高速に把握することが可能になりつつあります。

これらの取り組みは、単独の技術や組織だけでは実現できるものではありません。核融合という壮大なテーマは、高温プラズマ物理、材料工学、制御理論、データ解析、情報処理といった多彩な分野の知が交わる

「学際的な共創」の結晶です。さらに、大学や国立研究機関、企業、国際的な研究機関との連携を通じて、私たちは社会実装を見据えた技術基盤の確立に取り組んでいます。国内外のさまざまなパートナーと協力しながら、エネルギーと情報の融合によって新しい価値を創出し、未来の社会に貢献していきたいと考えています。そして、技術の発展とともに、制度や社会の受け皿づくりにも視野を広げ、クリーンで持続可能なエネルギー社会の実現に向けた歩みを進めていきます。

#### ■参考文献

- (1) [https://www.rd.ntt/se/technology/nuclear\\_fusion.html](https://www.rd.ntt/se/technology/nuclear_fusion.html)
- (2) <https://www.rd.ntt/se/media/article/0106.html>
- (3) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2025/03/17/250317a.html>



(上段左から) 児島 富彦 / 白澤 唯汰  
(下段左から) 米田 亮太 / 高橋 円

AIやデータサイエンスを用いた制御アプローチは、核融合分野においても技術革新が期待されています。私たちは今後ともさまざまな分野の方々と協業し、次世代のクリーンエネルギーの実現に貢献していきます。

#### ◆問い合わせ先

NTT宇宙環境エネルギー研究所

\*11 磁気平衡：プラズマ内部の圧力と磁場の力が釣り合って安定している状態。再構築や制御の基本となります。



## 主役登場

# エネルギーとICTの最適融合により持続可能な未来を切り拓く

マハムド ファーハン Farhan Mahmood

NTT宇宙環境エネルギー研究所  
環境負荷ゼロ研究プロジェクト 主任研究員



カーボンニュートラルの実現は地球環境だけでなく、経済や社会の持続性にもかかわる重要課題となっています。化石燃料の消費削減に向け各国では様々な政策を進めており、特に再生可能エネルギー（再エネ）の導入拡大が急務となっています。

一方で、生成AI（人工知能）の急速な普及により、データセンタ（DC）の電力需要は急増しています。NTTグループでも、環境エネルギービジョン「NTT Green Innovation toward 2040」のもと、2030年にDCのカーボンニュートラルを掲げ、全社で取り組みを進めています。この中でも、いかに再エネを有効活用するかが重要なテーマとなっています。

こうした流れの中で注目されているのが、エネルギー（ワット）と情報通信（ビット）を高度に統合する「ワット・ビット連携」という概念です。電力とICTの融合により、DCの電力需要と再エネ供給を最適にマッチングさせ、持続可能な社会基盤の構築をめざす取り組みです。私が所属するNTT宇宙環境エネルギー研究所では、環境負荷削減と環境適応に関する研究開発を進めており、その中で私はワット・ビット連携を通じた再エネ利用量の最大化に取り組んでいます。

再エネは地域や時間帯によって発電量が大きく変動する特性があり、安定的かつ効率的に活用するには、その変動性に応じた需要家側の柔軟な運用の実現が課題です。これを解決するため、私たちはソフト/ハードの2つのアプローチを軸に取り組んでいます。1つは、再エネの発電状況に応じてDCの処理負荷（WL：ワークロード）や

蓄電池の充放電を柔軟に制御する「エネルギー・ICTリソース統合制御技術」というソフトウェア的アプローチです。もう1つは、再エネ活用に適した場所にDCを設置するための「DC配置最適化技術」というハードウェア的アプローチです。

エネルギー・ICTリソース統合制御技術は、再エネ電力が不足する地域のDCから、余剰が見込まれる地域のDCへWLを移動させるとともに、再エネの余剰タイミングで蓄電池に充電した電力を不足時に放電することで、各地域における再エネ利用率の向上を実現する技術です。一見シンプルですが、実現には電力需要・発電量の高精度予測や最適化アルゴリズム、仮想環境での制御実行など、多様な技術要素が必要で、その連携の難しさを実感しています。私のチームでは予測結果を基に、DCごとのWL量や蓄電池の充放電量といったエネルギー需要を最適化するアルゴリズムの設計・開発を担当しています。社会実装に向けては、他の技術要素を担う研究所や事業会社と密に連携し、実証実験や共通基盤の開発などを通じて、実現性の検証も進めています。特に、効果をより拡大するためには、電力事業者や大手DC事業者などとの社外連携が重要で、各社と合同議論の場で問題提起するなど、巻き込み型の推進を意識しています。

DC配置最適化技術は新設した研究テーマで、DC新設や既存通信ビルのDC化を検討する際に、再エネ発電ポテンシャルや地域別の電力需要、各種コスト、電力系統状況などを総合的に評価し、コストや再エネ利用率等を踏まえてDCの配置を最適化

する技術です。インプットデータは多岐にわたるため、それらを広く網羅するには、地域の電力会社や通信事業者、行政機関等との連携を前提としたデータ共有の仕組みづくりが不可欠です。また、評価軸も一律ではなく、目的や優先度によって大きく変動するため、立ち上げ段階から利用者の声を丁寧にヒアリングし、柔軟に条件の切り替えが可能なアルゴリズム設計を進めています。

私はこれまで、無線基地局における電波干渉に関する障害対応や、無線エリアの設計・構築支援といった現場業務に携わる経験も積んできました。近年では、5G（第5世代移動通信システム）の高度化に伴って、基地局が処理するトラフィック量や搭載機器が増加し、基地局当りの電力消費も年々増加しています。こうした背景から、消費電力を抑える「グリーン基地局」の導入も徐々に進んでいます。加えて、無線アクセスネットワークの仮想化（vRAN）に向けた取り組みも活発化しており、基地局の機能が汎用サーバ上のWLとして柔軟に移動できることで、電力需要の分散や再エネの有効活用にもつながる可能性がみえてきました。

現在取り組んでいるワット・ビット連携の技術も、将来的にはDCにとどまらず、こうした無線基地局への適用も視野に入れています。これまで培ってきた無線の知見を活かし、エネルギーと通信を一体で最適化することで、将来的にはネットワークインフラ全体のグリーン化にも貢献していきたいと考えています。

# PSTNマイグレーションの15年の営み

## ——固定電話サービスの今後の安定的提供に向けたIP網への移行

NTT東日本とNTT西日本は、2010年に「PSTNのマイグレーションについて～概括的展望～」を公表以来、約15年にわたり、固定電話網からIP網への移行方法の検討、切替を進めてきた。本特集では、制度面の検討経緯、安全な固定電話網のIP網への移行に向けた技術面、運用面の取り組み、PSTNマイグレーション完了までの営みを紹介する。

### PSTNマイグレーションの営み 34

PSTN (Public Switched Telephone Network : 公衆交換電話網) マイグレーションの概要として、そこに至った固定電話網の状況、およびNTT東日本・西日本を経由したSTM(Synchronous Transfer Mode)での電話接続をIP-IPでの直接接続にするためのネットワーク実現に向けた技術的課題、ネットワーク移行方法を中心にマイグレーション完了までの営みを紹介する。

### IP-IP接続のための新規機能開発・検証 ——安定切替に向けた品質向上 39

PSTNマイグレーション実現にあたって構築したIP-IPでの直接接続を可能とするネットワークを実現するためのENUM(E.164 NUmber Mapping)、NNI-SBC(Network-Network-Interface Session Border Controller)に関して、方式・機能検討、標準化対応から開発検証および品質向上施策までの取り組みを紹介する。

## PSTN マイグレーション

電話網の IP 接続

大規模ネットワーク切替

電話網品質維持

シンプルなたらフィック監視制御



## PSTNからのネットワーク移行・固定電話発信切替 ——安全な切替STEPと事前準備——

43

PSTNからIP網へのネットワーク移行においては、NTT東日本・西日本の固定電話・ひかり電話、および20社以上の全相互接続事業者の切替工事を約3年半かけて実施してきました。切替工事の規模が大きく、また切替パターンも多岐にわたる中、安全かつ効率的に工事を進めるために行った各種取り組み（切替方式や試験方法の検討、工事統制、および事業者間連携等）について紹介する。

## 電話網トラフィック制御運用方法の変革 ——保守・運用のシンプル化——

48

PSTNからIP網への移行に伴い、IP網中心のシンプルなたらフィックの監視・制御の実現に向けて、トラフィック運用を従来の細かな交換機区間のトラフィック・設備管理からエンド・ツー・エンドの管理への移行、それを実現するための新たなシステム導入等、安定したネットワーク運用のための取り組みについて紹介する。



# PSTNマイグレーションの営み

本稿では、PSTN (Public Switched Telephone Network : 公衆交換電話網) マイグレーションの概要として、そこに至った固定電話網の状況、背景、およびNTT東日本・西日本を経由したSTM(Synchronous Transfer Mode)での電話接続をIP-IPでの直接接続にするためのネットワーク実現に向けた“つなぐ機能”の技術的課題、ネットワーク移行方法を中心にマイグレーション完了までの営みを紹介します。

キーワード：#電話網移行円滑化委員会、#PSTNマイグレーション、#固定電話のIP網への切替

いとう つとむ<sup>†1</sup> はたけやま なおひさ<sup>†1</sup>  
伊藤 努 / 畠山 尚久  
さとう よしのり<sup>†1</sup> みぶ こうじ<sup>†2</sup>  
佐藤 良憲 / 壬生 浩二

NTT東日本<sup>†1</sup>  
NTT西日本<sup>†2</sup>

## PSTNマイグレーションの背景

固定電話の加入者数は2000年度末の6200万加入をピークに毎年減少を続け、予測を上回るペースで減少したことから、2004年に発表された「NTTグループ中期経営戦略」において、既存の固定電話サービスからIP電話サービスへの移行、メタルアクセスから光アクセスへのマイグレーションを円滑に行う目標を定めました。また「NTTグループ中期経営戦略」において、固定電話網から次世代ネットワークへの切替の具体的な進め方等を2010年までに策定することを公表しました。

その後、2008年の「サービス創造グループを目指して」において、PSTN (Public Switched Telephone Network : 公衆交換電話網) ユーザのマイグレーションについては、各種交換機の活用可能期間におい

て、光化エリアにおけるメタルアクセスのIP対応装置によるNGN (Next Generation Network) 収容と、電話サービスの光アクセスによるNGN収容との経済性比較を検討のうえ、2010年度にPSTNに対する展望を明らかにすると公表しました。また2010年度の概括的展望の公表に向け、NTTグループ横断でPSTNマイグレーション検討プロジェクトを立ち上げました。

2010年4月に総務省で開かれた「グローバル時代におけるICT政策に関するタスクフォース」における合同ヒアリングにおいて、既存の交換機がおおむね10年程度で寿命を迎えること、交換機からIP装置に切り替えること、現行のIP技術のサービスでは提供していない機能・サービス〔公衆電話、ISDN (Integrated Services Digital Network)、相互接続交換機の機能等〕について、同年秋に概括的展望を公表する予

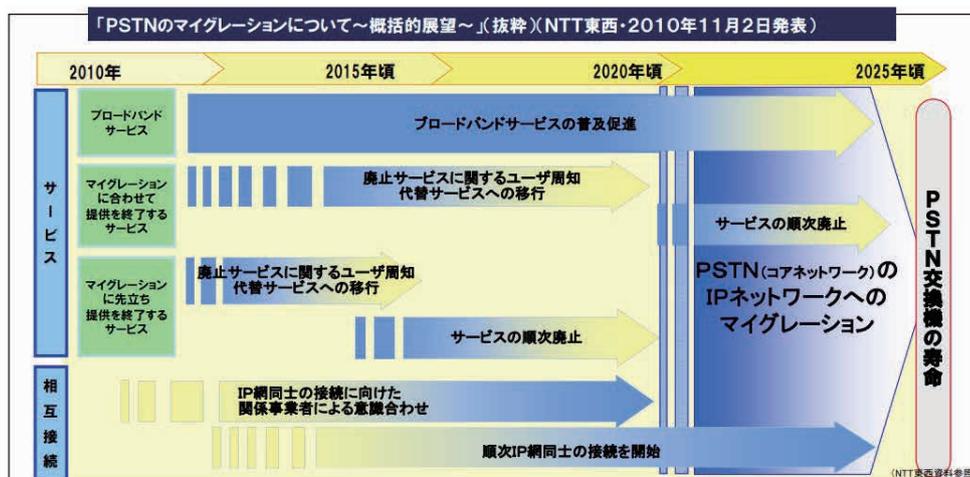
定であることを示しました。

## 概括的展望の発表と社会的反響

2010年11月2日に「PSTNのマイグレーションについて～概括的展望～」を世の中に発表しました。当時、インターネットではISPどうしでの直接接続が実現しているが、電話においてはNTT東日本・西日本 (NTT東西) 網を経由した接続となっていることから、IPどうしでの直接接続が必要になることを宣言しました。

また、接続方式の変更のみならず、ユーザーサービスについても、基本的なサービスは提供を継続し、お客様の利用の減少が見込まれるサービスは提供を終了することを宣言し、PSTNマイグレーションのロードマップについて発表しました (図1)。

上記発表に伴い、利用者からは「現状の



出典：[https://www.ntt-east.co.jp/release/detail/20101102\\_01.html](https://www.ntt-east.co.jp/release/detail/20101102_01.html)

図1 PSTNマイグレーションのロードマップ

端末が使えなくなるのか」「ISDNが利用できるなくなるなら、フレッツ光を利用できるようにしてほしい」といった声や、接続事業者からも「移行に伴う負担が発生する」等の多くの声が寄せられたことを踏まえ、ユーザ保護の観点で総務省により「電話網移行円滑化委員会」が発足されました<sup>(1),(2)</sup>。

電話網移行円滑化委員会においては、検討の基本的視座として、継続性（PSTNにおいて「できていたこと」の維持）、予見性・透明性（PSTNからNGNへの移行の「見える化」）、発展性・柔軟性（NGNにおいて「できること」の確保）が掲げられ議論が行われました。

2011年12月20日に「ブロードバンド普及促進のための環境整備の在り方」として答申が示され、NTT東西の移行計画には一定の妥当性は認められたものの、各サービスの廃止時期等の詳細が明らかにならず、今後の技術動向や市場環境の変化による計画自体の見直し等があることを踏まえ、NTT東西によるさらなる情報開示、多くの関係者の代替サービス等への積極的な移行を促す環境づくり、関係者による合意形成が必要とされ、利用者対応面および事業者対応面の双方で、各種個別課題を解決していくことが求められました。

に向けた諸問題を解決し、合意形成を図る場としてNTT東西が会議を主催し、オブザーバーとして総務省を迎えるかたちで、2011年6月24日に「第一回PSTNマイグレーションに係る関係事業者間の意識合わせの場」が開始されました。

参加を登録した事業者は100社を超え、検討テーマとして大きく「つなぐ」基本的な課題、事業者間の具体的な接続の課題、費用負担のあり方の3テーマに分け議論を進めていきました。

ユーザ向けサービスの終了対応としては、お客さま対応窓口の設置とともに、廃止と整理されたサービス利用者に対し、請求書へのチラシの同封等の対応を実施しました。また、ダイヤルQ2サービス<sup>\*1</sup>等、法人ユーザがエンドユーザに提供しているようなサービスについては、個別に提供事業者に説明するとともに、代替サービスの提案等を進めていきました。

上記のような営みの結果、PSTNマイグレーションに先立ち順次提供終了見込みと区分されたサービス(オフトーク通信<sup>\*2</sup>、コレクトコール(106)<sup>\*3</sup>を含む15サービス)について、PSTNマイグレーション完了目標の2025年以前にサービス終了を実現しました。

委員会および事業者間意識合わせの場等を経て、固定電話が中心だった時代に導入された各機能の見直しについて、NTT東西から関係各所への説明が行われました。

本発表においては、2010年に発表した「概括的展望」に加え、「ハブ機能の廃止」「マイライン<sup>\*4</sup>の廃止」「回線保留の廃止」「簡便な精算の実現を志向する」「ISDNの通話モードは維持する」等を発表しました。ねらいとしては、かつて競争政策として導入された機能や、SIP (Session Initiation Protocol)<sup>\*5</sup>信号において標準化されていない機能を極力廃止することで、IP網移行における業界全体の移行コストの低減を図ったものです(図2)。

しかしながら、2025年の切替完了まで残り10年といったタイミングではあったものの、利用者や接続事業者からの反発等が強かったことから、総務省「電話網移行円滑化委員会」において、特に意見が集まった固定電話網のIP網への移行に伴う電話をつなぐ機能に関する信頼性、接続方式、POI (Point Of Interface)<sup>\*6</sup>の設置場所・個所

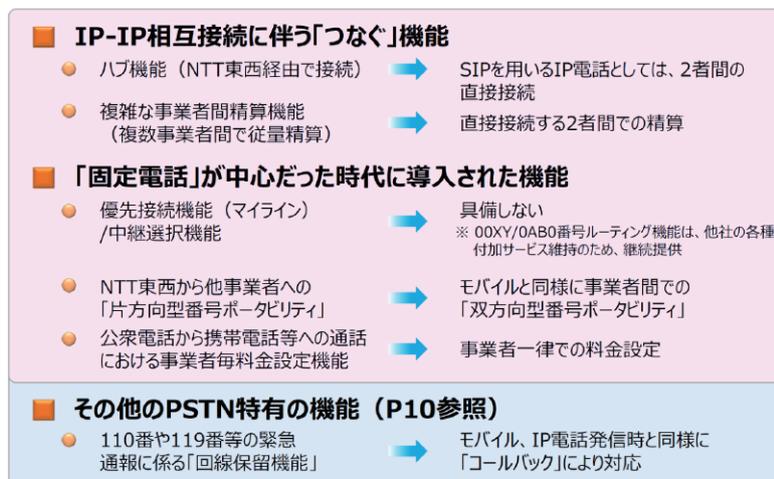
- \*1 ダイヤルQ2サービス：情報提供などを目的とした有料電話サービス。
- \*2 オフトーク通信：通話中に発信者と着信者以外の第三者が通信を行うサービス。
- \*3 コレクトコール(106)：着信側が通話料金を負担する電話サービス。
- \*4 マイライン：利用者が通話先ごとに通信事業者を選択できる制度。
- \*5 SIP：IPネットワーク上で音声・映像通話などのセッションを確立・管理するための通信プロトコル。
- \*6 POI：通信事業者間のネットワークを接続する物理的・論理的な接続点。

## PSTNマイグレーションにかかる意識合わせの場と各種サービスにおける終了の営み

PSTNに接続する事業者間で、IP網移行

## 本格的なマイグレーションの検討

その後、本格的なマイグレーションを進めていくため、2015年に「固定電話の今後」を発表するとともに、電話網移行円滑化委



出典：https://www.soumu.go.jp/main\_content/000414058.pdf

図2 電話網移行円滑化委員会 NTT東西提示資料 (一部抜粋)

数、担い手、コスト負担のあり方等の検討を目的とした「電話をつなぐ機能WG」と固定電話網のIP網への移行に伴うサービスの廃止・変更に係る利用者・消費者への影響の調査を目的とした「利用者保護WG」の2つのWG (Working Group) を立ち上げ、他機能のあり方について議論を行うとともに、合わせて事業者意識合わせの場においても並行して検討・議論を行いました。

■電話をつなぐ機能WG

「電話をつなぐ機能WG」では、

- ① SIPサーバの連携
- ② 「電話をつなぐ機能」の役割
- ③ つなぐ機能POIの設置場所・個所数、接続方式、「電話をつなぐ機能」を利用しない直接接続
- ④ つなぐ機能POIまでの伝送路
- ⑤ 「電話をつなぐ機能」の担い手

等について、「経済性」「信頼性」「継続性・安定性」「保守・運用性」「費用負担の公平性・適正性」「全体最適」等の視点から、事業者意識合わせの場と並行して議論が行われ、「NTT東西の交換機が各事業者の呼接続を媒介する」形態から、「同一のPOIビル」において各事業者のネットワークを接続し、「呼接続は各事業者のSIPサーバが1対1で接続する」形態へ変更すること、「POIの信頼性を担保するため、地理的に十分離隔をとったうえで冗長構成をとるこ

ととし、そのビル（コロケーションスペース\*7等）はNTT東西が担うこと」等について方向性が示されました。

■利用者保護WG

「利用者保護WG」においては、主にINSネット（デジタル通信モード）終了に伴う議論や切替に伴う詐欺等の撲滅等の議論が進められ、

- ① 代替サービスの確保
- ② 一般的周知の実施および消費者被害発生の防止
- ③ 他事業者や利用団体・企業との調整等について議論が行われ、代替策（デジタル通信モードの補完策）の提供、代替策の検証環境の提供、利用団体に対する丁寧な対応、詐欺防止等、利用者保護に向けた各種対応等について方向性が示されました。

また、事業者意識合わせの場においては、「電話をつなぐ機能WG」に求められた内容の検討に加え、PSTNからIP網への具体的な移行スケジュールの検討や「双方向番号ポータビリティ\*8」の実現にかかる費用算出、つなぐ機能POIビルに求められる要件等について議論を行い、事業者間で結論を得て委員会に対し報告しました。

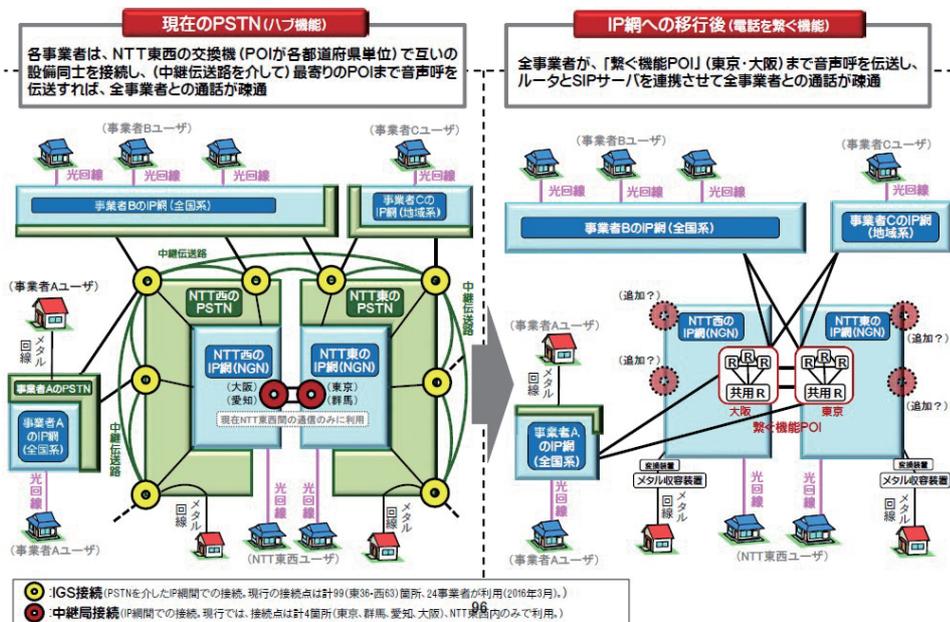
結果、2017年3月28日「第38回電気通信事業政策部会」および、2017年9月27日「第40回電気通信事業政策部会」を経て、

・SIPを用いるIP電話としては、2社間

の直接接続を実施（図3）し、料金精算も2社間で行う（ハブ機能を廃止するとともに、複数事業者をまたがる精算を廃止）

- ・POIは東京・大阪の2カ所に設置することを基本とし（追加のPOI設置は否定されない）、NTT東西がPOIビルを提供する
- ・新たな開発を要するマイルインについては具備しない
- ・公衆電話における柔軟課金\*9等の日本独自仕様を廃し、一律での料金設定で実施
- ・回線保留と同等の効用を持つ「5つの機能」を具備するコールバック方式の導入による緊急通報のIP網移行
- ・2021年よりIP接続を開始し、2023年までに関連する事業者間のIP接続の準備を完了した後、2023年半ばにすべてのサービス提供事業者とのIP-POI接続完了を行い、2024年初頭より固定電話の切替を開始するという大きなロードマップの制定（図4）

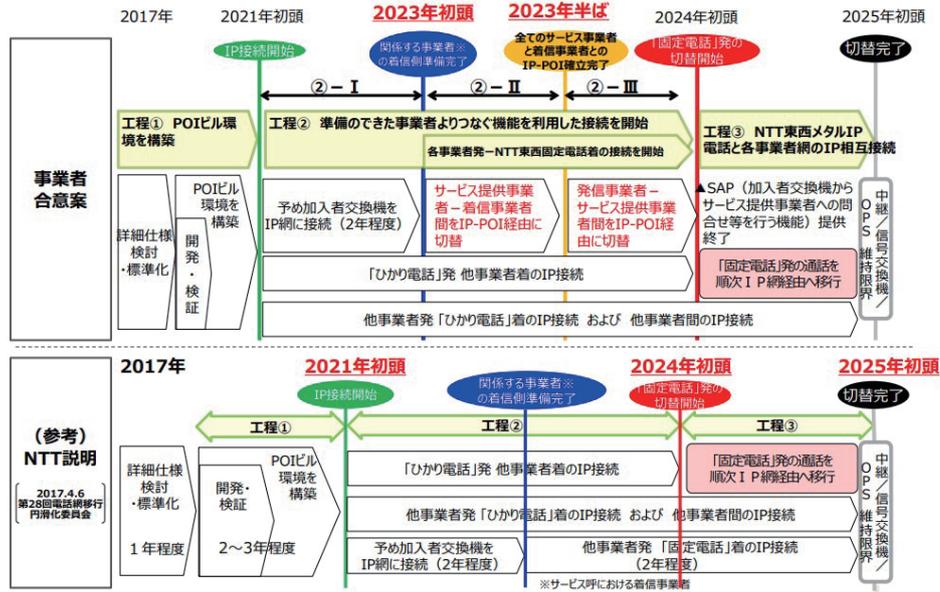
\*7 コロケーションスペース：通信事業者が設備を共同設置するための物理的空間。  
 \*8 双方向番号ポータビリティ：番号を変更せずに通信事業者を変更できる制度。  
 \*9 柔軟課金：着信事業者が発信事業者の通話料金を設定可能となる課金方式。



出典：https://www.soumu.go.jp/main\_sosiki/joho\_tsusin/policyreports/joho\_tsusin/denwa/02kiban02\_04000292.html

図3 電話網移行円滑化委員会「電話をつなぐ機能等WG」とりまとめ資料 抜粋

PSTNからIP網への移行スケジュールの検討状況



出典：https://www.soumu.go.jp/main\_content/000488690.pdf

図4 第32回電話網移行円滑化委員会 切替に向けたロードマップの策定

といった大きな方針を定めるとともに、INS デジタル通信モードの暫定利用を希望するユーザ保護を目的に、INS 代替サービスの導入、マイラインを具備しない代わりの通話サービスの卸提供等、既存ユーザを保護する取り組みも同時に行われることになりました。

また、携帯電話番号と同様に、固定電話番号においても双方向番号ポータビリティが導入されるとともに、番号区画内で固定電話番号を持ち運ぶことが可能となるロケーションポータビリティ\*10も開始されることになりました。

本方向性によって、従来のNTT東西の交換機において電話番号を解決し、各事業者へ呼を接続する「番号によるルーチング」から、各事業者がユニークなドメインを保有し、そのドメインをIPの仕組みで解決し、該当の事業者に接続を行う「ドメインによるルーチング」へ接続方法の変更が行われることになりました。

マイグレーションの実現に向けた事業者どうしの意識合わせ

委員会において各種課題に対する具体的な方向性が示されたことから、詳細内容を検討するため、事業者意識合わせの場における検討を細分化し、IPでの接続方式や新

■ 意識合わせの場関連会合	
	議論内容
意識合わせの場	各検討会・会合での議論結果の報告・共有等
テーマ別検討会	移行方法（スケジュール可視化）等について検討
技術検討の場	IP-IP接続の実現に向けた技術的課題の検討
「共用L2スイッチ」に係る議論の場	共用L2スイッチに関する運用方法等の検討
事業者間料金精算に係る運用会合	精算方式に係る運用方法の検討
「番号案内」に係る個別会合	番号案内における接続料の精算単位等の検討
双方向番号ポータビリティ会合	双方向番号ポータビリティの運用方法等の検討
網改造料に係る個別会合	網改造料の費用負担等の検討
マイライン事業者協議・通話サービス卸に係る運用会合	マイラインの廃止に向けたお知らせ・移行スケジュール等の検討

出典：https://www.soumu.go.jp/main\_content/000814358.pdf

図5 事業者意識合わせの場 関連会合

たな精算ルール等、テーマごとに議論するための会合（図5）を設置しました。

特に、精算と接続方式については、PSTNで実施していた多段接続から、1対1のメッシュ接続に切り替わることを踏まえ、実現するための技術的課題の検討と精算要件の明確化を行った結果、

- ・ IP接続の実施に向けたIPアドレス等保有ルール、着SBC (Session Border Controller)\*11の選択方法の整理
- ・ 網間接続に必須となる音声コーデック\*12の設定
- ・ アーリーメディア\*13の提供方式の確定

- ・ プリコンディション\*14の適用方式の整理
- ・ DTMF (Dual-Tone Multi-Frequency)

\*10 ロケーションポータビリティ：固定電話番号を地理的に異なる場所でも利用可能にする制度。  
 \*11 SBC：IP電話網の境界でセキュリティ・接続制御・品質管理などを行う装置。  
 \*12 音声コーデック：音声データを圧縮・展開するための技術。  
 \*13 アーリーメディア：通話接続前に相手側からメディア（音声など）を送信する技術。フリーダイヤル等の案内音声や呼び出し音などに利用されています。  
 \*14 プリコンディション：通話開始前に通信条件（帯域・品質など）を確認・確保するための技術。

signaling)\*<sup>15</sup>の流通方式の設定

- ・1XY, 0AB0, 00XY サービスの接続条件
- ・SIPレイヤの障害検知・普及検知方式の設定
- ・事業者間精算が可能となるSIP信号の拡張
- ・事業者網はドメイン名により解決(番号ルーチング\*<sup>16</sup>からドメインルーチング\*<sup>17</sup>へ)

等について一定の整理を図るとともに、一般社団法人情報通信技術委員会(TTC)に対し、「IP-IP接続のつなぐ機能」にかかる標準化検討要望として、各項目の要件に従った信号方式の検討と関連する標準化の制定を要望しました。

### 事業者どうしのIPでの接続開始と切替完了に向けた取り組み

IP接続への切替については、事業者間の接続に先立ち、NTT東西間で2021年1月より接続試験を開始し、2021年5月に商用呼の切替を開始することで、新たな方式でのIP接続が開始されました。

しかしながら、IP接続の完遂に向けては各事業者でフルメッシュの1対1の接続が必要となることから、国内の通信事業者は固定事業者のみならず、移動通信事業者も含め、20社以上の事業者との接続が必要となる一方、各事業者で導入している設備や方式が異なる状況でした。

そこで、事業者間で円滑な接続が進むよう、

- ① 机上による接続検討
- ② 試験環境どうしを接続した検証(事前接続試験)
- ③ 商用環境どうしを接続した検証(相互接続試験)
- ④ 切替実施

と段階を踏んで、切替まで実施していくことについて事業者間で合意しました。

机上による接続検討においては、接続に

おける標準的なシナリオを準備し、そのシナリオに沿って通信が可能か双方の持つラボ環境等による確認を行った後、事前接続試験において想定どおりの動作をしているかの確認を行い、さらに商用環境でも同様に動作しているか、と段階を踏みながら、確認を丁寧に行ったうえで切替を実現していきました。

なお、切替にあたっては上記試験で見つけきれなかった致命的な不具合が発生した場合、切り戻しを行う必要があり、加えて1対1のフルメッシュでの接続であるため、ある特定の事業者の不具合が原因で多数の事業者の切り戻しが必要な事態も想定され、仮に切り戻しに時間を要した場合、その間利用者にご不便をおかけすることになることから、事業者間で切り戻しに関するルールを制定することで、円滑な切替を実現する方向で合意しました。

実際に接続を行って行く中においては、接続の基本となるJJ-90.30等の各種標準規定において、明確にされていない事項や事業者ごとの標準解釈の違い等を原因とした、接続試験での不具合等が多数発見され、接続の実現に向けては数多くの課題を乗り越える必要がありました。

課題が発見されるたびに事業者で協議を行い、解決方法について合意をとった後、今後、新たな事業者が接続する際に困ることがないように、合意内容について標準的に反映する営みを2021年以降継続的に行っていく、IP接続を進捗させていきました。

### 固定電話の一斉切替と全事業者の切替完了

2024年当初より切替開始としていた固定電話発の切替については、2022年12月8日に

- ・固定電話発の通話料金を2024年1月1日に新しい料金体系に変更
- ・マイライン提供の終了、通話サービスの移行、INSネットの提供終了・補完策提供を3回に分け、エリアごとに一斉切替・終了すること

を報道発表しました。

固定電話の切替については、切替やサービス廃止がエリアごとに実施されることから、利用されている全ユーザに対しダイレ

クトメール等で周知対応を行いました。

加えて、すべての事業者の切替完了を実現するため、

- ① 事業者間の接続試験状況
- ② 各社装置間の接続工事状況
- ③ 各社の発信切替状況

について可視化を行うとともに、予定より遅延している事業者に対しリカバリプランを提示していただくなどの事業者ごとのマイクロマネジメントを行うことで、予定どおりの切替を進めていきました。

結果として、2024年12月末日までに、一部事業者(モバイル発の緊急通報呼)以外のすべての切替完了を達成することができ、モバイル発の緊急通報呼においても、2025年6月末をもって切替を完了することで一連の工程を完遂しました。

#### ■参考文献

- (1) [https://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/joho\\_tsusin/policyreports/joho\\_tsusin/denwa/index.html](https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/denwa/index.html)
- (2) [https://www.soumu.go.jp/menu\\_seisaku/ictseisaku/telephone\\_network/index.html](https://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/telephone_network/index.html)



(左から) 畠山 尚久/ 伊藤 努/  
佐藤 良憲/ 壬生 浩二 (右左)

本プロジェクトは電話接続方式の転換をめざし、総務省も巻き込んだかたちで、固定電話にかかわる多数の事業者が団結することで、完遂を成し得たプロジェクトであることを感じていただければ幸いです。

#### ◆問い合わせ先

NTT東日本/NTT西日本



# IP-IP 接続のための新規機能開発・検証 ——安定切替に向けた品質向上

本稿では、PSTNマイグレーション実現にあたって構築したIP-IPでの直接接続を可能とするネットワークを実現するためのENUM (E.164 Number Mapping)、NNI-SBC (Network-Network-Interface Session Border Controller) に関して、方式・機能検討、標準化対応から開発検証および品質向上施策までの取り組みを紹介します。

キーワード：#PSTNマイグレーション、#IP相互接続、#標準化活動

いしに かずひさ<sup>†1</sup> あかつち けんいち<sup>†1</sup>  
石谷 和久 / 赤土 健一<sup>†1</sup>  
きむら まさし<sup>†1</sup> おおほら ただし<sup>†1</sup>  
木村 昌史 / 大原 正<sup>†1</sup>  
かたおか あきら<sup>†2</sup> みなみだ こうき<sup>†2</sup>  
片岡 明 / 南田 幸紀<sup>†2</sup>  
NTT東日本<sup>†1</sup>  
NTT西日本<sup>†2</sup>

## IP-POI接続用装置 (ENUM, NNI-SBC) の開発・導入経緯

IP相互接続による通信事業者どうしの直接接続を可能とするため、PSTN (Public Switched Telephone Network : 公衆交換電話網) が提供している信号の中継機能や番号ポータビリティ機能をIP網で実現することになります。これらの機能を可能とするための新規設備として、ENUM (E.164 Number Mapping) / DNS (Domain Name System) と NNI-SBC (Network-Network-Interface Session Border Controller) を導入しています。

ENUMは、E.164番号<sup>\*1</sup>をインターネットのIPアドレス体系と統合させる国際規格です。E.164番号を管理し、電話番号を接続先事業者情報に番号解決するのがENUMサーバとなります。各事業者のENUMは各事業者の管理する番号帯の番号ポータビリティ接続情報 (番号情報) を保持しており、NTT東日本・西日本 (NTT東西) ENUMが番号管理元事業者のENUMへ問い合わせることにより、接続先番号が移転しているかを確認します。

NTT東西では従来番号情報を加入者交換機で管理していましたが、IP-POI (Point of Interface) からの番号問合せに対応するために、番号情報をENUMに移行しました。PSTNマイグレーション移行期においては、STM-POI/IP-POI双方からの番号

問合せに対応するため、交換機およびENUM双方に番号情報を設定し保持していました。2025年の移行完了後は、ENUMによる番号情報管理・番号解決に一本化しています。

IP相互接続では、通信の確立や切断などのセッション制御を行うためのプロトコルとしてSIP (Session Initiation Protocol) が利用されます。IP直接接続の相互接続性を担保するため、一般社団法人情報通信技術委員会 (TTC) では標準 JJ-90.30が制定されていますが、JT-Q3401に基づき実装されてきたNGN (Next Generation Network) 網内信号と、網間の標準化された信号には、その仕様に差分があります。この信号差分に対しては、NNI-SBCが具備する信号編集機能 (マニピュレーション機能) を用いて網内信号と網間信号を相互に変換することで、NGN網内のSIPサーバの開発コスト圧縮や網内信号仕様の終端処理を行っています。また、NNI-SBCは接続先事業者により許容するベアラ条件やコーデックの許容・非許容が設定可能なことで柔軟な接続形態に対応し、音声処理では高速なNAPT (Network Address Port Translation) 変換やQoS (Quality of Service) 制御を行います。

## IP-IP接続に向けた標準化活動

### ■「SIP信号」での事業者間接続の実現に向けた標準化活動

事業者間においては、コアネットワークをIP化する際の技術的な課題が議題にあが

りました。特に、相互接続におけるインタフェースのあり方が議論となり、JJ-90.10相互接続共通インタフェース仕様 (ISUP) と比較し、SIP信号では実現できない方式が多数あることから、SIP信号で標準化されていないISUP信号を、どのような用途で利用しているか調査を実施しました。

SIP信号の標準化においては、すでにNGNにおいてNTT東西間でIP接続を実現しており、その接続方式として2007年にTTCで制定されたJT-Q3401が存在していました。しかし、国際標準の世界では、3GPP (3rd Generation Partnership Project) にて2008年にTS-29.165が存在しており、移動通信網では3GPPの仕様が実装の基準となっていました。本取り組みを完遂するには固定・移動網双方の接続が必要であり、双方の接続仕様を合わせる必要があったことから、相互接続性を担保する新たな方式として、TS-1020が制定されました<sup>(1)~(3)</sup>。

また、上記に合わせ、IP網における番号ポータビリティの要件の議論も行われました。

PSTNでは、各事業者網において番号解決を行う際、NTT東西から他事業者への片方向番号であったことから、まずNTT東西網に接続し、NTT東西網で番号帯により接続網を特定していました。加えて、番号ポータビリティの対象となっている番号帯においては、NTT東西網で番号を保有する事業者に番号でルーティングし、番号を保有する事業者がどの事業者網に番号が移転しているか特定したうえで、発信事業

\*1 E.164番号：ITU-T E.164で定められている形式の電話番号。

者に対し、NTT東西網から接続先を特定するNRN (Network Routing Number)<sup>\*2</sup>を返送することで番号解決を行っています。

一方、IP網では、PSTNとは異なり、番号取得事業者網が提供するコーデックや付加サービスの提供条件に左右されず、番号取得事業者の呼制御サーバに障害が発生している際においても、番号解決が可能となる「発側データベース参照方式」を採用することが事業者間で合意できたことから、本方式の標準化が開始されました。3GPP標準等で利用されるキャリアENUMを採用し、2015年にJJ-90.31「キャリアENUMの相互接続共通インタフェース」として制定され、同じ2015年にTS-1020からJJ-90.30として制定された「IMS事業者網間の相互接続共通インタフェース」<sup>(4)</sup>に対し、JJ-90.31に対応した改版が行われました。

図1にIP-IP接続における呼処理の接続方法を示します。

**■緊急通報呼・ルーティング方式・INS代替サービスに関する標準化活動**

まず、IP網において回線保留の代わりに

「コールバック」での導入が可能になったことから、緊急通報回線のIP網での導入に向けIP接続に必要な要件をまとめ、事業者間で方式・要件について合意を行いました。必要要件に基づき、IP網での緊急呼接続を可能とするためのJJ-90.28「緊急通報呼に関するNNI仕様」について標準化を行いました。また、事業者意識合わせの場において、IP接続に必要な要件や事業者間料金精算に必要な要件が整理され、TTCに対し「標準化要望」が出されたことから、信号制御委員会において要望された要件に基づき、JJ-90.30「IMS事業者網間の相互接続共通インタフェース」、JJ-90.31「キャリアENUMの相互接続共通インタフェース」の改版が行われました。

また、事業者網間を接続する要件として、IPレベルでの事業者間の接続プロトコルやIPアドレス付与条件が整理されるとともに、各事業者のドメイン名等についても整理されたことから、ドメインからIPアドレスを解決する方法について、JJ-90.32「SIPドメイン解決のためのDNS相互接続共通インタフェース」が制定されました。加えて、INS (Information Network System) デジタル通信モードを暫定的に利用することを希望するユーザ保護を目的に、INS代替

サービスの導入を実現する必要があったことから、他の標準化活動と同様にINS代替サービスを利用する事業者間で議論を踏まえた要望に基づき、TS-1025「ISUP情報のカプセル化に関する技術仕様」の制定を行いました。

**商用導入に向けた機能**

**■ENUMの機能**

ENUMでは、接続インタフェースを運用面と試験面に割り当てを行い、このインタフェース単位でENUM応答を切り替えることで、運用中の事業者と接続前事業者が混在する環境においても自社の網内着信先を振り分けることを可能としました。この機能を活用して、自社の網内ルーティング試験や、他社と事前接続試験を行う際の試験設備への接続、IP相互接続開始時の試験設備から運用設備への接続切替制御を行っています。

**■NNI-SBCの機能**

JJ-90.30では、事業者網間の相互接続性を向上させるためのオプション項目が規定されており、NNI-SBC機能で具備されている基本機能と信号編集機能を組み合わせることでオプション項目の条件を満たすインター

\*2 NRN：移転先事業者網を特定可能なネットワークルーティング番号。

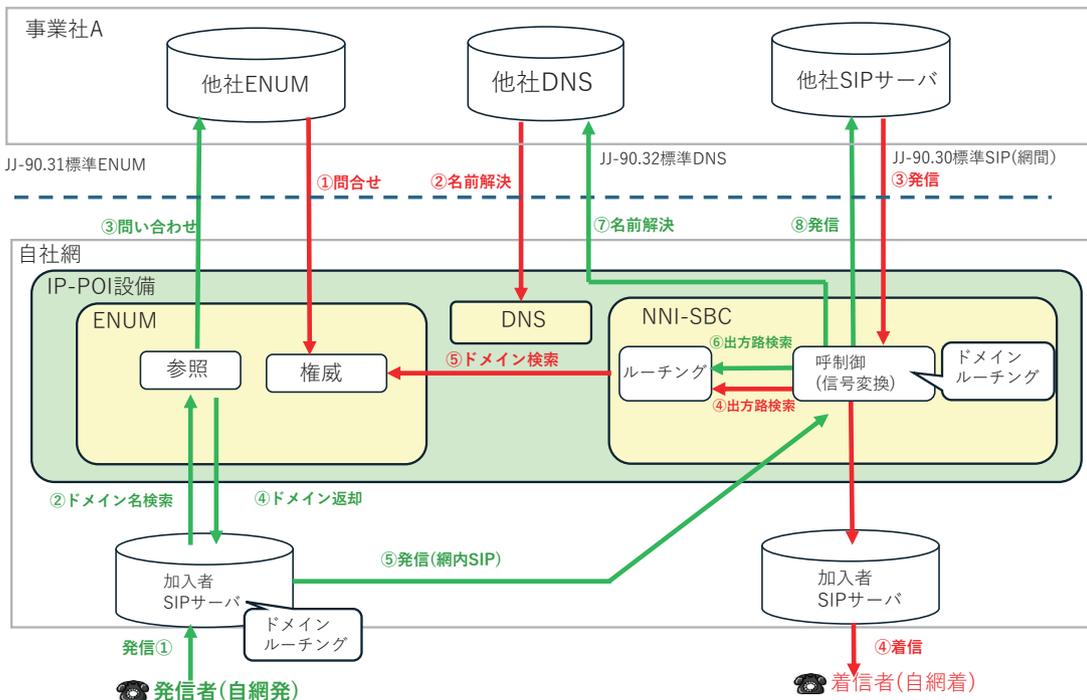


図1 IP相互接続後の呼接続

ク（信号変換）を実現しています。保守運用機能としては、IP相互接続の実現に向けた他社との接続試験を容易にできるように、自網内のインタフェースを運用インタフェースと試験インタフェースの2面構成にして、各事業者とは商用接続開始前にIP相互接続をNNI-SBCの試験インタフェースを経由して自社の試験設備と接続し、事前接続試験を行える機能を具備しています。試験インタフェースと運用インタフェースのどちらを利用するのかは、ENUM応答値によって定まる設計を行っており、試験ドメインと運用ドメインの変更だけで、NNI-SBCから網内設備の接続先を試験設備と運用設備のどちらに接続するのかを切り替えできる仕組みにして、安全なIP相互接続を開始できる方法を確立しています。また、商用サービス開始前に網間から網内装置へのルーチング設定を確認できるように、NNI-SBCでSIP信号を折り返すことで網内の試験をする機能を具備しています。

これらの機能により、IP相互接続前の事業者とIP相互接続後の事業者が混在する環境において、NNI-SBCとENUMの設定により接続を切り替える仕組みを活用して、事前接続試験環境を用いた試験からIP相互接続開始までを円滑に実現しています。

#### ■加入者SIPサーバおよびISUP・SIP変換装置の機能

PSTNマイグレーションを実施するにあたり、中継網IP化対応、JJ-90.30対応、緊急通報指令台収容の機能を具備しています。中継網IP化対応としては、維持限界を迎える共通線交換機や中継交換機を撤廃するた

め、ISUP・SIP変換装置が直接加入者交換機を収容する接続形態としISUPをSIPに置き換えています。また、網間インタフェースのJJ-90.30対応に基づき、NNI-SBCの信号インタワークでは吸収しきれない信号は、発側や着側の加入者SIPサーバで呼び制御信号の標準化対応を実施しています。例としては、転送呼において発番号を保持するSIP信号を網間インタフェースに準拠するように変更しました。また、メタル収容装置も維持限界がいつれ訪れるため、メタル収容装置で収容している緊急通報指令台を加入者SIPサーバに収容できる機能として、緊急通報指令台からの呼び返し機能、緊急特番通知機能、発ID取得機能、緊急通報指令台からの呼び返し呼を確実に着信させることができるユーザ発着信防止機能などを実現しました。

さらに、STM-POI接続からIP-POI接続へ円滑に移行するにあたり、ひかり電話発他事業者着、他事業者発メタルIP電話着、メタルIP電話発他事業者着のステップで切り替えるため、番号帯ごとに番号ルーチングからドメインルーチングに切り替えできる機能や、IP相互接続の開始前にドメインルーチングの確認を行うためにENUMの問合せ先を選択できる試験機能を具備しました。

#### 品質確保の取り組み

各社とのIP相互接続開始に向け、NNI-SBC、ENUM等のIP-POI接続用装置は短期間の設備構築完遂が求められる中で、効

率的な構築と確実な商用運用開始、その実現に向けた手順確立、マニュアル整備、習熟のための商用ネットワーク環境を利用した品質確保試験を実施しています。商用サービスの設備規模で、負荷試験や冗長代替試験、伝送路も含めた装置故障を模擬した試験や予防保全としての取替・切替手順を実施し、システムトータルの品質確保を行いました。また、他事業者との従来のSTM-POIからIP-POIに切り替える際には、段階的な切替に応じたサービス影響確認を行って品質確保する取り組みを行っています。

#### ■NNI-SBCのインタワークの品質確保

NNI-SBCの呼び制御のインタワークの仕様を明確にするために、接続方向や接続先サーバの種別ごとにSIP信号のメッセージ、ヘッダ、パラメータまでのインタワーク信号処理をドキュメント化しました。また、問題発生時にはNNI-SBC自身の不具合だけでなく、NNI-SBC以外の装置で発生した不具合をNNI-SBCの信号編集機能を活用して対処するケースがあったことから、NNI-SBCの信号編集設定を変更した場合に迅速に品質確認する必要があります。そのため、NNI-SBCの呼び制御信号インタワーク処理試験において、疑似呼装置を試験シナリオに応じて自動制御することで、試験の自動実行、入出信号パケットキャプチャの自動取得、取得したパケットキャプチャから入出信号を抽出しその呼び制御の信号シーケンスのチェックおよびヘッダやパラメータのインタワーク処理の自動チェック、自動で試験を実施した試験結果の自動集計に取り組むことで、品質確保の迅速化、目視によるチェックミスを防止しています。

#### ■商用提供前設備を活用したフィールドインベスティゲーション<sup>\*3</sup>の実施

商用サービスに向けて構築した、NNI-SBCとENUM/DNSのサービス提供開始前設備を活用して、終局トラフィック相当の試験条件で品質試験を実施しました（図2）。

試験では、定常状態におけるシステムの

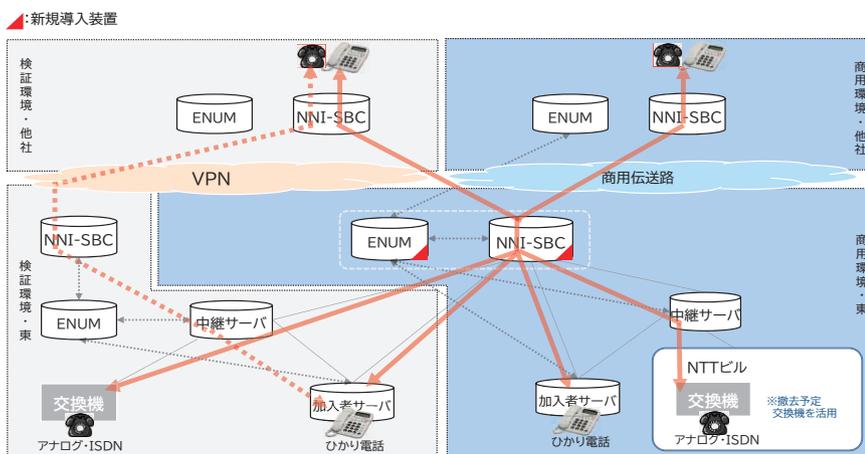


図2 事前接続試験・フィールドインベスティゲーション構成概要

\*3 フィールドインベスティゲーション：テスト工程の終盤に行う、実運用相当の環境で行う試験。

安定運用の確認に加えて、運用の習熟に向けた保守手順および各種装置故障時の回復手順を確立しました。

併せて、NTT東西網内・他事業者間のネットワークにおける保守作業や装置故障による影響についても確認しました。

これらの確認より、例えば、ネットワーク装置の故障発生時におけるNNI-SBCのSIP信号、ENUM/DNS信号、内部制御信号の再送間隔やリトライ回数の見直しにより、信号疎通能力の改善を行いました。また、ネットワーク復旧時のストームコントロールの設定やスイッチのポートにおける起動順番の見直しにより、ネットワークの切替復旧時間の短縮化を実現しました。さらに、ルータやスイッチのファームウェアのバージョンアップなどの計画的な保守作業に対して、装置の迂回や切替を実施する制御ポイントを明確にした手順を確立したことにより、サービス影響の最小化を実現しました。

#### ■IP相互接続の実現に向けた事業者間の接続品質の確保

PSTNにおいては、事業者間の接続はNTTのPSTNを経由して相互接続が実現されていました。また、通信事業者は、NTT交換機のインタフェース仕様に合わせるだけで簡単に相互接続が可能でした。

前述のとおり、IP相互接続では呼制御プロトコルとしてSIPを用います。SIPの標準化は行われましたが、接続のためにはメッセージの1つひとつが整合している必要があります。各通信事業者がフルメッシュで接続するため、1社でも仕様に差異があると相互接続の支障となり、PSTNマイグレーションの阻害要因となります。

このため、IP相互接続および相互接続試験に先立ち、各通信事業者の技術的条件等を確認するため、各通信事業者がフルメッシュで事前接続試験を実施しています。

試験項目は、基本呼接続（正常・準正常動作）、代表的な付加サービス（着信転送サービス、コールウェイトイング、DTMF等）、緊急呼等の3桁特番接続、およびNNI-SBC、ENUM/DNSにおける故障検知、迂回動作、復旧検知等の保守運用項目を各通信事業者の共通試験項目（110項目）としています。これに、各社固有のサービ

ス呼や付加サービスバリエーション、端末バリエーション等の各社独自試験項目を加えて事前接続試験項目としました。

共通試験項目について、各通信事業者が協力して、SIPシーケンス、メッセージ例を確認し、共通シーケンスを作成しています。机上での事前確認作業、実機での接続試験実施による試験ログ確認の2段階で、SIPシーケンス・メッセージを確認することで品質向上を図りました。この共通シーケンスは、「IMS事業者網間の相互接続共通インタフェースシーケンス/メッセージ例」<sup>(5)</sup>としてまとめられるとともに、一部はJJ-90.30等の標準ドキュメントに反映されています。

各通信事業者との事前接続試験は、呼種ごとの切替ステップを踏まえ、2020年11月よりひかり電話発着・メタルIP電話着より開始しました。以降は切替の進行に応じて、メタルIP電話発、サービス呼と順次試験を実施し、2024年12月にすべての事前接続試験が完了しました。NTT東西累計で約1.1万項目の試験実施により品質向上を図ることで、円滑な事業者間IP相互接続開始を可能にしました。

#### ■2024.1のメタルIP電話発切替に向けた商用ネットワークでの切替試験・検証

メタルIP電話発他事業者着切替では多数の電話サービスおよびNGN・PSTN・他事業者の複数網への接続や県域、エリア、全国、事業者単位の段階的な切替があり、検証パターンは無数に考えられ、すべてのパターンを網羅的に検証するには非常に多くの時間がかかります。必要なパターンの抜け漏れがないように、検証するパターンの絞り込みを以下に重点を置いて行いました。

##### (1) ユーザ利用シーンの整理

ユーザの電話サービス利用シーンとしては、音声通話を基本呼とし、コールウェイトイングや転送などの付加サービスを用いた「使い方」と、同一市内発着、東莞西着等の「接続先」を2つの軸としました。検証においては、「接続先」は発着網の組合せ（NGN・PSTN・他事業者）や接続先（県内・県間・他事業者）、番号帯（NGN番号・PSTN番号）等、お客さまの接続先ルートを横軸として、「使い方」は付加サービス

ありでの発着信や特番（1XY）系のダイヤルバリエーション等のサービス観点を縦軸とし、2軸のマトリクスで網羅性を整理し、接続品質およびサービス品質を確認しました。

##### (2) 切替工事ごとの影響範囲の明確化

切替工事ごとに上記で作成したマトリクス上に影響範囲をマッピングすることで、切替工事ごとの影響範囲を明確にしました。その際、なるべく効率的に実施できるように、過去トラブルや切替工事ごとの検証実績を踏まえて実施済みパターンは省略するなど、切替範囲拡大に応じた見極めを実施しました。

#### ■参考文献

- (1) 永徳：“3GPPにおけるIP相互接続仕様の標準化動向,” NTT技術ジャーナル, Vol. 32, No. 9, pp. 107-111, 2020.
- (2) 坂谷・荒井・鐘ヶ江：“IP相互接続仕様に関する標準化活動,” NTT技術ジャーナル, Vol.26, No. 7, pp. 63-65, 2014.
- (3) 小川・上茶：“緊急通報の標準化動向とIP網間インタフェース仕様の標準化,” NTT技術ジャーナル, Vol. 30, No. 2, pp. 57-61, 2018.
- (4) [https://www.ttc.or.jp/document\\_db/information/view\\_express\\_entity/300](https://www.ttc.or.jp/document_db/information/view_express_entity/300)
- (5) [https://www.ttc.or.jp/document\\_db/information/view\\_express\\_entity/1376](https://www.ttc.or.jp/document_db/information/view_express_entity/1376)



(上段左から) 石谷 和久 / 赤土 健一 / 木村 昌史

(下段左から) 大原 正 / 片岡 明 / 南田 幸紀

PSTNマイグレーションで培った多くの知見を活かし、今後も引き続き安定した電話サービスの提供に取り組んでいきます。

#### ◆問い合わせ先

NTT東日本/NTT西日本

# PSTNからのネットワーク移行・固定電話発信切替 ——安全な切替STEPと事前準備

PSTN (Public Switched Telephone Network : 公衆交換電話網) からIP網へのネットワーク移行においては、NTT東日本・西日本の固定電話・ひかり電話、および20社以上の全相互接続事業者の切替工事を約3年半かけて実施してきました。本稿では、切替工事の規模が大きく、また切替パターンも多岐にわたる中、安全かつ効率的に工事を進めるために行った各種取り組み（切替方式検討、各種事前試験、工事統制、および事業者間連携等）について紹介します。

キーワード：#ネットワーク移行、#切替工事、#品質向上

さとう よしのり<sup>†1</sup>  
佐藤 良憲<sup>†1</sup>  
くろさき りょういち<sup>†2</sup>  
黒崎 良一<sup>†2</sup>  
NTT東日本<sup>†1</sup>  
NTT西日本<sup>†2</sup>

## 網内⇒網間の段階的切替による 安全性向上

従来のSTM-POI (Point Of Interface) での相互接続においては、各事業者がNTT東日本・西日本 (NTT東西) の交換機をハブとして接続していましたが、IP-POIでの相互接続においてはすべての事業者間をそれぞれ1対1でIP-IP接続することとなります。中継・信号交換機の維持限界である2025年までにIP-IP接続へ確実に切り替えるためには、切替の順序性を整理し、各手順のスケジュールを明確にしたうえで、各事業者間で綿密に検討・調整することで、切替工程を安全かつ効率的に進めることが必要でした (図1)。

NTT東西と接続事業者との網間切替の前に、まずはNTT東西の網内で、ひかり電話発固定電話着の切替を行い、網内でドメインルーチングを開始しました。

ここで初めてドメインルーチングを行うこととなりますので、事前の機能確認試験として、開発検証環境およびフィールドインベスティゲーション (FI) 環境でサービスバリエーション試験を行いました。具体的にはユーザ種別 (固定電話、ひかり電話、番号ポータビリティ)・接続パターン・付加サービスパターン・端末種別 (ビジネスホン、FAX等含め) を網羅した、約600~700項目のバリエーション試験を実施することで、ネットワーク移行に伴う接続、サービスの品質担保を実施しました。

次に、網間の切替の中でもまずはNTT東西のひかり電話発、および他事業者発固

定電話着の切替を行いました。

網間切替にあたっては、自社検証環境での検証に加えて、各接続事業者の検証環境と接続した相互接続試験 (IOT : Inter Operability Testing) を行い、事業者間の信号差分等による不具合解消を行いました。また発信切替の際には、切替後の正常性確認は30分以内での確認完了をめざし、切替対象呼種の接続試験、トラフィック状況の正常性確認、ユーザ申告状況確認を速やかに実施し、万が一不具合があった

場合は切り戻し判断を行う体制を確立するとともに、切戻し手順も事前に整理したうえで臨みました。

NTT東西のひかり電話発の切替が全接続事業者との間で完了した後、いよいよNTT東西の固定電話発の切替に着手しました。NTT東西の固定電話発切替ではサービスの差分 (一部サービスの廃止等) が生じることを踏まえ、事前のお客さまおよび各事業者への周知や、切替過渡期のお客さま影響を極力少なくする等の観点から、切

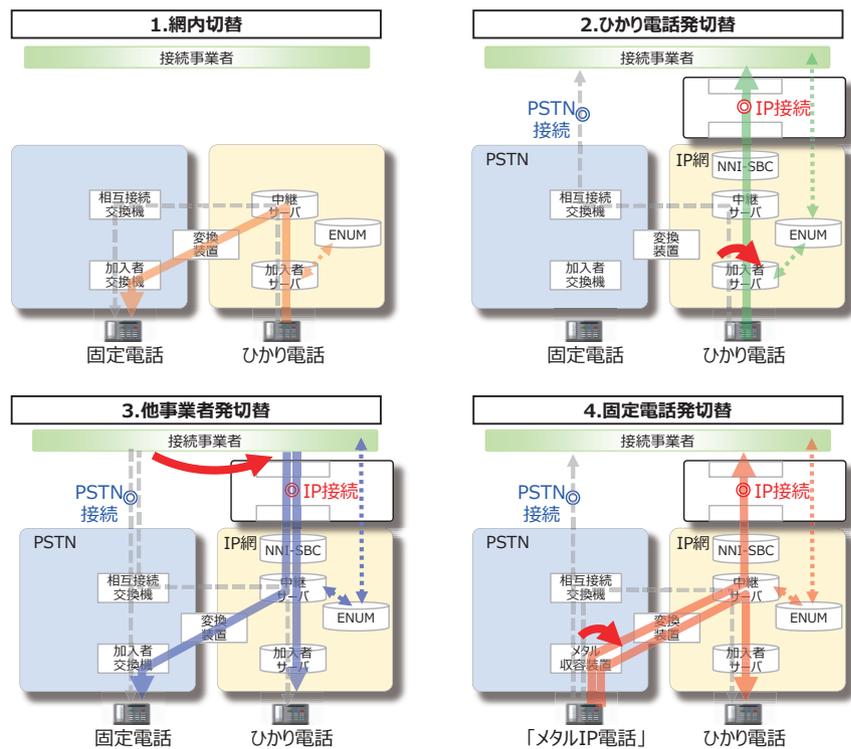


図1 網内⇒網間の段階的切替

替開始時期は極力後ろ倒しにするとともに、2025年初頭までに確実な切替を完了させるため、切替に必要な期間を逆算し、2024年初頭からの1年間で切替を実施する計画としました。また、固定電話発切替を開始する時点までに、NTT東西ひかり電話発他事業者着のIP-POI接続ルートを確認しておくことで、固定電話発切替の手順簡素化、およびIP-POI接続ルートの正常性確認を行い、切替によるトラブルリスクを極力抑制するスケジュールとしました。固定電話発切替における品質向上の取り組みについては、後ほど詳述します。

なお、サービス呼（0A00：フリーダイヤル、ナビダイヤル等）について、PSTNマイグレーション後は「発信事業者→サービス提供事業者」と「サービス提供事業者→着信事業者」の2区間で接続する方式となります。サービス呼（0A00）の切替においても一般呼と同様に、着信側の準備完了後に発信側の切替を行います。すなわち、まず「サービス提供事業者→着信事業者」

の切替を先に行い、呼接続や課金等の正常性を確認後に、「発信事業者→サービス提供事業者」の切替を行うこととしました。

2区間の切替に順序性を持たせない場合は、切替過渡期において、各接続事業者のそれぞれの区間でSTM-POI接続とIP-POI接続が混在することになります。その場合、サービス提供事業者にてSTM/IP間でインタワークする機能が必要となってまいります。切替過渡期だけに用いる機能の開発は回避することが望ましいとの各事業者の考えから、切替に順序性を持たせることでサービス提供事業者は、STM-POIからの入り呼はSTM-POIで、IP-POIからの入り呼はIP-POIで接続することとし、STM/IP間のインタワーク機能の具備を回避することができました（図2）。

### PSTN機能シンプル化

PSTNでは加入者交換機がルーチング機能を持ち、ルーチングに紐付く料金精算や

トラフィック制御等のOpSもPSTN用に配備していました。そのため、PSTNとIP網で類似の機能を持つOpSがあり、運用もそれぞれの網に対して行っていました。

PSTNマイグレーション後、加入者交換機は「メタル収容装置」として加入者収容だけの機能を流用し、ルーチングはIP網に具備することになります。そのため、料金精算・トラフィック制御等もIP網側のOpSにPSTN対応の機能を具備することで一元化し、運用のシンプル化を実現しました。

なお、同一加入者交換機内のお客さまどうしの接続においては、従来、加入者交換機内で折り返すルーチングとなっていたが、PSTNマイグレーション後はルーチング機能がIP網に具備されるため、同一「メタル収容装置」内の接続であってもIP網経由でルーチングされることとなります。そのため、呼接続では必ずIP網を経由することとなり、料金精算やトラフィック制御等もIP網側のOpSで実現可能となりました。

また、従来の加入者交換機のルーチングでは共通線網を介してISUP信号を疎通させていましたが、PSTNマイグレーション後はIP網経由でルーチングすることとなります。具体的には、PSTNマイグレーション後はメタル収容装置から信号変換装置を介してIP網に接続し、ISUPをSIPにインタワークしてルーチングします（図3）。

また、サービス呼（0A00）の番号解決も同様に、IP網へ切替を行っています。従来はPSTNの代表加入者交換機からサービス提供事業者のサービス提供装置へ共通線網を介して接続し、番号解決していました。PSTNマイグレーションにおいて、サービス呼（0A00）の発信側の切替を契機にIP網経由のルーチングに移行したことにより、共通線網を廃止可能となりました。

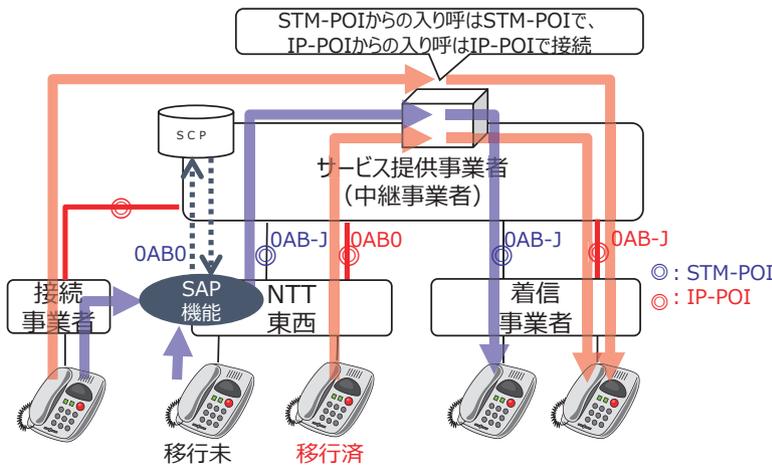


図2 サービス呼（0A00）の切替過渡期

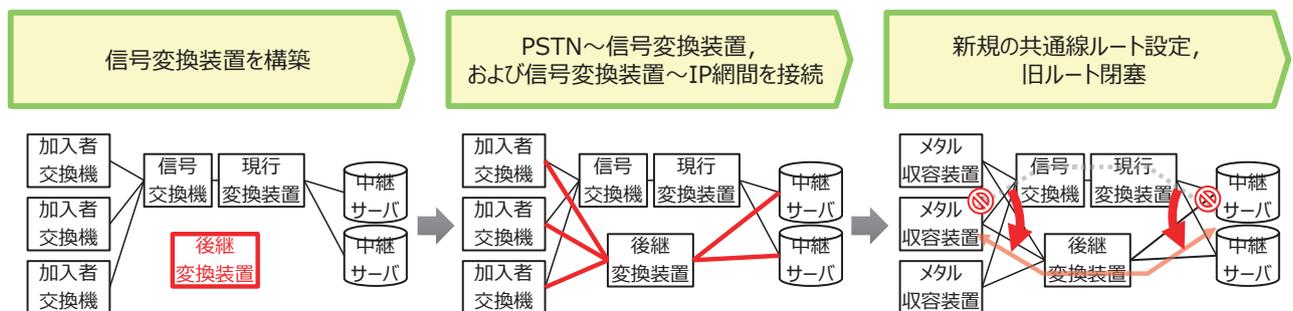


図3 共通線網からIP網への切替

## 固定電話発切替における品質向上の取り組み

PSTNマイグレーションにおいては、NTT東西の固定電話発通話をIP網に切り替えるのに合わせて、一部付加サービス等の廃止、マイライン廃止、および通話料金の全国一律化等を行いました。これらはお客さまサービスの仕様に影響するものであることから切替日をあらかじめ公表しており、トラブルによる切戻し等のリスクを徹底的に排除し確実に切り替えることが必要な状況でした。

そのためにはネットワークの切替だけでなく、料金請求等にかかわるOpSの切替、また事前のお客さま周知等、多岐にわたる対応を行いました。ここではまず、ネットワーク切替における品質向上について説明します。

トラブルリスクを事前に低減する取り組みとして、まずはひかり電話・他事業者発着の切替と同様にIOTを行い、事業者間の信号差分等による不具合を解消しました。加えて、商用設備と同等の環境であるFI試験環境を構築し、検証環境では難しい他装置を含めた商用ネットワーク全体での確認も実施しました。FI試験実施の背景として、固定電話発切替の前工程であるひかり電話発の切替においては特定の接続パターン、もしくは特定端末の挙動に起因するトラブルが発生していたことから、固定電話発切替においても商用環境独自の問題が発生するリスクを想定し、各相互接続事業者の商用環境とも接続のうえ、正常に切り替えられるかを確認しておく必要がありました。そのため特定端末の仕様による問題が発生するリスクの低減に向け、FI試験において

はさまざまな端末（特に、固定電話独自の端末である公衆電話、G4FAX、緊急呼受付台等）を用いたバリエーション試験も行いました。またネットワークからOpSに連携する課金トラブルのリスクも想定し、FI環境で生成した課金情報を課金系OpSへ流通し、料金請求の試験も実施しました。なお、FI環境は切替手順の習熟の観点でも活用しました。

ここまです切替工事のトラブルリスク低減に向けた取り組みです。それでも切替当日に万が一トラブルが発生した場合には影響範囲の極小化と早期回復、および不具合への対処を容易にする観点から、通話種別ごと、かつエリアごとに段階的に切替を行うこととしました。

切替対象は県域→ブロック→全国と3段階に分けて順次拡大することとし、切替後の安定期間の確保、および不具合発生時の改修期間の確保等の観点から、約1カ月をかけて全国の交換機（約800ユニット）の切替を実施しました。先行工事となる県域単位の切替においては、山形県（NTT東日本）および鳥取県（NTT西日本）を切り替え、その後ブロック単位の切替では東北ブロックおよび中四国ブロック、その後に残りすべてのエリアの切替を行うこととしました。

先行工事となる県域単位の切替においてはさらに段階を分け、切替工事日の中でまずは対象県域内の1ユニットを切り替えて正常性を確認した後に、残りのユニットを切り替えることで、万が一の影響を極小化しました。

切替当日の正常性確認では、万が一呼処理不可等の重大影響があった場合の長時間化防止と速やかな社内外への情報発信を行

うために、まずは切替後30分以内に基本機能（PSTN/ひかり着、他事業者着、緊急呼着等で呼が正常に接続されること）の試験を実施しました。基本機能の正常性が確認された後に、付加サービスや各種端末等のバリエーション試験、切替後の疎通ルートでのトラフィック上昇の確認、および課金処理の正常性確認等を行うなど、2段階で正常性確認を実施することとしました（図4）。

正常性確認で不具合が発見された場合には速やかに対処できるよう、影響規模、発生要因、運用対処可否等に応じた対処方針をあらかじめ定め、必要な場合には切戻しをする手順も準備しました。例えば接続先等によらずすべての呼に影響が生じている等、重大な不具合が発生した場合には切戻しを行うこととなります。一方、特定の相互接続事業者との間で不具合が発生した場合には、全体切戻しを回避するため、事業者単位で暫定的にSTM-POIに迂回する機能も準備しました（図5）。

また、OpS切替の対象である課金系システムのトラブルを想定し、料金請求タイミングまでにデータ補正する運用対処を含めて方針を策定しました。

以上の取り組みにより、可能な限りリスク低減して切替工事に臨みました。

## 固定電話発切替の工事統制と情報発信

固定電話発切替においては、ライフラインである電話サービスを切り替えることを踏まえ、万が一の不具合発生時には、関係者での情報連携により迅速に対処方針検討・判断ができる体制を整えて臨みました。具体的には、ネットワーク切替、OpS切替、



図4 固定電話発切替の工程

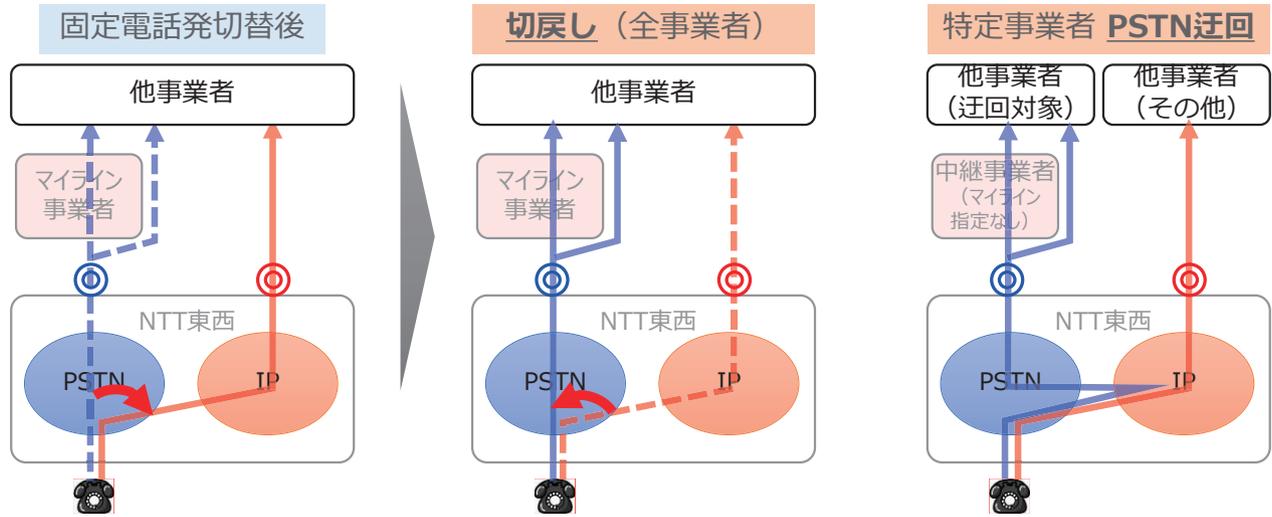


図5 固定電話発切替の切戻し・迂回機能

サービス切替を同時に行うことから、各切替班に加え、情報を統括する班や、社外の各ステークホルダーへ情報を発信する班を設け、切替本部が全体を統制する体制を構築しました。またNTT東西間の連絡体制も構築し、体制規模は総勢で約1000名（NTT東西）となりました。

この体制は本工事に特化したものであったことから事前にリハーサルの訓練を行い、運用の習熟と課題の対処を行ったうえで切替当日に臨みました。

社外への情報発信については、切替により一部のサービスに影響が生じることから、工事スケジュールについてお客さまへあらかじめダイレクトメールをお送りするとともに、工事の2週間前からは公式ホームページからリンクする特設ページを設けて情報発信しました。切替工事当日は切替作業完了、および正常性判定完了の時点でタイムリーに特設ページを更新して進捗状況を情報発信するとともに、ステークホルダー（関係省庁、業界団体、緊急通報受理機関、相互接続事業者等）へは各窓口から個別に必要な情報を発信しました。

切替状況は社内でも広く情報共有しました。万が一の不具合の際にはお客さま対応が必要となることを想定し、コミュニケーションツール（Teams/ELGANA等）を活用して営業アカウントや災害対策室等へ情報連携しました。

正常性確認はバリエーション試験で網羅的に行うものの、特定の利用形態等でのみ

発生する不具合がお客さま申告で発見される可能性もあることから、PSTNマイグレーションに関する問合せ専用のコールセンターや故障受付センター（113）へ切替影響が疑われる申告があった際には、切替本部へ速やかに報告するレポートラインを構築しました。また申告数の推移を把握し、切替後に申告数の増加傾向がないかも併せて確認しました。

異常が発見された場合には速やかに社内外へ情報発信するための業務フローを整理するとともに、想定されるトラブルのパターンに応じて社外へ公表する文面フォーマットを準備しました。特に重大事故となり得る不具合が生じた場合には、30分以内に情報発信が可能となるように、事前に取り得る準備は徹底して行いました。

また、本工事における一連の取り組みは、社内の品質管理・保証組織により、事前に厳しい品質チェック・評価が行われています。

この組織は、スリーラインモデルの考え方に基づき構成されています。第一線（施策実行機能）が品質向上に向けた具体的な取り組みを推進し、第二線（品質管理機能）がその内容のチェックとフォローを実施、さらに独立性の高い第三線（品質保証機能）が第二線のチェックを補強することで、品質保証を担っています。また、第三線の機能として高度な専門性を持つ外部有識者が参画する社内委員会を設置しています。この委員会では、外部視点からの客観的な指摘や助言を受けることで、トラブルの未然防止や発生時の影響最小化を実現し、リス

クマネジメントの強化を図っています（図6）。

結果的に、切替当日には大きな不具合は発生せず、切替作業は予定どおりに完了させることができました。なお、固定電話発切替を開始した直後の2024年1月1日には令和6年能登半島地震が発生しましたが、切替本部とは別で災害対策態勢を立ち上げて対応する一方、切替工事に関してはNTT東西および持株会社で情報連携し、切替対象エリアの被災状況や切替実施に必要な体制等をふまえ、切替工事上の懸念がないことを確認し、予定どおり実施することができました。

### 相互接続事業者発切替の品質向上

IP-POIの相互接続は各事業者間がそれぞれ1対1での接続となることから、各社間の網機能の差分や、各社の商用環境に起因する不具合等のリスクを想定し、事前に事業者間の接続試験を行いました。

各社は自社環境での検証に加えて、各社の検証環境へ接続して行う接続試験（IOT）を行いました。従来、新規に相互接続する際には、IOTの要否は事業者間の協議で決定していましたが、PSTNマイグレーションにおいては各社とも初めてIP-IP接続することになるため、全事業者間でIOTを必須とするよう、事業者会合の場で合意して進めました（図7）。

各種検証を行っても、実際に切り替えた後には特定の接続パターンや特定端末に起

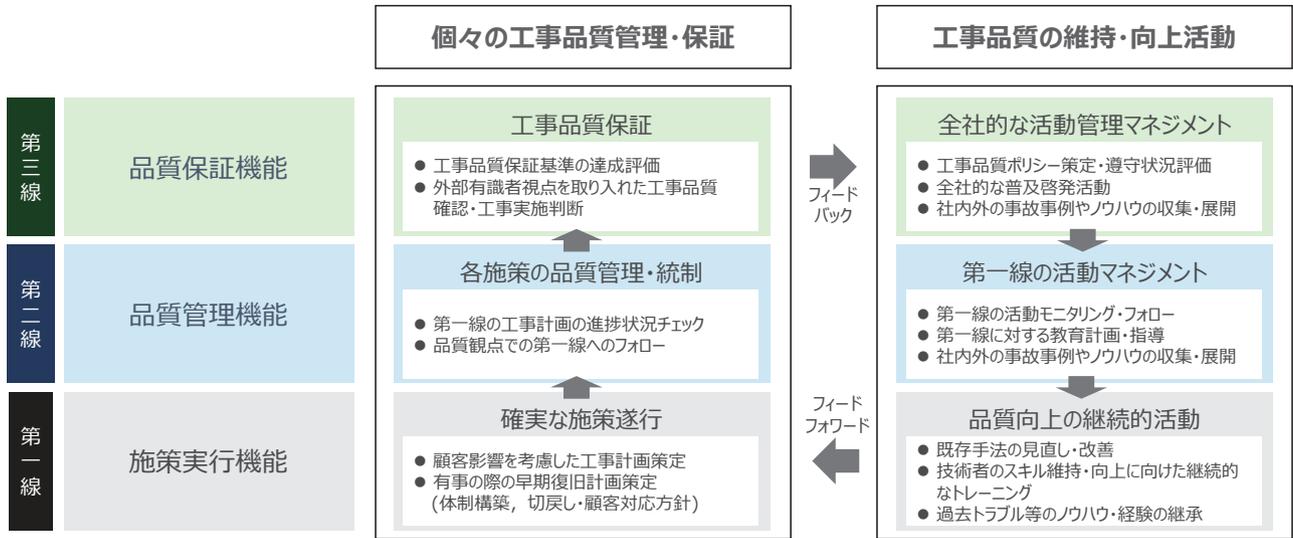


図6 固定電話発切替の品質管理・保証

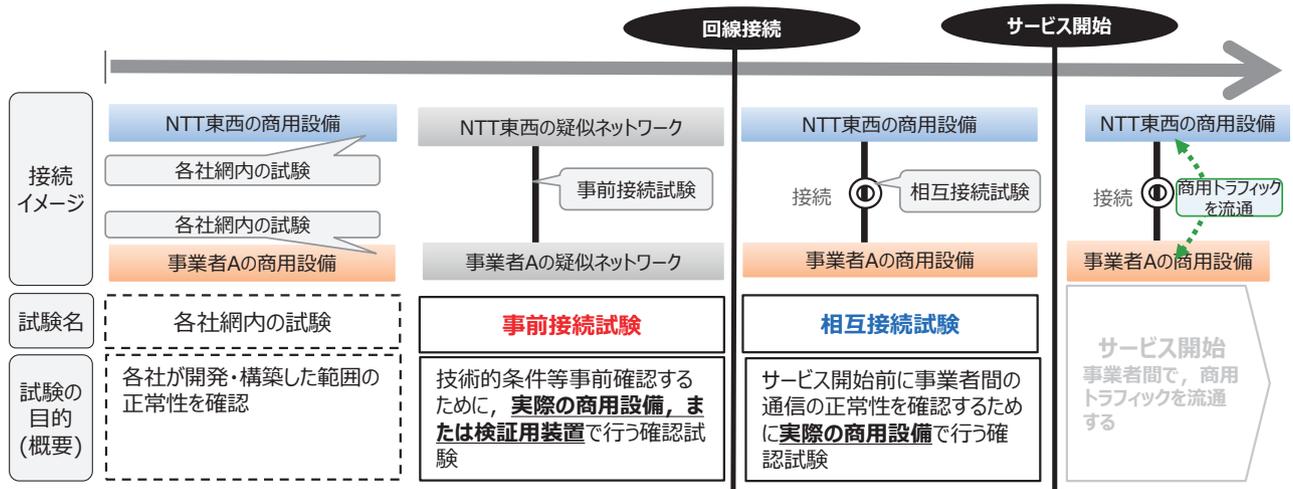


図7 相互接続事業者発切替の品質向上

因する不具合が生じることがありました。その際には影響規模に応じて切戻し、もしくはドメインルーチングを継続しつつ接続ルートをSTM-POIへ迂回する暫定措置も活用しながら切替工程を進めました。また、各社間の切替で発生した不具合について、他社でも発生するおそれのあるものは事業者会合の場で情報共有することで水平展開し、同様の事象が発生することを防止しました。

各社間の切替期限については、切替工程の順序性が「着信側の準備→発信側で切替」であることから、全事業者がIP-POI経由での着信が可能となる期限を定め、着信側の準備が整い次第発信側で切替を開始できるようにすることで、極力各事業者の発信

切替のスケジュールに柔軟性を持たせることとしました。また、切替期限である2024年末までに全事業者間の切替を完了させるために、各社ごとに接続事業者との切替時期を調整完了する目標時期や、切替完了に向けた中間指標（例：0AB-J着は2024年1月末までに少なくとも1社と切替等）を設定し、毎月の事業者会合で進捗状況の可視化を実施しました。そのうえで定期的に進捗状況を評価するタイミング（チェックポイント）を設け、未達成の事業者については個別にフォローアップを実施しました。

最終的には2024年12月に（一部モバイル発緊急呼を除き）全社の切替が完了しました。全社の切替完了が前提となっていた双方番号ポータビリティについても、予定

どおり2025年1月に提供開始することができました。



(左から) 佐藤 良恵 / 黒崎 良一

安全なPSTNマイグレーション実現のために長い期間、切替方法の検討を実施、ここに完了を迎えました。このノウハウを活かし、これからも、通信ネットワークの安定運用に向け、各種ネットワーク移行等の切替工事を安全かつ確実に進め、高品質で効率的なネットワークの実現に貢献していきます。

◆問い合わせ先

NTT東日本/NTT西日本



# 電話網トラフィック制御運用方法の変革 ——保守・運用のシンプル化

本稿では、PSTN (Public Switched Telephone Network : 公衆交換電話網) からIP網への移行に伴い、IP網中心のシンプルなトラフィックの監視・制御の実現に向けて、トラフィックの運用を従来の細かな交換機区間のトラフィック・設備管理からエンド・ツー・エンドのトラフィック管理への移行や輻輳起因のトラフィックに対して早期に検知し制御を行う機能を追加することによって、より安定したネットワーク運用のための新たなトラフィック監視・制御システム (TCS : Traffic congestion Control System) の機能、導入経緯、取り組みについて紹介します。

キーワード：#トラフィック監視・制御，#輻輳，#トラフィックの可視化システム

## 背景

長年にわたる安定した電話サービスの提供に向けて、電話網内のトラフィックが輻輳\*1を起こさないように、TCS (Traffic congestion Control System) や電話トラフィックの可視化システムによる監視・制御を行ってきました。このような取り組みは、通信の信頼性を確保するために不可欠なものであり、社会的にも非常に重要な役割を果たしてきました。輻輳が発生すると、特定の電話ユーザの接続処理が滞るだけでなく、交換機処理自体が停止してしまうおそれがあり、その結果として複数の電話ユーザの通話を妨げる可能性があります。その輻輳の種類は、災害時やチケット予約等に発生する電話の殺到による輻輳、交換機等の設備故障による輻輳があり、これらは突発的、かつ予測困難な事象であるため、対策が必要となります。TCSは、常に電話網のトラフィックを監視し、輻輳が発生した場合には、輻輳原因を特定し、他の電話ユーザへの通話を阻害しないように、トラフィック量を適性量に絞り込む制御を行います。その結果、輻輳していない他の電話ユーザへの安定した電話サービスを提供します。

\* 現、NTT ExCパートナーズ

\* 1 輻輳：災害やイベント等により多数の人が同時に電話を発着信することで通話がつながりにくくなる現象。

これまでのトラフィックに対しては、2つのTCSで監視・制御を実現していました。PSTN (Public Switched Telephone Network : 公衆交換電話網) 内およびPSTNと接続事業者との相互接続点 (STM-POI) のトラフィックはPSTN用のTCS (STM用TCS) で監視・制御を行い、IP網内のトラフィックはIP網のTCS (IP用TCS) で監視・制御を行ってきました。

STM用TCSは、輻輳を検知した着信側の交換機から検知情報を受け取り、輻輳内容に合わせて制御方法を判定し、発信側の全交換機に対して制御を指示し、トラフィック制御を行うことで、輻輳を防いでいます。

IP用TCSは、輻輳を検知したSIPサーバから検知情報を受け取り、STM用と同様に発信側のSIPサーバに対して制御を指示し、トラフィック制御を行うことで、輻輳を防いでいます。これら2つのTCSはそれぞれ独立して運用していることから、STM用TCSで輻輳を検知した場合はIP用TCSでも追従して制御を行い、IP用TCSで輻輳を検知した場合はSTM用TCSでも追従して制御を行う必要がありました。

PSTNマイグレーション後は、PSTNの中継ネットワークがIP網中心のネットワーク構成 (中継ネットワークのIP化) に変更、かつ、接続事業者と接続するSTM-POIが廃止されたため、全国で相互接続点がIP化 (IP-POI) されました。このネットワークの構成変更に合わせて、トラフィックの監

ほしの し の ぶ はせがわ た く み  
星野 志乃美<sup>†1</sup> / 長谷川 拓海<sup>†1</sup>  
せきの ともひろ むとう ひろゆき<sup>†1</sup>  
関野 智啓<sup>†1</sup> / 武藤 展敬<sup>†1</sup>  
まるはし ふみかず かわなみ としひこ<sup>†2</sup>  
丸橋 史和<sup>†2</sup> / 河浪 年彦<sup>†2</sup>

NTT東日本<sup>†1</sup>

NTT西日本<sup>†2</sup>

視・制御の見直しを行いました。

## 新TCSでのトラフィック監視・制御 の一元化に向けて

PSTNマイグレーション以前において、NTT東日本・西日本 (NTT東西) の電話ユーザ (ひかり電話含む) が接続事業者の電話ユーザと通話する際は、STM-POIを経由して通話を行っていました。また、固定電話ユーザどうしの通話はPSTN内、ひかり電話ユーザどうしの通話はIP網内でそれぞれのネットワークで接続し、固定電話とひかり電話の通話についてはPSTNとIP網を横断して接続していました。

PSTNマイグレーション後は、IP網にIP-POIが設置され、NTT東西のIP網と接続事業者が接続します。また、固定電話ユーザどうしの通話についても、中継ネットワークはIP網を使うようになったため、今までのSTM用TCSが監視・制御してきたSTM-POIやPSTN内のトラフィックは、新たなトラフィック制御機能の検討が必要でした (図1)。

具体的には、STM用TCSの機能のうち、中継ネットワークのIP化に伴い十分な方路帯域が確保できることから、方路上の輻輳を迂回等で制御する回線群指定制御機能の廃止と、IP-POI化に伴うSTM-POIでの制御機能を廃止しました。また、TCSの制御機能を精査し、IP用TCSをベースに一元

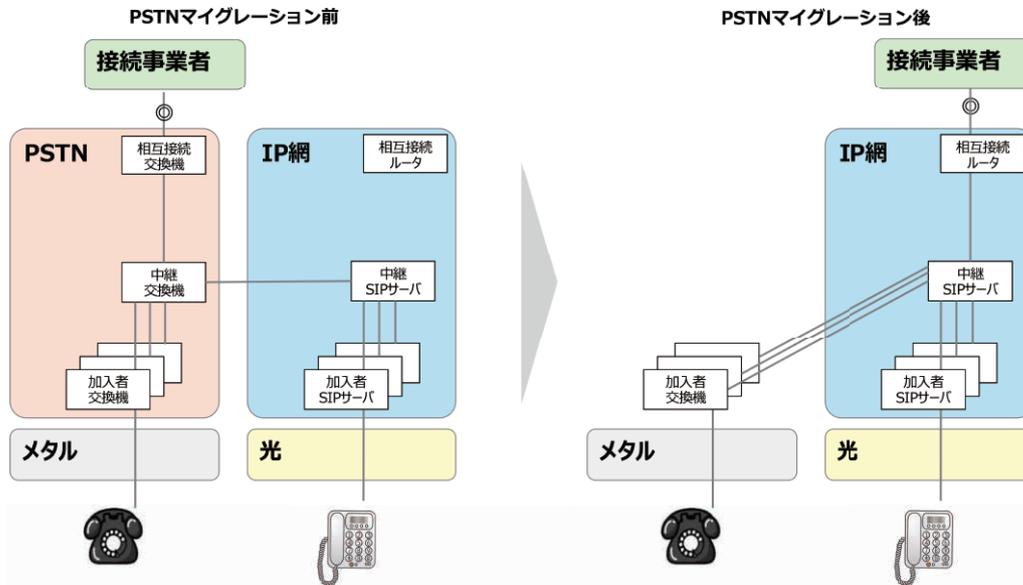


図1 PSTNマイグレーション前後のネットワーク構成

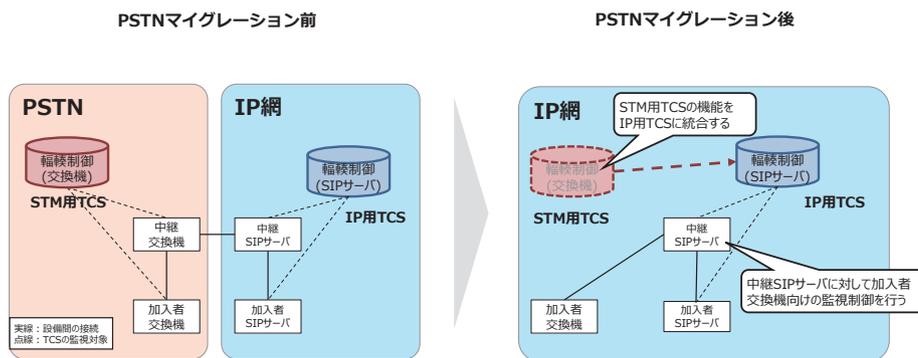


図2 トラフィック制御をIP用TCSベースの一元監視・制御へ

管理する方向で検討した結果、固定電話ユーザへ着信する輻輳は、中継SIPサーバで輻輳を検知し、制御する方法に変更しました。以上を踏まえて、IP用TCSをベースとしたSIPサーバへの輻輳制御指示を行うことで、すべての電話トラフィックを一元的に監視・制御できるようにしました。

さらに、制御指示の効率化の観点から、以前のIP用TCSで行っていた全SIPサーバへの制御指示に加え、グループ単位でのSIPサーバへの制御指示を実現しました。STM用TCSの機能をIP用TCSの機能に反映し、不足した機能を追加することでトラフィック制御を1つのシステムで実行する新しいIP用TCSが誕生しました(図2)。

## トラフィック管理方法のシンプル化

トラフィック制御をするためには、適切

なトラフィック管理が必要となります。トラフィック管理は、ネットワークの安定運用を支えるとともに、制御の精度を高めるためにも欠かせない重要な要素の1つです。ここでは、PSTNマイグレーション前後のトラフィック管理方式を変更した点について紹介します。

電話網の品質を管理するために、定期的にトラフィック情報を収集、集計しています。この情報収集は、電話網の品質を観測するための基本的な要素であり、通話品質の向上や障害の早期発見にもつながる重要なプロセスです。具体的には収集したトラフィック情報を利用して、完了呼、不完了呼の推移を観測します。特に、不完了呼を監視することで品質管理を行っています。不完了呼の増加は輻輳や障害の兆候を示すため、これを継続的に監視することで迅速な対応が可能となります。以前は、PSTN

とIP網のトラフィックをそれぞれ収集していました。

PSTNは接続事業者または県間と対になった交換機の区間や、加入者交換機と中継交換機の区間のトラフィック情報を収集、集計処理、表示をしていました。この機能を実現するシステムをATOMICS(トラフィック統合管理システム)と呼んでいました。ATOMICSは、PSTNにおけるトラフィック管理を担うシステムであり、長年にわたり電話サービスの安定運用を支えてきました。

一方、IP網はトラフィック収集システムが全国のSIPサーバからトラフィック情報を定期的に収集し、一元的に管理していません。以前は、輻輳しているトラフィックを特定するために、IP網であっても、SIPサーバの方路ごとにトラフィックを取得する方式でした。

PSTNマイグレーション後は、従来の方路単位でのトラフィック収集からドメイン単位でのトラフィック収集へ移行しました(図3)。この方式の移行により、効率的かつ統合的にトラフィック情報の収集・分析が可能となり、その結果、電話網の詳細状況を把握することができました。具体的には、全国のSIPサーバから情報を収集するにあたり、ドメイン単位で総呼数、完了呼数、不完了呼数、同時接続数\*2、セッション数\*3を取得するようにしました。SIPサーバから発信したトラフィックに対してドメイン単位で分計し、これまで把握が難しかった一般呼やサービス呼の把握も可能とし、複雑な集計処理をすることなく、エンド・ツー・エンドのトラフィックを取得するこ

とを可能としました(図4)。

ドメイン単位でのトラフィック運用により、電話網の安定運用を支えるとともに、トラフィック制御に必要なトラフィック情報を集める仕組みを構築しました。

### トラフィック制御方法, トラフィックモデル

PSTNマイグレーション以前は、接続事業者と県単位で対となる交換機の区間や、交換機どうしの区間のトラフィック量に従って、方路や物理回線増設数の検討・構築を行ってきました。また、接続事業者とのSTM-POIでの接続は、接続事業者とトラフィック量を協議し、その結果に応じて

必要な設備の構築を行ってきました。

PSTNマイグレーション後は、PSTNの中継ネットワークのIP化と接続事業者との接続がIP-POI化されたことから、交換機の区間ごとのトラフィック制御からエンド・ツー・エンドの同時接続数でのトラフィック制御が可能となり、シンプルなネットワーク管理が可能となりました。この変化により、従来の物理的な回線単位の管理から脱却し、論理的なトラフィック制御を実現することで効率化を図ることができました。

IP-POIでの接続事業者との接続は、事前

- \* 2 同時接続数：当該時刻における同時に通話している（Uプレーン）数。
- \* 3 セッション数：当該時刻におけるSIP通信（Cプレーン）が同時に発生した数。

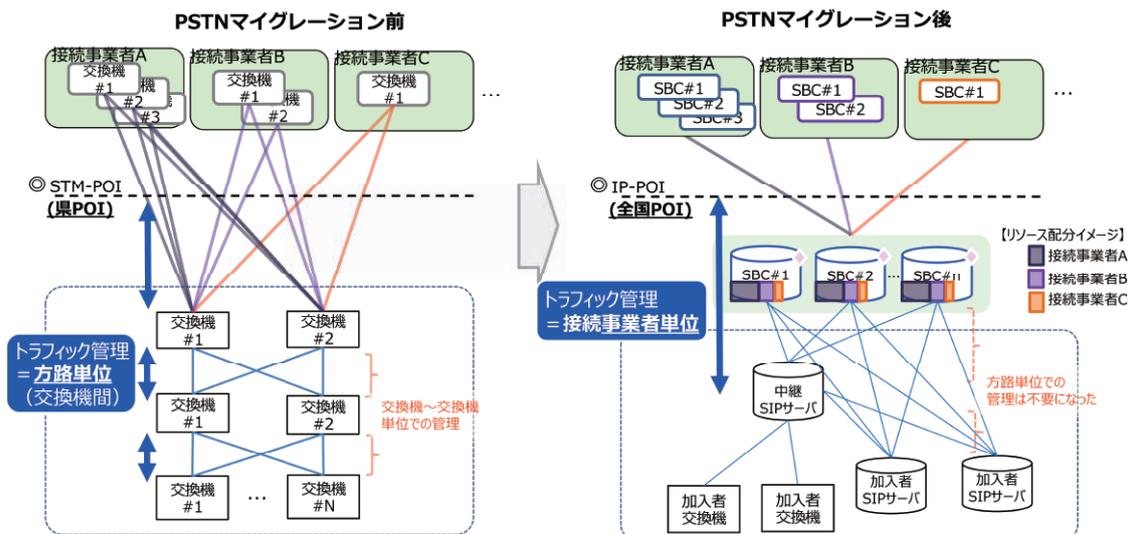


図3 トラフィック管理方法の変更

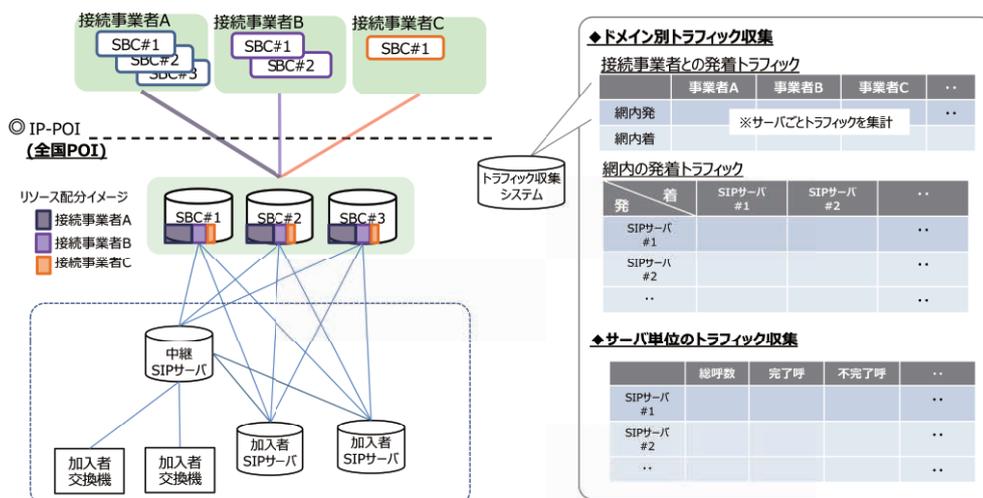


図4 トラフィック収集

に接続事業者と同時接続数を協議し、必要な帯域およびリソースを確保します(図5)。この帯域およびリソースは、予測されるトラフィック量に基づいて構築し、通話品質を確保します。また、予測されたトラフィック量を超えた場合でも、通話品質を維持し、他の通話への影響を最小限に抑える適切なトラフィック制御を行う必要がありました。

しかし、接続事業者とのトラフィック制御について、制御された呼は不完了呼となり、制御が効きすぎてしまうと通話が制限されてしまいます。さらに、即時、かつ強力なトラフィック制御を実施した場合、不完了呼となったユーザはリダイヤルを行い、トラフィック制御前よりも多くトラフィックが発生することが想定されることから、徐々に、かつ緩やかに制御を実施し、協議したトラフィック量となることをめざしました。その結果、トラフィックの増加を予測できるように管理し、協議値を明らかに超える予兆がある場合、トラフィック制御を実施すれば、より緩やかで安定した制御を実現できると考察しました。

トラフィック量の増加を予測するために、「トラフィックはポアソン分布に従う」と

いう説に基づいて検討を進めました。ポアソン分布<sup>\*4</sup>は、一定時間内に発生する事象の確率を数学的にモデル化するものであり、電話トラフィックのようなランダムな呼発生に対して適した理論です。ポアソン分布は、時間当りの期待値が分かれば、おおよその発生確率を求めることができます。例えば、1000呼/分を期待値と考えた場合、1分間に1050呼以上かかってくる確率は約6%と求められます。この考え方を接続事業者とのトラフィックの協議値に当てはめてみることにしました。具体的には、接続事業者との事前協議において、PSTNマイグレーション以前のトラフィック量(実績値)から、切替後のトラフィック量を導き、協議値としました。トラフィック量は通話中数に基づいた値です。この協議値を期待値と考えれば、接続事業者の単位時間当り何呼数来るかを予測できるようになります。同時接続数の増加に伴うトラフィックを予測することで、早めに制御を行うことが可能となります。この結果、ネットワーク品質を維持しつつ緩やかな制御が可能と考えました。

接続事業者とのトラフィックは、接続事

業者単位のトラフィックを監視し、制御を行います。トラフィック制御は、事前に接続事業者と定めたトラフィック量に収まるように、接続事業者ごとに制御トラフィック量(呼/分)を規定しています。制御トラフィック量(呼/分)は、IP網全体で1分間に接続できる呼数を示しており、制御が開始された際には、IP用TCSが制御トラフィック量を基に各SIPサーバへトラフィック制御する呼数値を計算し、制御指示をします。接続事業者とのトラフィック制御が発生した際のシミュレーションを重ねて、接続事業者との呼数が瞬間かつ突発的に増えた場合にも過剰な制御が働かないことを確認しました(図6)。

制御トラフィック量は下記の式で定義しています。

$$\begin{aligned} \text{制御トラフィック量} &= (\text{同時接続数} \times 60 \text{秒} \div \text{平均保留時間(秒)}) \div \text{完了呼率} \\ &\times \text{同時接続数, 平均保留時間, 完了呼率} \end{aligned}$$

については接続事業者の実績値より算出  
接続事業者との制御トラフィック量は、

\*4 ポアソン分布：一定の時間内で特定の事象が発生する回数。

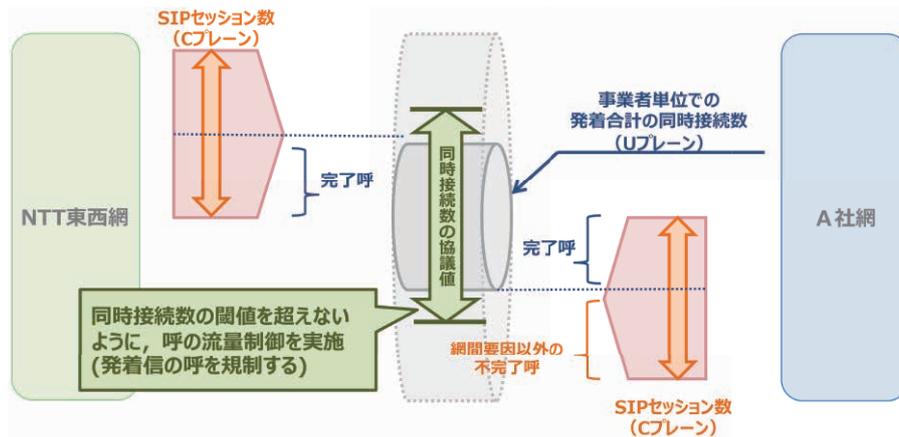


図5 同時接続数の協議値

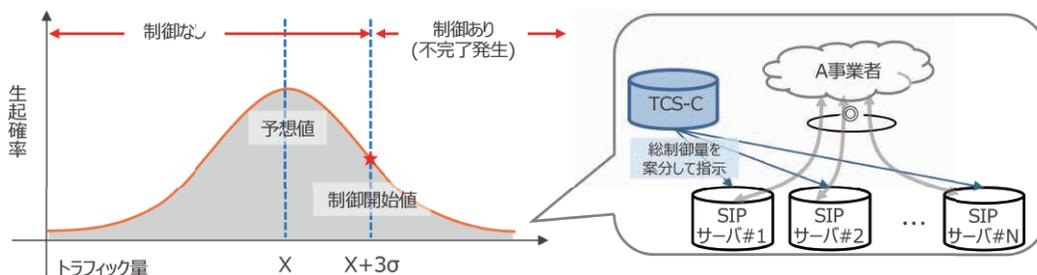


図6 制御シミュレーション

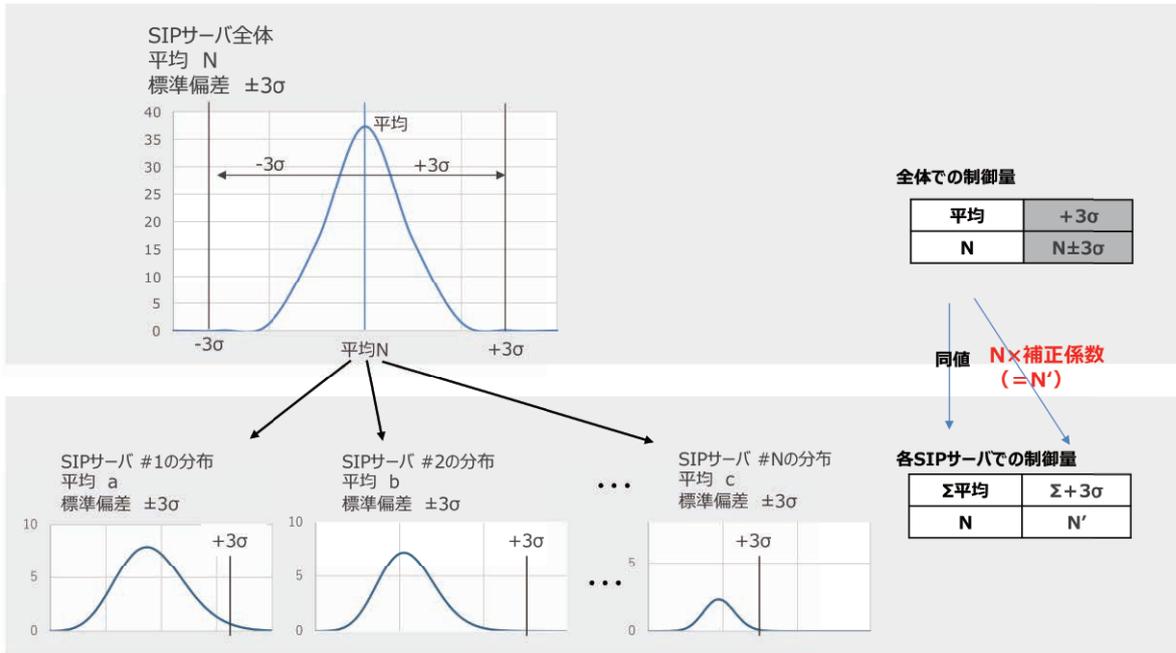


図7 補正係数のシミュレーション

ネットワーク全体をみた値で想定値を作成しました。しかし、各SIPサーバへ制御指示を分配した場合に、トラフィック量は割り切れず、単純にSIPサーバ数で割った値を分配した場合、SIPサーバごとのトラフィック制御が規定値以上に掛かってしまう可能性がありました。そこで、既存のトラフィック量を集計し、トラフィック制御が過剰に掛からないように補正する機能を具備しました。補正するための係数として、全体のトラフィック量と分配された各SIPサーバでのトラフィック量を比較し、分割後にも制御がかかりすぎないような値を求めました(図7)。

実際に接続事業者とのトラフィック制御を実装するにあたり、現実に近いかたちのトラフィックモデルを作成し、シミュレーションを繰り返し行ってきました。トラフィック制御がかかった場合、ネットワーク品質が悪化すると判断されるレベルの制御が行われていないかを確認しました。シミュレーションの中で、制御トラフィック量を増やした場合や補正係数を変えた場合の影響についても検証を行い、理論が正しいことを確認しています。

固定電話網内の制御について、特定の電話ユーザや交換機への着信による輻輳は、中継SIPサーバで監視・制御を実施しています。また、前述のトラフィック管理が実

現したことから、どのSIPサーバのトラフィックが急増したか監視することが可能となり、また、輻輳発生後の早い段階から、エンド・ツー・エンドのトラフィックを確認し、制御範囲を絞り込むことが可能となりました。

### おわりに：長年にわたり電話網を支えてきたATOMICS, STM用TCSの廃止

PSTNマイグレーション後、STM用TCSとIP用TCSの機能を見直すことによりトラフィック監視制御システムの一元化を実現しました。その結果、STM用TCSの廃止が可能となりました。また、STM用TCSと連携してPSTNのトラフィックデータを収集、集計し、表示するATOMICSについても必要な機能要件を整理し、IP用TCSが収集するトラフィックデータに組み込むことでシステムの統合を実現しました。結果、ATOMICSも廃止することができました。

PSTNマイグレーションに伴い、電話網のシンプル化だけでなく、トラフィックの監視制御システム、トラフィック収集・管理のオペレーションもシンプル化し、電話網の品質を維持しながら保守・運用性の向上を図ることができました。今後も、IP網

を中心としたネットワーク構成のもと、トラフィック運用の効率化を進めることで、安定した通信サービスの提供を継続していくことが期待されます。



(上段左から) 星野 志乃美 / 長谷川 拓海 / 関野 智啓

(下段左から) 武藤 展敬 / 丸橋 史和 / 河浪 年彦

PSTNからIP網への移行に伴い、電話トラフィックの監視制御方法で見直したノウハウを活かし、今後も安定的なネットワーク運用につなげていきます。

#### ◆問い合わせ先

NTT東日本/NTT西日本

NTTアクセスサービスシステム研究所  
 上席特別研究員

可児 淳一 Junichi Kani

## 情報通信サービスの進化を加速する 新たな光アクセスネットワークの研究 でIOWN APNの発展に貢献する

2023年3月に、NTT東日本・西日本からIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) APN (All-Photonics Network) のサービス、「APN IOWN1.0」がリリースされ、その高速・大容量、低遅延性が世の中の注目を集めました。さらに2025年4月13日から10月13日まで開催の大阪・関西万博では、夢洲会場内のパビリオン・催事施設等の主要施設間をIOWN APNで接続することで、その低消費電力、大容量高品質、低遅延伝送により、会場内のさまざまなコンテンツやイベントの共有、距離を感じるここのない一体感と没入感のある体験が可能な環境を提供しています。特にアクセス面のAPN化については、さまざまな方式が検討・議論されている段階であり、新たな方式に挑戦するとともに議論を先導する、NTTアクセスサービスシステム研究所可児淳一上席特別研究員に、IOWN APNの発展に向けた取り組み、研究テーマに直接関係なくても新しいこと、興味のあることにチャレンジすることが、新たな発見、研究のヒントにつながるという考え方を伺いました。



### アクセス面のAPNアーキテクチャ、SDN化、伝送性能の抜本的向上でIOWN APNの本質に迫る

現在、手掛けていらっしゃる研究について教えていただけますでしょうか。

情報通信サービスの進化を加速する新たな光アクセスネットワークの研究というテーマに継続して取り組んでいます。

従来のネットワークでは、ユーザ直近の通信ビルにおいては、ユーザとの間のアクセスネットワークから中継ネットワークにトランフィックを乗せ換える処理を電気で行っているため、消費電力も多くなり遅延も発生します。また、通信装置は専用装置でサービスごとに異なります。これを光と電気の処理を分離し、必要な場所まで光のままアクセスし、必要なものだけ電気処理することで抜本的な省電力化と低遅延化を図ります。また、電気処理はなるべく汎用サーバで実現します (図1)。

これをめざして、「アクセス面のAPN (All-Photonics Network) のアーキテクチャに関する研究」「伝送機能のソフトウェア化による柔軟性の向上」「光アクセスネットワークの伝送性能の抜本的な向上」の3つの軸で研究を進めています。

「アクセス面のAPNのアーキテクチャに関する研究」については、

図1にあるようなAPNの入り口となるPhotonic Gateway (Ph-GW) を、部品を組み合わせさせて試作・実証したところを前回 (2022年12月号) 紹介しました。現在は、アクセス面をカバーする将来のAPNに向け、Ph-GWの研究を加速し、チームとしてAPN端末における“Plug and Play”を実現する方式やさまざまなサービスの光信号に対応する方式などを提案・実証しています。これらの結果は、国際会議 ICETC 2022でベストペーパー賞を受賞するとともに、光通信業界でトップレベルの国際会議 (OFC 2023, ECOC2023, OFC2024, OFC2025) に継続的に採択されました。

また、アクセス面と中継面をカバーするAPN全体のアーキテクチャについて、IOWN Global Forum (IOWN GF) においても議論を進めています。IOWN GFのOpen APNアーキテクチャタスクフォース (OAA-TF) の共同タスクフォースリーダーとして、ネットワーク事業者がOpen APNをより容易かつ効果的に展開できるようにOpen APNの機能アーキテクチャを拡張し、アーキテクチャ文書のリリース2 (2023年10月公開)、リリース3 (2025年6月公開) を策定・公開して、APNの段階的な発展イメージを具体化しました (図2)。

「伝送機能のソフトウェア化による柔軟性の向上」については、従来の通信装置は、サービスごとに必要な機能がベンダ独自の設

計で実装されていて、要件の変化に応じて機能を柔軟に追加したり変更したりすることが困難でした。昨年、ネットワーク仮想化技術の進展に伴い、通信機能の一部がソフトウェアで実現できるようになったことにより、機能の柔軟な追加・変更が可能となりました。私たちは、ソフトウェアで実現する機能領域をさらに拡大し、データセンタで利用されている汎用のサーバ機器などでソフトウェアによりすべての通信機能・サービスを提供する世界をめざしています（図3）。これにより、光モジュールを交換するだけでさまざまなサービスが迅速に提供可能となります。課題となっていた低遅延化への取り組みについては、代表的な光アクセスシステムである10 G-PON（Passive Optical Network）の処理を、専用LSIを使わずに汎用サーバ上のソフトウェアで1ms以下ですでに実現できるようになり、また、長距離伝送に必須となっているデジタルコヒーレント方式の信号処理についても専用LSIを使わずに汎用サーバ上のソフトウェアで実現し、10 Gbit/sの伝送速度もすでに達成しています。

その後、アクセスシステムを中心とした通信機能のSDN（Software Defined Network）化に関して、性能の追求に加えてサービスとして実現するうえで必要となる検討に幅を広げてチームで取り組みました。具体的には、誤り訂正等の信号レベルの処理や優先制御等の通信制御の処理、さらには画像分析等のアプリケーションに至るまでの各種の処理機能をコンテナ化（ソフトウェアとその実行に必要な環境をまとめてパッケージ化したもの）して、順番に組み合わせることで実行していく、ファンクションチェーンングを実現して、トップレベルの国際会議（OFC 2024）、難関論文誌（IEEE/OPTICA Journal of Optical Communications and Networking）において採択されました。また、拡張性の実証としてスーパーコンピュータ環境で4万台以上のユーザ端末の同時処理を実証し、トップレベルの国際会議（ECOC 2025）において採択されました。こうしたSDN化の取り組みについては2030年ごろの実際のネットワークへの実装をめざしています。

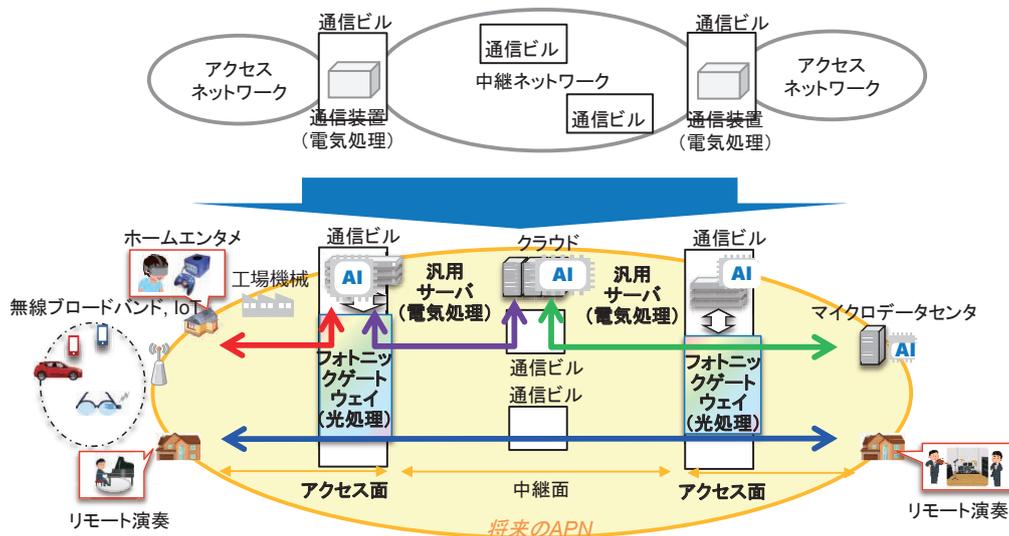


図1 研究の概要

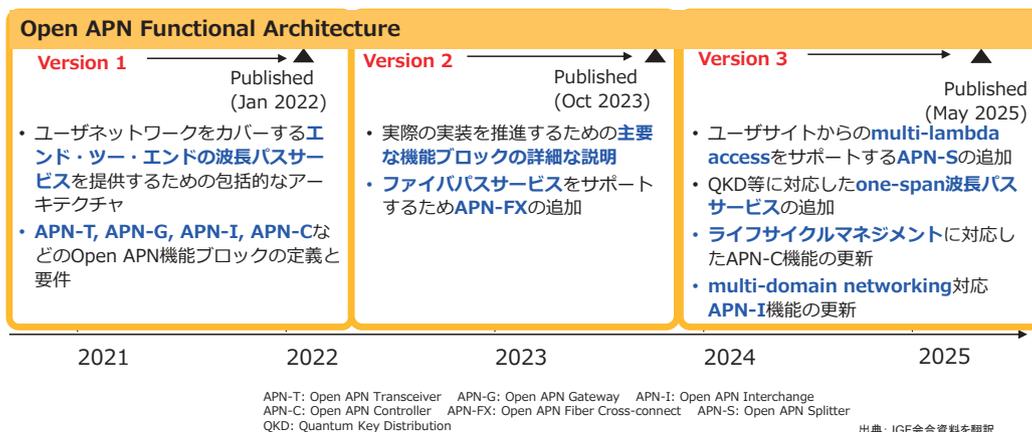


図2 Open APN Functional Architectureの改版のポイント

## 「光アクセスネットワークの伝送性能の抜本的な向上」は、アクセス面のAPN実現の本質に迫るようなテーマですね。

「光アクセスネットワークの伝送性能の抜本的な向上」について、従来の光アクセスネットワークは、各ユーザから直近の通信ビルまでの距離が20 km以下のエリアで展開し、多重化された信号を32~64ユーザで共有し、ユーザごとに1~10 Gbit/sの速度で信号を提供するPONの構成でした。これを将来のAPNでは、必要などころまで光のままアクセス可能とするための基本技術として、デジタルコヒーレントアクセス技術による伝送性能の抜本的な向上に取り組んでいます。デジタルコヒーレントアクセスは、従来光の強度で情報を伝えていたものを、光強度に加えて位相に情報を乗せることで大容量化が可能になるとともに、受信側で光の干渉を利用して超高感度の受信を可能とするものです。これにより、速度100 Gbit/s超、ユーザ数256超、アクセス距離80 km超といった抜本的な性能向上が実現できる可能性があり、そこにチャレンジしています（図4）。これまでのリアルタイム検証実験では、上り下りともに10 Gbit/sのPONシステムで、距離40 km（過去の検証の2倍）、送受信バジェット50 dB（過去の検証の100倍）を達成しました。

その後、さらなる高速化の検討を進め、チームで100 Gbit/sアクセスに向けたシンプルな受信方式を提案・実証し、トップ国際会議（ECOC 2024）で採択されました。これについては、実験室レベルの話であり、APNへの適用も視野に入れると、高速化はもちろんのこと、いかに経済的なアーキテクチャで実現するかということも検討のポイントとなります。特にユーザごとに個々に設置されるため、シェアリングによるコスト削減効果が効かないONU（Optical Network Unit）側を低コストに実現することが大きな課題になっており、世界中でさまざまな方式が提案さ

れ、切磋琢磨している状況ですので、私たちのチームもさまざまな提案をしているところです。

**長期的な予想は外れることが多いが、逆にそれを楽しみながら将来予想をすることがアマラの法則との付き合いにおいて重要**  
研究者として意識していることを教えてください。

以前から継続して意識し続けていることですが、短期的な流行に必要以上に流されずに、長期的な大きな変化を考えること、そして、将来を考えるに際しては楽しみながら予想していくことが重要だと思っています。この意識の底流にあるのが、以前にも紹介しましたが、短期的な予想はオーバーエスティメートの傾向があり、長期的な予想はアンダーエスティメートの傾向があるという「アマラの法則」です。短期的な話は予想が容易で分かりやすいので、過剰に期待してしまう傾向にあります。一方で、長期的な話はどうしてもブレ幅が大きくなり、外れることも多くなるので、控えめになる傾向になります。だからこそ、この外れることも楽しみながら予想していくことを心掛けています。

私が取り組んできたアクセスネットワークの分野では、2000年ごろは電話線を使ったインターネットアクセスが主流でした。ADSLという技術で当時としては電話線でもだいたいが高速化できたのでFTTH（Fiber To The Home）の普及は未知数という見方もありましたが、2016年にはFTTHがピーク時のADSLの2倍以上の家庭に普及しました。単にインターネットが高速化したのではなく、あらゆる処理がクラウドで行われて私たちユーザとネットワークの関係が大きく変わりました。2010年代はモバイル通信が高速になってスマートフォンが普及し、当時PCでしかできなかったことが今ではほとんどスマホでできるようになりました。最近

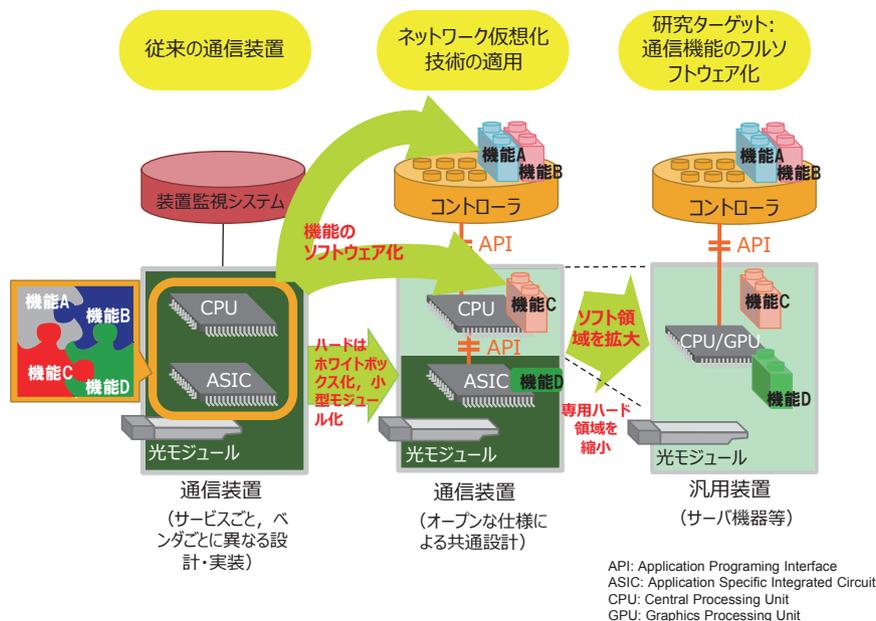


図3 通信機能のフルソフトウェア化

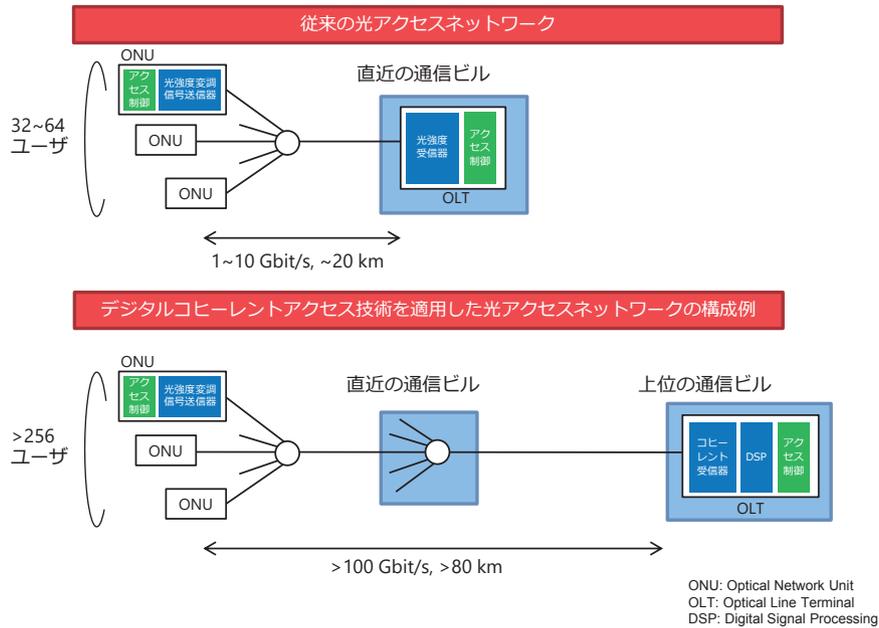


図4 デジタルコヒーレントアクセス技術による伝送性能の抜本的な向上

では生成AIが2020年以降に急速に進展していますね。生成AIが私たちにとって10年後、20年後にどのようなものになっているかを考えると、想像を超える部分がたくさんあると思います。ネットワークとの関係でいうと、現在すでに、生成AIの進展によって、各地のデータセンターの間をさらに高速・低遅延でつなぐニーズが高まっていて、光ネットワークのあり方も大きく変わる可能性があります。このような大きな変化を今後もポジティブに想像しながら研究に取り組んでいきたいと思っています。

さて、私はこれまで、ITU-T (International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector) SG (Study Group) 15 Q2 (ファイバアクセスネットワークのための光システムに関する課題) において アソシエートレポート、FSAN (Full Service Access Network) の議長、IOWN GF OAA-TF のタスクフォースリーダーとして、国際標準化活動に参画してきました。私は、標準化と研究開発を車の両輪として回すことが大事と考えており、そのバランスについて若いころから意識してやってきました。両方やるから倍面白いということもあります。現在は、ITU-TとFSANは、後進に引き継いでいますが、引き続き後進と議論して提案も行っています。特にネットワークの分野は今後ますます標準化、グローバル化が重要になってくるので、意識的にかかわるようにしています。

**研究テーマに直接関係なくても新しいこと、興味のあることにチャレンジすることが、新たな発見、研究のヒントにつながる**

後進の研究者へのメッセージをお願いします。

私は、以前にも紹介しました、スティーブ・ジョブズの有名な演説「Connecting The Dots.」が今でも印象深く残っています。

スティーブ・ジョブズが大学の図書館で偶然見つけて興味を持ったカリグラフィー（アートな文字）が、Macの多様なフォント群につながっている。将来に向けてこうした点と点がどうつながるかは分からない、という話です。最初はバラバラで脈絡がないと思っていたことが、後になって偶然つながってくるようなことがある、という示唆として受け止めています。研究を進めていくと、新たな気付きや発見があったときにそれが追い求めている成果につながるのかという点を、その段階で判断してしまいがちになります。しかし、その時点で関係ないと思われる事象であっても、後になってつながってくることもあるのです。こうしたチャンスを増やしてそれを活かすためにも、たとえ自分のテーマ外であったとしても、新しいこと、興味のあることに積極的にチャレンジしてもらえたらいいと思います。

また、アマラの法則に関して、楽しみながら長期的な予想をしていただけたらいいと思います。これは研究に限った話ではないのですが、長期的という意味で10年後あるいは20年後の世界を予想することになると思いますが、自分の10年後、20年後、例えば自分が40歳、50歳になったときに、自分がどのような仕事をしているのか、ということとセットで考えるとより楽しく予想できるのではないかと思います。こうした異なる観点とのセットで予想することで、新たな発見があるかもしれませんし、そうした発見が「Connecting The Dots.」のごとく、将来的につながりを持っていくかもしれません。



NTTコミュニケーション科学基礎研究所  
特別研究員

**高木 敦士** Atsushi Takagi

## 脳の運動制御メカニズムが導き出す 新たな遠隔操作ロボット技術の展望

人間の脳はさまざまな指令を出して、何気ない体の動作や運動を行っています。同じ人間であっても利き手と非利き手ではその器用さに差があります。そのような単純な課題点から、脳の運動制御メカニズムを「脳の出す運動指令のタイミングの乱れ」という、今までにない新しい視点で解明し、次々と新たな発見をされている「脳の運動制御メカニズム」のトップランナー、高木敦士特別研究員にお話を伺いました。

◆PROFILE：2011年インペリアル・カレッジ・ロンドン物理学部卒業。2016年同大学博士号取得（理学）。2017年東京工業大学（現・東京科学大学）特任助教。2020年NTT株式会社入社。脳の情報処理や運動制御メカニズムの解明にかかわる基礎研究に従事。



### 基礎研究の原点、脳の指令する筋活動の乱れが 実際の動作の精度を左右する

#### ■「手足の器用さを定量的に測る技術」について、その経緯や内容を教えてください。

この研究を始めたきっかけは日常生活での何気ないひらめきからです。具体的には、ある日歯磨きをしているときに「なぜ左手では歯磨きができないのだろう」と思いついたのがはじまりです。そのときはコロナ禍でリモート状態だったため、この疑問を検証できる「自宅でできる実験」を考案したことが、この研究のスタートでした。

そこでスマホの加速度センサを利用し、右手（利き手）と左手（非利き手）で円運動をした際のデータを計測、解析をしました。右手（利き手）のほうが器用なのは、はじめから分かっていたのですが、ではこの右手と左手の差はなぜ起こるのか、その本質的な理由は明確ではありませんでした。これまででも、こうした器用さを具体的に予測・説明できるような仮説はいくつか提案されてきましたが、依然として未解明な点が多く残っていました。そこで、実際の動作の精度を決めるのは、筋肉を動かすための指令を脳が出すタイミングの乱れに原因があるのではないかと仮説を立てました。

例えば、お年寄りが思うように体が動かない、つまずきやすくなったなどとよく聞きますが、これも脳が出す運動指令のタイミングが乱れている部分に原因があると考えられます。歩くために足を前に出そうとしてそのタイミングがワンテンポ遅れる、けれ

ども体はすでに前傾している、そしてバランスを崩して転倒、というような事例です。同様のことは小脳疾患の患者にも起こるのですが、この事例でも「脳の運動指令タイミングの乱れ」が発生していることが予想できます。

例えば、テーブルの上にあるリングを持ち上げるという動作1つでも、脳は腕や手首、指などのさまざまな筋肉に動きの指令を出しています<sup>(1)</sup>（図1）。それは、運動量やそれぞれの筋肉に発生させる力の強弱など、各筋肉に出す指令の要素は多岐にわたります。この脳が出すさまざまな指令のタイミングのばらつきが実際の動作の精度を左右するといえるのです。

#### ■具体的にはどのような技術研究に取り組まれていますか。

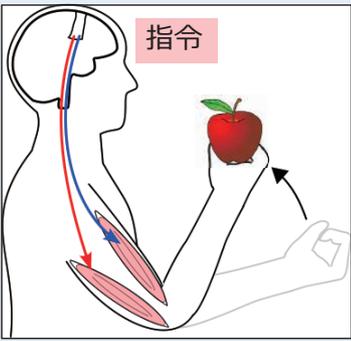
まずは、この動きのばらつきデータを測定するためのスマートフォンアプリの開発を行いました。人間は、学習によって複雑な感覚情報を基に思ったとおりに動くことができるようになります。しかしロボットと異なり、どんなに上達した動きでも「ばらつき」が生じ、完全に正確には動かすことができません。この運動のばらつきは、長年、脳運動研究分野でも注目されてきましたが、手や足を自在に動かす脳の情報処理の仕組みを理解するには、成長やトレーニングによって運動のばらつきがどのように変化するかを調べる必要がありました。そこで私は、定量化が難しかった手や足の「器用さ」をその重要な側面である「運動のばらつき」に注目し、日常生活の中で手軽に実施可能な「スマートフォンを15秒程度ぐるぐる回す」という行為から、簡便かつ短時間で運動のばらつきを「可視化」するアプリを開発しました。



そしてこのアプリを使用して、多くのデータを取得することができました。具体的にはスポーツ用品会社のミズノ株式会社との共同実験で、4歳の幼児から88歳の高齢者まで、1675名の方々のデータを計測しました。この実験はその後も継続しており、現在では2000名以上のデータが集まっています。

図1右側のパネルは、実際に右利きの人で計測した、両手両足の加速度軌道の一列を示しています。左右の軌道を比較すると、手足とも左よりも右が軌道のばらつきが少ないことが分かります。

私が開発したアルゴリズムで、周期運動における連続した2周期の3次元加速度軌道の違いを距離尺度で表現し、全周期に対して平均を求めることで、その「ばらつき度」を定量化できます。こうして得られたデータを解析した結果、手足ともに利き側・非利き側で、ばらつき度は成長とともに減少し、その後一定となり、加齢によって増大することが明らかになりました<sup>(2)</sup>(図2)。また、手足ともに利き側のほうが非利き側よりもばらつき度が小さいことも判明しました。



指令

脳から筋肉に出される指令により運動が成立する

### ◆スマートフォンの加速度センサを利用して「器用さ」を測定

- ①スマホを速めの速度でぐるぐる回す
- ②器用さの度合いを「ばらつき度」で評価



スマートフォン



スマートフォン

(右利きの例)

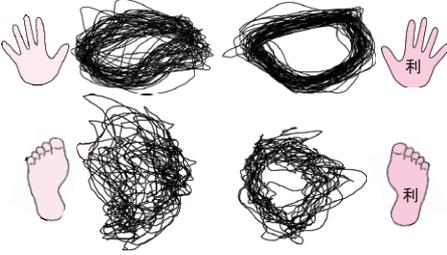


図1 脳が出す動きの指令と実際の動きの「ばらつき」の測定

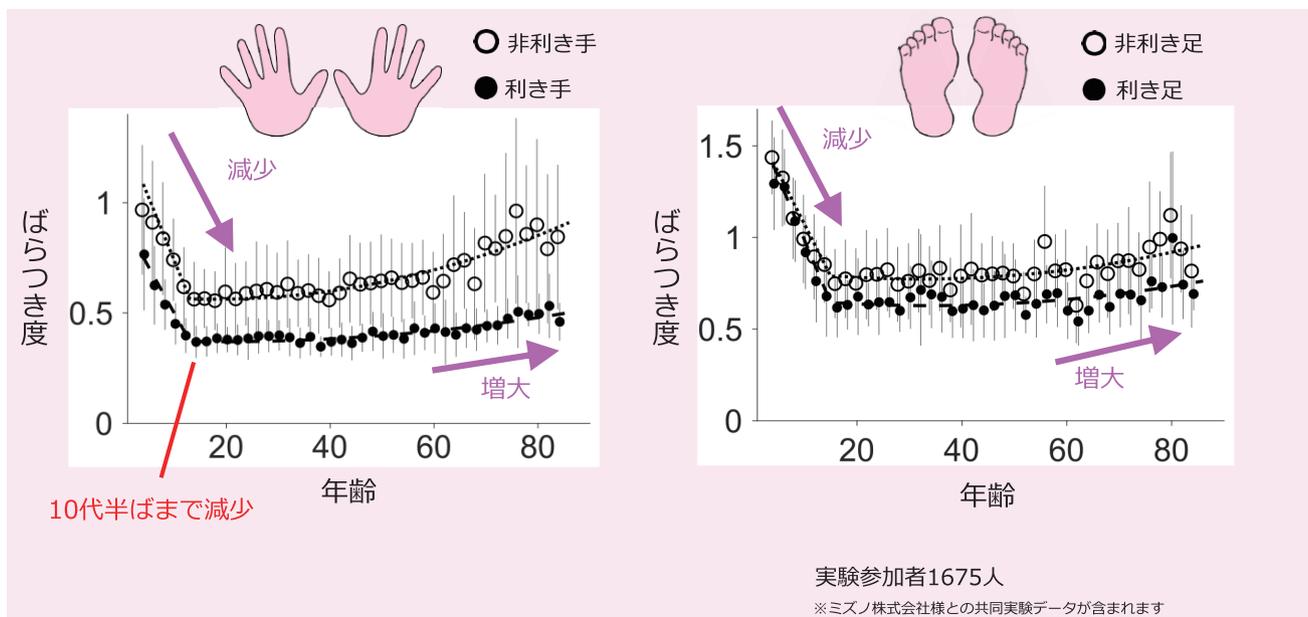


図2 手足の動きのばらつき度の測定データ

次に、この利き手と非利き手の器用さの違い、ばらつき度の左右差がトレーニングに影響されるかを検証するため、右利き、左利き、右手への矯正者に分けてばらつき度を評価しました(図3)。右利きの人は左手のほうにばらつき度が大きく、左利きの人は右手のほうにばらつき度が大きくなっています。また、元々は左利きで右手を使うように矯正された人は、左手と右手両方ともばらつき度が少ないことが分かります。左から右への矯正トレーニングを受けた場合、右手のばらつき度が減少するだけでなく、左手のばらつき度は増えていないので器用さが低下しないということも明らかになりました。

現在は次の段階として、リハビリ施設を運用する企業と協同し、本アプリを使って運動疾患を伴う患者のデータ取得に関するプロジェクトを進行中です。例えば、脳卒中で運動能力の落ちた患者さんのデータを計測し、何週間かのリハビリ後のデータと比較することで、回復状態を検証するといった計画です。基本的にリハビリは単純動作の繰り返しになるので、ある程度回復するとどうしても怠けがちになってしまいます。このアプリで回復効果が可視化できれば、それぞれの患者さんにとっても治療に向けた良いモチベーションになるのではないかと考えています。

ほかにも、このアプリで自分の器用さを測定したり、図2のようなデータと照合することで、同年代の方の平均的な器用さと比較できますし、例えばトップアスリートが自分のフォームを改良するときに、新しいフォームの安定度や習熟度を測るなどという使用方法も考えられます。

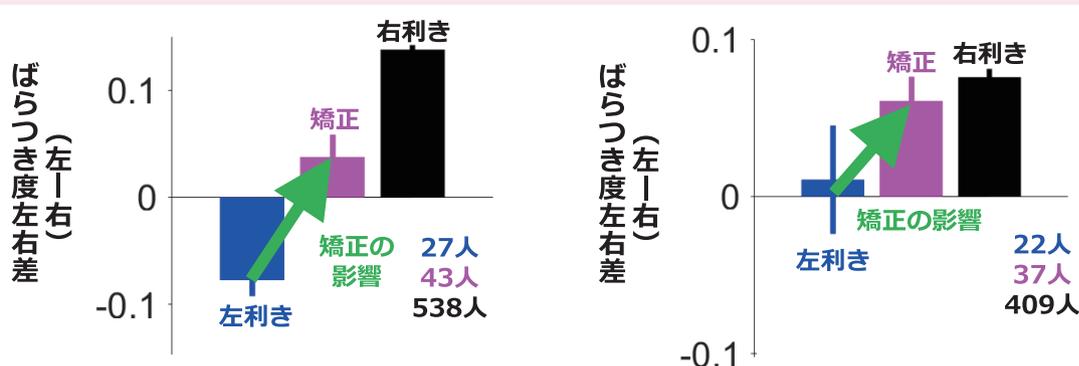
#### ■研究で苦労された点や今後の課題点を教えてください。

私の研究は、従来の脳科学の教科書に掲載されている理論とは

異なる「脳の運動指令のタイミングが乱れる」という新しい仮説に基づくものです。そのため、周囲からの理解や協力を得るのに苦心しています。ただ、この仮説のおかげでこれまでにない発見も次々と生まれており、その影響で研究の可能性も広がり、脳の運動制御の理解がますます深まっています。現在開発中の遠隔操作式のロボットアームも、脳の運動制御を深く理解することから生まれた技術です。このロボットアームに関する私の研究は、ロボットのハードウェアではなく、動作プログラム(アルゴリズム)に関するものになります。この技術は従来のシステムでは難しかった、「高い追従性と、自然な動作の柔らかさ」を兼ね備えた画期的なものであり、遠隔医療や介護の未来を切り拓く可能性を秘めたものです。

従来法(Tele-impedance法)のロボット操作では、通信を介さない状態であれば人間の動作を正確にトレースして動くことができますが、遠隔操作で通信を介する状態では通信遅延が発生し、動作の追従精度と動きの柔らかさを両立することができません。動作精度を追求すると柔らかさが失われ、柔らかさを求めると精度が落ちてしまいます。そこで、私が開発した動作プログラム「運動意図伝送法」では、操作者の現在の動きから運動意図を推測し、その推測に基づいて遠隔操作ロボットを動かすことで、精度と柔らかさを両立することが可能になります<sup>(3)</sup>(図4)。ただ、この「高追従低剛性制御」の遠隔操作ロボットの能力でも、私としては十分ではありません。今後の課題として、「触覚」フィードバックの実現が残されており、現在研究を進捗中です。

また、実用化の観点においては、さらなる課題も抱えています。現状では送信側のアームと受信側のアームの大きさなどが同型であることが必須です。例えば、各医療現場や介護施設などで使用



元々左利きで右手を使うように矯正された人は、左手と右手両方ともばらつき度が少ない

図3 右利き、左利き、左利きで右手を使うように矯正した人のばらつき度の比較



される設備が、同型・同一機種でない場合は対応が難しいということ。同一規格の同一機種を各地に敷設するというのは現実的ではありませんから、これは実用化にあたって機械が小型化することなども念頭に置くと、さらに実証実験で検証しクリアしなければならぬ大きな課題です。

このように私の研究は、発展例としてさまざまな展開や可能性があるため、限られた時間内でどの部分に焦点を当てるべきか、今後の進め方を検討していく必要があるかという点も、今後の課題の1つといえます。幸い私は大学の助教としての経験もありますから、将来は有望な後進社員を育て、すべての発展例や可能性をグループとして実現していくという方向性も考えています。

### 医療や介護への貢献と品質の向上で未来を切り拓く

#### ■今後の研究の展望やNTT事業とのかかわりについて教えてください。

私の専門は、脳の運動制御理解という基礎研究になりますが、社会応用という観点から大きく2つの実用化を目標にしています。1つは前述した「手足の器用さを計測するスマートフォンアプリ」です。こちらは、他社リハビリ施設との共同実験が進行中であり、2025年度内には何らかの成果を生み出す見込みです。例えば、リハビリの業界で一般的に用いられてきた医療指標と、本アプリで計測する手足の器用さとの相関解析などは、興味深い結果になると思われます。一方、患者さんにとってもっとも重要な側面は、リハビリによる機能回復です。これは年単位での経過を観察する

必要があるため、長い期間での継続的な取り組みが必要になるでしょう。

もう1つの目標は、新しい遠隔操作ロボット技術の実用化です。人の動作や運動の意図を推測して、高い追従性と自然な動きの柔らかさを両立させ、この2つの性質を兼ね備えたロボットの動作プログラムが実用化されれば、遠隔医療や遠隔リハビリ、介護などの発展に大きく寄与する可能性があります。例えば、事故などで時間を争うような緊急かつ専門的な手術が必要な場合、これまではヘリコプターで緊急搬送などの手段が高じられてきましたが、医療設備とこのロボットアームの設備さえあれば、事故現場近くの医院でも高度な専門医の施術が受けられるようになるはず。これは1分1秒を争うような場合には大変な利点となる医療技術です。また、限定的な使用法になると思いますが、原子力発電所の中核施設や宇宙空間での船外活動などといった、人が立ち入ることのできない危険環境での作業でも活躍が期待できます。

現在、私が開発している遠隔操作ロボットにおいては、低遅延で安定した通信を実現するNTTのIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想の基盤は極めて重要な要素となります。送信側と受信側の距離が離れていれば、通信の遅延が起こるのは当然のこと、その遅延が数10ミリ毎秒のレベルで安定していることが、遠隔操作においては不可欠となります。この値が変動すると、それだけでロボットの動きがごちゃごちゃになってしまう、変動する通信遅延に対応して新たなプログラムが必要になるので動作プログラム自体に余計な負荷がかかります。IOWNによって安定した低遅延通信が確立され、最小限のプログラムで安定して動作するようになれば、遠隔操作技術の応用範

#### 従来法 (Tele-impedance法)

送信側との遅れが明白に分かる



若干の追従の遅延が発生し、動きも少し硬い

#### 運動意図伝送法

ほぼ正確に追従している



高い追従精度と動きの柔らかさを両立

(剛性50N/m)

図4 ロボットアームの動きの比較

囲は飛躍的に広がってその能力を最大限に発揮できるようになります。

### ■入社された経緯や所属されているNTTコミュニケーション科学基礎研究所について教えてください。

私がインペリアル・カレッジ・ロンドン在学中に、NTTの上席特別研究員の方がロンドンの研究室に訪れたことがありました。当時、私は「人と人の触覚ベースの相互作用のメカニズム」について研究していたのですが、その方の研究内容との共通点があったため結構深い議論になり、そのときにNTTの基礎研究の内容について初めて詳細を知ったのです。

私は2016年に博士号を取って大学を卒業してから、翌年2017年には帰国して東京工業大学（現・東京科学大学）の特任助教として勤め始めました。学会などでも、また別のNTTのフェローや研究員の方にお会いして懇意にさせていただくようになり、NTTコミュニケーション科学基礎研究所の環境の素晴らしさを教えていただきました。その方々の薦めもあって、2020年にNTTに入社しました。今になって振り返れば、こうしたNTTの研究者の方々にお会いしたことが私の人生の大きな分岐点になったのではと感じています。

現在、私が所属するNTTコミュニケーション科学基礎研究所は「人にやさしいヒューマノイドコンピュータをめざして、人間の知識や感性に関する情報処理やメディア処理など情報通信に関する新しい知見や概念の創出をめざす」という理念のもと、さまざまな基礎研究に勤しんでいます。あらゆる角度から未知の知見を掘り起こし、それによって新たな未来の可能性を切り拓くことを目標にしています。自由な発想が何よりも重視される環境で、幅広いジャンルの基礎研究者が多数在籍しています。現在の私は、リモート勤務を中心としながら、他社・大学・リハビリ施設などに頻りに足を運び、多用なデータ計測に汗を流しています。研究テーマの選定や働き方を含めて、本当に自由な研究環境で私自身ものびのびと研究ができ、個性あふれる素晴らしい研究者たちと共に働けることを大変楽しく感じています。

### ■研究者・学生・ビジネスパートナーの方々に向けメッセージをお願いします。

研究のアイデアは、多くの場合「自由な発想」から生まれます。私の場合、趣味であるテレビ番組や読書から思いがけないヒントを得ることもあります。常にアンテナを張り、新しい視点で問題をとらえ直し、アイデアを生み出せるよう心掛けています。

また、多種多様な方々とのコミュニケーションの中で生まれてくるアイデアもあります。違う業種の方々と話すことで、同じアイデアでも異なるアプローチがあったりします。私のスマートフォ

ンアプリでも、医療やリハビリだけでなく、そういったコミュニケーションの中からトップアスリートのフォームの改善や安定化の指標として使用するなどのアイデアが生まれたりもしました。

最後に、これから研究職に就きたいと考えている学生諸君に伝えたいことは、英語がとても大事だということです。英語は研究発表や国際会議、論文読解に欠かせません。翻訳だけではなく、議論やプレゼンテーション、メールといった実践的なコミュニケーション力を身につけることも重要です。文法が完璧でなくても構いませんから、自分の意図を相手に伝えることが最優先です。可能であれば海外に滞在し、現地で英語を使う経験を積むことをお勧めします。私もその経験のおかげで、海外の研究者との共同研究をスムーズに進めることができましたし、これまで国内外の大学や企業と連携して単独では成し得なかった成果を積み重ねることができました。今後も多様なパートナーと協力し、実社会で役立つ研究を推進したいと考えています。

### ■参考文献

- (1) A. Takagi and H. Gomi: "A model of motor timing volatility and its effect on force variability," IJCNN 2024, pp. 1-5, Yokohama, Japan, June-July 2024.
- (2) A. Takagi, N. Tabuchi, W. Ishido, C. Kamimukai, and H. Gomi: "A novel assessment reveals motor variability as a sensitive marker of neurological development, decline and plasticity," IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, Vol. 33, pp. 2597-2605, 2025.
- (3) A. Takagi, Y. Li, and E. Burdet: "Flexible assimilation of human's target for versatile human-robot physical interaction," IEEE Transactions on Haptics, Vol.14, No.2, pp.421-431, 2020.



(今回はリモートにてインタビューを実施しました)



## 株式会社NTTアーバンソリューションズ総合研究所

<https://www.ntt-us.com/usri/>



### 想いをかさねて未来をひらく。地域想合研究所

近年、地球規模の気候変動による災害の激甚化や、日本における人口減少と少子高齢化の進行は、深刻さを増し、都市や地域のさまざまな領域に重大な影響を及ぼしています。一方で、AI（人工知能）やICTの急速な進化に伴い、既存の産業構造の転換は加速し、社会に大きな変革をもたらされています。かつて経験したことのない背景の中で、まちが抱える課題は一層多様化・複合化しています。そうした一方で、地域の特徴や個性を活かした持続可能な基盤づくりや、未来に向けた価値創出の取り組みによって、まちの更新や再生を通じて課題を解決していこうという機運が、ますます高まっています。今回、こうした認識のもと、街づくりのシンクタンクとして、「人が主役の街づくり」をめざすNTTアーバンソリューションズ総合研究所 阿部 聡社長に、事業運営の方向性や最新の取り組みについて伺いました。



NTTアーバンソリューションズ総合研究所  
阿部 聡社長

まちにかかわる人々が心地良く愛着を持って過ごせる「人が主役の街づくり」をめざして

#### ■設立の背景と会社の概要について教えてください。

2019年、NTTグループが持つICT、不動産、エネルギー、環境技術などの幅広いリソースを最大限に活用し、地域の皆様とともに個性豊かで活力のある街づくりをめざし、NTTアーバンソリューションズ（US）が設立されました。2年後の2021年、NTTアーバンソリューションズ総合研究所（US総研）は、多様化、複雑化する地域課題への迅速な対応と、US街づくり推進体制の強化を目的に、街づくりのシンクタンク機能を担う会社として設立されました。これまで、地域特性の分析や都市デザイン、コミュニティ形成などの知見を蓄積しながら、地域の皆様の想いをもとにしたまちのビジョン、コンセプトづくりや、地域の課題解決のお手伝いなど、全国各地でさまざまなコンサルティング活動を行ってきました（図1）。

私たちは、そのまちならではの魅力を大切に考え、まちに暮らす人やかわる人々が、心地良く愛着を持って過ごすことができる、「人が主役の街づくり」をめざす姿とし、取り組んでいます。地域の皆様の「まちと向き合う目線」をしっかりとらえたうえで、US総研ならではの幅広い情報収集力と本質を見定める分析力、自由で豊かな発想力で、ステークホルダーの皆様のさまざまな想いを重ねて具現化する街づくりを、サポートしていきたいと考えています。

設立5年目を迎えましたが、次のステップでは、「街づくりのことならUS総研に相談してみよう」と言ってもらえるような

会社に成長したいと考えています。そのために、街づくりにおけるテーマごとの知見・実績を深化・拡大していくことや、オウンドメディアを通じた情報発信にも力を入れ、取り組んでいます。現在、「賑わいの創出」「地域再生・観光」「防災・減災」「脱炭素・生物多様性」を主要なテーマとし、当社らしい強みを創り出すべく、鋭意活動しています。

その中で、情報発信にも力を入れており、現在3つのオウンドメディアを運営しています。1番目は、地域の「想い」にもっと耳を澄ませ、街づくりの「今」を考えていくWebメディア「地域想合研究室.note」です。2番目は、地域の文化や歴史、風土、環境などを背景に、街づくりを牽引する人物にスポットを当て、「足

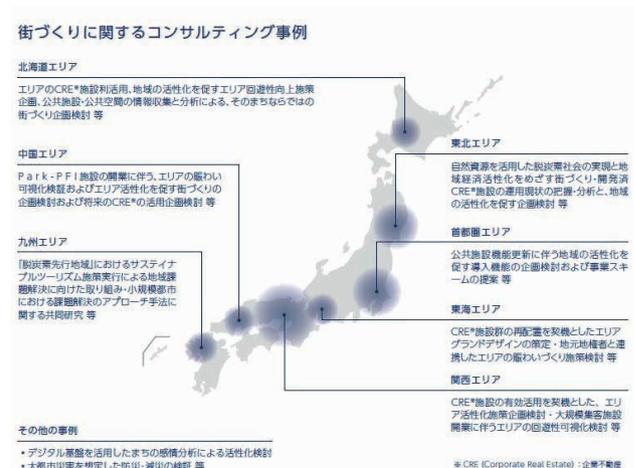


図1 US総研のコンサルティング事例



図2 運営しているオウンドメディア

で稼ぐ徹底した取材」によって、街の個性を織りなす人々の想いと取り組みを探り紹介する冊子「まち織人」です。3番目は、街づくりに対する多様な視点や考え方をリサーチし、独自の視点で取り纏め提言する「US総研レポート」となります。ぜひ皆様にご高覧いただけると幸いです（図2）。

当社は、多種多様な専門分野をバックグラウンドに持つ社員がチームとなり、街づくりのコンサルやリサーチに取り組むことから、日頃の社内コミュニケーションを大事にしています。季節の節目等で仕事を離れた懇親の機会を設ける一方で、日頃の活動成果を称え合い、社員のさらなるチャレンジへつなげる営みとして、今年度は社内表彰を制度化し開始しました。会社の成長に向けて果敢に取り組んでくれた社員の成果は、オフィスで見える化し、再生木材を利用した打合せ室のルーバーに表彰者名をレーザー刻印して残していくことにしました。社員の取り組みが目に見えるかたちで毎年増えていくのが楽しみです（図3）。

## NTTグループ内外の企業や大学とのコラボレーションを通じて新たな領域を開拓

### ■新しい事業展開やサービスについて教えていただけますでしょうか。

最近の特徴的な取り組みでは、株式会社JTB総合研究所（JTB総研）との協業スタートがあります。US総研が持つICT、不動産、エネルギー、環境技術などの知見に基づく街づくりにかかわる専門領域と、JTB総研の持つ観光産業の社会トレンドや生活者行動など観光にかかわる専門領域を掛け合わせ、共同で研究する「観光まちづくり共創ラボ」（共創ラボ）を始動しました（図4）。昨今、地方都市では、大都市圏への人口流出、中心市街地の空洞化、そ



図3 オフィス設置のルーバーへの刻印模様

して山間部の過疎化が進行し、地域経済や生活環境に深刻な影響を及ぼしています。一方、大都市や人気の観光地では、訪日旅行者の増加によるオーバーツーリズムが原因で、交通渋滞や住環境の悪化、観光体験の質の低下など住民や観光客に悪影響を及ぼしています。

こうした社会動向を背景に、この共創ラボを通じ、全国の自治体、観光関連事業者をはじめとした地域のステークホルダーの皆様が抱える諸課題を、「観光まちづくり」の側面から解決しているというもので、将来ビジョンの策定、観光資源の企画・提案など、地域活性化の実現に向けた支援の取り組みを開始しました。両社の連携の公表は、経済・ビジネス分野の一般メディアのほか、観光関連や不動産・建築関連のメディアからも注目され、またその後、「観光まちづくり」にかかわる中央省庁や地方自治体、JTB・NTT両グループなどからの問合せが相次ぎ、具体的なご相談を始めているところです。

この「観光まちづくり」については、会社設立後、比較的早期から取り組んできました。3年ほど前に、US総研の調査・分析・研究にJTB総研が協力するかたちで、北陸3県での分散型ホテルの調査分析に着手し、さらに福井県のある町における歴史的資源を活用した高付加価値宿泊機能、分散型ホテルのあり方などをリサーチしました。またほかにも、長崎県では、サステナブルツーリズムや持続可能な街づくりをテーマとした取り組みを進め、某県庁所在地では観光ポテンシャルの評価と街づくりの課題整理、岩手県の某町では地域資源である木材を起点とした廃校の利活用など、特定の地域やまちに対してリサーチとコンサルティングを実施してきました。最近では、港を核とした街づくり「みなとオアシス」の促進を目的に、その中核拠点となる客船ターミナル施設のレビューのテキスト情報を対象として、試行的なデータ分析を実施しました。客船ターミナル施設の魅力や課題を読み解き、観光と不動産、建築の観点で、地域住民の交流や観光の振興を通じた、地域活性化に資する「観光まちづくり」への知見として論文にまとめ、公表しました<sup>(1)</sup>。

ほかに最近のタイムリーな活動としては、桜美林大学 ビジネスマネジメント学群との大阪・関西万博のNTTパビリオンにおける共同研究が挙げられます。もともと、当社はUSグループで開発を進めている原宿エリアでの人流分析などから、まちの評価に取り組んでいましたが、同じ原宿で、カメラによるデータを取得し研究を実施していた桜美林大学と意見交換をしている中で、共同の検討体制を構築してきました。

今回は、大阪・関西万博のNTTパビリオン敷地内のスペースで、

共創ラボの研究などの成果や知見に基づき、  
2社それぞれの専門分野からアプローチし、観光まちづくりを支援・価値提供

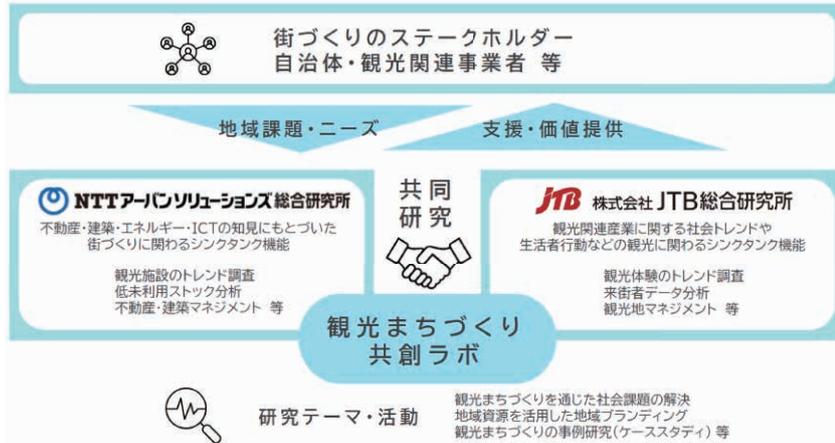


図4 共創ラボにおける価値提供イメージと活動模様

AIカメラを用いて来訪者の顔の表情を含むデータを数値化し、解析します。その数値は「笑顔度」として分析評価し、さらに滞在時間データなどとも組み合わせ、人の流れと属性（年齢、性別）等の関連性を研究します。将来的には、人々の笑顔を、まちや空間の魅力を測る有効な評価手法として確立し、街づくりへの活用をめざしています。

この研究では、NTTパピリオン建築のコンセプトの1つである、来訪者の感情に訴える仕掛けへの反応を、AIカメラによる自動計測を行うとともに統計的に分析し、設計の意図がどう実現されているかも含め、特徴的な空間に対する来訪者の印象を数値化し、場の状況把握や評価につなげようという、意欲的な試みとして取り組んでいます。

■今後の展望についてお聞かせください。

今回は、私たちの活動の一端を紹介しました。私たちは、新たな価値創造と地球のサステナビリティのために挑戦を掲げるNTTグループの一翼を担うUSグループの一員として、これからも、より希望が膨らむ未来の街づくりに向け、まちや地域が抱えるさまざまな課題解決を、まちの皆様が目線からお手伝いし、社会に貢献して参りたいと考えています。

その中で、当社の活動の源泉は、各領域の専門家である社員です。対外的なコンサルの経験をさらに蓄積し、学会等の機会でも、インパクトのある研究成果を発信し、当社ならではの提言・活動を、これからも高めていきたいと思っています。NTTグループはもちろん、グループ外でも私たちのことを広く知っていただきながら、信頼され、選んでいただける会社として成長していきたいと考えています。

■参考文献

- (1) 公益社団法人日本都市計画学会：都市計画報告集，24巻2号，2025年9月。

担当者に聞く

共創ラボでは地域の声に耳を傾け共に未来像を創り上げていく



街づくりリサーチ部  
担当課長

坂巻 哲 さん

街づくりデザイン部  
担当課長代理

竹下 圭悟 さん



■日々担当されている業務と取り組む姿勢についてお聞かせください。

現在、私たちは「観光まちづくり共創ラボ」にかかわる業務を担当しています。ここでは、US総研の持つ都市・不動産・ICTの知見と、JTB総研の観光データとを組み合わせ、地域の実情に即した分析を実施しています。この取り組みでは客観的なデータだけではなく、現地の視察や地元住民等の対話を通じた生の声も重視していくことを常に心掛けています。特に「観光まちづくり」は、不動産・建築、防災、交通、環境など多分野にまたがっているため、地元の各部門との横断的な連携が不可欠です。現地では自治体や観光事業者、地域住民など、多様なステークホルダーと対話を重ね、異なる立場の声を丁寧に拾い上げる必要があるため、対話の場においては「共通言語」を意識し、専門用語をかみ砕いて伝える工夫をしています。とはいえ、地域によって観光への期待や課題は必ずしも同一ではないため、画一的なアプローチでは通用し

ないケースがよくあります。その課題には、地域の人々を「対象」としてではなく「主体」としてとらえ、共に考え、共に動き、共に創るスタンスで取り組んでいくことが大切だと思います。私たちは今後も地域の皆様との一体感を大切に、観光振興はもちろん、防災、環境、暮らしなど多面的な視点を取り入れた街づくりモデルを基に、地域の未来像を提案していきます。

#### ■今後の展望について教えてください。

シンクタンクが連携した「観光まちづくり共創ラボ」では、研究活動を通じて、地域の観光ポテンシャル、観光ビジョン（ソフト）および観光インフラ（ハード）に立脚し、US総研は観光施設のトレンド調査や低・未利用ストック分析など「街づくり」の領域から、JTB総研は観光体験のトレンド調査や来街者データ分析など「観光」の領域から、2社が得意とするそれぞれの専門分野からアプローチし、「観光まちづくり」の取り組みを支援します。

### 原宿の商業施設周辺での人流分析を将来の街づくりへとつなげていく

街づくりデザイン部

竹中 俊平 さん



#### ■日々担当されている業務と取り組む姿勢についてお聞かせください。

NTT都市開発が開発した商業施設、WITH原宿（2020年開業）や原宿クエスト（2025年秋開業）には、周辺の大通りからの回遊

を促す導線が設置されています。私たちはこれが効果的に機能しているかを分析し、これら施設がまちへ与える影響を計測しようとしています。また、グループ企業を含む関係者へこの成果を共有し、まち全体を巻き込んだ施策へと展開できないか検討を継続しています。その中で、GPSデータを使用した分析では、コロナ禍とそれ以降でのデータ量の差から、分析そのものが難しい時期がありました。また、周辺の地権者様へ直接ご挨拶しながら、分析用のビーコンを原宿エリアに20個以上設置していますが、プロジェクトの初期では、調査の目的をお伝えし理解いただくことに苦労しました。しかしながら、設置以降、コミュニケーションを継続してきたこともあり、成果報告の際にさまざまな示唆をいただきましたし、調査の中で桜美林大学との接点も生まれ、今回の万博における実証でもご一緒するなどの成果が生まれています。来年以降、施設の開業でまちへの人の流れに変化が生まれたのか、周辺商業施設のテナントの構成などに影響を与えたのかなど、可能な限り可視化し、今後の街づくりへ活かせる成果へつなげたいと考えています。

#### ■今後の展望について教えてください。

人流変化の可視化を通じた効果の検証だけでなく、自分たちがアクションをうち、人の流れをデザインできるようにすることが最終的な目標と考えています。まちのハードを大きく変更せずにエリア間をまたぐイベントや広告・宣伝等のソフト施策によるアプローチから、まち全体で回遊を促し、街全体の価値を高めることのできる、NTTグループならではの街づくりをステークホルダーの皆様と進めていきたいと思っています。

## NTTアーバンソリューションズ総合研究所 ア・ラ・バ・ル・ト

### ■社員によるDIYでオフィスをリニューアル

昨年度、「ふらっと・コミュニティベース」をコンセプトに、一級建築士資格を持つ社員が中心となりオフィスをリニューアルしたとのことです。「ふらっと立ち寄れる社員間のタッチポイントを散りばめ、フラットなコミュニケーションを促す」ことで、机上検討が多くながりがちなコンサルティング事業に対し、リアルな場所・空間・体験を通じたUS総研の「VISION・MISSION」の実践をめざしています。今回のリニューアルに伴い、面積が旧オフィスから60%減少しましたが、フレキシブルな利用に対応する空間の構築、一部仕子の廃止など、レイアウトの工夫や必要機能の取捨選択を行うことで、ワークエリアのデスクは旧オフィスと同じ寸法を採用し、業務の快適性を確保できました。また、フローリングやルーバーには、業務上連携のある地方の林業会社から直接仕入れ、商品価値の低い小径木や通常は破棄されてしまう選別外木材を活用することで、自社オフィスのリニューアルを通して地域産業が抱える課題解決をめざしました。さらに、老朽化した仕子に対し、社員によるDIYでアップサイクルに取り組み、テーブルには塗装・天板交換を、本棚には収納機能付加などの工夫を施し、持続的に活用する試みを行うことで（写真）、社員参加型の愛着を持てる・環境負荷の低いオフィスの構築をめざしました。今年7月にはオフィス移転から1年の節目でアンケートを実施しました。その結果も踏まえ、さらなるコミュニケーション活性化・コラボレーション効果最大化に向けて各種機能の改善に取り組んでみたいとのことです。

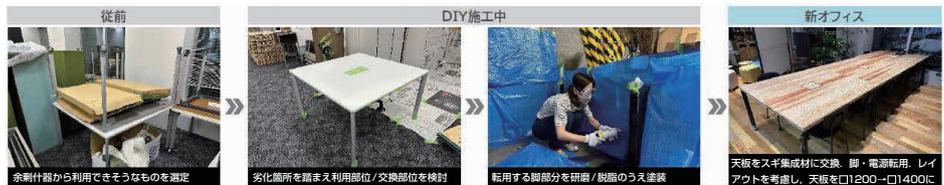


写真 余剰の会議用テーブルを社員によるDIYでアップサイクル

# web3データの特徴をとらえた レコメンドエンジンの開発

近年、ブロックチェーンが普及し始め、Bitcoinなどの暗号資産や、NFT (Non-Fungible Token) といったトークンの売買が盛んになっています。さまざまなトークンが爆発的に増える中、ユーザは自分の欲しいトークンを推薦され、探しやすくなることを望んでいます。また、web3の世界では、ブロックチェーンに書き込まれた情報に誰でもアクセスできるため、全マーケットの取引履歴を基にしたレコメンドエンジンの構築が可能となります。そこでNTTドコモは、世界に先駆けて、複数のマーケットに対応できるNFTレコメンドエンジンを開発しました。

## はじめに

近年、web3<sup>1</sup>技術の進展とともに、トークンを利用した新たな経済圏が形成されつつあります。その中でも、NFT (Non-Fungible Token)<sup>2</sup>は特に注目を集めているトークンであり、その取引量も急激に増加しています。NFTは、デジタルアート、音楽、ゲームアイテムなど、さまざまな範囲での応用が進み、NTTドコモでも、「MetaMe NFTマーケット」などのマーケットプレイスを次々と立ち上げています<sup>(1)</sup>が、この急激なweb3市場の成長の中で2つの課題が生じています。

第1は、膨大なコンテンツの中から本当に欲しいものにユーザがたどり着くことが困難であるという課題です。Web2.0<sup>3</sup>と同様、web3市場にも多様なプラットフォームとNFTなどの無数のアイテムが存在するため、人気のあるアイテムばかりが注目され、その背後にあるもっともそのユーザに適した選択肢を当該ユーザが発見することができずに、購買行動を終えることがしばしば起こり得ます。

第2は、web3技術の特性上、従来のWeb2.0におけるレコメンドエンジンがそのままweb3市場に適用できないという課題です。Web2.0におけるレコメンドエンジンは中央集権的に情報収集を行うことを前提としていますが、web3では非中央集権的にデータが管理されており、ユーザの取引データの収集方法やその記録内容が複雑なため、web3データの特徴をよく理解したうえでレコメンドの手法を適用していく必要があります。

NTTドコモでは、web3データの抽出、独自の加工処理、そして、グラフニューラルネットワーク (GNN : Graph Neural Network)<sup>4 (2)</sup>技術の活用により、web3データを扱い、高い精度でレコメンドが実現可能なエンジンを開発しました。本稿では、このweb3技術を活用したNFTレコメンドエンジンの設計と実装について解説します。

## 関連研究

NTTドコモでは、NFTをレコメンドするための技術として、さまざまなレコメンドのタスクで成果を挙げているGNNを採用しました。ここでは、レコメンドにおいて、GNNがなぜ有効な

のか、また、NFTとGNNの関係性や親和性についても解説します。

### ■GNNとレコメンド

GNNは、グラフ構造データの学習に特化したディープラーニングモデルであり、ノード間の関係性やグラフ全体の構造を効果的にとらえることができる手法です。特に、ノード分類やリンク予測、グラフ分類など、多様なタスクにおいて高い性能を示しています。

GNNをアイテムのレコメンドに応用した例として、JODIE (Joint Dynamic Item Embedding) が提案されています<sup>(3)</sup>。JODIEは、ユーザとアイテムの動的埋込みを学習し、時間的相互作用のシーケンスから未来の埋込みを予測することに特化しています。

従来の動的埋込み手法は、ユーザの行動に基づいて埋込みを生成するものの、アイテムの現在の状態を考慮せず、ユーザの埋込みのみを動的に更新するという問題がありました。これに対し、JODIEは2つのリカレントニューラルネットワーク (RNN : Recurrent Neural Network)<sup>5</sup>を用いて、ユーザとアイテムの埋込みを相互に更新することで、両者の依存関係を明示的にモデル化しています。

具体的には、JODIEではユーザの埋込みを更新する際に、相互作用したアイテムの埋込みを利用し、反対にアイテムの埋込みもユーザの埋込みを基に更新します。このアプローチにより、従来の手法が抱えていた「アイテムの状態を無視する」という問題に対応し、より正確な埋込みを生成することを可能にしています。

また実験結果において、JODIEではMRR (Mean Reciprocal

- \*1 web3 : Web1.0, Web2.0<sup>3</sup>に続く「第3世代」としてその名が付けられた、ブロックチェーン技術を活用した分散型のネットワークのこと。
- \*2 NFT : ブロックチェーン技術などを活用しその唯一性が担保される代替不可能なトークンのこと。
- \*3 Web2.0 : 従来の情報を共有するだけの時代 (Web1.0) と異なり、SNSなどをはじめとする動的で情報の流れが双方向な現代のWebのこと。
- \*4 グラフニューラルネットワーク : ネットワーク理論を基にした機械学習の一種で、グラフ構造を扱うために設計されたニューラルネットワークのこと。ソーシャルネットワーク分析、化学分子の予測、推薦システムなど多くの応用分野で成功を収めており、グラフデータの複雑な関係をモデル化するための強力なアルゴリズムです。
- \*5 リカレントニューラルネットワーク : 時系列的なデータを用いて将来のデータの予測を行うディープラーニングモデルの1つ。

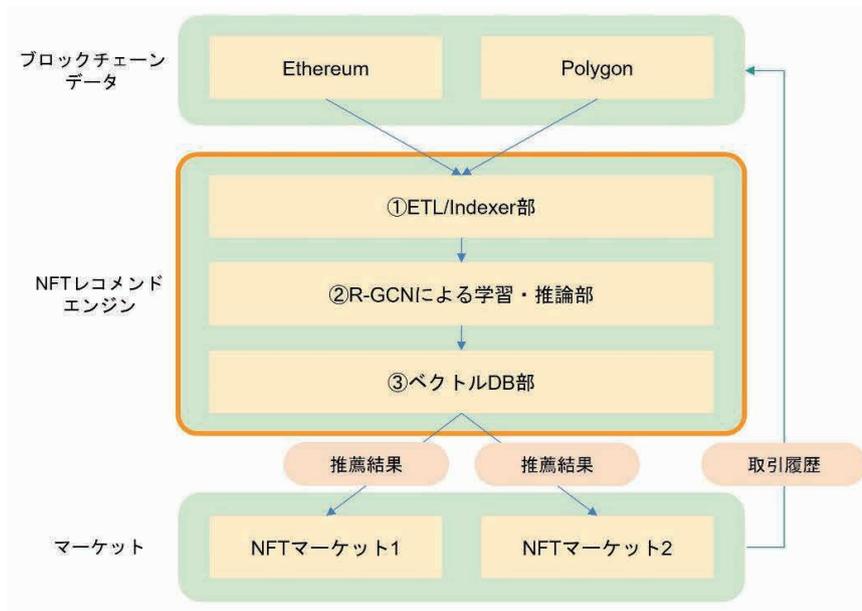


図 NFTレコメンドエンジンの概要図

Rank)<sup>\*6</sup>やRecall@10<sup>\*7</sup>の指標で、従来手法に対して20%以上の改善を達成しており、その有効性が示されています。

このように、GNNをアイテムのレコメンドに応用することで、その高精度化が期待されます。

### ■ GNNを用いたweb3データの表現

NFT取引のレコメンドにおいてもグラフ表現は有効です。

NFT取引では、NFTやWallet間でさまざまなスマートコントラクト<sup>\*8</sup>が実行され、トランザクション<sup>\*9</sup>履歴としてブロックチェーンに記録されます。スマートコントラクトには、ERC (Ethereum Request for Comments)<sup>\*10</sup>1155<sup>(4)</sup>の場合、データのNFT化に使われるMint<sup>\*11</sup>やNFTの権利移譲・購買に使われるTransferAll<sup>\*12</sup>などがあります。

NFT・Walletをノードとし、トランザクション関係をエッジとすることで、NFT取引をグラフとして表現することができます。ここで、ノードが複数種類（NFTとWallet）、エッジも複数種類（MintやTransferAllなど）有するグラフを異種グラフと呼びます。

実際に、web3の分野でもGNNが使われています。NFT取引においては、フィッシング詐欺などの不正取引への対策がweb3の重要な課題となっており、参考文献(5)の研究においても、暗号通貨における不正取引を検出するための技術として、ノードの種類や関係性を考慮したGNNを採用しています。さらにこの研究では、いくつかのGNN手法を比較した結果、R-GCN (Relational Graph Convolutional Network) がもっとも精度が高かったと報告しています。R-GCNは上記の異種グラフを扱えるGNN手法で、GCNを複数種類のノードおよびそれによる複数種類のエッジに対応するように拡張したものです。本研究は、NTTドコモの

取り組みとはタスクが異なりますが、NFT取引を捕捉するという意味では親和性があると考え、レコメンドエンジンの開発にあたって、研究報告においてもっとも精度の高かったR-GCNを採用しました。

### 提案手法

NTTドコモでは、NFTレコメンドエンジンとして以下の3つの機能を実装し、ブロックチェーンデータの取得から必要なデータの抽出、レコメンドリストの計算、リストのマーケットへの出力までを実現しました（図）。

- ① ETL (Extract, Transform, Load)<sup>\*13</sup>/Indexer部
- ② R-GCNによる学習・推論部
- ③ ベクトルDB部

以降では、各部の機能について解説します。

- \*6 MRR：各クエリに対し、最上位の正解アイテムの順位の逆数を求め、全クエリで平均した評価指標。
- \*7 Recall@10：正解アイテムのうち、推薦結果の上位10件に含まれる割合を示す評価指標。
- \*8 スマートコントラクト：条件が満たされると契約の履行が自動実行されるブロックチェーン上のプログラム。
- \*9 トランザクション：ブロックチェーン上で記録・承認される資産移動や契約実行などの取引情報の単位。
- \*10 ERC：トークンの仕様や動作が定義されたEthereumにおける標準規格。
- \*11 Mint：NFTや新しいトークンをブロックチェーン上に発行する処理。
- \*12 TransferAll：保有するすべてのトークンを特定のアカウントに一括送信する処理。
- \*13 ETL：データを収集し、必要なデータを編集したうえで、情報を格納する一連の処理。

## ■ETL/Indexer部

ETL/Indexer部では、レコメンドのために必要になるデータの収集や変換、加工を行います。現在のレコメンドエンジンは、EthereumとPolygonを対象のブロックチェーンとしています。

EthereumはNFTを使用する際に、標準的に利用されているブロックチェーンです。仕組みとしてスマートコントラクトを持つことが特徴であり、これを利用してNFTの所有などの契約状態をブロックチェーンに記録しています。Polygonは、Ethereumと互換性を持つブロックチェーンであり、Ethereumをスケールさせる目的で開発されています。

ブロックチェーン上のデータは、NFTの情報などを基にした検索が不可能であるために、レコメンドエンジン上でデータの収集をまず行う必要があります。このため、ETL/Indexer部はブロックチェーンのノードに接続し、トランザクションの情報を収集します。トランザクションのデータは、そのままでは利用できないため、変換が必要です。一般的にはERC721<sup>(6)</sup>、ERC1155などの一定の規格に従って記録がなされているため、それらに従って変換を行い、所有者や移転者、NFT自体の情報を抽出します。これらをデータベース（DB）上に記録をすることで、R-GCNの学習に必要なデータをそろえることができます。また、ETL/Indexer部では、規格が増えた場合にはそれに対応可能なように、拡張可能性をもたせた実装を行っています。

## ■R-GCNによる学習・推論部

学習・推論部では、ETL/Indexer部で収集・変換されたNFTの購買データを用いてグラフ構築を行いました。グラフ構成としてはNFTとWalletの2種類のノードを用意し、NFTの購買（Transfer）があったWalletにエッジを定義しました。ここで、Walletにはユーザが紐付いています。このように複数種類のノード種別を含む異種グラフに対応するGNNとして、NTTドコモではR-GCNを利用しました。

学習にあたり、ノードごとに特徴量を設定します。設定には、ランダムなベクトルを設定する方法と、それぞれのノードを特徴付けるベクトルを設定する方法の2パターンがあります。今回は簡易に実装を進めるため、前者の方法を用いています。一方、後者の方法では、例えばNFT自体のメタデータやWalletの利用傾向などの特徴量を取り入れることにより、さらなる精度改善も見込めます。

R-GCNでは、上記で定義したNFT-Wallet間のグラフと各ノードの特徴量を用いてR-GCNへの入力とします。推論時には、NFTノードとWalletノード間で購買関係がありそうか否か（すなわち、エッジが定義できそうか否か）を予測します。このようにノード間のエッジの有無を推定するタスクはリンク予測と呼ばれ、GNNのレコメンド向けのタスクとして知られています。

各ノードの間のエッジ有無は、ノードそれぞれが持つベクトル

どうしの演算で定義されます。ここではDistmultと呼ばれる手法<sup>(7)</sup>を用いて0から1の間のスコアを算出し、より値が大きいものはエッジが定義できそうなものとしてWalletへのレコメンド対象のNFTとします。

R-GCNでは、各ノードの特徴量に対して、隣接するノードの特徴量を、エッジを通じて重み付け集約させることで、特徴量の更新を行います。

エッジがあるノードどうしのDistmultの結果が、エッジがないノードどうしの結果より大きい値になるように、重みの更新を実施し学習を行います。この処理は、グラフのサンプリングによって取得した部分グラフに対して繰り返されます。

この部分グラフで学習を行ったR-GCNモデルをグラフ全体に適用することで、学習・推論部はすべてのノードが更新された特徴量を得ます。このノード特徴量はグラフ構造を考慮したものになり、購買関係が発生しそうなWallet-NFTのペアはDistmultの結果の値も大きく、反対に購買関係が発生しなさそうなペアはDistmultの結果の値も小さくなります。実際のレコメンドにおいては、Walletごとに各NFTとのDistmultの出力値を計算することで、そのNFTを推薦すべきかを決定します。

## ■ベクトルDB部

ベクトルDB部では、R-GCNモデルを用いて学習・推論部で抽出したWalletとNFTそれぞれのベクトル情報をDBに格納します。レコメンドを実施する際には、この情報を基に、各Walletに対するレコメンドリストを計算します。具体的にはレコメンド対象となるWalletのベクトルと各NFTのベクトルとのDistmult値を計算し、その結果を降順にレコメンドリストとして出力します。

ここで、距離計算に際しては、近似最近傍探索という技術を用います。近似最近傍探索は、大量のデータから対象のベクトルに近いベクトルを効率的に見つける技術です。これを用いることで、すべてのWalletとNFTのDistmult値の計算を行わずとも、効率良くレコメンドすべきNFTのリストを抽出することができます。

NTTドコモでは、これらの技術の組合せにより、高い精度を保ちつつ、効率的にレコメンドを実現可能なエンジンを開発しました。

## 検証と結果

### ■オフライン検証と結果

#### (1) 概要

NTTドコモでは、実装したレコメンドエンジンの効果を検証するため、人気のFPS（First Person Shooting）<sup>14</sup>ゲーム「[Matr1x Fire]<sup>(8)</sup>」のゲームアイテムのNFTを用いてオフライン検証を実施

\*14 FPS：プレイヤ視点で銃火器を使用し戦闘を行うシューティングゲームの一種。

しました。具体的には、ERC721規格のトランザクション情報から、Transferが行われた際のログを収集しました。データセットとして約1カ月間のTransferログを使用し、前半3週間を訓練データ、最終週のデータをテストデータとしました。この訓練データを学習したレコメンドエンジンによってユーザが購入するであろうと推論されたアイテムと、テストデータにおいて実際に購入されたアイテムとの一致度を評価しました。これにより、実際のマーケット環境に近いかたちでの評価が可能となります。

評価指標として、ランキング評価に適したMAP (Mean Average Precision)<sup>\*15</sup>を採用しました。MAPは、レコメンドリストのうち、実際に選択(購入、クリックなど)されたアイテムが上位にあるほど高いスコアとなる指標であり、ユーザが上位のアイテムを優先的に閲覧する実際の行動パターンと整合性が高いため、本検証に採用されました。本稿では、実際にユーザがNFTを購入したことを示すスマートコントラクトであるTransferをした場合に、購入したとみなしMAPを算出しました。

比較対象として、訓練データ期間中の取引数に基づく人気ランキングを用意しました。人気ランキングは全ユーザに同じレコメンドリストを提供するのに対し、提案手法のGNNモデルに基づくレコメンドエンジンは、ユーザごとの過去の取引履歴から個別のレコメンドリストを生成し提供します。これら2つの手法を用いた際の結果を比較しました。

## (2) 結果

提案手法の有効性を検証するため、定量的評価と定性的評価を実施しました。

定量評価では、提案手法のMAPスコアは比較手法の人気ランキングに比べ、有意性のある13%の性能向上を達成しました。この結果は、GNNモデルがユーザの個別の嗜好を適切に学習できていることを示しています。

定性評価では、特定のユーザのレコメンド結果を分析しました。人気ランキングでは、同種のゲームアイテムが推薦されていたのに対し、提案手法に基づくレコメンドでは、ユーザの購入履歴に見られるさまざまなデザインや種類を反映した推薦を行えていることが確認されました。

これらの結果では、取引データを活用したNFTレコメンドエンジンの実現可能性が示されました。特に、GNNモデルによる取引ネットワークの学習が、個々のユーザの嗜好を反映した効果的な推薦を可能にすることが明らかになりました。

## ■オンライン検証と結果

また、実ユーザへのレコメンド効果を確認するため、音楽NFT

マーケット「Sound Desert」<sup>(9)</sup>においてオンライン検証を実施しました。具体的には、Sound DesertのNFT購入画面上に本技術で算出したNFTを表示させた場合と、Sound Desertの運営が設定した人気ランキングを表示した場合との効果の差を確認しました。検証の期間は1カ月間とし、ERC1155規格のトランザクション情報から、TransferSingle<sup>\*16</sup>が行われた際のログを収集し検証に用いました。検証における学習方法やアルゴリズムは前述したオフライン検証と同様です。評価指標としてはクリック率を使用しました。

検証結果としては、運営が設定した人気ランキングと比較して、レコメンドを表示した際のクリック率が3倍以上であったことを確認しました。この結果から、オフラインでの結果のみならず、実際のマーケット上においても本技術の有効性が示されました。

## おわりに

本稿では、GNNを応用したNFTレコメンド手法について解説しました。各検証では、比較手法と比べて精度向上が確認でき、本技術の有効性が示唆されました。

今後の展望として、多様なブロックチェーンやERC規格、またデータの大規模化などへ対応できるよう、本技術の改良を検討していく予定です。

## ■参考文献

- (1) <https://nft.metame.ne.jp/ja>
- (2) F. Scarselli, M. Gori, A. C. Tsoi, M. Hagenbuchner, and G. Monfardini: "The Graph Neural Network Model," IEEE Transactions on Neural Networks, Vol.20, No.1, pp.61-80, Jan. 2009.
- (3) S. Kumar, X. Zhang, and J. Leskovec: "Predicting Dynamic Embedding Trajectory in Temporal Interaction Networks," Proc. of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining, pp.1269-1278, July 2019.
- (4) <https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-1155>
- (5) H. Kanezashi, T. Suzumura, X. Liu, and T. Hirofuchi: "Ethereum Fraud Detection with Heterogeneous Graph Neural Networks," arXiv preprint arXiv:2203.12363, July 2022.
- (6) <https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-721>
- (7) B. Yang, W.-t. Yih, X. He, J. Gao, and L. Deng: "Embedding Entities and Relations for Learning and Inference in Knowledge Bases," arXiv preprint arXiv:1412.6575, Aug. 2015.
- (8) <https://fire.mtrix.io/>
- (9) <https://sound-desert.com>

## ◆問い合わせ先

NTTドコモ  
サービスインベーション部

\*15 MAP: 推薦結果の各クエリに対する平均適合率を算出し、全クエリで平均した評価指標。

\*16 TransferSingle: 1つのトークンを特定のアカウントに送信する処理。