

NTT 技術ジャーナル

ISSN 0915-2318 平成2年3月5日第三種郵便物認可
令和7年2月1日発行 毎月1回1日発行 第37巻第2号(通巻431号)

2 FEBRUARY
2025
Vol.37 No.2



特集

NTT R&D FORUM 2024—IOWN INTEGRAL (後編)

カーボンニュートラル実現への道

——再生可能エネルギー普及拡大に向けて

For the Future

観光地経営の現在地と観光DX—前編—

from NTTコムウェア

ICT機器の排出熱に基づくCO₂排出量算出AIモデルと今後の応用可能性



特集1

NTT R&D FORUM 2024 — IOWN INTEGRAL (後編)

- 4 Unlimited Innovation for a Global Sustainable Society by IOWN
川添 雄彦 NTT代表取締役副社長
- 8 技術セミナー：
次世代のAIについて
- 14 技術セミナー：
光電融合技術とスーパーコンピュータの未来



20 特集2

カーボンニュートラル実現への道 ——再生可能エネルギー普及拡大に向けて

- 22 エネルギー流通の革新 蓄電池を活用したアグリゲーションへの挑戦
- 27 エネルギーグリーン化のための新たな電力流通モデル
「Internet of Grid プラットフォーム」
- 31 NTTが創る水素パイプラインによる街区供給モデルの確立に向けた
取り組み



39 For the Future

観光地経営の現在地と観光DX —前編—

43 挑戦する研究者たち

中島 和秀

NTTアクセスサービスシステム研究所 上席特別研究員

既存光ファイバと同外径の4コア光ファイバの早期実用化と、
光給電技術の高度化に挑む



特集

47 挑戦する研究開発者たち

二渡 直樹

NTTファシリティーズ サービスイノベーション部
研究開発部門 環境ソリューション担当 主任研究員

時流を読み、現場を意識、本質を見極める力を持って
研究開発に取り組む



For the Future

特別企画

50 明日のトップランナー

横坂 拓巳

NTTコミュニケーション科学基礎研究所 特別研究員

誰でも触覚体験デザインの際に利用できる「マップ」や
「図鑑」をつくる



挑戦する研究者たち

54 from NTTコムウェア

ICT機器の排出熱に基づくCO₂排出量算出AIモデルと
今後の応用可能性

挑戦する研究開発者たち

58 Webサイト オリジナル記事の紹介

3月号予定
編集後記

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、ご要望、お問い合わせ先
日本電信電話株式会社 NTT技術ジャーナル事務局
E-mail journal@ml.ntt.com

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

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





Unlimited Innovation for a Global Sustainable Society by IOWN

NTT 代表取締役副社長

川添 雄彦 Katsuhiko Kawazoe



本記事は、2024年11月25～29日に開催された「NTT R&D FORUM 2024 - IOWN INTEGRAL」における、川添雄彦 NTT 代表取締役副社長のKEYNOTE SPEECHを基に構成したもので、持続可能な社会を実現に向けたIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) の世界規模の取り組みについて紹介します。

はじめに

本稿では、地球規模で持続可能な社会の実現に向けたIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) による新しい価値の創造について紹介します。

NTTグループは現在、全世界で900社以上、また30万人の従業員を擁するグローバルなICT企業で、45%の従業員が日本国外で仕事をしています。グループ本社である持株会社には大規模な研究開発部門があり、日本と米国に計17の研究所、そして2300人の研究者がいます。

NTTはさまざまな分野のグローバル研究開発をリードしており、特に光エレクトロニクス、セキュリティシステム、脳神経解析技術などは世界一を誇っています。また、音声認識や量子力学はIBMに次ぐ存在となっています。

一方、脱炭素社会（カーボンニュートラル）の実現は国際的な目標であることから、経済成長とカーボンニュートラルの両方が強く求められています。

次にデータセンターの電力消費量の増加についてみてみましょう。

NTTは世界第3位の規模のデータセンター事業者です。2018年のデータセンターの電力消費量は世界全体で190 TWhでした。これは2030年までに13倍になると予想されており、増加傾向も顕著なものになると考えられています（図1）。その限界を突破するためのイノベーションが、「IOWN構想」です。問題解決のためにはインターネットをはじめとする現在のネットワークを超えるものが必要だといえます。その基本要素となるのが、光の技術です。光は電気と比べて回路基板の配線長が伸びても、信号の周波数が高くなったとしても、電力

消費はほとんど増加しないという利点があります。

現在、NTTは光ファイバを用いて長距離データ伝送を行っています。光技術を用いてデータ処理にも用いることをめざして研究を続けています。当初は、情報処理への光技術の適用は、光伝送技術と比較し困難を極めました。しかし、2019年に世界初となる光トランジスタの開発に成功し、この発明がIOWNの起源となりました（図2）。

NTTの強みは光トランジスタの製造方法にあり、世界で50以上の特許を取得しています。従来の光トランジスタは縦方向に積層されていますが、NTTは横方向に積層します。強い光を薄い活性層に閉じ込めることによって高性能を実現し、電力消費99%削減に向けたキー技術であるメンブレンフォトンクス技術の開発に成功しました（図3）。

IOWNについて

現在、社会は、新型コロナウイルスの蔓延や気候変動、自然災害や世界の分断など、さまざまな危機的状況に直面しています。このような状況に対応するためには、ICT環境をますます強化しなければいけません。しかし、近年、多くのコンピュータを用いて大量のデータを処理していることからインターネットのトラフィックが爆発的に増えており、その結果、エネルギー消費が急増しています。

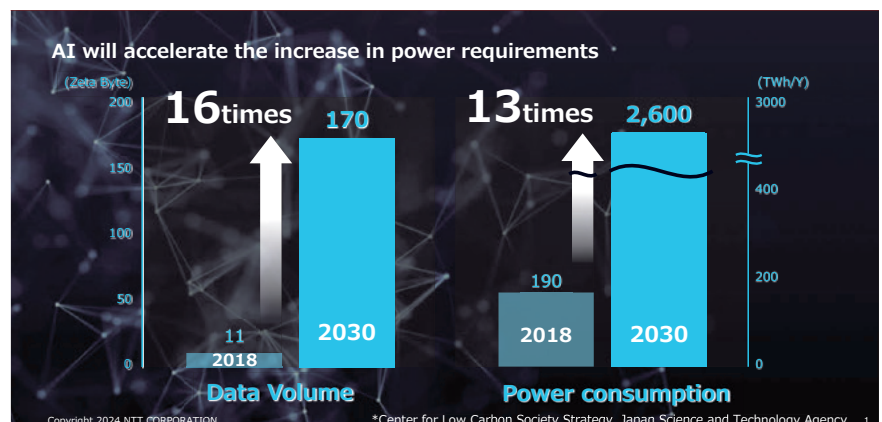


図1 グローバルデータセンターのデータ量と電力消費量

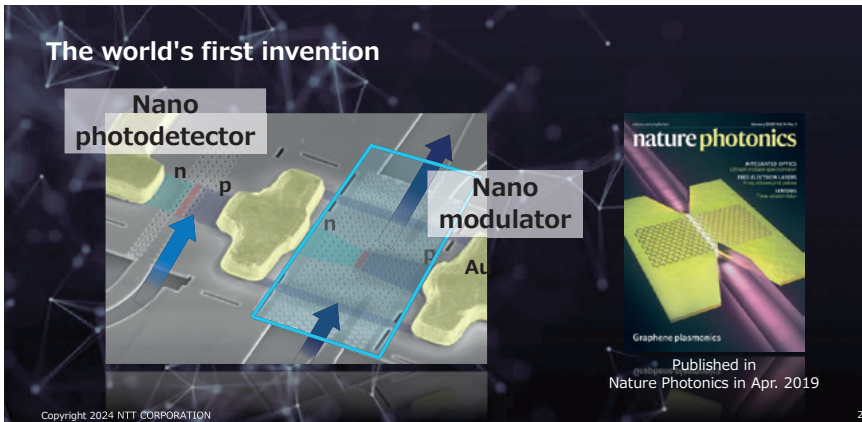


図2 NTTにおける光技術の研究開発

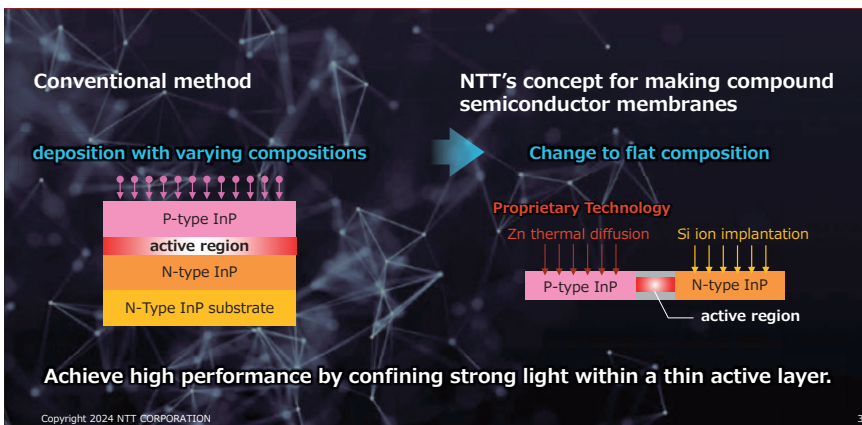


図3 NTTの強みである化合物半導体デバイス

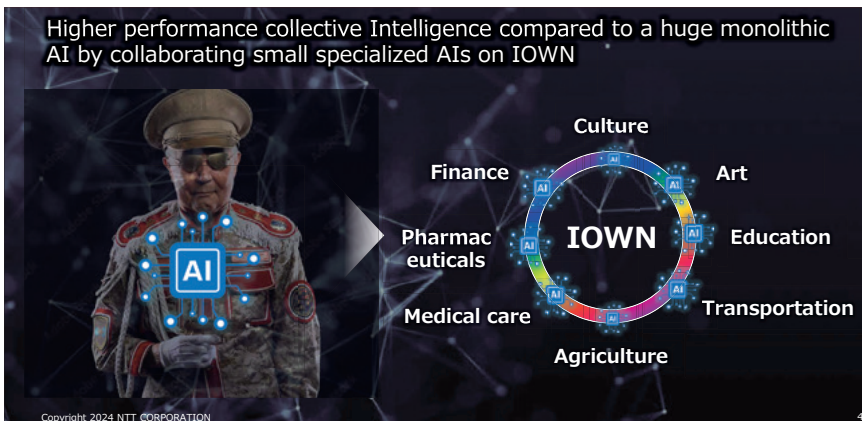


図4 AIコンステレーション

IOWNの達成目標はエネルギー効率100倍、伝送容量125倍、エンド・ツー・エンドの遅延が200分の1となることです。IOWN構想を発表したとき、非常に大きなイノベーションでもあり、最初のIOWNサービス開始を2030年と予定していました。しかし、ご期待の声が多かったことから、2023年にはIOWN1.0としてAPN (All-Photonics Network) のサービス提供を開始しました。

次に、APNのユースケースの一例を紹介いたします。

■クラシックコンサートでのユースケース

東京だけでなく、大阪や全国各地に散らばった奏者が、東京にいる1人の指揮者の指揮により遠隔で演奏を行う「未来の音楽会」というクラシックコンサートを実施しました。東京と大阪の間のファイバの距離は700 kmもありますが、APNを利用することで音の遅延はわずか20 msになります。これは同じステージ上にいる奏者の間が3 m離れているのと同じ状態です。

AI × IOWN

AI (人工知能) の活用はサイバーセキュリティの面では大きな意味合いを持ちますが、これは守る側だけでなく、攻撃する側にも当てはまってしまいます。ボットネットによるサイバー攻撃をいかに撃退するか、このサイバー攻撃対サイバーセキュリティ対策の戦いが続いています。

ボットネットが人間の能力を超えた高度なAIと組み合わせると、AIは簡単にボットネットをより悪質なものに変えることができます。そのため、サイバーセキュリティ上これまでない脅威となります。しかしIOWNがあれば、ディフェンシブAIがAPN上で連携しながら速やかに情報共有することでボットネットを撃退し、こ

の脅威を回避できます。

NTTでは、このようなAIの連携を星座に例えて「AIコンステレーション」と名付け、研究開発を推進しています(図4)。AIコンステレーションは、AIを用いてより高度な集合知を実現するためのキー技術です。

さて、現在の生成AIが唯一できないことがあります。それは、「自らの答えを確かめること」です。現在の生成AIのほとんどは単一の巨大AIです。そのため、その答えを自ら否定することはできないのです。AIがより良い答えを見つけるためには、複数のAIが互いにコミュニケーションを取り合い、それぞれの専門性を発揮するべきだと思っています。しかし、インターネットにはAIどうしが同期するために必要なクロックがないためこれできません。しかし、IOWNの光技術を使うことで同期が可能となり、人間が当たり前に行っているようなことをAIコンステレーションによって実現できると考えています。

もう一点、重要なポイントがあります。生成AIは大規模言語モデル(LLM)を使用し、人間が作成したデータから答えを見つけます。人間の知識から学習し、人間を支援してくれますが、「人間の知識を超えた課題に対して人間を支援できるでしょうか」。答えはNOです。例えばコロナウイルスの変異の仕組みを解明できるでしょうか。現在の生成AIではすべての情報を知覚することはできません。生成AIが人知を超えた答えを導き出し、人間の限界を超えることはできません。生成AIが人間のつくれたデータに加え、地球や宇宙のさまざまなデータを広く理解していくことで、人知を超えた答えを導き出す新たな生成AIへと進化していくのです。そして、そのような未来の生成AIを実現させるための基盤となるのがIOWNなのです。

Mobility × IOWN

IOWNにより世界中のデータセンター間に大容量かつ低遅延のネットワークを提供できます。このIOWNによるグローバルデータセンターコネクティビティにより、モビリティはよりスマートに、より安全に進化します。この進化のために必要な、3つのコア技術を紹介します。

1番目はインテリジェントコミュニケーション基盤です。これは人やモビリティ、そしてインフラからリアルタイムにデータを集め、AIを使って最適な情報を選択し、シームレスなコミュニケーション基盤を提供するものです。

2番目は分散型コンピューティング基盤です。未来のコネクティッドカーは、データセンターと常時接続されます。これにより、時間と空間を超えて安全運転実現のための情報をダウンロードすることで、交通事故ゼロの社会が可能になります。NTTは分散型コンピューティング基盤をまず日本国内で構築します。それからNTTのグローバルデータセンターの能力を活用して、この基盤を世界中に拡大していきます(図5)。

3番目はモビリティAI基盤です。モビリティAIには、ヒト・モビリティ・インフラから多種多様なデータを学習させます。これをLMM(Large Mobility Data Model)と呼んでいます。これは先に述べた未来の生成AIの一例でもあります。

この技術を実現するために、トヨタ自動車と連携を開始しました。2028年にはさまざまなパートナーとともに社会実装を行い、広く普及をめざします。トヨタ自動車 中嶋裕樹副社長からは「交通事故ゼロの社会を実現するためには、ヒト・モビリティ・インフラを三位一体として扱うアプローチが必要だ。そのためにシームレスなコミュニケーション基盤と多様なデータから学習するAI基盤を組み合わせたモビリティAI基盤の構築が不可欠だ。NTTとトヨタが協働することで新しい未来をつくっていくことができるだろう。」という熱いメッセージをいただきました。

Aerospace × IOWN

IOWNは地球を超え、宇宙へと拡大していきます。

NTTは地上で培った技術力と最新の

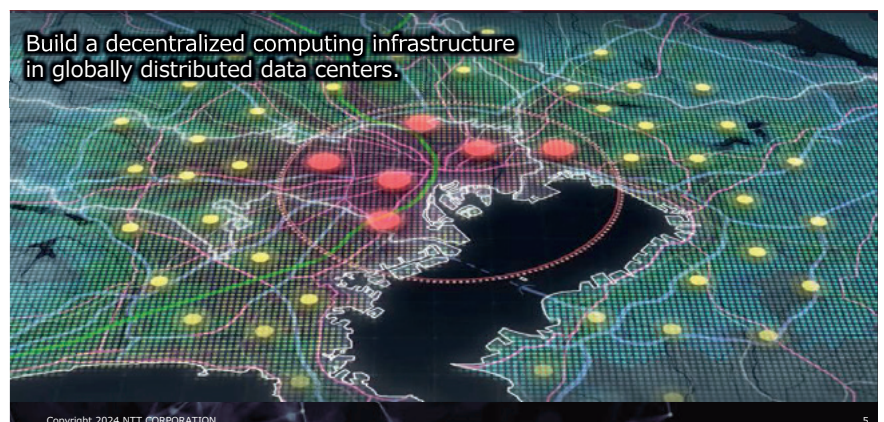


図5 分散コンピューティング基盤

IOWN技術を本格的に宇宙へと拡張させることで、豊かな未来の実現をめざします。この新たな価値への挑戦を「宇宙統合コンピューティングネットワーク」とよび、地球系エネルギーから脱却した究極にエコなインフラの構築をめざしています（図6）。

NTTのIOWN技術とSKY Perfect JSATの宇宙アセット事業を統合することで、観測衛星が得たデータの収集、計算処理を宇宙空間で実現します。現在、観測衛星が地上局にデータを送信できるタイミングは限られています。また、電波による通信では速度が遅いため、データを取得するまでに数時間、遅いと1～2日かかり、衛星の観測機能も十分に活用できていませんでした。こうした課題を克服するのが、IOWNによる光技術と電子技術を融合した光電融合デバイスの活用です。

成層圏を飛ぶHAPS (High Altitude Platform Station) や、宇宙空間の低軌道衛星および静止軌道衛星を統合してコンピューティングネットワークを構築し、それらと地上を光無線通信で接続します。観測衛星が取得したデータは即座にコンピューティングネットワークを構成する各衛星に送られ、分散処理されます。宇宙空間上で処理された膨大なデータは、静止軌道上にある衛星から必要な情報のみを地上へ送信することで、重要なデータを地上へ送るのに要する時間が大幅に短縮されます。これが宇宙統合コンピューティングネットワークです。

地球とは別に、宇宙空間に独立したICTシステムを構築するというのがコンセプトです。これは災害大国である日本において非常に有効であり、ぜひ実現したいと思っています。

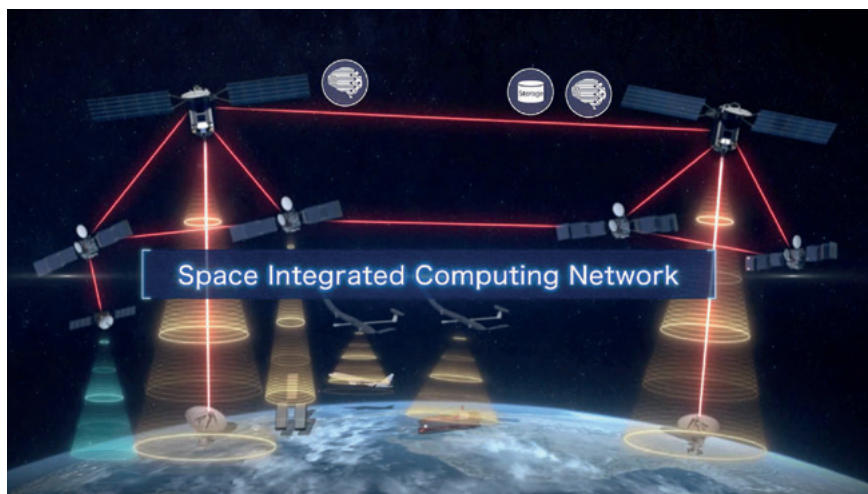


図6 宇宙統合コンピューティングネットワーク

Human × IOWN

テクノロジーは進化していきます。AIも進化します。では、人間はどうでしょうか。私は人間も進化すべきだと考えます。最後に「IOWNによる人間の新しい進化」について紹介します。

■ Project Humanity

DJ MASAは2013年にALS（筋萎縮性側索硬化症）を発症し、体が動かせなくなりました。しかし、発症後も視線を使うことによって精力的に音楽活動を続けてきました。そんな彼の挑戦は願いとともに次のステージへ向かいます。

「もう一度、体が動かせるのであれば、DJをしているときにハンズアップをしたい（盛り上げたい）。その願いをかなえるために、私たちは、わずかに動くMASAの筋肉が動いたときに発生する微細な電流から電位情報を検出し、デジタル上のアバターを動かす技術を開発しました。実世界では手足が動かなくても、デジタルツイン上ではもう一度、体を動かせるかもしれないという可能性を抱きながらMASAは挑

戦の舞台を世界最高峰のメディアアートの祭典、「Ars Electronica」へ移します。MASAのパフォーマンスでは、過去の録画から音声を再現して多言語表現も可能になるNTTのクロスリンガル音声合成技術を活用し、MASAが自分の声で英語のコミュニケーションを行いました。観客はMASAと一体となって盛り上がり、パフォーマンスは大成功でした。MASAは、「観客との一体感を感じました。これからも不可能に挑戦していきたい」と最後に語りました。

おわりに

人間の可能性はIOWNにより無限に広がります。持続可能な社会に向け、引き続き頑張っていきます。



次世代のAIについて

登壇者

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所

主幹研究員 竹内 亨

Sakana AI COO 伊藤 錬

東京大学 特任教授 三宅 陽一郎

モデレーター

『WIRED』*日本版 編集長 松島 倫明



(左から) 松島編集長, 竹内主幹研究員, 伊藤COO, 三宅特任教授

本記事は、2024年11月25～29日に開催された「NTT R&D FORUM 2024 - IOWN INTEGRAL」における、技術セミナーを基に構成したもので、現在のLLM (Large Language Models) の限界と今後の展望をテーマとしたパネルディスカッションの様子を紹介します。

はじめに

松島：AI (人工知能) が進化を繰り返す先に、AIの能力が人間を上回る「シンギュラリティ (技術的特異点)」という仮説がありますが、今の生成AIは事実と異なる情報を生成する「ハルシネーション」もあり、人間社会の中でどのようにフィットしていくのかについては、これからも議論を継続していかなければなりません。そのポイントとして、文化や地域性の違いなど複雑な人間社会やテクノロジーの多元性をAIによりどう実現していくのか、という大きな課題設定をベースに「次世代のAI」についてパネラーそれぞれのお話を伺い、議論を進めます。

次世代AIに向けた取り組み「AI コンステレーション」

竹内：私はAIのアルゴリズムに関する研究開発グループのリーダーを務めています。ここでは、2023年度から研究開発を進めている「AI コンステレーション」について紹

介します。2022年末以降の現代のAIはLLM (Large Language Models) が台頭しており、LLMを抜きに考えることはできません。ChatGPTの登場以降、AIはLLMをベースとしたものが主流となり、オープンで大量の汎用的な知識を獲得するものが実現されています。一方で、実用の世界では、クローズドなドメイン・組織内データを活用する取り組みも進んでいます。

LLMは大規模化による一般性が向上する一方で、消費電力と計算コストの増加が問題視されています。また、個性がなくなり事業で利用する場合の差別化ができなくなる懸念もあります。このため、LLMは「何でも知っている巨大なLLM」から、「専門知識を持ったリーズナブルなLLM」の流れになり、すでに各社で、医療、法律、製造、鉄道などに特化したオリジナルのLLM開発に取り組んでいます。そして、こうした専門知識を持った複数のLLMを組み合わせることで使うことが今後のトレンドになると考えています。

NTTは2023年度に、専門性や個性を持つ低コストのLLMを組み合わせることで問題を解く「AI コンステレーション」というコンセプトを立ち上げました。AIどうしが相互に議論・訂正をして多様な視点で問題を解き、少数意見も尊重して議論を高度化する

大規模なAI連携技術です。AIどうしが星座 (コンステレーション) のように連携する様子から「AI コンステレーション」と命名しました (図1)。

続いて、AI コンステレーションが持つべき能力を、人間の「創造性」と「個性」を軸に考えたとき、まず定型の業務があり、そこに創造性が加わると持続的イノベーションが生まれ、個性が加わることで破壊的イノベーションになると考えられます。今のLLMの適応範囲は定型業務で、人の作業をAIに置き換えることにより適用領域の拡大が期待されています。それに対してAI コンステレーションは多様なAIによって「個性」を獲得しつつ、AIどうしの議論によって「創造性」が増すことが期待され、人間の「置き換え」ではなく「支援」ができると考えており、これが持つべき能力の1つとなります (図2)。

ユースケース (ユーザの要求や利用目的を明確に定義したもの) は2つあり、1つが「創造性や個性の拡大」です。何か物事を計画し、決めるときは、未来を想像してから逆算で考えるものですが、AI コンステレーションのように多様な視点で情報が提供できればユーザの視点拡大が期待できます。もう1つはコミュニティ議論とその高度化です。例えば会議で議論を広げたり深

*「未来 (Futures) を実装する」ことをコンセプトにしているメディア。「未来は1つではなく複数の可能性がある」ことを意図して、Futuresと複数形に呼んでいます。

めたりするのは非常に難しいことですが、そこに多様な観点を追加することで知識や議論レベルが深まります。

今回のNTT R&D FORUMでは、複数のLLMに議論させるデモンストレーションや、コミュニティ議論の高度化をめざして開催した、福岡県大牟田市の「会議シンギュラリティ」も紹介しました(図3)。これは実際の地域問題について議論する場にAIを導入したもので、AIどうしで議論させてから住民どうしが議論する取り組みです。その結果AIのアイデアにより議論が円滑にスタートし、自分にはない視点に気付けるなど、多くの効果がありました。

AIコンステレーションの実現にはAIどうしの連携方法、学習や運用の改善、コストの削減などが課題です。また、今のLLMは自然言語の範囲は理解できても、世の中の情報理解には達していないため、非メディアによる高度化も必要です。私たちはIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) のネットワークやコンピューティング基盤などを活用して、「人とAIが協調するサービス環境」を提供し、社会貢献につなげたいと考えています(図4)。

次世代のAI「モデルを1つにする 進化的モデルマージ」

伊藤：Sakana AIは2024年3月にLLMをつないで利用する「進化的モデルマージ」を発表しました。これは「モデルのつくり方」という意味で、AIコンステレーションのコンセプトを体現したものだと考えています。複数の小さなモデルをつないで、大きなモデルに比するパフォーマンスで課題を解決したり、AIどうしが会話することで正しくカリブレーション(調整)していくことが次世代のAIの姿だと考えています。ここではAIコンステレーションのコンセプトのうえでどのようなAIをつくるべきか、利用に際してAIコンステレーションのコンセプトが次世代のAIだということを、実例を含めて紹介します。

モデルをつくるときに「ゼロ」からつく

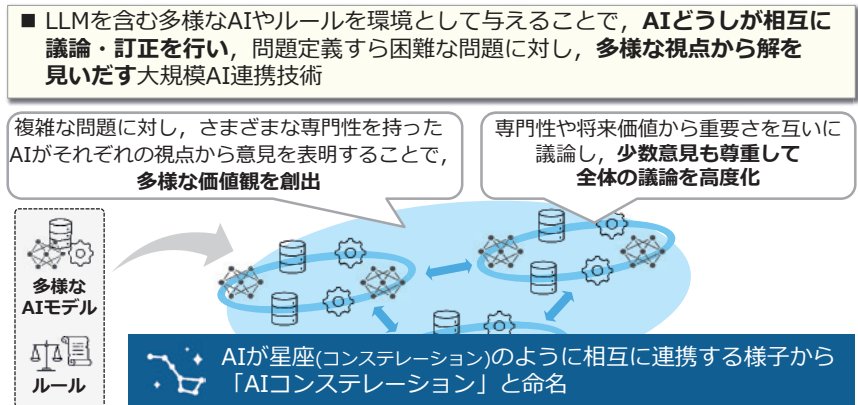


図1 AIコンステレーション

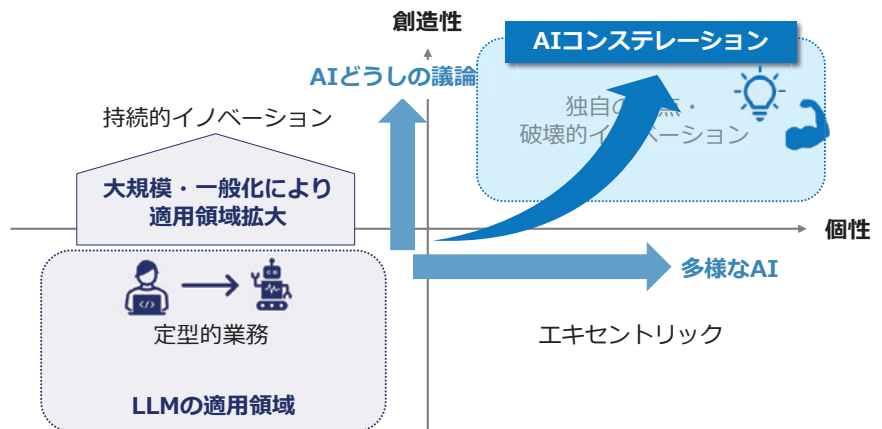


図2 AIコンステレーションの能力



図3 大牟田市で開催した会議シンギュラリティ

■ IOWNのNW・計算機基盤を活用し、異なる多様なAIどうしで議論・訂正することで、人とAIが協調して多様性と公平性を確保した社会実現に貢献

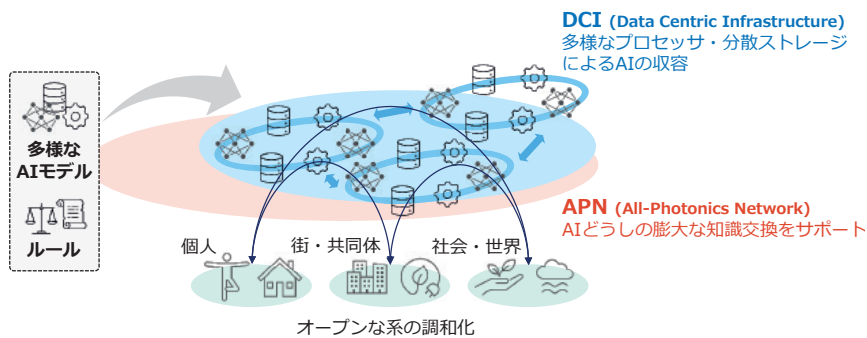


図4 AIコンステレーションで社会に貢献する

り始めた場合、OpenAIよりも20~30%ほど効率的にモデル作成ができる、フランスのミストラルのような企業もあります。しかし、99.999%の効率化をめざしたとき、ゼロスタートではなく既存モデルの得意とするところどうしを連携させることで効率化を図る方法もありますが、この場合経験則から人知を超えることはできません。そこで私たちは、例えば、目が4つあって足の裏にもあって、耳も4つあってかまわれないという「フランケンシュタインマージ」という手法で、1万通りのモデルマージをつくり、その中のパフォーマンスの高い10個だけ残してあとは捨ててしまいます。その10個のモデルどうしを掛け合わせて第2世代モデルとしてまた1万個をつくり、トップの10個だけを残すという作業を、999世代まで試したところ、GPT3.5くらいの性能のものを24時間と24ドルの経費でつくることができました。これは私たちにとって面白い大きな気付きとなりました。またモデルのつくり方もただデータを学習させるだけでは限界があり、性能は上がってもコストに見合わなくなります。そのため「リーズニング」と呼ばれるモデルどうしが会話できる技術を使ってサステナブルなモデルをつくる流れになってきています。今のChatGPTは何でもすぐに解決できる精度はなく、翻訳や要約が少しだけできてコールセンタの業務が少し軽減された、というのが現実です。しかし私たちが思い描く「革

新的な未来を起こすために必要なAI」も、いくつか出てきました。その1つがワークフローオートメーションで、複数のステップに分かれているものを一気に自動化するテクノロジーです。

これを「学术论文を書く」という例で試してみました。通常のステップでは偉い先生から若い研究者に「こんな論文を書いてごらん」と助言があり、若い研究者は100個の面白いアイデアを考えて図書館に行って調べます。そうすると95個くらいは証明済みだったりするので、その残りの5個を証明して図表をつくり論文にしています。

2024年8月5日にそれをすべてAI化させたものを『AI Scientist』という論文で証明しました(図5)。これは雑誌『Nature』にAIで初めて取り上げられた論文となりました。方法としては100個のアイデアを100個の違う基盤モデルに問いかけて得られたアイデアを、エージェント機能によりカリブレートするやり方です。このように私たちはコンステレーションの考え方をを使いながら、面白いモデルの構築や活用方法にチャレンジし続けています。

次世代AIとデジタルゲームAI 「3種類のゲームAIでスマートシティを実現させる」

三宅：私からはゲーム分野とデジタルゲー

ムAIについて紹介します。この産業はまだ新しく2000年から盛り上がってきたもので、私は2004年くらいにゲーム産業に入りました。まず「ゲームAI」にはメタAI、キャラクターAI、空間AIの3種類があり、それぞれ以下のような役割があります。

- ・メタAI：神さまAI（支配する）
- ・キャラクターAI：動物型知能（動き回る）
- ・空間AI（スパーシャルAI）：植物型知能（場所をつくる）

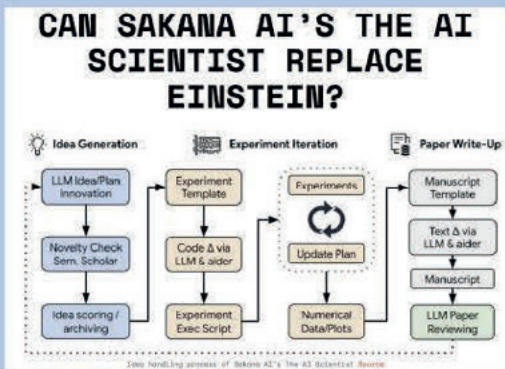
そしてメタAIは生成AIと、キャラクターAIは言語AIと、空間AIは空間コンピュータと組み合わせができます。東京大学ではそれを実空間に応用するため、都市全体を統べるメタAI、都市の中で活動するキャラクターAI、そして都市の空間的状况を把握する空間AIの3つのAIを組み合わせたスマートシティ（最先端のデジタル技術や情報を活用して都市機能の効率化・最適化をめざす都市）の仕組みづくりをしています。ここではこれからキーワードになっていく空間AIとメタAIについて紹介します。

まず空間AIは、特定の場所で取得した空間情報や、デジタルツインメタバース（デジタルツインが構築された仮想空間）をつくるときに空間に張り付いたAIが情報を渡すなど、現実から情報を吸い上げてメタバースに渡す役割を担っています(図6)。ほかにも環境の中に情報AIを埋め込むテクニックもあります。実はゲームではドアなどのオブジェクト自体がAIになってキャラクターの運動補助を担っており、それを積み上げてスマートシティをつくらうとしています。

メタAIは「人間を理解しようとするAI」です。ユーザにいろいろなデバイスをつけて生体情報を取得して心理状態が把握できますが、これはゲーム内だけではなく実空間でも同じです。

さらに、メタAI自体が3Dダンジョンなど、ゲームそのものをつくり出すこともできます。ゲームコンテンツはこれまで100%人間がつくっていましたが、80%をメタAIが生成AIの力を借りて作成し、残りの20%を制作者に応じたコンテンツを作

AI SCIENTIST END-TO-END WORKFLOW AUTOMATION (*2)



AI Scientist can write science papers on its own

A new AI system called "The AI Scientist" can independently carry out the entire research process. The system generates research ideas, writes code, conducts experiments, and produces complete scientific manuscripts. It is much faster and considerably cheaper than if humans do the work.

Source: NowadAI, August 13, 2024.
Retrieved from: <https://www.nowadai.com/can-sakana-ais-the-ai-scientist-replace-einstein/>

Source: Warp News, August 19, 2024.
Retrieved from: <https://www.warpnews.org/artificial-intelligence/ai-scientist-can-write-science-papers-on-its-own/>

図5 論文『AI Scientist』

成することで、多様なコンテンツやゲームが作れるようになります。こういった技術を活用してさまざまコミュニケーションをとることができればと考えています。

この3つのAIでゲーム空間や実空間を変えていくには、仮想空間でシミュレーションしてから実空間に返す作業が必要です。今後は実空間と仮想空間をセットにし、メタバースそのものをAIとして使うことがメタAIの役目となります。ほかにシステムと人間をつなぐエージェント（データを統合する役）も必要になり、今後はAIコンステレーションが軸となる「AIで会話できる未来」が来ると考えています。

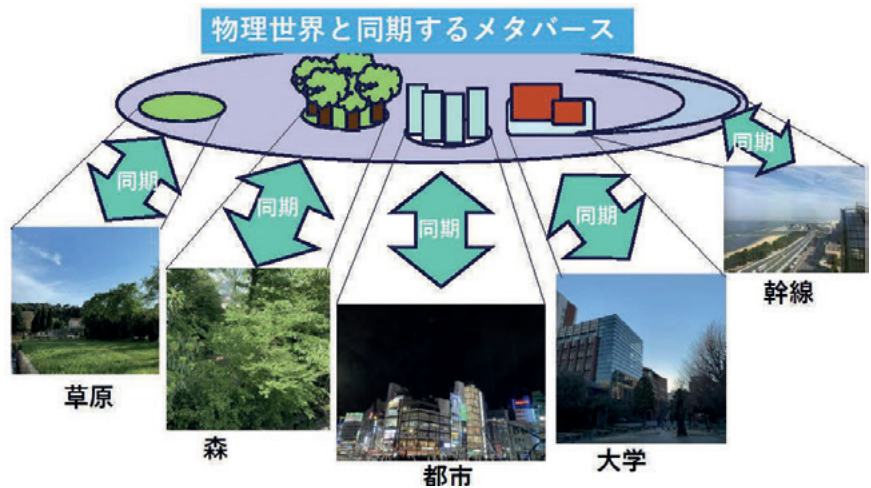


図6 物理世界と同期するメタバース

メタバースを活用してゲームAIを現実世界に戻す取り組み × AIコンステレーションの可能性

松島：AIが物理空間や人間とインタラクションするというAI研究の中でもチャレンジの部分だと思いますが、ゲーム空間のもの

を実世界にどう返せば良いと考えますか。また、今回のAIコンステレーションの構想には、どのような可能性を感じましたか。竹内：最初の段階でAIコンステレーションはLLMを中心に考えており、自然言語で把握・表現されている一般的な概念の話でした。しかし、大牟田市のように実際に

やってみると情報を与えても拾いきれない、数値データを与えても拾えないことも多く、もしAIがカフェをつくる提案をしてきても、空間情報がないため実世界における移動等の観点を提案に入れることができず、提案として成立するか分からない話になります。仮想空間を現実に戻す話もLLMにおける

議論も、正しい知識をグラウンディング（知識の接点が合うこと）しなければ議論を深めることは難しい、という共通点があると思います。

伊藤：三宅特任教授のデジタルツインの議論は、一足飛びに物理空間にいかない未来のある手法だと思います。AIは物理的要素がなく、答えがすべてコンピュータの中にあるほうが実装しやすく、金融機関における住宅ローンのプロセスの自動化ならすべて計算で解が出ます。一方で、飛行機をうまく飛ばすAIをつくりましょうといった場合に、最後に翼をカナヅチで叩く匠の技が入るような物理的プロセスがあると、今のAIでは対応できません。

実世界の物理も加味してAIが解を出すためには、中間ステップが必要です。その中間ステップにはデジタルツインが必要不可欠で、例えばロボティクスや自動運転が、空間を把握して物理的な障害に対応するための知見をためてAIにフィードバックするといったループをつくるため、デジタルツインが唯一の方法になります。そして、それをまた現実世界に戻すラーニングループも重要となります。

さらに、LLMのデータ投入量に対してリターンが低減しているため、時系列データや信号理解のモデルといった言語以外のモデルのモデルも必要であり、その掛け合わせが大きな成果を生むのだと思います。

三宅：AIコンステレーションには大袈裟な表現ではなく絶大な可能性があると思っています。職業柄いろいろな会議に参加しますが、会議にはパワーが必要ですし、そこにいるメンバに依存してその日の流れで会議の結論が出てしまうことがあります。そこに昔から違和感があり、メンバを変えたり、抜いたりした別バージョンの会議を本当はやるべきで、そのソリューションこそ会社の経営層がほしいはず。それをAIによって1000通りの多様な意見が飛び交う会議を行い、999個の結論を捨てて1つの最高の結論が残る、それこそが本来必要なものです。私たちが本来必要なものを、無意識にあるいは漠然とほしいと思っていた

ことにより実現できることに大きな可能性を感じます。

会議 × マルチモーダルなAIで 広がる可能性について

松島：1000個の会議の結果を知りたいというときに、1個のLLMではなくコンステレーションのようにまとめた方がいいのか、そしてマルチモーダルなものを混ぜていくことで、さらに広がる可能性に期待できるのでしょうか。

竹内：LLMでもまだまだできることがあり、会議で複数のモデルが議論すれば多様な視点の解を出すなど、人間ではできない議論のブランチ（分岐点）を大量につくることができます。また、会議がうまくできない原因に時間やデータの不足、必要なステークホルダーが集められないなどがあります。未来の社会問題の場合は未来のステークホルダーが必要になります。これらに対してはLLMで一定程度再現できると思っています。しかし、例えば、未来の海洋資源を議論するときはそこに住む生物の立場の観点も考える必要があり、こうした視点は今のLLMでは再現できません。また、時系列分析や空間分析の観点も含めて、意見をロジカルに拾わなければよく分からない結果になるため、LLMだけではなくさまざまなメディア情報・マルチモーダルが必要になると思います。

松島：AI Scientistは論文に新しい知見を入れていく必要もあると思います。AIどうしの議論やマルチモーダルによって、実際にどこまで対応可能になるのでしょうか。

伊藤：大牟田市の会議シンギュラリティはとても良い使い道で、ステークホルダーを1000人そろえなくても、AIがあれば1000通りの多角的なアイデアが創出される点や、そのアイデアに対するステークホルダーの反応をシミュレーションできるのが面白い点だと思います。これをAI Scientistの文脈に直して正規分布曲線を用いて紹介します。

LLMは「それっぽい答え」を出すことが得意です。これは1000個の答えが正規分布

曲線をなし、その中央値付近に多数が集まるというのがLLMの基本的な仕組みで、ChatGPTが返す期待どおりの答えも、期待外れな答えのどちらも正規分布曲線上の話です。大牟田市の例でも、LLMによる1000通りの答えは中央値付近の予定調和な答えになります。

これはハルシネーションの解決にも有効で「ハルシネーションの少ないAI開発」よりも「大きな母数のモデルをつくり、解の分布の中央値付近（予定調和）の値を解とする」ことが効果的だと考えています。その判断はファインチューニングによりエージェントが行いますが、ファインチューニングには人間の意図も入ります。そして、中央以外にある解を指定すると面白い答えが返ってくる場合があります。このように、どこをねらうのかで解を変えられることが、AIのカリブレーションの真骨頂であり、私たちの狙うポイントの1つだと思います。そして最終目標に向けて解の曲線上の位置をずらしてフィードバックしながら、LLMの討論を繰り返していくことだと思います。

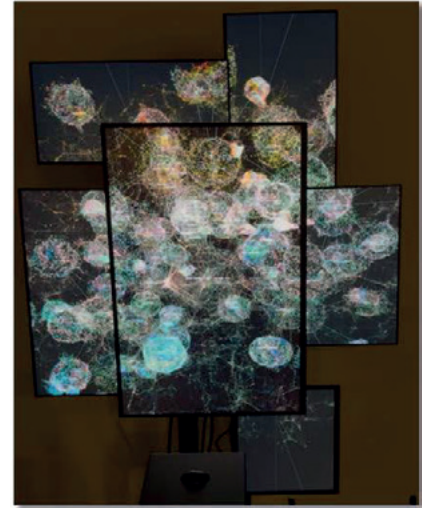
竹内：私たちはオードリー・タンが提唱している「AIはArtificial Intelligence（人工知能）ではなくAssistive Intelligence（アシストする知能）であるべき」という考えに影響を受け、人の個性や創造性の発揮を支援する未来を描いていますが、AI Scientistの観点でいうとAIはどのように人の行動をアシストするのでしょうか。

伊藤：AIは現時点では人間の単純作業を助ける存在であり、この先の方向性についてはAI Scientistのレベル次元ではまだみえていません。AIの発展はSF映画のような夢を描くのではなく、地に足をつけて現実的に進めるものだと思います。ChatGPTをコピー・アンド・ペーストする以上に高度で現実的な使い道を世界に広め、手ごたえを出すことが大事だと思っています。そのため、今は定型的な業務の深掘りを進める時期だと考えています。

松島：ゲームのプレイヤーが飽きないために3つのゲームAIが一体で動いて、毎日1回は大きな山場がくるようなゲームの知見を、



図7 アート作品として展示したAIコンステレーション



実際の会議などでも活かせるのでしょうか。
三宅：メタAIはゲームそのものをAIにするという考え方のため、人間を理解してゲームそのものが変化していきます。会議で例えるなら、議論が停滞したら打開策を提示したり、中だるみすれば同じ話題を繰り返していることを伝える、など議論を進めるようなメンターの役割としてメタAIが活躍できます。

「身近にAIがいる未来」でのAIと人間の関係性

松島：次世代のAIというテーマなので、何かAIと人間の関係性をどうぞ覧になっているかを、最後に3人にお伺いしたいと思います。

竹内：AIは多様であり、それぞれに魂が宿る八百万の神的な考えに近いと思います。この業界でずっと描かれていたシステム・オブ・システムズ（複数の独立したシステムを連携させる技術）が、生成AIの力で現実味を帯びてきました。この生成AIの技術を使って、よりリアルで非常に高度なサービスが一気に実現できるようなパラダイムシフトが起きようとしているのではないかと感じています。

伊藤：現実的なユースケースは、AIが人間の暮らしを楽にしてくれるのには間違いあ

りません。ここを出発点としてAIはリーズニングができるようになりました。次のステップは人間のブレインストーミングができる相手となり、インスピレーションを与えることだと思います。その先にはすべてAIで自動化される未来があるかもしれませんが、便利な世の中が第1にあり、その次に人間のブレインストーミングの相手になる、これが人間とAIの面白い役割分担ではないかと思っています。

三宅：ゲームにはフローチャートで結論を迎えるものがあります。実世界では、例えば会議中に分岐点があった場合1度選択したら後戻りできなかったものが、フローチャートがあって分岐点に戻れば、別の結論が見つかる可能性もあります。人間が会議する前にAIに1000回会議してもらい、こんな方向の結論ができましたが人間はどうしますか、というメタシミュレーションができれば、「その日たまたまの条件で選ぶしかなかった未来」を回避できるのではないかと思います。

松島：「これまでの考え方がAIによりリアルに実現できるようになった」「リーズニング」「多元的な未来へのアシスト」というキーワードでまとめてみましたが、バズワードになっている生成AIの先に進むべき真の次世代のAIの姿が議論やキーワー

ドの中からみえてきたと思います。私たちは、今まさにその途中にいるわけなので、ここで結論が出るわけではありませんが、このような議論の場をこれからも続けていくことが大事ではないかと思っています。

インスタレーションで体感するAIの未来

竹内：最後に、AIコンステレーションのコンセプトを、実際にAIどうしが連携しているようなイメージのアートとして示します（図7）。真ん中に非常に複雑な社会課題があり、ステークホルダーがそれぞれ全然違う意見を持っているというような問題があったときに、それをまずいくつかのサブイシューに分割し、それぞれのサブイシューごとにいろいろなAIが議論しているというイメージです。

私たちがいろいろな視点から俯瞰することによって、物事を深く見ていくことが、これから必要になってくると考えています。ぜひこのようなアート作品を体験いただきながら次世代AIについて皆様と考えていきたいと思っています。



光電融合技術とスーパーコンピュータの未来

登壇者

NTT 先端集積デバイス研究所・NTT 物性科学基礎研究所
フェロー 松尾 慎治株式会社 Preferred Networks 代表取締役
最高経営責任者・共同創業者 西川 徹

(左から) 松尾フェロー, 西川代表取締役

本記事は、2024年11月25～29日に開催された「NTT R&D FORUM 2024 - IOWN INTEGRAL」における、技術セミナーを基に構成したもので、光電融合技術の最前線について議論された様子を紹介します。

プレゼンテーション1

■パッケージ内光インターコネクションに向けたメンブレン化合物半導体デバイスの研究開発

松尾：最初に、NTTが光デバイスの研究に取り組んでいる目的の1つが低消費電力化です。現在ICT機器が世界的に急増しており、クラウドサービスやAI（人工知能）の普及に伴い、データセンターもGoogleデータセンターのように大型化しています。大型化したデータセンターでは、原子力発電所1基に相当するほどの電力が必要といわれており、こうしたデータセンターは世界で消費される電力の2%を使用しています。日本の場合は首都圏にデータセンターが集中し、国内消費電力の12%を占めています。さらに、NTTは通信・コンピュータ関連を中心に日本の総電力の0.7～1%を使用していることから、消費電力の削減に向けた研究開発が急務となっています。

私は光技術の専門家なので、光技術の歴史についても簡単に触れておきます。情報の伝送には携帯電話のような無線による方式と有線による方式があります。有線による方式は、銅線に情報が載った電気信号を流す方式と、情報が載った光信号を光ファイバに通す方式があります。電気信号の方式は通信速度が遅いですが伝送距離が短いときはコスト的に有利で、伝送距離が長く通信速度が速い場合は光信号の方式が有利

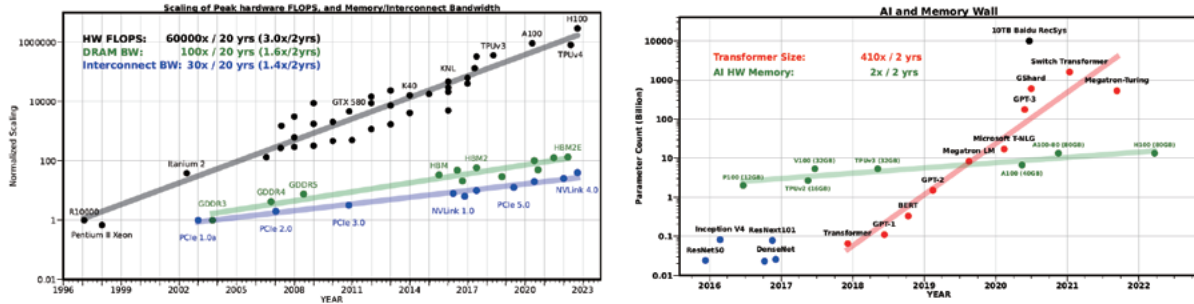
となります。今から40年ほど前に県間網などで使用され始めた光ファイバは、現在では海底ケーブルに至るまで広く使われています。そして、現在では、ICT機器の処理能力が向上し通信速度も高速になってきたため、短距離であっても光信号を使うほうがコスト的に有利な状態になってきており、データセンターやスーパーコンピュータでは平均20mほどの短い距離でも信号伝送にはほぼ光を使っています。そしてICT機器の性能向上の傾向はさらに顕著なものとなっています。こうした背景をベースに、光電融合デバイスパッケージ内の「光インターコネクション」を中心に、なぜ光が通信の世界だけではなくコンピューティングの世界にも適用されるのかについて説明します。

さて、AIの利用が増加することで、トラフィック（通信量）が増大し消費電力も今後さらに増大していくものと予想されています。図1左の黒い線はコンピュータのパフォーマンスの上昇、緑がメモリの伸び、青が通信速度の伸びです。両者の伸びの差をメモリギャップといいますが、メモリギャップが広がる一方です。それをさらに時間を進めたものが図1右です。インターネットの使用量に加え、赤で示すAIがそれを上回るスピードで上昇しており、通信に必要な電力が増加してきています。この短い距離で消費電力の高い部分が、私たちの研究開発のターゲットです。研究開発を

進めるうえで留意すべき点としては、スペースに限りがあるため機器は小型であり、そして低消費電力かつ低コストでなければなりません。この3つのポイントを実現させるのが光集積回路です。その実現にあたっては、シリコンのCMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor：相補型金属酸化膜半導体）プロセスを使ったシリコンフォトニクスによりシリコン上に光と電子の集積回路を制作する技術を使います。光通信に必要な光（レーザー光）の送受信素子としてはシリコンではなく「化合物半導体」を使うため、「異種材料集積技術」も重要となります。こうしてつくられた光集積回路がさらに電子デバイスと3次元に集積され、電気と光を密に融合させたものが、「光電融合デバイス」です。

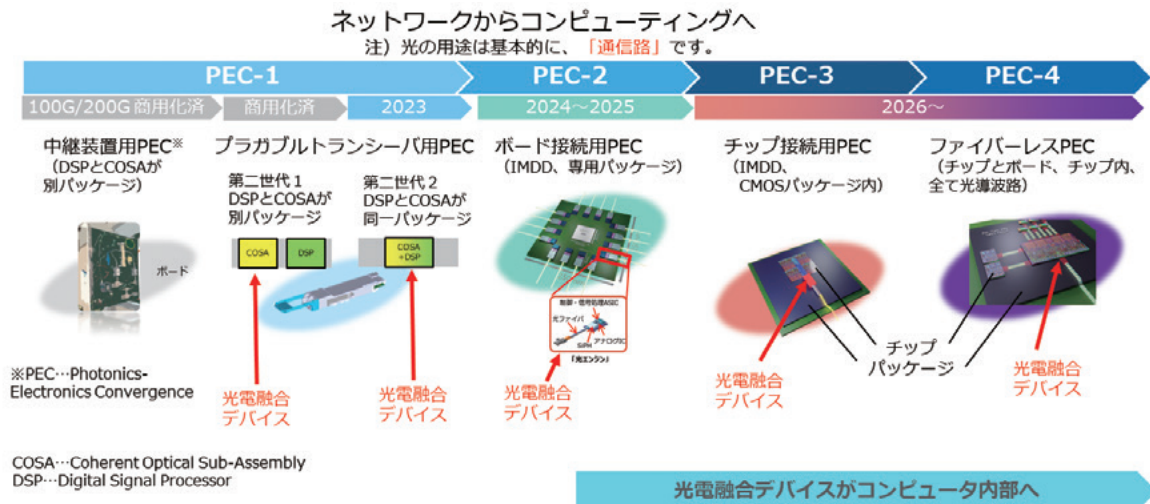
IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想における光電融合デバイスのロードマップ（図2）では、現在のデータセンター間からボード間、チップ間、そして最後はチップ内まで光を導入することをめざしています。このため、もう1つポイントとして、チップ単体の機能としては通信、コンピューティングの区別がなくなってくるため、チップ内という極短距離において電気が変わって光が導入されると、今まで通信を専門としてきたNTTがコンピューティングの領域の応用にも入っていく必要が出てくるということになります。

AIの利用による爆発的なトラフィック増大により
さらなる消費電力の増加が懸念されている



A. Gholami, et al., “AI and Memory Wall,” IEEE Micro, pp.1–5, 2024.

図1 消費電力の増加



https://www.rd.ntt/download/NTT_TRFSW_2022_J.pdf より

図2 IOWN構想における光電融合デバイスのロードマップ

さて、光電融合デバイスのめざす時期は非常に短期間で設定されており、チャレンジングな研究開発です。現実的な課題として、LSI (Large Scale Integration : 大規模集積回路) からレーザー光を出す際、電気の配線の部分で膨大なエネルギーが使用されることで無駄が生じており、エネルギー消費の少ない光部分を物理的に寄せて密接させることで無駄を省く取り組みが世界的な流れです。しかし、電子デバイスと比べて、光デバイスは壊れやすく取り替えも困難なため、低コストで耐久性があり、信頼性が高い高品質な光デバイスをつくること

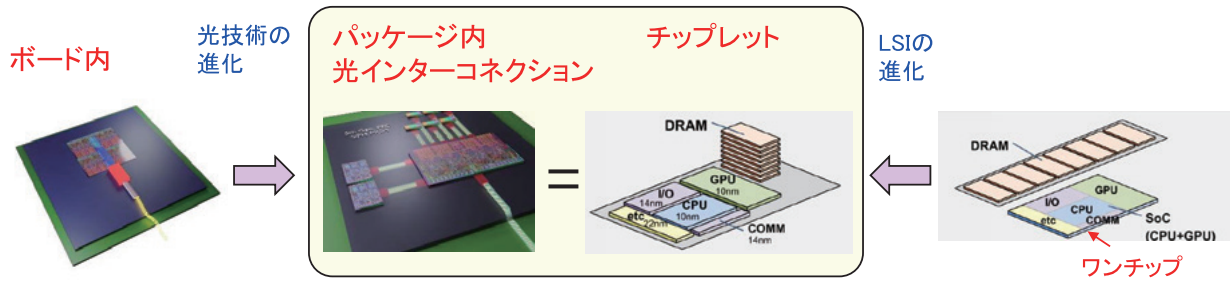
が研究課題となっています。

■演算に割り当てられる電力の確保と、「光化」によるハードウェアの物理的な位置に依存しない計算資源の有効利用

次に、LSIの「光化」の必要性について説明します。光化の理由はやはり消費電力が関係するのですが、CPU (Central Processing Unit) チップの消費電力は、性能の向上に伴い一定の割合で増加していることに比べ、オフチップの通信に使われる電力は指数関数的に増加しています。この傾向で消費電力の増加が進むと、コンピュータの本来の目的である「演算」に使

用できる電力がなくなってきます。この演算に使う電力を確保するために、「LSIの光化による低消費電力化」が必要になります。

また、一般的なLSIの電子回路は、元々1つのチップ内にCPU、GPU、I/O、メモリ等を構成してきましたが、チップの肥大化やそれに伴う製造上の歩留まりの問題が顕在化したため、チップレット (パーツを細分化して適材適所に活用したもの) により、構成されるようになりました。この場合、「チップレット間の通信」も重要になります。その一般的なLSIのチップレットと、私たちのめざす「パッケージ内の光化



◆ 光デバイスと電子回路を同じパッケージに搭載

光インターコネクションの導入により、LSIの進化を継続させることができる(差別化技術)

- ・ 大容量・低消費電力・低コストな光電融合デバイス作製技術
 - ・ 光デバイスと電子回路の特性を考慮した設計
 - ・ 実装技術(電気&光)
- の研究開発が重要

◆ パッケージ内のデバイスもデータセンタ内のデバイスも同じ損失で接続可能⇒パラダイムシフト

NTTのIOWN構想では光ディスアグリゲータッドコンピューティングを実現し、場所の制約やサーバの筐体から解放された自由度の高いデータセンタを構築する

図3 パッケージ内光配線によるパラダイムシフト

(光インターコネクション)」は同じもので、光インターコネクションの導入により、LSIの進化を継続できるのではと考えています(図3)。

さらに、光は2cm飛ばしても、2km飛ばしても伝送損失はほぼ同じで0.2dB程度です。そのためディスアグリゲータッドコンピューティング(多種類のコンピューティングリソースを、長距離・広帯域・低消費電力な光電融合技術を利用して相互につながる)のようなものが実現できます。実際に米国の企業では、300mmウエハの中に光回線を実装する話も出てきています。

このように光は伝送に適しているため、距離が長くなるほど光を使う可能性が高くなります。またNTTが提案しているディスアグリゲータッドコンピューティングでは、メモリ不足解消のためいろいろな個所からメモリを集めてスケーラブルにしておき、ボード上の電気では対応できない領域をターゲットとしています。

■半導体とシリコンを集積した「光電融合デバイス」の重要性

さて、前述のとおりシリコンでは電子回路をつくらせても、レーザ光はつくれません。現在、レーザ光を出すデバイスをシリコン上に配置する方式が一般的ですが、光ファイバに相当する0.5μm幅の光導波路に光

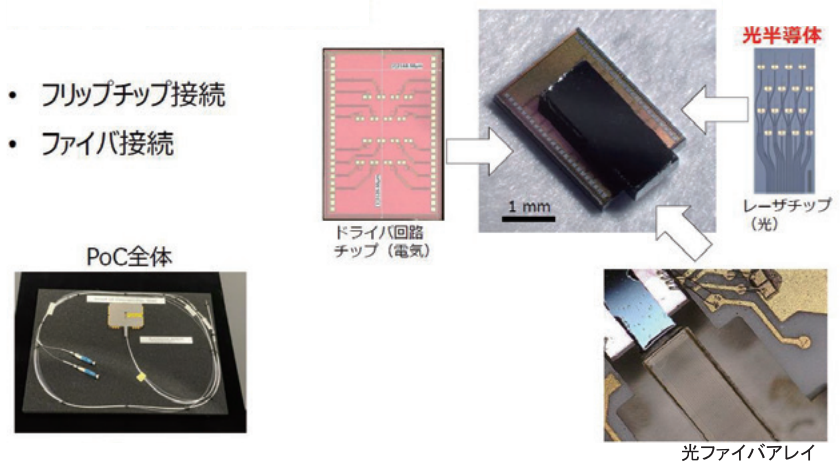


図4 光電融合デバイス化

を通すために、レーザデバイスの発光部と光導波路の位置を合わせる必要があります。それに非常にコストがかかります。今回のR&Dフォーラムではウエハレベルでつくれることを紹介していますが、従来のレーザデバイスをより薄膜にすることで多くのメリットが生まれました。その結果、シリコンフォトニクスと非常に相性の良い光電融合デバイスが出来上がりました。現在では16chのレーザアレイを置いて1.6Tbit/sの信号を出すところまで研究開発が進められています。

そこには光電融合デバイスが重要で、そのチップとCMOSのドライバサーキットを3次元的に集積することで、回路間の距離が短く非常に低消費電力のものができます。このとき低価格で早く低消費電力化を実現するために、電子回路と光回路を別々に設計せずトータルで考えることが大事であり、これからはこの光電融合デバイス化が非常に重要な技術になると考えています(図4)。

プレゼンテーション 2

■サステナブルなAIをめざして

西川：NTTグループとAI分野で業務提携しているPreferred Networksの西川です。私たちはまだ「光電融合技術」は使っていませんが、生成AIや基盤モデルといったインターコネクトを非常に重要とする世界において、これからは間違いなく低消費電力や低コストでの製造は重要になってくると考えています。

また、これまでの機械学習AIに比べて生成AIのようなAIは、計算インセンティブによりアーキテクチャのバランスが変わり、アーキテクチャそのものも変わってきています。ここでは、私たちはこうした変化の中で、どのようなアーキテクチャをめざすべきなのかについて説明します。

まず、私たちはソリューション・製品、生成AI・基盤モデル、計算基盤、そしてそれを動かすためのAIチップの制作など、垂直統合型で4階層の技術をつくっています。取り組みの理由として、生成AIや基盤モデルはポテンシャルが分からない部分が多くあり、さまざまなレイヤを研究開発して機動力よくそのポテンシャルを突き詰めていくフェーズだと考えており、4階層をバランスよく研究開発しています(図5)。

そして、先ほど松尾フェローから話がありましたように、現代では消費電力が非常に大きな問題になっています。最先端AIシステムに求められる計算力は指数関数的に上がり、世界最高性能のスーパーコンピュータの計算能力を遥かに超える状況になっています。AIのポテンシャルが高くなる反面で、消費電力やコストも上がり、高度なAIを使うことでエネルギーは低減できても、それを上回る大量の電力を使用するという矛盾を抱えている状況です。AIを研究する者としては、この消費電力をいかに減らすかということも非常に重要です。その打開策として、私たちは2016～2019年に「MN-Core」という専用AIチップを開発し、2020～2023年にはバージョン2を発表しました。

そもそもなぜAIチップを開発したのかというと、AIに使用されるGPUの不足が当時から問題で、出荷量が10万あったとしても不足していました。そして、AIにとって計算力や消費電力が大切な生命線であり、この生命線をいかに確保するのが非常に重要な課題でした。この心臓部分を確保するため、自分たちで開発を始めました。

省電力化の方法としては、トランジスタの多くの部分を演算器とSRAM (Static Random Access Memory) と呼ばれる

オンチップメモリで占めて、制御回路は最小限にしてソフトウェアに任せることにより、大幅な電力の低減に成功しました(図6)。

現在はこれを社内で使用しており、推論であれば軽い部分であっても、学習の部分は非常に重いといったように、このアンバランスさが性能に大きな影響を与えてしまうことが分かり、アーキテクチャを工夫することによって性能を確保しつつ低消費電力で、低価格なプロセッサをつくれると考えています。現在は第3世代、第4世代の開発に着手しており、2026年からは販売を予定しています。

それに加えて、MN-Coreのソフトウェアに関してはコンパイル(プログラミングコードを機械語に翻訳変換すること)にも注力しており、開発においてソフトウェアとハードウェアをうまく融合させることで、対応するAIモデルの数を日々増やしています。さらに、それに対して高度な解析・最適化を行うことにより、新しいモデルへの対応を日々生み出しています。

少し前の話になりますが、私たちが開発したものが、同じプロセスルールにおける「コンピュータランキング」の世界1位を計3回獲得できました。非常にエキセントリックなアーキテクチャなのですが、ソフ



図5 垂直統合型のビジネスで4階層のビジネススタイル

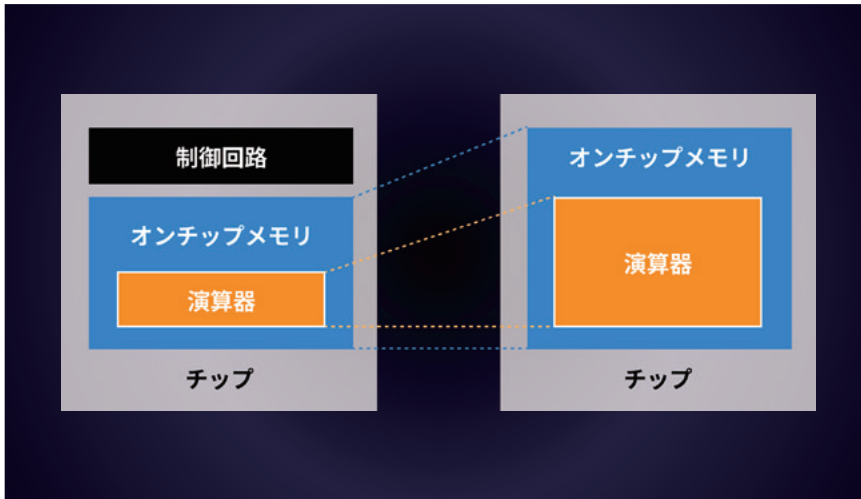


図6 従来のGPUとMN-Core

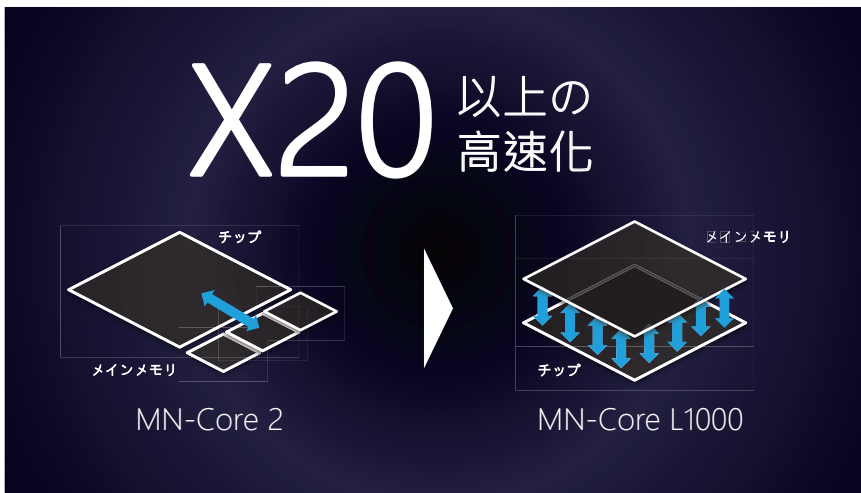


図7 AI推論特化したMN-Core L1000

トウェアとハードウェアの融合を工夫することにより、使いやすさとコストパフォーマンスを兼ね備えた「新しいアーキテクチャ」であると証明できたと思います。

今後のロードマップでは、アーキテクチャの仕様が大きく異なる「推論」と「学習」を2つに分けて、それぞれに最適なアーキテクチャの実現をめざしています。例えば推論はほとんど演算を使わず、メモリやインターコネクトなどを多用するため、光電融合のような高速で低消費電力な仕組みが必要です。こういったものを組み合わせていくことにより、より優れたアーキテクチャを実現し、今後特にLLM (Large Language Models) をはじめとするチップの世界の発展にさまざまな側面から寄与していくの

ではないかと思っています。

このように、現在はパッケージングをはじめとする新しい技術を用いて、柔軟かつ用途に応じた適切なプロセッサづくりに取り組んでいます (図7)。

スーパーコンピュータ的な大型の計算機は複雑なエコシステムにより形成されるのですが、日本の中で優れたエコシステムを構築し、どんどん新しい技術を取り込みながら成長させていくことが重要だと考えています。

これからは「計算機をスケールする技術」もますます重要になります。もちろんLLMにおける計算機のスケールも重要ですが、LLMだけでAIの世界が終わるわけではありません。計算機の高速化によってできる

ことが増えてきており、それを実現するためには高効率のAIチップとインターコネクトやチップレットをはじめとするさまざまなエコシステムや技術のインテグレーションが必要だと考えています。

ディスカッション

■MN-Coreをつくるまでの経緯

松尾：演算に使う電力が圧迫されてくる中で、不要なものを外に出し、ソフトウェアで制御して演算にスペースを与える、という考えに非常に感銘を受けました。私の知っている限り、Preferred Networksは検索エンジンやAIを開発していたと思うのですが、MN-Coreの開発が重要だと考えた経緯をもう少し詳しく聞かせてください。

西川：2016年当時、日本ではGPUの入手が非常に困難で、私たちは何とか1024枚のGPUを購入できたのですが、入手するまでの交渉は非常に厳しいものでした。日本でもアーキテクチャを研究開発・販売する企業はありましたが、ソフトウェアで弱い部分があるためGPUを代替できるものではなく、このままではいずれGPUが手に入らなくなると思いました。さらに、ディープラーニングの中でも私たちが理想とするワークロード (コンピュータにかかる処理負荷の大きさ) を実現する目標がありましたので、それならば自分たちの理想とするアーキテクチャを自分たちでつくろうという流れになりました。それに加えて、私がハードウェアをつくることに魅力を感じていたことも大きいと思います。大学時代、ハードウェアが専門の指導教官の研究室にいたのですが、その先生は当時スーパーコンピュータが1000億円かかる時代に「20億円で低消費電力のプロセッサをつくるぞ」と話をされていたことが私の中では衝撃でした。結果的に、所望の性能を出すのは難しかったのですが、かなり良い性能を出せました。このような流れの中で、スーパーコンピュータをつくることはとても面白いことだと感じて、この世界に入り、こうした流れの中でMN-Coreの開発につながったと思います。

松尾：スーパーコンピュータをつくるなど、ハードウェアをつくるときは設計がとても重要になります。Preferred Networksはソフトウェアの研究者が多いと思いますが、ハードウェアの研究をどう加速していくのか、人を集め社会的に成果を出していく際に心掛けていることはありますか。

西川：現在ハードウェアを開発しているメンバーは80人ほどおり、どれだけ入念に検証するか、ということに注力しています。ハードウェアのテストベクタ（設計内容を評価するデータ）やテストケースを書くときもいろいろなパターンを試行錯誤し、できる限りバグによるトラブルが発生しないようにしています。もし、バグが発生したとしてもどうやってそれを修復してトラブルを防ぐかというワークアラウンドに力を入れています。

■未来のスーパーコンピュータとAI

松尾：メモリ不足の問題では、メモリとCPUを3Dで積層して、通信のエネルギーや速度帯域を上げる話をされてきました。先ほどNTTのディスアグリゲータッドコンピューティングについて話をしましたが、データセンタ全体を使用したコンピューティングはAIで使えるものがあるのでしょうか。

西川：データセンタ自体の性能を上げていくことはもちろん、スーパーコンピュータの設計にAIを活用することも重要だと思っています。スーパーコンピュータは非常に複雑なシステムで、その複雑さは今後増していくといわれています。その複雑化したスーパーコンピュータを安定して動かすためには正確な設計が大事で、それを人間が行うのは非常に難しいことです。そこでAIの活用が期待でき、これからはAIと人がどのように協調してコンピュータをつくるのかというプロセスを構築することが重要だと思っています。

松尾：AIがあまりに膨大に設計してしまい、その正誤判定や検証を人間が行うのも難しく、AIに判断を任せると間違ったものを正しいと判断する可能性もあります。この対策はどうするのでしょうか。

西川：私も同じ問題意識を持っています。この対応については、正誤判定や検証にAIを活用するためには、最初は小さな回路か

ら順に育て、ノウハウを積み上げることが必要です。今後はコンピュータがコンピュータを設計するという流れになると考えています。そこでは、人間にできること・できないことを、切り分けなければなりません。最初はその切り分け自体が職人芸になると思います。それをうまく使いこなして新しい設計手法を見出していくことが、新たな半導体をつくるうえで非常に重要であり、ほかにも複雑化するパッケージングの階層や、排熱の難度が高くなり、また、半導体のレイヤどうしのインテグレーションなど、人間では難しいことがたくさん出てくると思いますが、そこまで踏み込んで設計することで「日本にしか出せない価値」があると考えています。逆にいえばそこまでいかないと、日本でも半導体をつくる際の、勝ちシナリオを見つけるのは難しいと思います。

松尾：ディスアグリゲータッドコンピューティングにも関するところですが、私たちの今の課題は、コンパクトなLLMと大きなLLMでは、ボードのつなぎ方で必要なアーキテクチャが異なるということです。臨機応変に使えるアーキテクチャがなければ、将来のスーパーコンピュータを効率的に動かすことができないと思います。そこでMN-Coreのつくり方についても伺いたいのですが、1個で全部の計算をするのか、それとも何個もつないで計算するのでしょうか。

西川：MN-Coreのバージョン1は4つの台をつなげ、バージョン2は1つの台になり、現在のバージョン3は密度を高める方向に移っています。そして、推論と学習を分けることで、効率良く動けて容積的にも短く小さくすることが重要で、これにより効率的な推論に本当に必要な演算量は10分の1とか20分の1くらいまで下がります。工夫しながら小型化・効率化をめざしています。また、電力の供給だけではなく排熱も重要なため、シミュレーションを駆使して排熱と電力消費のバランスを考えながら研究開発を進めています。

会場へのメッセージ

■AIで省エネができる世界をめざす

松尾：ハードウェアの研究は当たり、はずれが多いため手探りの状態になりやすく、そのため結果に向けて一生懸命やるのはとても大変なことです。私たちは世の中に役立たせるため、パートナー企業とともに非常に苦勞して進めていますが、NTTの研究所は公共的な部分を求められるところがあるので、地球全体、社会全体を考える必要があります。エネルギー消費についても、極端な話をすると、インターネットを使わなければエネルギーを消費せずに地球に優しくなれるのですが、ただそれだけの話に終始してしまい非現実的です。そこを打ち破れるのがAIだと思っています。現在はAIのエネルギー消費が問題視されていますが、これからはNTTやPreferred Networksの技術を使い、AIで省エネルギー化ができる世界をめざすことが大事だと思います。また、AIはデバイスなど設計分野以外にも活用できると考えています。例えば工場のライン管理などでも活用でき、AIがモニタを監視して何かあればアラームを出して修正する、などサステナブルな工場ができ、それにより消費電力抑制にもつながるのではないかと、といったようなAIの可能性も広がるのではないかと思います。

西川：ハードウェアとソフトウェアの合わせ技、そのバランスがスーパーコンピュータにおいてますます重要になると思います。私たちはよく「何をしている会社なのか」と聞かれるのですが、ハードウェアとソフトウェアをバランスよく融合させることで起こせるイノベーションをめざしています。そのためには両方研究していなければいけません。AIによる自動化もいずれ鈍化するかもしれませんが、一方でエンタテインメントや新しいデバイスなど、低消費電力で新しい素材を使ったエッジデバイスの世界観は、これからも生まれ続けると思います。また、ハイブリッドで人々を豊かにしていく会社はほとんど日本にはないとも思われる中で、NTTの取り組みは非常に素晴らしいもので、とても感銘を受けています。

カーボンニュートラル実現への道 ——再生可能エネルギー普及拡大 に向けて

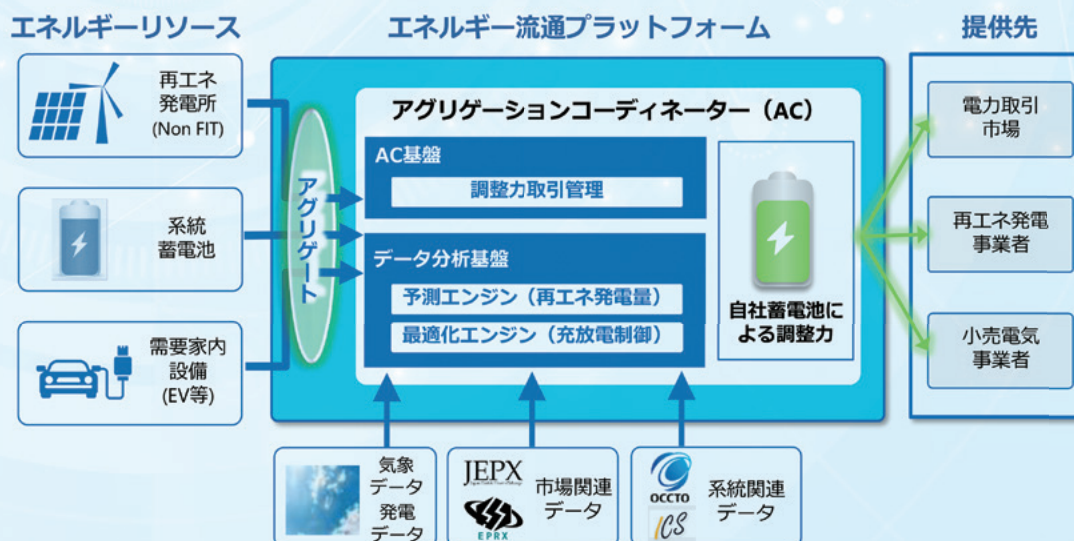
NTTアノードエナジーは、温室効果ガス排出量削減による環境負荷の低減や電力の安定供給の実現など、環境・エネルギーに関する社会課題の解決に向けて取り組んでいる。本特集ではNTTアノードエナジーの各種取り組みを紹介する。

エネルギー流通の革新

蓄電池を活用したアグリゲーションへの挑戦

22

カーボンニュートラルの実現に向けた取り組みの1つとして、一連のエネルギー流通のうち「蓄え」「調整」の役割を担う、蓄電池などを活用したアグリゲーション事業について紹介する。



カーボンニュートラル

蓄電池

アグリゲーション

再生可能エネルギー

水素利活用技術


 NTT G×Inno

特集

エネルギーグリーン化のための 新たな電力流通モデル「Internet of Grid プラットフォーム」 — 27

再生可能エネルギーのさらなる拡大をめざし開発した、分散型電源に適應した電力流通モデル「Internet of Grid (IoG) プラットフォーム」の開発経緯と今後の展望について紹介する。

NTTが創る水素パイプラインによる 街区供給モデルの確立に向けた取り組み — 31

水素パイプライン網整備、無付臭による新たな安全技術の確立、安全性に関する科学的根拠の積上げ等、さまざまな水素事業の発展・実用化に向けた取り組みについて紹介する。



エネルギー流通の革新 蓄電池を活用したアグリゲーションへの挑戦

太陽光や風力等、発電量が天候に左右される再生可能エネルギー（再エネ）を主力電源化していくため、近年蓄電池の役割がますます注目されています。NTTアノードエナジーでは、カーボンニュートラル実現に向けた取り組みの1つとして、蓄電池を複数束ねて制御するアグリゲーションと呼ばれる取り組みを進め、再エネの普及拡大や電力需給バランスの維持に貢献することをめざしています。

キーワード：#カーボンニュートラル、#蓄電池、#アグリゲーション

なかやま たつき
中山 達貴
やすやま のぶき
安山 信基

NTTアノードエナジー

NTTアノードエナジーの ミッション

地球規模の課題の1つである気候変動への対応として、昨今カーボンニュートラル実現に向けた動きが加速しています。2020年10月、政府は2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラル実現を宣言し、国を挙げてエネルギー・産業部門の構造転換、積極的な投資によるイノベーションの創出を推進しています。NTTグループとしても、2021年9月に環境エネルギービジョン「NTT Green Innovation toward 2040」を策定し、2040年度カーボンニュートラル実現をめざしています。

NTTアノードエナジーは、NTTグループの環境エネルギービジョンの達成と環境・エネルギーに関する社会課題解決への貢献を目的として、電力を創り、蓄え、調整し、届け、使う、といった一連のバリューチェーンを「エネルギー流通」と定義し、これらを一気通貫でサービス提供することを事業の柱としています。本稿ではこのうち、「蓄え」「調整」に焦点をあて、当社の取り組みの1つである蓄電池等を活用したアグリゲーション事業について紹介します。

カーボンニュートラル実現に向けた 課題とアグリゲーションの目的

2021年10月に政府が策定した第6次エネルギー基本計画の中で、2019年に日本の発電量の18%程度であった再生可能エネルギー（再エネ）を2030年度に36～38%と

倍に増やす野心的な目標を設定しています。再エネには、太陽光、風力、水力、地熱、バイオマス等の種類がありますが、太陽光や風力等の再エネは気象現象と密接に関係する資源を利用するため、発電量が天候に左右される特徴があります。

ここで押さえておくべきポイントが、電力の安定供給を実現するための「同時同量」の考え方です。同時同量とは、電力を創る量（供給量）と消費する量（需要量）をリアルタイムで一致させることを指しています。このバランスが崩れると、電力系統は不安定となり、最悪の場合、大規模停電につながるおそれがあります（図1）。電力の需要と供給のバランス（需給バランス）を維持するため、従来は化石燃料を活用した火力発電等が、変動する需要に合わせて供給量を調整する役割を担っていましたが、今後、火力発電設備の老朽化に伴う廃止とそれに代わる再エネの主力電源化が進むことで、従来火力発電が担っていた調整機能の代替手段が必要となってきます。

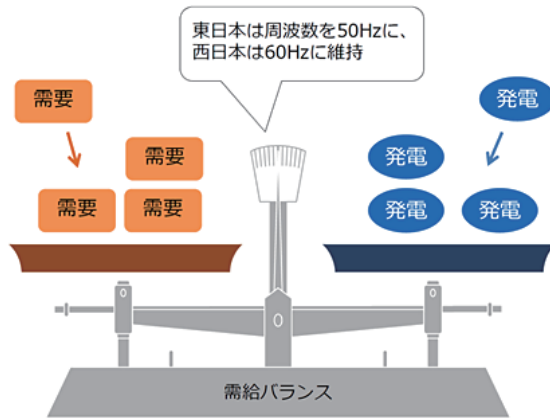
近年の電力需給の構造は、昼間は太陽光発電による電力供給量が過剰となり、日射量が減少する夕方以降は太陽光発電量の急激な減少と照明点灯等により電力需要が増加することで供給量が不足する傾向にあります（図2）。これに伴い、電力量を取引する卸電力市場の市場価格は、電力需給に連動し、昼間は安く、夕方以降は高くなる傾向がみられます。需給バランスの不一致により市場価格は乱高下する場合もあり、エネネット^{*1}をはじめとする小売電気事業者の経営にも大きな影響を与えています。

また、九州エリアなど再エネ導入が進ん

でいるエリアでは、春や秋などの冷暖房需要が少なく電力消費量が小さい時期において、天気の良い昼間における太陽光発電の影響により電力供給量が過剰となるケースが増えています。このようなときに電力会社を実施するのが、需給バランスを調整するための再エネ発電出力を制限する措置（出力制御）です。再エネ増加に伴い、ここ数年で出力制御は九州のみならずほかのエリアでも増加し始めており、再エネ発電所は発電できる能力があるにもかかわらず強制的に発電量を減らす、または発電所の稼働を停止させている状況です。

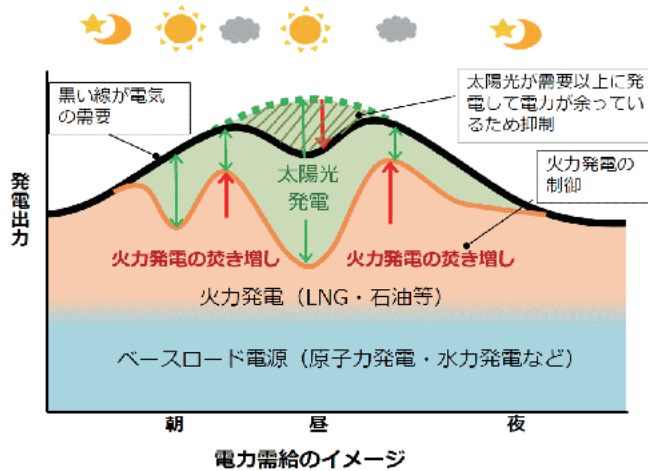
このような課題を解決するカギとなる技術の1つとして最近注目を集めているのが蓄電池です。蓄電池は電力を溜めて（充電して）、必要な時間に供給する（放電すること）ができます。例えば、太陽光が余剰する昼間の電力を夕方以降にタイムシフトする役割や、季節・時刻や天候に起因する太陽光発電の出力変動による電力系統の需給バランスの乱れを蓄電池の充放電により調整する役割が期待できます。この蓄電池を束ねて制御し、大きな調整力として提供する取り組みをアグリゲーションと呼称し、当社ではこのアグリゲーション事業拡大に向けて、システム開発や蓄電池評価を含めさまざまな取り組みを進めています。以降、本稿では蓄電池の設置場所によって、調整力アグリゲーション（系統に直接接続するもの：調整力アグリ）、再エネアグリゲーション（再エネに併設するもの：再エネアグリ）、

*1 エネネット：NTTアノードエナジーのグループ会社である小売電気事業者。



出典：資源エネルギー庁，“出力制御について，”
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/grid/08_syutyuyokuseigy.html

図1 需給バランスのイメージ



出典：資源エネルギー庁，“再エネの大量導入に向けて～「系統制約」問題と対策，”
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/saiene/keitouseiyaku.html>

図2 電力需給のイメージ

需要アグリゲーション（需要家内に設置するもの：需要アグリ）と区分し、需給バランスの調整に活用できる電力のことを総称して「調整力」と呼称することとします。

調整力アグリを取り組み

調整力アグリで用いる蓄電池は、電力系統と直接接続して設置します（系統蓄電池）（図3）。系統蓄電池では電力そのものを取引する卸電力市場や、電力を調整する能力を取引する需給調整市場といった電力市場を活用し、蓄電池による収益確保を図るとともに、需給バランスの維持に貢献します。

電力の供給力が不足している時間帯は、市場価格も高くなる傾向にあるため、その時間帯を精度良く予測することが事業性向上のカギとなってきます。

当社の具体的な取り組みとして、沖縄を除く9つの電力会社各エリアに系統蓄電池2システムずつ構築を進めています。電力市場はエリアごとに特性が異なるため、2システムを同時に異なる条件で応札し、応札者のみ知り得る各エリアの落札結果を日々分析・学習させることで、市場取引に関するデータを蓄積し、予測や運用に反映していくねらいがあります。

系統蓄電池に溜めた電力は複数の電力市

場*2で取引ができるため、収益性向上の観点からどの市場に、いつ、いくらで取引するか、限られた時間の中で最適な取引計画を判断できるよう、システム・人の判断力強化の両面からアプローチをしています。今後は自社開発に限らず、お客さまが開発した系統蓄電池の電力を当社が買い取りつつ、蓄電池運用を受託するモデルを検討中です。

なお、現行制度では、再エネ発電所と系統蓄電池は別敷地にあるため、系統蓄電池に充電した電力には再エネ電力としての価値（非化石価値）が認められていません。系統蓄電池の価値をさらに高めるためにも、制度変更に向けた活動を進めています。三菱商事、九州電力とともに共同で構築した田川蓄電所（福岡県田川郡香春町）において、出力制御量の低減に向けた再エネ発電量と蓄電池充電量との遠隔地での同時同量達成のトライアルも実施しています。

再エネアグリを取り組み

再エネアグリで用いる蓄電池は、再エネ発電所に隣接して設置（併設蓄電池）し、主に年々増加する出力制御の回避に活用します。出力制御指示時は再エネ発電を併設蓄電池に充電し、出力制御解除時に系統へ放電することで、発電した再エネ電力を有効活用します。

再エネアグリにおける蓄電池の投資回収にはFIP（Feed-in Premium）制度を活用します。日本において、当時まだそれほど普及していなかった再エネの普及拡大を促すきっかけを作ったのは、2012年に国が定めたFIT（Feed-in Tariff）制度です。FIT制度は、発電した電力を国が20年間固定価格で買い取る制度です。この固定価格で買い取るための原資は国民負担となっており、また発電事業者が同時同量の責務を負わない仕組みであることから、FIT期間終了後の発電所の事業継続に課題を抱えています。

*2 複数の電力市場：蓄電池が取引できる市場は、電力量（kWh）を取引する卸電力市場だけではなく、将来の電気の供給力（kW）を取引する容量市場、一般送配電事業者が周波数制御・需給バランス調整に必要な調整力（ΔkW）を取引する需給調整市場などがあります。

国は、国民負担の軽減と再生可能エネルギー発電事業者の自立化をめざし、2022年にFIT制度に代わる新たな仕組みであるFIP制度を導入し、FITからFIPへの転換を促しています。FIPは主に価格変動する市場収入とFIPプレミアム収入の2つが収入源となります。特に、FIPプレミアムは市場の最低価格である0.01円の時間帯には付与されないことから、出力制御が発生していない場合にも、市場価格0.01円の時間帯の電力を充電し、その他の時間帯にタイムシフトすることにより、FIT制度での収入以上の売電収入を得られる仕組みとなっています(図4)。このため再生可能エネルギーでは、天候に左右される再生可能エネルギーの発電量と、市場価格特に0.01円の時間帯を的確に予測することが事業性向上のカギとなってきます。

当社の具体的な取り組みとして、まずは出力制御指示がもっとも多く発令されている九州エリアの自社のFIT発電所3カ所に

蓄電池を設置し、FIP転換を進めています。そこで得られた知見、ノウハウを活用し、同様の課題を抱える他の発電事業者へのサービス提供も進めていく予定です。また現状、蓄電池の投資回収が見込めるエリアは九州エリアに限定されていますが、蓄電池価格の低下や他のエリアでの再生可能エネルギー増加に伴う出力制御の増加、市場価格0.01円時間帯の増加が進むことで、他のエリアへの展開も可能となる見込みです。

この併設蓄電池の取り組みは、FIP発電所に蓄電池を設置して収益の増加を狙うだけでなくとどまらず、再生可能エネルギー出力の安定化や夜間に不足する再生可能エネルギーを補うためのタイムシフトを通じて、将来の再生可能エネルギーを中心とした電力供給サービスの実現にも寄与すると考えています。

需要アグリを取り組み

需要アグリの対象は、需要家サイドにある制御可能なエネルギー機器(主に電気自動車(EV)やエコキュート、家庭用蓄電池等)です。各家庭やオフィスビル・工場等に分散する膨大な数のエネルギー機器をIoT(Internet of Things)などの情報通信技術で制御し、需要側の消費電力パターンを変化させる(昼間に充電して見かけの需要を増やし、夕方に放電して見かけの需要を減らす)モデルとなります。小売電気事業者の電力調達コストの低減と需要家の電力コスト低減の両立につなげつつ、国の制度動向も注視しながら2026年度以降の電力市場活用による収益化をめざしています。

当社の具体的な取り組みとして、まずはドコモでんきユーザを対象とした実証を2024年8月から開始しています。ドコモでんきユーザが保有する家庭用蓄電池を遠隔制御する際の技術的な確認を主な実証目的とし、制御技術や運用ノウハウを蓄積しています。

需要アグリ課題は、エネルギー機器の本来用途への考慮が必要な点です。系統・併設蓄電池はアグリケーション事業の目的で設置されたものに対して、需要アグリで制御するEVやエコキュートは、移動やお湯を使うなどの本来の用途があります。例えば、EVに乗車したいタイミングで十分な充電ができていない、またはお風呂等で湯切れが発生していた場合には、利用者にとって不都合が生じます。こうした利用者への快適性や利便性の確保だけでなく、工

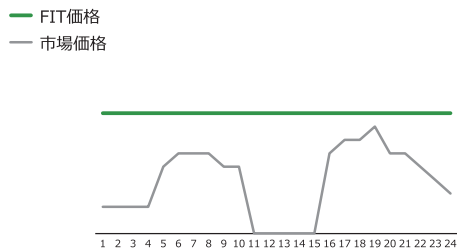


図3 系統蓄電池の一例(NTTアノードエナジー 和光蓄電所)

FIT制度とFIP制度の買取価格・収入

FIT制度

- 買取価格が固定されており、収入はどの時間帯に発電したとしても一定



FIP制度

- プレミアム(補助額)が一定で、収入は市場価格に連動して変動する(※市場価格が0.01円/kWhの時間帯はプレミアムが付与されないが、トータルでFITと同等収益)

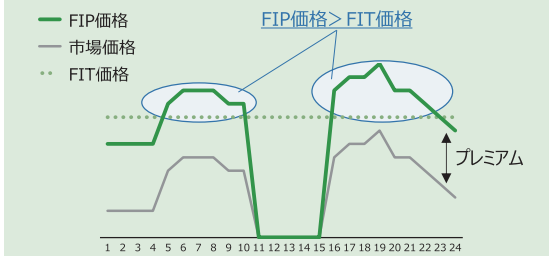
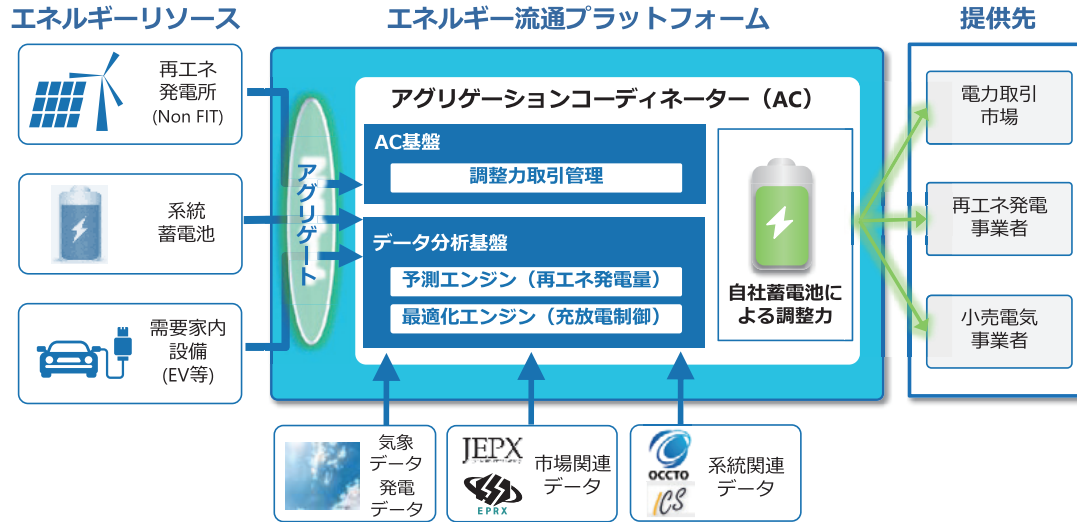


図4 FIP制度の収入イメージ



出典：NTT IR DAY 2023, “NTTグループのスマートエネルギー事業,” より一部, 加筆。

図5 エネルギー流通プラットフォーム イメージ図

エネルギー機器の種類によっても、供出できる電力の継続時間や応動特性が異なります。このため、どのタイミングでどの程度の調整力を生み出せるか、機器の属性や稼働状況等を勘案して適切な組合せで制御することが課題です。また系統・併設蓄電池と比較して、需要アグリ制御対象は1つひとつが小規模のため、相当数確保しないと需給バランスに影響を与えるほどの規模には達しないといった事業面での課題もあります。

今後はパートナー企業との協業を通じて、エネルギー機器の獲得拡大を図るとともに、各機器の特性や状態を考慮したうえで、狙った調整力をつくり出すためのシステム開発も行っていく予定です。

システム開発における取り組み

前述のとおり、これら3つのアグリゲーション事業を推進していくためには、正確な予測技術と効果的な蓄電池充放電制御が必要です。当社ではNTTグループのデータサイエンス技術を活用した「エネルギー流通プラットフォーム」を構築し、蓄電池の充放電、市場取引の最適化・自動化を行っています(図5)。具体的には①太陽光発電量や電力市場価格等の予測エンジン、②蓄電池充放電計画策定を担う最適化エンジン、③市場取引を管理するアグリゲ-

ーションコーディネーター(AC)基盤により構成されます。さらに実際の蓄電池運用を通じたDevOps^{*3}により、さらなる高度化をめざしています。

① 予測エンジン

再生アグリFIP転換を行った際には、前日12時までに翌日分の時間帯ごとの発電計画の提出が必要となります。その計画と実績の差分が発生するとインバランス^{*4}として差分量に応じたペナルティが課されることから、精度の高い発電量予測が求められます。当社の太陽光発電量予測においては、NTTグループが保有する約11万カ所の太陽光発電所からのデータを用いて、全国各地の日射量予測の高精細化を行い、市中の日射量予測よりも誤差の小さいデータを用いて機械学習を行うことで、全国の任意の地点の発電所における高精度な予測を実現しました。

また電力市場価格予測においては、複数の予測モデルのアンサンブル学習^{*5}により卸電力市場価格を予測、需給調整市場価格予測では約定価格に大きな影響を及ぼす募集量に対する応札量の充足・不足予測について誤分類コストを考慮した機械学習^{*6}により実現しています。

② 最適化エンジン

これらの予測情報を用いて、複数電力市場の中から「どのタイミングで」「どの市場のどの商品に」「どれだけの電力量を」

入札することで収益性を最大化できるのか、混合整数線形計画法(数理最適化)により、日々複数回、市場入札計画を策定しています。この計画を入札実行するAC基盤に自動連携することで、数多くの蓄電所を少数のオペレータで同時オペレーションすることを可能としています。また、策定された市場入札計画を確認し、コンソールからオペレータの「意思」を入れて再最適化計算する機能も実装しています。この機能により、日々の蓄電所運用において、稼働中発電所の故障による予期せぬ需給逼迫など電力系統上での突発的なイレギュラー事象の発生や、想定を超える異常気象に伴う各電力市場の動きの変化にも対応可能としながら、人手をかけない仕組みと収益性確保の両立をめざしています。

③ AC基盤

複数の電力市場^{*2}とシステム接続し、自動入札や応札結果取得などの日々の業務を

*3 DevOps: アプリケーション開発チームと運用チームが協力・連携して、迅速で柔軟に開発プロセスを回していく仕組みや考え方のこと。

*4 インバランス: 発電事業者や小売電気事業者が作成した発電計画・需要計画と実際の供給・需要値の差分のこと。

*5 アンサンブル学習: 複数の機械学習モデルを組み合わせて予測性能を高める手法のこと。

*6 誤分類コストを考慮した機械学習: 誤分類時のコストが非対称である場合にコストを最小化することを目的とした学習手法のこと。



図6 EV用リユースLIB

支えるシステムであり、多数の系統・併設蓄電池の管理、市場取引計画に基づく充放電制御を担っています。また需要家サイドのエネルギー機器についても、パートナー企業とのシステム連携を図ることでリソースの拡大をめざします。

蓄電池評価技術における取り組み

アグリゲーション事業においては蓄電池コスト低減や性能評価も重要となってきます。現在、系統・併設蓄電池は主に定置用リチウム電池（LIB）が使用されていますが、価格面や技術的特徴から今後の活用が見込まれる別種類の蓄電池もあります。しかし、そのような蓄電池は導入事例が限られており、性能や運用・保守に関する検証が必要です。そこで、実環境で蓄電池の実機評価を行うための実証サイト「NTTアノードエナジー バッテリー・リサーチパーク」を山梨県北杜市に構築しました。

検証の第一弾として、EVに搭載されていたLIB（EV用LIB）を再利用した蓄電池を導入し、2024年10月より運用評価を行っています（図6）。EV用LIBは一般的に定置用LIBよりも廉価とされ、さらにEV普

及に伴い使用済みEV用LIBの流通量の増加が見込まれることから、価格低減やサーキュラーエコノミーの観点から有効と考えています。他方、EV用リユースLIBは使用履歴が不明なことが多く、寿命や安全性が不透明な状況です。そこで、性能にばらつきなく安定した充放電サイクルを繰り返すことができるのか、経年や型式が異なる蓄電池を組み合わせる充放電サイクルができるのか等を検証しています。

検証第二弾として、レドックスフロー電池の導入を2024年11月より進めています。この電池は、長寿命（劣化が非常に少なく電解液はリユース可能）、高い安全性（電解液は水溶液で不燃、危険物は不使用）などの特長を持っています。また、LIBと比較して大容量（数10 MWh級）や長時間放電（5～8時間以上）のケースでコスト優位性があるとされています。今後も新たな蓄電池評価や太陽光と組み合わせた運用検証等を行い、アグリゲーション事業の技術進化に取り組んでいきます。

構築・保守に関するサービス展開

当社では、これまでNTTの通信サービスや太陽光発電所の構築・保守で培ってきたエンジニアリング力を活かし、自社で資産保有する系統・併設蓄電池の構築・保守の内製化と、お客さまが資産保有する蓄電池へのサービス展開を検討しています。当社の強みは、設計・調達・監理・保守・資格者（主任技術者・施工管理技士）機能をワンストップで提供でき、全国拠点と24時間365日の監視体制を保有していることだと考えています。今後、国内の蓄電池導入は加速し、蓄電池の構築・保守のお客さまニーズも高まると期待されることから、エンジニアリング面でのカーボンニュートラル実現にも貢献していきます。

制度面での動向

国においても、再エネ普及拡大に向けて蓄電池導入を推進するさまざまな施策を展開しています。蓄電池投資の固定費を補填する長期脱炭素電源オークション（2023年度開設）、出力制御をFITからFIP電源の順とする制度変更（優先給電ルール見直し）

によるFIP優遇措置、家庭用蓄電池等小規模の調整可能な低圧リソースを束ねての需給調整市場への参入緩和（2026年度以降予定）はその施策例です。また近年、再エネ発電による環境価値の発生タイミングと電力消費のタイミングを1時間単位で一致させるHourly Matchingの考え方にも海外では注目され始めています。国の施策動向も見据え、将来的なGHGプロトコル^{*7}の改訂も注視しながら、再エネを中心とした電力供給モデルへの転換時に必要な調整力の確保を進めていきます。

NTTアノードエナジーがめざすビジョン

NTTアノードエナジーでは、社員が一体感を持ってエネルギー流通ビジネスに取り組めるよう、2023年1月に経営の羅針盤となるAnode Way（パーパス・ビジョン等）を策定しました。その中で、当社が将来ありたい姿（ビジョン）として、「カーボンニュートラルを実現するエネルギー流通のリーディングカンパニーになる」という目標を掲げています。この蓄電池を活用したアグリゲーションの取り組みが将来のカーボンニュートラル実現の中核になると考え、エネルギー流通のリーディングカンパニーになるための挑戦をこれからも続けていきます。



（左から）安山 信基 / 中山 達貴

NTTアノードエナジーでは、電力を創り、蓄え、調整し、届け、使う、といった一連のバリューチェーンを通じて、カーボンニュートラル実現に向けて日々邁進しています。蓄電池を活用したアグリゲーションは、その中でも将来の再エネを中心とした社会を支える重要な取り組みの1つになると期待しています。

◆問い合わせ先

NTTアノードエナジー
経営企画部 広報室
TEL 03-5444-2442

* 7 GHGプロトコル：温室効果ガス排出量の算定・報告をする際に用いられる国際的な基準。

エネルギーグリーン化のための新たな電力流通モデル 「Internet of Grid プラットフォーム」

NTTアノードエナジーは、カーボンニュートラルの達成には再生可能エネルギーのさらなる拡大が必要不可欠と考えています。しかし、現在の送配電網は大規模発電所からの電力供給を前提にしており、太陽光発電等の分散型電源に適したものにはなっておらず、これらの課題を解決するために、新たな電力流通モデル「Internet of Grid (IoG) プラットフォーム」を開発しました。本稿では、IoGプラットフォームの開発経緯ならびに今後の展望について紹介します。

キーワード：#IoG, #再生可能エネルギー, #カーボンニュートラル

ながい すぐる
 永井 卓
 やまざわ たかのり
 山際 孝典

NTTアノードエナジー

はじめに

NTTグループでは、日本全国に通信局舎があり、停電時でも通信事業を継続するために蓄電池を保有しています。

また、NTTでは新たな環境エネルギービジョン「NTT Green Innovation toward 2040」を発表し、2040年度までにカーボンニュートラルの実現をめざしています。

このような中で、NTTアノードエナジーは2019年6月に設立され、NTT通信局舎の蓄電池等を活用し、再生可能エネルギー（再エネ）拡大に向けた取り組みを展開しています。

近年、これまでの再エネの主力であったウインドファーム（集合型風力発電）やメガソーラー（大規模太陽光発電システム）等は開発ポテンシャルが少なくなってきており、これからは中小規模の太陽光発電等の増加が見込まれます。

一方で、現在の一般送配電事業者が運用する配電システムにおいては、これら中小規模太陽光発電等がシステムに接続できないケースが増えてきており、課題となっています。

そこで、NTTアノードエナジーではこの課題解決に資する新たな電力流通モデルである「Internet of Grid (IoG) プラットフォーム」を開発しました。

開発の背景

現在の送配電網は、火力発電所などの大規模発電所からの電力供給を前提としているため、各家庭へ供給するまでの間、段階的に電力流通設備の容量が小さくなって

ます。そのため、特に電力流通設備の容量が小さい配電システムに導入される各家庭や、地域の太陽光発電や風力発電等の再エネを増やし、利用していくためには、天候や時間帯で変化する電力システムの潮流把握や、再エネの増加に伴う電圧上昇や設備容量の増強等が必要となり、これらの解決が喫緊の課題となっています。これらの課題解決を図るために、新たな電力流通モデルを実現するIoGプラットフォームの検討をすることとなりました。

再エネ導入拡大に関する課題と対処方針

既存の配電網は、発電所から需要家等に向けて電力流通設備の容量が小さくなるように設計されており、容量の小さい需要家付近の末端システムに再エネが接続されることは想定していませんでした。このため、電力流通設備の容量不足により、中小規模の太陽光等の再エネの末端システムへの導入ができないケースが発生してきており、再エネの導入拡大にあたっての大きな課題となっています。

本事象への対処方法としては、まずは再エネを最適に導入できるように、配電網および配電所をつくり変えることが考えられます。しかしながら、この方法は莫大な規模の投資が必要であり、その実現は極めて困難であると考えています。

その他の対処方法としては、既存の配電網を最大限有効活用しつつ、接続する再エネを増やすという方法が考えられます。この実現にあたっては、配電網の電流や電圧

等の潮流データ把握が必要となります。現在の配電網ではこれら潮流データが正確に把握できないため、いつ・どの程度の電力が供給、または発電されるか不明であり、電力システムの電圧上昇や電流増加のリスクを回避するために再エネの系統連系ができないケースが増加しています。

そのため、スマートメーターで潮流データを把握、分析し、電流増加や電圧上昇時に蓄電池制御することを一体的に行う、これまでになかった新たな電力流通モデルであるIoGプラットフォームを開発しました。IoGプラットフォームにより、既存の電力インフラに通信を融合させ、既存の配電網を最大限有効活用しつつ、接続する再エネを増やすことができるインフラへアップデートすることが可能となります。

IoGプラットフォームの構成

IoGプラットフォームは、スマートメーター、潮流マネジメントシステムと蓄電池で構成されており、主な役割は以下のとおりです（図1）。

(1) スマートメーター

従来のスマートメーターは、電力使用量を計量することが主な役割でしたが、今回製作したIoGプラットフォームのスマートメーターは電力使用量に加え、電流や電圧等の潮流データを計測します。これらのデータを潮流マネジメントシステムへ送信し、配電網内の潮流把握のために使用します。

また、スマートメーター内にサービス基盤を設け、さまざまなサービスのハブとして活用できるマルチユースを可能とする仕

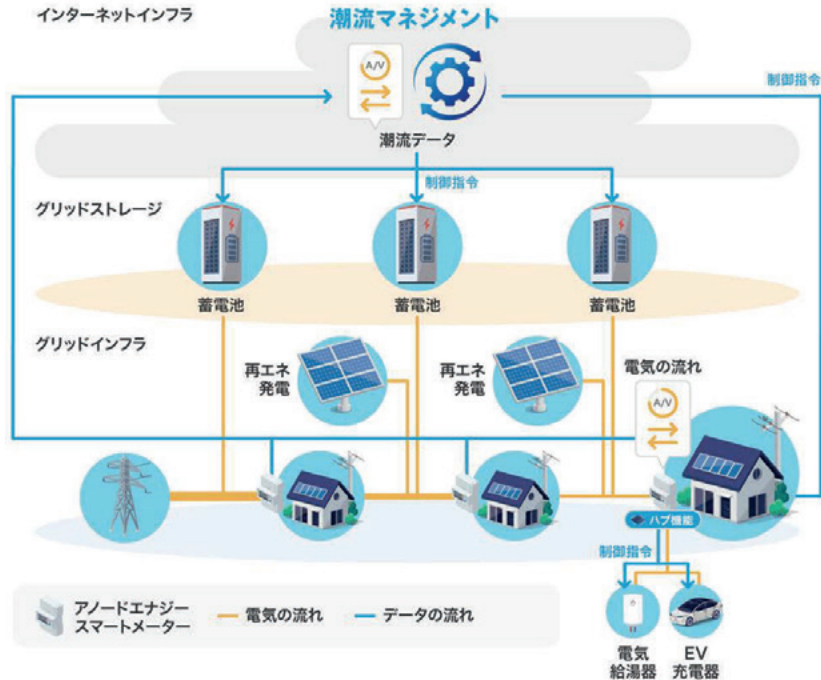


図1 IoTプラットフォームの構成イメージ

組みを持っています。

(2) 潮流マネジメントシステム

潮流マネジメントシステムは、IoTプラットフォームの司令塔として機能します。スマートメーターからの潮流データを把握、分析し、設備許容値を逸脱しないかを監視するとともに、蓄電池へ充電指示を行い、システム安定化を実現します。

(3) 蓄電池

配電システムの電流や電圧が設備許容値を上回ることが予見された場合、潮流マネジメントより指示を受け、充電を行います。

また、この蓄電池は充電した電気を市場取引に活用したり、災害時や大規模な停電の際に災害避難施設等に電力を供給したりする等マルチユースを可能とする仕組みを持っています。

IoTプラットフォームによる再生エネルギー導入促進効果

晴れた日の昼間は、太陽光再生エネルギーの発電量が増え、配電システムに逆潮流する電力量が多くなるため、配電システム内において電圧上昇や電流の増加が発生します。

電圧を例にすると、配電システム内において低圧は101Vの上下6Vを超えないように法律で定められています。そのため、現在

の配電システムでは電圧が上昇した場合、この範囲に収まるよう電圧を調整する必要がありますが、一般送配電事業者が管理する既存の配電システムでは電流や電圧といった潮流データが把握できていないため、これ以上発電を行わないように再生エネルギーの系統連系回避や出力抑制を行うこととなります。

IoTプラットフォーム導入後の配電システムでは、電圧や電流といった潮流を測定し、潮流マネジメントシステムにて可視化を行い配電システム内の状況を監視します。また、測定された潮流データにより設備許容値逸脱の可能性が予見された場合、蓄電池への充電指示を行い、電圧上昇や電流増加を抑制します。この取り組みによって再生エネルギーの発電量増加が可能となります(図2)。

他エネルギーソリューションとの違い

これまでの主なエネルギーソリューションであるDR(Demand Response)やVPP(Virtual Power Plant)は、再生エネルギーを含めた電力供給量と需要量を一致させることを主な目的として、発電や電力使用量の抑制等、再生エネルギー事業者や需要家への制約を前提としたソリューションです。

一方、IoTプラットフォームはこれら再

エネルギー事業者や需要家への制約をなるべくなくして、最大限再生エネルギーを配電システムにつなげられるように、配電インフラのアップデートを目的としたソリューションであり、この点が最大の違いです(図3)。

蓄電池のマルチユースについて

IoTプラットフォームの蓄電池については、前述の電流増加や電圧上昇対策に加え、夜間においては充電した電気を電力市場取引へ活用することが可能です。また、災害発生時においては避難施設等に対して電気を供給する非常時マイクログリッドの調整力としての活用など、マルチユースが可能です。

スマートメーターのマルチユースについて

IoTプラットフォームのスマートメーターについては、潮流データの測定以外にもマルチユースが可能です。スマートメーター内に新たなサービス基盤を搭載し、さまざまなアプリケーションを組み込むことが可能です。さらに、HES(Head End System)に振分け機能を搭載しており、多様なサービスのハブとしての活用を可能

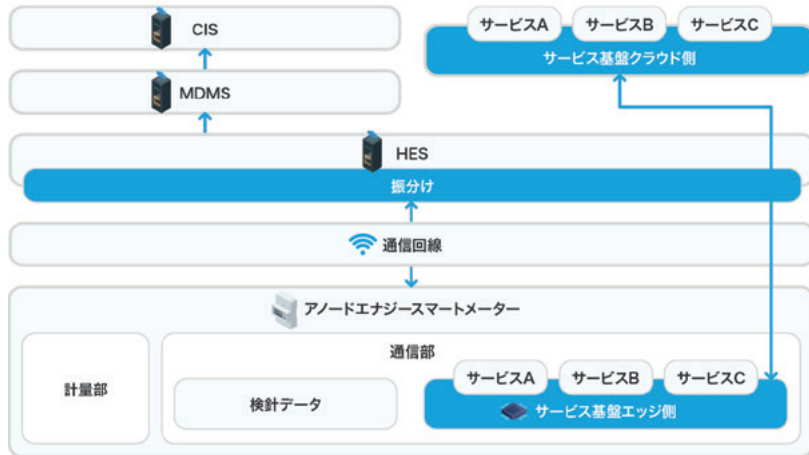


図4 IoTプラットフォームのスマートメーターマルチユースイメージ

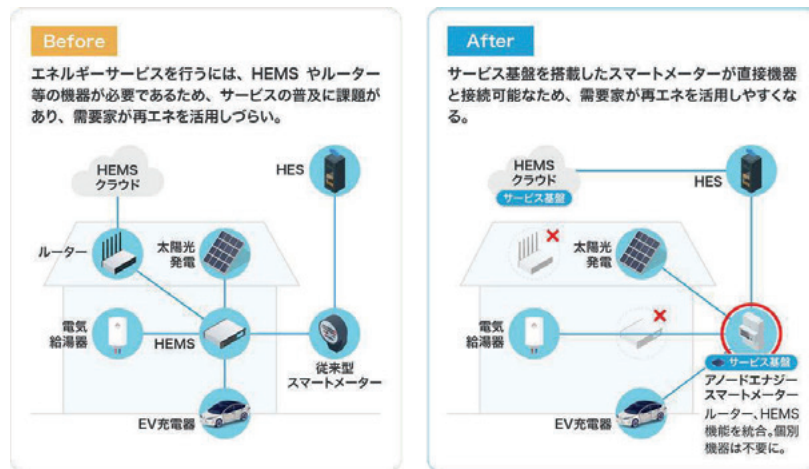


図5 HEMSサービス例

事業者へのIoTプラットフォームのサービス提供に加え、当社自らが配電事業や、特定送配電事業等で活用することを検討していきます。

また、IoTプラットフォームにおけるエネルギーサービスのハブとなるスマートメーターを活用して、前述の電気給湯器やEV充電器等の需要家リソースの監視や制御の実現に向けた取り組みをACCESS社と行うとともに、電力使用監視（デマンド監視）や水道・ガス等の共同検針の実現に向けた取り組みについても大崎電気やNTTテレコンと行います。

将来的には、エネルギーサービスだけでなく、防災情報等の自治体サービスとの連携等に向けた取り組みについても検討を進めます。IoTプラットフォームのスマートメーターには、これらが可能となるよう多様なサービスのハブとして活用できる機能を搭載しており、また、HESに振分け機能

を搭載することで、サービス事業者にとって事業展開しやすい環境を提供します。

おわりに

今後、電力の主要電源が再生エネとなっていくことから、既存の電力流通システムを変革し、より配電分野に設備投資を行っていくなどの投資リバランスを進めていく必要があります。その際に新たなイノベーションやこれらを活用した事業者による取り組みを活性化していくことが望ましいと考えています。

このような観点からも、今回のIoTプラットフォームによる取り組みを進めることは重要であり、IoTプラットフォームの事業を通じて、再生エネのつながりやすい社会をめざすとともに、自治体のレジリエンス強化等の地域貢献にも取り組んでいきます。

また、NTTグループの通信事業と電力は、

電柱や電線等の同じような資産を擁するため、インフラとしての親和性が高いことから、これらの相乗効果についても追求していきたいと考えています。



(左から) 永井 卓 / 山際 孝典

NTTアノードエナジーは、今回紹介したIoTプラットフォームのようにNTTグループの保有するアセットやICTに関する知見を活用し、再生エネのさらなる普及拡大を通じた、持続可能な社会へ貢献できる取り組みを今後も展開していきます。

◆問い合わせ先

NTTアノードエナジー
経営企画部 広報室
TEL 03-5444-2442



NTTが創る水素パイプラインによる 街区供給モデルの確立に向けた取り組み

本稿では、NTTのアセット（設備・人材）等を活用した水素パイプライン網整備の実現に向けた取り組み、無付臭による新たな安全技術の確立に向けた取り組みを紹介し、また、法制度・ルール化に必須となる安全性に関する科学的根拠の積み上げ、グリーン水素の大規模輸送・利活用に向けた調査、ならびにNTT通信ビルや商業施設、大型ビルなどの需要家サイドにおける水素利用技術に関する実証など、さまざまな取り組みを紹介します。

キーワード：#水素パイプライン、#安全技術、#水素利活用技術

えのもと ひろゆき
榎本 裕幸
ともとう さちお
友納 佐智雄
おさだ ともひこ
長田 智彦

NTTアノードエナジー

日本における水素戦略とNTTが 水素事業へ参入する意義

日本は世界で初めて「水素基本戦略」を2012年12月に策定し、2023年には本戦略が改定されました。官民合わせて15年間で15兆円のサプライチェーン投資計画が検討され、水素導入目標は2050年に2000万トン（2030年に300万トン、2040年に1200万トン）と設定されました。水素は「電力・非電力分野の脱炭素化」に貢献でき、特に電力分野においては2050年には全電源の10%を水素・アンモニアで賄うことをめざすとされています。

2050年のカーボンニュートラル実現に向けた一翼を担う水素に官民合わせて力を入れている中、NTTグループが水素事業へ参入検討する意義は3つあります。

(1) 社会の環境負荷削減

再生可能エネルギー（再エネ）による水の電気分解や、化石燃料と二酸化炭素の貯留・再利用技術を組み合わせることで、水素はカーボンフリーエネルギーとして活用することができます。

(2) 日本の経済発展・競争力強化

日本は国際的に高い水素関連技術を持っており、官民一体での水素社会実装の推進により経済発展への寄与が期待できます。

(3) エネルギー安全保障リスクの低減

水素は国内での製造や、海外からの資源調達先の多様化を通じ、日本のエネルギー安全保障リスクの1つである、エネルギー供給・調達リスクの低減に資するエネルギーとなります。

NTTがめざす水素パイプライン 事業

NTTが水素事業に参入するにあたって強みになると着目したのがNTTのアセット（設備・人材）です。現在、国土交通省が進めているカーボンニュートラルポート（CNP）の取り組みにおいて「水素等サプライチェーンの拠点としての受入環境整備」と「港湾地域の面的・効率的な脱炭素化」が示されており、取り組みの方向性として「CNP形成の対象範囲」「港湾地域における官民一体となった取組」「水素等の大量・安定・安価な輸入・貯蔵等」等を視点として整理が図られています。他方、港湾地域より内陸に位置する大型ビル、大規模商用施設、工場、病院、水素ステーション、NTT通信ビルなどの需要家、さらには再開発計画エリアなどにも積極的に水素を導入・活用し、規模の経済による水素価格の低減化を推進していくためには、「国内製造あるいは海外から輸入してきた水素」を効率的かつ低コストで内陸に輸送する手段として経済合理性が成立する街区供給モデルが新たに必要となります。NTTではNTT通信ビルを起点に「とう道（約650 km）」「管路（約60万 km）」を保有しており、通信ケーブル用途で空いている配管を水素パイプラインに有効活用できると考えています（図1）。

これにより水素基盤整備にかかるコスト低減化と時間の大幅短縮が期待できます。また、機能要件として物理的な水素輸送に加え、24時間365日の運用監視や有事の際の駆けつけ対応も必須となります。これに対

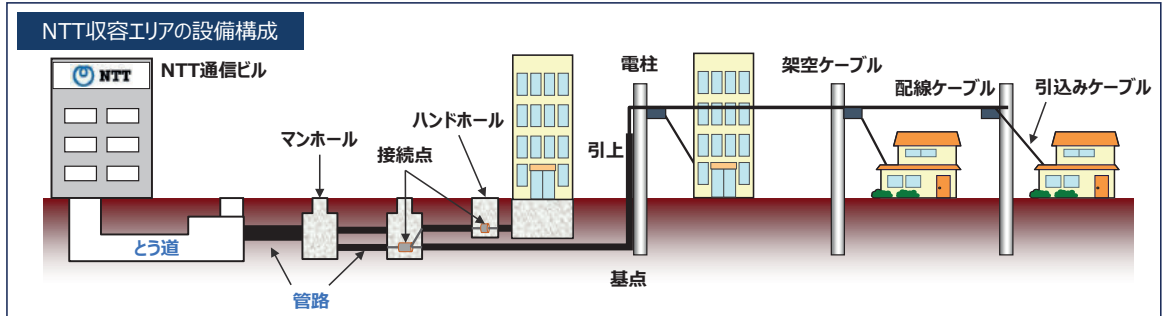
して電電公社時代より築き上げたネットワークの“監視技術”やセキュアな“監視網”，またNTTが全国に擁している“人材”による駆付け体制がNTTの強みと考えています。NTTのアセットを活かし、水素の新たな街区供給モデルに資する内陸需要家へのエネルギー供給から保守までのワンストップ提供をめざしていきます（図2）。

東京都港湾局、および産業技術 総合研究所との共同研究

NTTアノードエナジーでは、2022年度よりNTTの通信管路や共同溝といった既設設備を活用した水素輸送のための、二重配管方式（水素輸送用の内管と外管の二重構造）（図3）の実現性の調査と基礎技術の検討をしてきました。本方式の特徴は、①水素輸送用配管のみを直接埋設する一重配管方式と比べて、既設管路を有効活用できること。そして、②（現行のガス事業法に適合する場合には必要となる）水素ガスへの付臭を不要とできる可能性（詳細は後述）があることです。これらを実現することにより、既存の輸送方式に比べて大幅なコスト低減化が図れると考えています。2024年度7月からは、これまで蓄積した基礎データを基に、東京都の臨海副都心部の脱炭素化推進に向けて、東京都および産業技術総合研究所と三者で実際の共同溝を使用した水素配管安全技術検証を実施しています。以下に本共同研究の概要を示します。

■技術概要

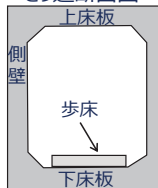
本技術は、前述の内二重構造によって外部への水素漏洩を防止する「二重配管技



【とう道イメージ】



とう道断面図



【マンホールと管路イメージ】

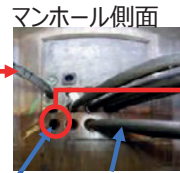


図1 「とう道」と「管路」

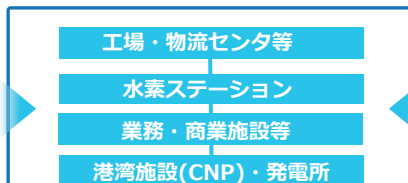
水素生産エリア



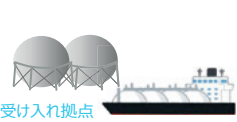
ローカル水素の供給



とう道・管路利用



水素調達エリア



グローバル水素の供給



とう道・管路利用



* 1 P2G: Power to GAS (太陽光など再生可能エネルギーの電力を水素に変換し貯蔵する技術のこと)

図2 水素パイプライン事業の将来構想

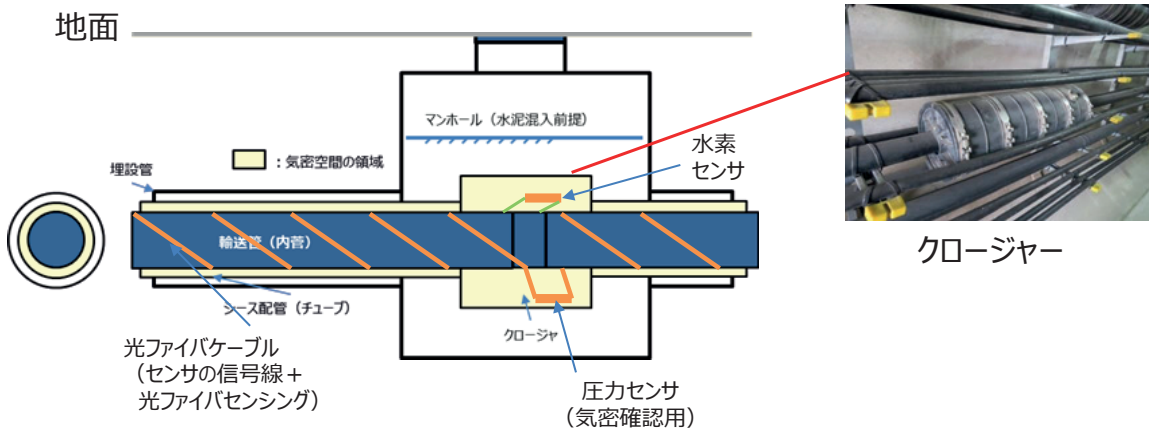


図3 二重配管方式のイメージ

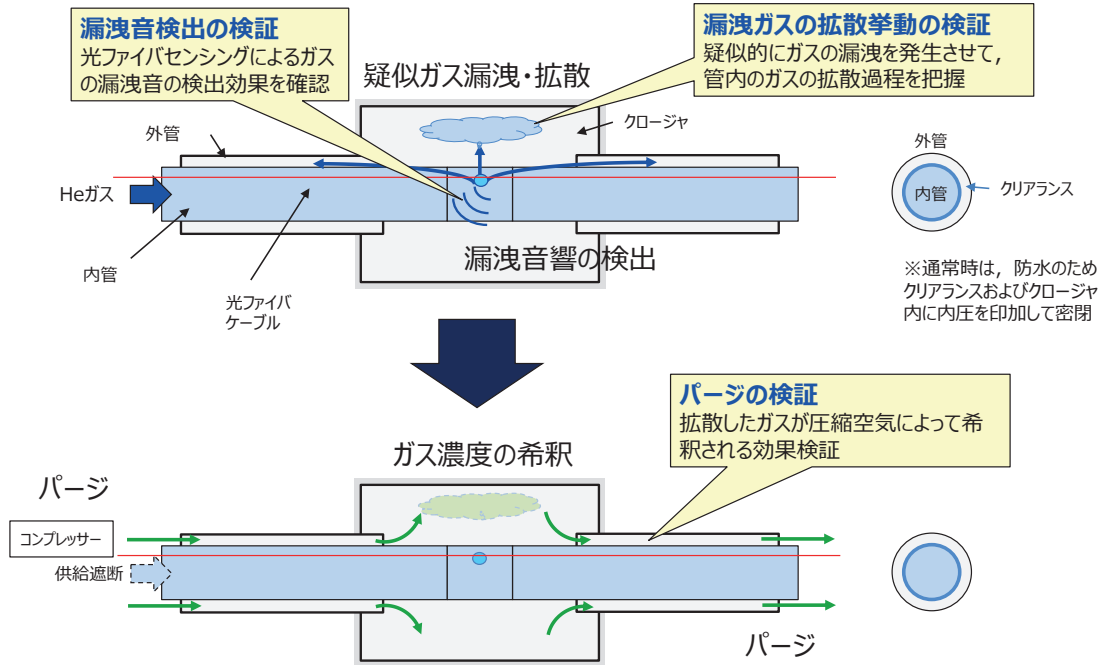


図4 検証概要

術」、内管から水素が漏洩した際に、内管と外管の中空層内で即座に水素の検知・遮断等を可能とする光ファイバセンシングを組み合わせた「複合検知技術」、輸送管から漏洩した水素を空気層に閉じ込めて希釈することで爆発を防止する「パージ技術」で構成されます。これら技術により人の覚知（嗅覚）に依存した既存のガス検知方法に代わる新たな検知・対処方法を確認し、無付臭による水素輸送が実現できると考えています。また、付臭に使用する硫黄などの成分による燃料電池の侵食を防ぐための脱臭工程が不要となることで、コスト削減にも貢献できます。

■共同研究内容

共同研究は、2024年7月～2025年3月まで、東京都臨海副都心部の地下の既設共同溝と地上の実験専用区画を使って実施しています。また、安全性を考慮して漏洩挙動がほぼ同一の水素の組成にもっとも近いヘリウムを用いて実施しています。

■検証内容

検証内容は、二重配管方式の基礎性能検証と光ファイバセンシングの高度利用検証（図4）となります。

(1) 二重配管方式の基礎性能検証

① 二重配管の施工性検証：共同溝での検証環境構築に際して、共同溝における敷設・接続作業性検証を行います。また、検証設備撤去後に、二重配管を分析し、内管（輸送管）と外管（シース配管）とその中間層に埋め込まれた光ファイバによる構造の最適化評価を実施します。

② 漏洩ガスの拡散挙動の検証：水素が中間層に漏洩した場合、水素は空気と混合し拡散しながら滞留することが想定されるため、早急な漏洩検知が重要となります。そこで、クロージャ^{*1}と呼ばれる輸送管接続部において、疑似的にガスを漏洩させる機構をつくり、外管と内管の間隙におけるガスの拡散時間の測定することで、ガスの拡散過程を把握する検証を実施します。

③ エアパージ検証：エアパージ検証は共同溝を使用し、実運用に近い曲げや高低差を考慮した350 mの検証用二重配管に対し、拡散したガスが圧縮空気によって希釈される効果（時定数）を測定・検証します。

(2) 光ファイバセンシングによる高度利用検証

複合検知方式では、水素センサ、流速・圧力センサに加え、光ファイバセンシングを組み合わせて事故シナリオに沿った最適な漏洩検出を実現します。本研究では、光ファイバセンシングのうち、C-OTDR (Coherent Optical Time Domain Reflectometry)^{*2}を用いた音響振動検出を行い、検出可能な周波数範囲やノイズ耐性を確認します。

本共同研究を通じて二重配管方式や水素漏洩検知等に関するデータや知見を獲得し、既存設備を活用した無付臭の安全輸送技術を確認するとともに、街区供給モデルの社会実装をめざしています。

グリーン水素の大規模輸送・利活用に向けた調査

2050年カーボンニュートラル実現の1つ

*1 クロージャ：水素配管の接続点を保護する装置。
*2 C-OTDR：長距離に及ぶ光ファイバの状態を把握する技術。



出典：Googleマップを基にNTTデータ経営研究所が作成

図5 東京空港臨海部の2030年および2050年の水素サプライチェーンの仮説

の手段として期待されている水素エネルギーの流通、その中でも街区供給モデルに資する水素サプライチェーン構築に向けた当社の取り組みを紹介します。

■東京都空港臨海部における水素供給体制構築に向けた調査

当社は、東京都空港臨海部におけるパイプラインの敷設等を伴う大規模な水素の利用や供給の実現可能性調査等の共同実施にかかわる協定を2024年9月20日に東京都産業労働局と締結しました。本検討では、2030年および2050年における水素サプライチェーンの仮説に基づき、これを構成する「つくる」「はこぶ」「つかう」の各フェーズの個別検討、ならびにそれら全体を包括した事業性分析やロードマップ策定を目的としています⁽¹⁾(図5)。

- ・「つくる」：水素製造地・製造量・製造開始時期・コストの調査・試算。
- ・「はこぶ」：パイプラインの仕様および敷設・運用コストの調査、コスト最適な輸送手段の分析、障害となる法規制の調査、共同溝・とう道・管路・NTT

通信ビル等の設備状況の調査。

- ・「つかう」：水素利用設備の仕様・概算コストの調査、需要家企業ヒアリング(創エネ分野、プロセス利用分野、モビリティ分野等)。
- ・「全体」：事業性・水素販売価格の分析、ロードマップの策定。

■姫路地区を起点としたグリーン水素の大規模輸送・利活用に向けた調査検討

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の公募事業「水素社会構築技術開発事業/地域水素利活用技術開発/(イ)水素製造・利活用ポテンシャル調査」において、関西電力株式会社、西日本旅客鉄道株式会社、日本貨物鉄道株式会社、パナソニック株式会社、NTT、NTTアノードエナジーの6社協業による「姫路エリアを起点とする国内水素輸送・利活用等に関する調査」が2024年6月11日に採択されました。本事業では、各社、以下の分担で大規模で低コストかつ低炭素な水素輸送を確立するため、鉄道や通信管路といった既存インフラを活用した水素輸

送方法に関する調査、技術開発を行い、内陸需要家の水素需要創出と効率的なサプライチェーン構築に貢献することを目的としています⁽²⁾(図6)。

- ・関西電力：水素供給管理システムの検討・モデル構築等。
- ・JR西日本：線路敷パイプラインおよび水素利活用の検討等。
- ・JR貨物：鉄道による全国への水素輸送の検討等。
- ・パナソニック：水素を使った自社製燃料電池の活用の検討。
- ・NTT、NTTアノードエナジー：通信管路を活用した水素パイプラインの構築における需要調査、法規制調査等。

需要家における水素利用モデルの創出に向けた実機検証

ここまでは、街区供給モデルにおける水素輸送の取り組みについて紹介してきましたが、水素輸送のコスト低減には、水素輸送を増やすこと、つまり水素需要量を増やしていくことも重要です。

NTTアノードエナジーでは、将来の水素需要の創出に向けて、輸送技術とともに水素需要サイドにおける水素利用に関する実機検証の取り組みも行ってきました。

以降では水素混焼発電機の取り組みを紹介します。水素混焼発電機とは、水素とその他の燃料を混ぜて発電する装置のことをさし、今回の実機検証では、水素と軽油の混焼発電機を採用しました。

■取り組みの背景

水素利用モデルの対象として、既存で導入されている化石燃料を使用する設備の燃料を水素へ転換するユースケースを考えています。

重要な設備を持つ建物には停電時に備えて予備発電装置が設置されていますが、平常時には停止しています。この予備発電装置の日本における導入数は、2018~2022年度の5年間で約3万3000台、設置容量は合計で約500万kWにもなります。これは大規模発電所約5基分に相当します。予備発電装置は日本全体で見ると大きな発電ポテ

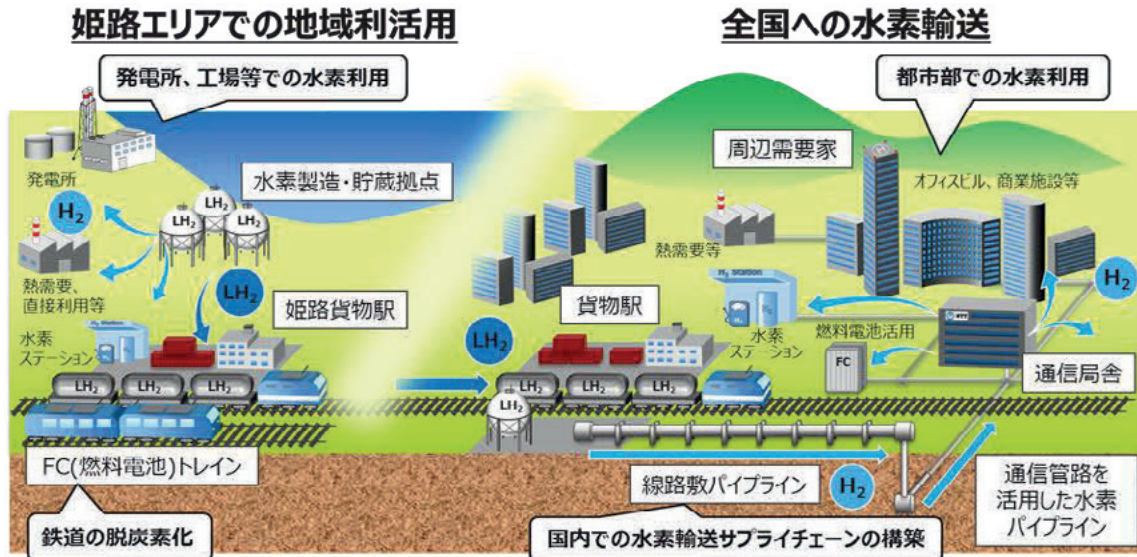


図6 姫路地区を起点としたグリーン水素の大規模輸送・利活用に向けた調査（イメージ図）

	現在の予備発電装置の利用形態	めざす姿
イメージ		
非常時 (停電時)	発電	発電
平常時	停止	発電 (ピークカットやデマンドレスポンス等の調整用電源として活用)
燃料	軽油	混焼(水素・軽油) もしくは軽油

図7 実機検証がめざす姿

ンシャルを持っていますが、停電時の限られた期間しか利用されていません。

そこで、NTTアノードエナジーは、この社会に整備された発電リソースである予備発電装置を、平常時にも分散電源として有効活用することに着目しました。例えば、調整が困難な太陽光発電や風力発電等の再生エネの変動を吸収する調整用電源としての活用が考えられます。

一方、現在導入されている予備発電装置は化石燃料で駆動するため、カーボンニュートラルに向けて発電時のCO₂排出量の低減が必要不可欠と考えています。そこで、予備発電機の燃料に水素を採用することで、CO₂排出量の抑制と調整用電源としての活用の両立をめざし、実機検証に取り組んでいます（図7）。

水素を燃料とする発電機には、大別して

水素のみで発電する「水素専焼発電機」と水素とそのほかの燃料を混ぜて発電する「水素混焼発電機」があります。本検証では、水素と軽油の混焼が可能な「水素混焼発電機」を採用しました。

■水素混焼発電機を用いた実機検証の概要

NTTアノードエナジーは、日立製作所が本検証に先立ち発電機メーカーとともに開発した「水素混焼発電機」に対し、導入時に想定される利用モデルに対してさまざまな条件のデータを収集、評価を実施しました（図8）。

対象とする「水素混焼発電機」は水素と軽油の混焼発電に対応しており、水素と軽油の混焼率（熱量換算）は最大50%まで調整が可能です。また、水素が供給できなくなった場合も、軽油のみで発電を継続することができます（表）。

実機検証では、運用を想定し以下のような条件で、評価・測定をしています。

- (1) 起動時・遮断時における出力影響の評価
起動時や遮断時において、水素と軽油の燃料比率を適正範囲から逸脱せずに安定した発電出力を維持できるか評価します。
- (2) 水素供給停止時の挙動確認
水素の枯渇等を想定し、水素供給が停止した場合、軽油のみで安定して発電を継続

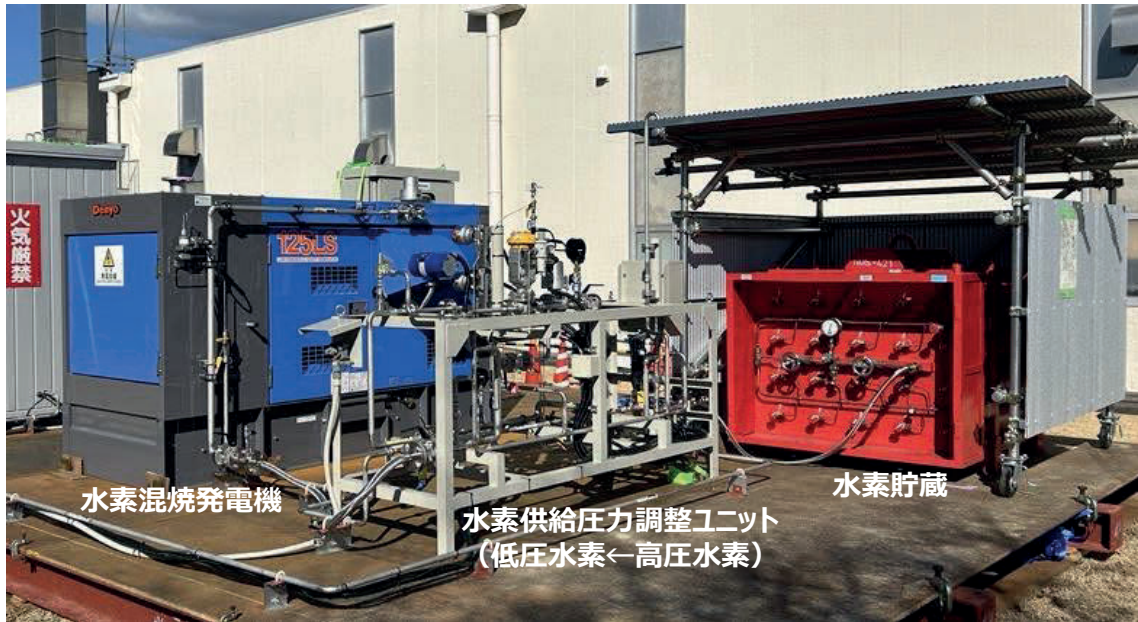


図8 水素混焼発電機 検証設備

表 本検証で使用する水素混焼発電機の仕様

発電能力	定格出力	44 kW (三相交流出力)
	定格電圧/相数/周波数	AC200 V/三相 4 線/50 Hz
水素混焼	水素混焼率	最大50% (軽油と熱量換算)
	水素流量	350 NL/min (50%混焼時)

することができるか評価します。

(3) 排気ガスの成分測定

排気ガス中に含まれる、窒素酸化物や硫黄酸化物等を測定します。

窒素酸化物は、燃焼温度が高くなると生成量が増えることが知られています。水素は燃焼温度が高く生成量が増えることが懸念されるため、燃料に水素を混ぜた際の窒素酸化物の変化を評価します。

なお、予備発電装置は大気汚染防止法のばい煙排出規制において、非常時のみの利用のため基準適合の対象外となります。一方、調整用電源として活用するには非常時以外も利用するため排出基準適合の対象となります。

実機を用いた評価により得られた知見を活かし、水素利用モデルの構築に貢献して

いきます。

今後の展望

本稿では、埋設管路や共同溝といった既設設備を活用した水素輸送技術開発、大規模輸送・利活用に向けた調査、水素混焼発電機の実機検証など、水素サプライチェーンの確立に向けたさまざまな取り組みについて紹介しました。

NTTアノードエナジーは、将来の水素社会の実現に向けて、水素の供給から活用まで含めた水素サプライチェーンの構築・運用に取り組み、再生可能エネルギー等を含めたエネルギー流通技術によりカーボンニュートラルの実現に貢献していきます。

参考文献

- (1) https://www.ntt-ae.co.jp/site_content/wp-content/uploads/2024/09/NewsRelease20240920.pdf
- (2) https://www.ntt-ae.co.jp/site_content/wp-content/uploads/2024/06/press20240611.pdf



(左から) 長田 智彦 / 榎本 裕幸 / 友納 佐智雄

NTTアノードエナジーは、再生エネの開発、エネルギーマネジメントなど電気のエネルギー流通に加え、水素を活用したエネルギー流通に挑戦し、カーボンニュートラルの実現に貢献していきます。

◆問い合わせ先

NTTアノードエナジー
経営企画部 広報室
TEL 03-5444-2442



観光地経営の現在地と観光DX ー前編ー

2023年5月の新型コロナウイルス感染症の5類感染症への移行以降、日本国内の観光産業は全般的に上向きの兆しがみられ、コロナ禍前のペースを取り戻しているようにもみえます。昨今の円安基調も相まって、海外から日本を訪れるインバウンド観光客は、大幅な増加傾向にあります。引き続き、政府主導の地方創生を目的とした新たな経済対策なども期待されています。直近、2024年9月の訪日外客数は、287万2200人で、前年同月比では31.5%増、2019年同月比では26.4%増となり、8カ月連続で同月過去最高を記録しています。また円安の影響もあって訪日客の消費額も増えていて、日本経済新聞（2024年8月21日）によると、訪日客の2024年1～6月の消費額は3兆9070億円、財務省の貿易統計で同期の主要な輸出品目と比べると、半導体等電子部品（2兆8395億円）を上回るほどです。本稿では、日本の観光に着目して、その歴史的な観点からの「現在地」を再確認するとともに、コロナ禍以降観光地が抱える課題やポイント、さらには観光DX（デジタルトランスフォーメーション）が求められる背景や事例について紹介します。前編では、日本人にとっての「観光地」の変遷について「観光資源」に着目しながら歴史的に振り返ります。コロナ禍がもたらしたインパクトを確認するとともに、観光地経営に求められる「情報の重要性」について俯瞰します。



観光地と観光資源

■日本の国土と観光の起源

日本は、「国土のゆがみと複雑さ」「四島に分かれていること」「脊梁山脈が縦貫し、河川が急流であること」「全体として少なく狭い平野（少ない平野面積・細かく分かれた平野）」といった特徴を持ち⁽¹⁾、他国と比べてもかなり独特な地形をしています。可住面積の割合は相対的に小さく、狭い土地に人々は村を切り拓き、造成し、稲作を中心とした生活を営んできました。そして、山岳や河川が多いことで、全国各地に独特の地域文化がはぐくまれてきました。橋やトンネルなどの交通インフラが未整備の時代には、土地から土地への移動はとても困難で、多くの日本人にとって自分の住んでいる地域から移動する、今日の「旅行」のような機会はほとんどなかったと考えられます。

日本の旅の起源をみると⁽²⁾、江戸時代には、経済力が増した村人の中で、一生一度の寺社仏閣の巡礼に行くための互助によるコミュニティが各地で仕組み化されました。

村人によってシェアされた資金を原資として、村の代表者が「代参講」というかたちで、伊勢神宮をめざすというような旅が行われました。そして寺社仏閣への巡礼を大義名分に、団体での名所見物や温泉湯治なども行われるようになりました。柳田國男は「参拝の大きな意義はむしろ道途にあった。ついでに京見物大和廻り、思い切った琴平宮島も掛けて来たという類の旅行も、信心として許されたのであった」と記述しています⁽³⁾。江戸後期から明治にかけて、物見遊山的な要素が旅の目的となりました。それに合わせて、各地には、観光案内、土産物屋といった、現代の旅行者者ともいえる職業が現れるようになりました。

明治時代に入ると、鉄道の敷設（1872年）や、「内国勧業博覧会」イベント（1877年）、修学旅行の開始（1886年）等、現在の旅行の概念につながる基本的な交通インフラや観光文化が徐々に広がり、全国各地に近代的な欧米型の避暑地やリゾートなども整備されるようになりました。第二次世界大戦後は、戦後復興の期待として、本格的なインバウンド観光が注目されるようになりました。1950～51年にかけて、「国際観光文

化都市」が指定され、全国で9つのエリアに対する財政などの優遇措置が始まりました。これらの地域は長らく、寺社仏閣、景勝地、温泉、避暑地として、当時の日本を代表する観光地としてのポテンシャルを持ってきた地域だとも考えられます。このように、土地固有の自然や歴史的な資産に紐づく観光資源を軸にして、戦後の観光はスタートしました。

■ハード整備とマストゥリズム

高度経済成長期、日本人の暮らしが豊かになってくるにつれ、余暇やレジャーが楽しめるようになります。鉄道・新幹線や高速道路など交通網の整備、交通事業者主導で、全国各地で、遊園地、スキー場や海水浴場のレジャー施設、商業施設が整備され、また美術館・博物館といった文化施設が各地に建設されました。こうした施設の整備が進むにつれ、これまでの旅行が、主に富裕層を中心としたものだったのに対し、企業の社員旅行や町内会の団体旅行などもかたちづくられ、人工的につくられた施設に行くことが観光目的化するようになりました。

このように全国各地に建設された「ハー



「整備」によって、日本の観光は富裕層のみならず、大衆も楽しめる「マストツーリズム」の時代へと入ります。

■「安近短」とソフトの魅力

そして、旅行は、グルメや山登り、鉄道を楽しむ旅など、少しずつ個別化・細分化されるようになっていきます。1980年代後半から1990年にかけて「安近短」という言葉に象徴されるように、安く、近い場所に、短い期間で、気軽に旅行を楽しむようなものになっていきます。この時代には、「るるぶ」(株式会社JTBパブリッシング、1973年に雑誌として創刊、1984年よりガイドブックシリーズ『るるぶ情報版』発刊開始)、「まっぷる」(昭文社、1989年創刊)といった旅行雑誌や、テレビの旅番組など、マスメディアが果たした役割も大きかったと考えられます。個人の選択で、身近な場所に、気軽に行き来するような旅行も好まれるようになりました。

■モバイルメディアと旅のパーソナル化

インターネットの時代になると、旅行者は、雑誌やテレビ等マスメディアの情報に加えて、旅行予約、移動検索、地図情報といったものを用いて、情報を確認できるようになります。さらに、モバイルメディアの利用が前提となった今日では、情報を携帯して観光を楽しむことが当たり前になりました。

これまでの旅行ガイドに代わって、YouTubeや自身のフォローするブログやSNSの情報を参考にしながら旅程を組み立てたり、旅行者自らも「映えスポット」を

訪れては、スマートフォンを使って旅の経過をその場から気軽に発信したりすることが可能になりました。その観光者自身による情報が、広く拡散され、そのことが観光地の魅力造成へと、再生産されるようになり、普段使いの検索情報や位置情報は、ビッグデータとしてマーケティングに活用することも可能です。

また、アニメや映画、テレビドラマで扱われた場所を訪問しながら、登場人物と同じ目線を旅するような「聖地巡礼(コンテンツツーリズム)」は、クールジャパンを支える有力な日本の資源として、訪日外国人からも注目されています。さらに、仕事と滞在を有機的に組み合わせながら、創造的な活動を支援する「ワーケーション」の登場など、旅行者のライフスタイルに合わせた新しい旅のあり方も志向されています。

今日の観光を取り巻く様相は、モバイルメディアの利用を前提として、よりパーソナルなものになり、「リアルとバーチャルの融合」といった流れの中でのちたづくられていると考えられます。

ここまでみてきたように、日本の観光は伝統的にみると、まず歴史や自然への訪問に端を発し、やがて旅の目的はハードからソフトへ、「集団」から「個」へと変化してきたこと、そして、現代においては、情報やメディアとの親和性がより強固になってきていることが分かります(図1)。

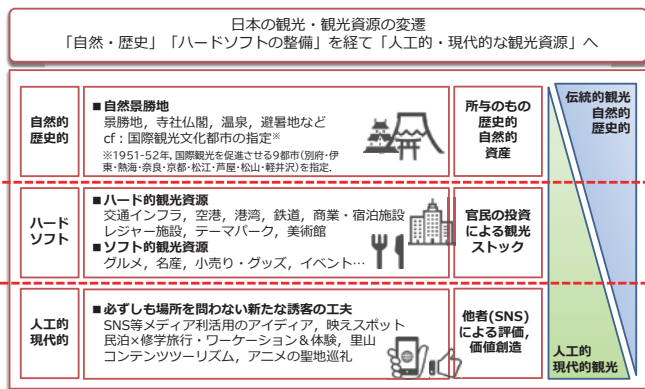


図1 観光資源の変遷

出入国と地方創生、コロナ禍以降の観光地経営

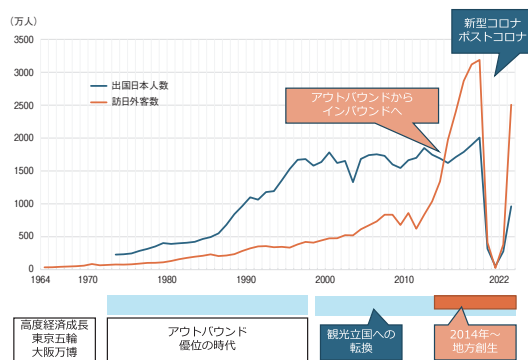
■出国者数優位の時代

ここで、日本を中心とした観光と人々の大きな流れを、「日本人の海外渡航者」と「海外からの来訪者」から比較してみたいと思います(図2)。

長い間、日本における「観光目的の入出国」といえば、海外への出国優位の時代が続いていました。とりわけ、1985年ごろから、「円高」やバブル景気などを背景として、多くの日本人が海外へ渡航するようになります。また、海外旅行の形態についても、それまでは、団体のツアー旅行が中心でしたが、「地球の歩き方」シリーズ(1979年創刊。旧発行企業:株式会社ダイヤモンド・ビッグ社。2024年現在は、学研グループの子会社として「株式会社地球の歩き方」が発行)などの出版を通じて、若者のバックパッカーや気軽に海外への個人旅行が増えてきており、これを支援するためのノウハウが流通することで、日本の海外旅行ブームはしばらく続きます。

■インバウンドとコロナの時代

一方、海外から日本への渡航者については、一貫して増加傾向が続いているものの、日本からの出国者数の伸びに比べると、その数はかなり少ないことが分かります。日本では、2000年代に入ってからインバウンドへの取り組みが本格化しました。2006年に「観光立国推進基本法」、2008年に「観光庁」が発足しました。リーマンショック



出典:「日本政府観光局 (JNTO)」を基に情報通信総合研究所作成

図2 出国日本人数と訪日外客数の推移

(2008年)など、一時的に減少している時期があるものの、時代とともに緩やかに増加している様子が伺えます。そして東日本大震災のあった2011年を境に、海外からの来訪者数は大きく増加しました。

その後、東京2020オリンピック競技大会の誘致に成功した(2013年)ことや、2014年の第2次安倍改造内閣が「地方創生の推進」を掲げて以降、国を挙げてインバウンドの観光に力を入れていくことになり、2013~2015年の2年間で、1000万人から2000万人へと倍増しました。そして、2015年には、海外からの来訪者数が日本からの出国者数を逆転します。

しかし、観光業界は2020年以降の新型コロナウイルス感染症の影響を、直接受けました。令和3年度版労働経済白書でも指摘するように、コロナ禍は観光関連の事業者にとって、ほかの業種と比べても、厳しい時代が過ぎました。

全国観光協会等アンケート調査より(2022年度自主調査)

2022年秋以降は、新型コロナウイルス感染症拡大防止対策としての入国時の水際対策が大幅に緩和されたことから、外国人観光客は少しずつ日本に戻るようになりました。現在(2024年12月の執筆時)では、東京の街を歩けば、スーツケースを引き、大きな買い物袋を持った外国人観光客の姿はもはや当たり前前の光景となりました。

さて、コロナ禍を経験した日本の観光は、どのような課題を抱え、何を求めているのでしょうか。株式会社情報通信総合研究所では、コロナ禍の行動制限が大きく緩和さ

れたことを踏まえ、2023年1月に、「ポストコロナ時代の観光地経営」に関する調査を実施しました。NTTタウンページの電話帳データを活用し、全国の観光協会、道の駅、観光施設等に対して、アンケート票を発送、408件(回収率10.33%)の回答を得ました(表)。

ポストコロナの起爆剤としての観光産業、インバウンド需要の復活、その一方で、新型コロナウイルス感染症発生以降に露呈した経営上の課題、ICTソリューションのニーズ等について調査しました。

この調査では図3に示すような観光系ICTソリューションのキーワードを選択肢として取り上げました。観光系のICTソ

表 調査概要

項目	内容
調査期間	2023年1月6~31日
調査方法	インターネットによるWebアンケート調査
調査対象	NTTタウンページ・データベースを利用 (日本全国の観光関連の事業所宛てに郵送で案内送付「観光案内」「道の駅」)
回収状況	408件(回収率:10.33%)

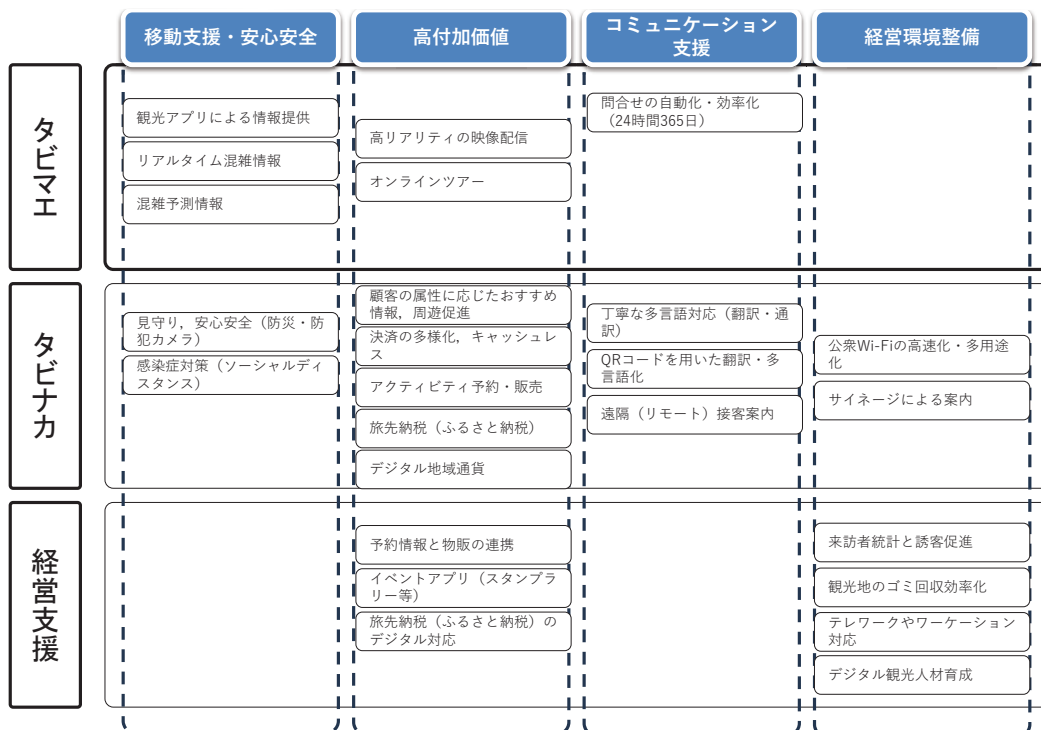


図3 観光関連ソリューション 整理の例(調査対象としたキーワード)



リユースは、「タビマエ（旅行前）」「タビナカ（旅行中）」「経営支援」といったシーンに応じて、「移動支援・安心安全」「高付加価値」「コミュニケーション支援」「経営環境整備」等を目的としたキーワードが考えられます。

■ポストコロナの観光課題

コロナ禍前後で、「改善したこと」や新たな課題については、「地域の情報発信」「地域資源を活かした魅力的なアクティビティ」「周遊の工夫」といった、地域資源の新たな発掘に関する項目については、積極的に取り組んでいる様子が分かります。

その一方で、「働き手不足」に関する課題は、全国各地で、かなり深刻な状況にあることが確認できました。とりわけ、働き手の「数的な不足」「高齢化」については、全国で課題視され、それぞれ大きなウエイトを占めています。併せて、「多言語対応」についても課題とするところは多く、コロナ禍でインバウンド観光客が消え、各地の外国語人材の雇用にも大きく影響を与えたことにより、地域の対応力が極端に弱まってしまったことが考えられます（図4）。

■ICTソリューションのニーズ

旅行者の行動の流れを意識した、いわゆる「タビマエ」「タビナカ」、また観光協会自身の業務効率化に有益と考えられるソリューションへの関心、および行政への期待度合いについてアンケートで確認した結果を以下に示します。

まず「タビマエ」については、概して「観光アプリを用いた情報提供」「高リアリティの映像配信」「問合せの自動化・効率化」「混雑に関する情報発信」などについて、高い関心が示されていました（図5）。

また「タビナカ」については、「公衆Wi-Fiの高速化・多様化」にもっとも高い関心が示されています。続いて、「顧客の属性に応じた情報発信」「安心安全を意識したソリューション」「多言語化対応」「キャッシュレス」等の取り組みに大きく関心が集まりました。「旅先納税」といったキーワードについても、65%以上もの興味関心が持たれています（図6）。

観光地の業務支援に資するリユース

現在（2023年1月）のあなたの地域の観光産業の状況は、コロナ禍前（2019年より前）と比べていかがですか？ それぞれ、もっとも近いものを1つ選択してください。（n=408）

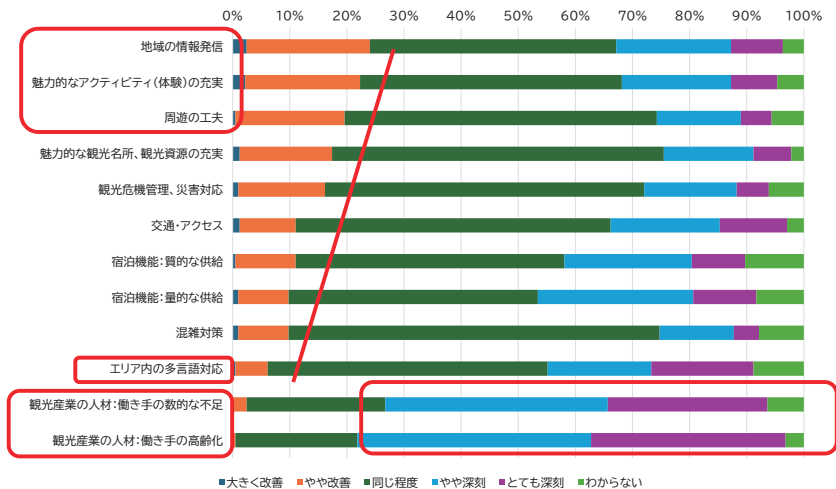


図4 コロナ禍と観光地経営—改善したことや新たな課題

旅行者の「行動前（タビマエ）」に有益な情報、遠隔の旅行者に対する情報提供・ICT活用について、興味（効果）を感じますか？ それぞれ、もっとも近いものを1つ選択してください。（n=408）

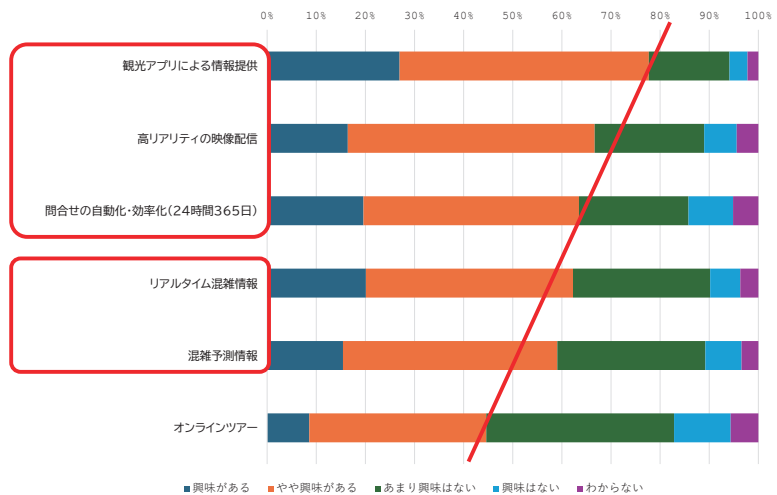


図5 ソリューションへの期待度（タビマエ）

ンについては、「来訪者統計と誘客促進」という、データ活用に関連したキーワードに関心が寄せられました。「予約者の属性と物販の連携」や、イベントの開催を支援する「アプリ活用」も大きく期待されています（図7）。

さらに、各地の観光協会からみた、国や自治体への期待については、「Wi-Fiの通信環境整備」に対して、高い関心が確認されました。「ICT整備に対する金銭的な支援」についても、引き続き強い要望・ニーズが示されています。国の助成金などこれ

までも公衆Wi-Fi整備に向けては多くのメニューが準備されてきましたが、現場からみると、引き続き国の支援を求め必要としている様子が伺えます（図8）。

観光地経営に求められる視座

■観光は「コト・モノ」スタート

一般的に「経営資源」といえば「ヒト、モノ（コト・モノ）、カネ、情報」という4つの要素を指すことが多いと思います。

旅行者の「行動中（タビナカ）」に有益な情報、現地滞在中の旅行者に対する情報提供・ICT活用について、興味（効果）を感じますか？それぞれ、もっとも近いものを1つ選択してください。（n=408）

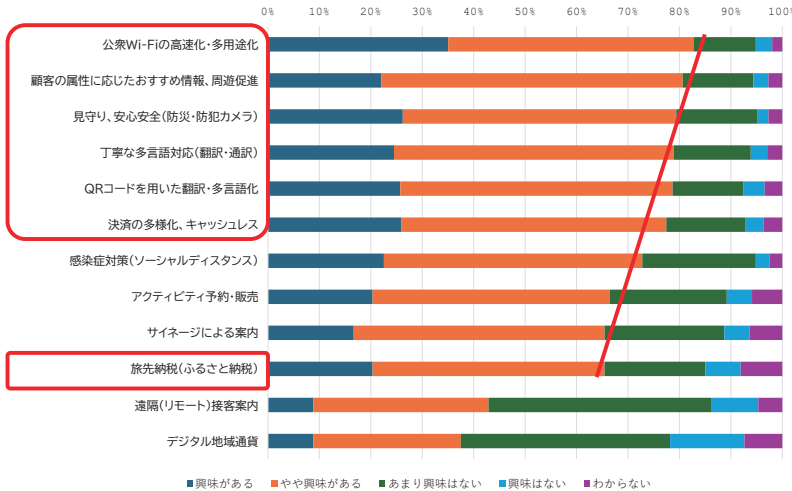


図6 ソリューションへの期待度（タビナカ）

観光地経営を支援するデジタル環境整備・ICT活用について、興味（効果）を感じますか？それぞれ、もっとも近いものを1つ選択してください。（n=408）

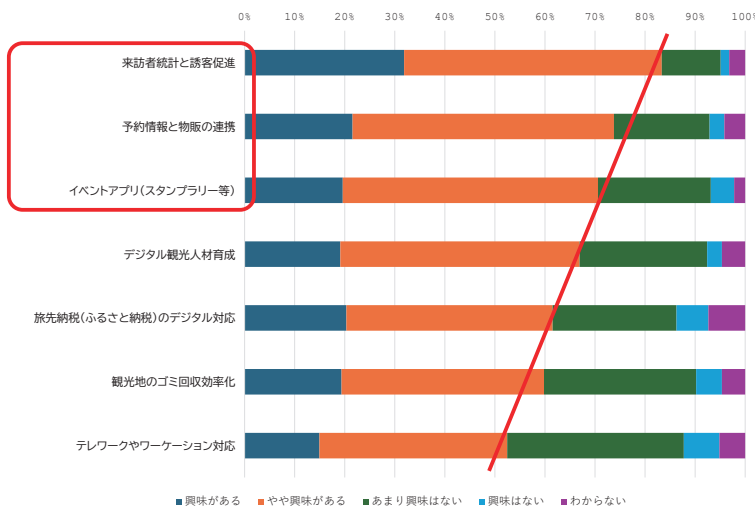


図7 ソリューションへの期待度（業務支援）

観光を、この経営資源的な観点で考えた場合、「コト・モノ」が「存在すること」がすべてのスタートとなっていると思います。ここまでみてきたように、観光の目的は「自然・歴史」「ハード」「ソフト」「メディア・バーチャル」という流れで、これらの「コト・モノ」があることが原点にあります。それを地元や地域の人々、もしくは域外からの人々（ヒト）が「観光地」として自覚することにより、訪問する動機が生まれます。さらにそこに投資（カネ）をして観光地としての環境を整備したり、観光資源を

中心にマネタイズの仕組みを考えることでこうした地域が観光地として営まれていきます。観光地の経営は、このような手順で成り立っていく、と考えられます。

そして、経営資源のうち、4番目の「情報」の果たす役割については、これまでみてきたように、旅行者のタビマエ、タビナカなどの各シーンにおいて、観光地の魅力を高め、地域の課題解決をサポートすることを通じて、観光地の付加価値や安心安全を提供するものになり得ると考えます（図9）。

そのもっとも基本的な営みとして考えられるのは「データの活用」です。前述のアンケートの中でも、「来訪者統計と誘客促進」というデータ利活用には、高いニーズが確認できます。域外からの「来訪者」人数や、来訪中の行動に関するデータを把握することは観光地経営において重要な情報活用の1つだと思います。

観光地経営の中で「情報」の果たす役割や期待について、データ活用の観点から整理をしていきたいと思えます。

■地域資源を活かした魅力づくりの視座

コロナ禍の影響で、インバウンドや国内旅行者の来訪がまだ十分に戻っていないと考えられる地域では、次の一手に向けた早急な対応が求められます。これから観光を軸に新しいことを考えていきたい地域にとっても、まず基本的な現状把握として、「来訪する人数の把握」は出発点になると思います。「ヒトに関する統計」というと、住民基本台帳や国勢調査のデータによって、居住地を基本にした統計が一般的ですが、域内に外部から訪問する観光客、いわば「アウェイ」の属性の現状を、効率良く把握することを考えていく必要があります。

地域へのゲート（入り口）が限定的な場合、例えば、スタジアムやテーマパークを考えれば、ゲートにおいて来訪者の数を把握することができます。主な観光資源が宿泊を伴うケースなら、地域内の宿泊事業者に定期的に調査をすることで、域外からの来訪者を把握することが可能でしょう。祭りや花火大会など、かつてはイベントのたびに、カウンター（数取器）を用いて人手をかけて数えたり、目視での入出を推し量ったり、といったこともありましたが、観光動態把握を目的として、スマートフォンの位置情報から、特定のエリア、特定の時間での人口や性別、年齢等を把握することも可能になりました。

日々の来訪状況を「継続的に」把握する一方で、域内での消費額や「行動把握」にまつわるニーズ来訪者の「宿泊日数」と「宿泊単価」から、おおよその顧客動向を踏まえて、消費傾向や経済効果を算定することもできます。さらに観光のホスト側が、



地域におけるICT整備について、国や自治体に対し、以下のようなことについて期待しますか？
それぞれ、もっとも近いものを1つ選択してください。(n=408)

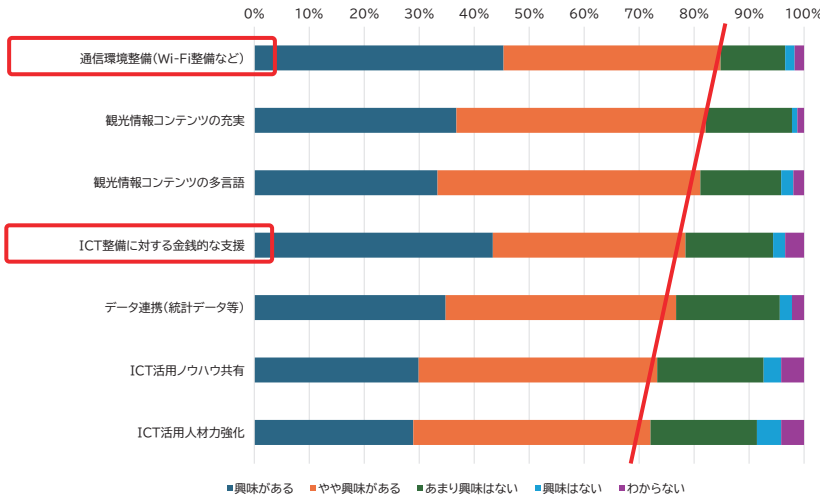


図8 ソリューションへの期待度 (国・自治体への期待)

観光の経営資源：「①コト・モノ」が存在することが重要。観光地としての「自覚(②ヒト)」と「整備(③カネ)」を踏まえて、④情報により「付加価値を高める」という構図が考えられる。

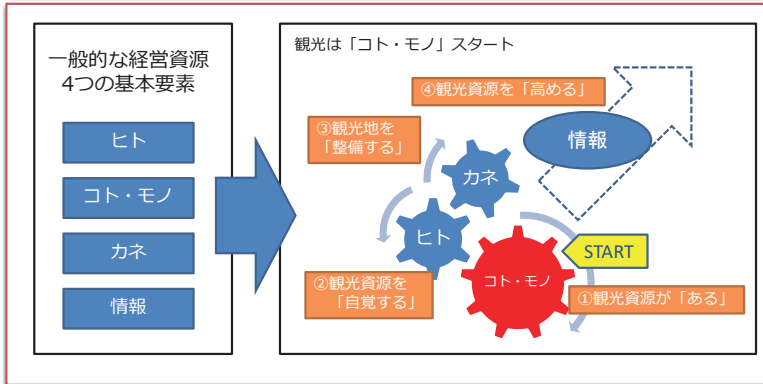


図9 観光の経営資源：観光は「コト・モノ」スタート

SNSコミュニティの「参加者」として、観光客と対等な立場から情報をキャッチボールしていくことで、SNSからの新しい情報の収集や、優良コンテンツ発掘が可能となり、地域の新たな魅力造成の一助になると考えられます。

■観光地の課題解決の視座

一方、特定のエリアに旅行者が一時的に集中しすぎてしまうと、観光客によるゴミの放出・放置、交通渋滞や交通機関の混雑の発生により、買い物や通院など地元住民の日常生活をも脅かされてしまうなど、いわゆる「オーバーツーリズム」が社会的に問題になっています。花火大会やハロウィ

ンなど、想定外の人数が押し寄せたことで、大事故を引き起こしてしまうといったことも考えられます。

また、日本では自然災害がいつでも起きてもおかしくない状況にあります。自治体が策定する多くの地域防災計画は、自らのエリアに住む住民を基本に考えられていることが一般的です。観光を地域の主要施策として掲げることと、来訪者をも対象とした防災対策の検討は、車の両輪としてセットで考えられるべきだと思います。そのためにも、国内外からの来訪者が地域内にどの程度滞在しているのか、有事に備えた状況把握が肝要です。

観光地経営は、1つの事業体ではなく、多くの地域主体(宿泊、交通、飲食、自治体等)が関係しているからこそ、統合的にPDCAのようなサイクルを描き、回し回ることが困難です。基本的な域内データの把握についても、関係者間の合意や協力が必要ですし、外部から情報を購入するにも費用がかかります。分析のためのノウハウの蓄積や人材の育成も必要になります。

とはいえ、まずは身の丈に応じた基本データの収集を通じて、施策と成果把握を地域に根付かせることで、観光地経営のレベルも少しずつ高度化していきます。そのためにも、定点観測、さらに「成果把握の方程式」を見付けることが、成功への近道になると考えます。

後編では、2024年現在の「観光地経営の現在地」について、観光を取り巻く環境を、PEST分析の観点(政治、経済、社会、技術)で俯瞰しながら、観光DXの事例について紹介します。

■参考文献

- (1) 大石：“国土と日本人 災害大国の生き方、” 再版、pp.31-50、中央公論新社、2012。
- (2) 竹内・竹内・山田：“入門 観光学、” 初版第6刷、ミネルヴァ書房、2018。
- (3) 柳田：“明治大正史 世相篇 新装版、” 初版第27刷、p.211、講談社、1993。



株式会社情報通信総合研究所
主任研究員 松原徳和


NTTアクセスサービスシステム研究所
 上席特別研究員

中島和秀 Kazuhide Nakajima

既存光ファイバと同外径の4コア光ファイバの早期実用化と、光給電技術の高度化に挑む

生成AI（人工知能）の進化に伴うデータセンタ間のデータ伝送量の増大や、XR（Extended Reality）の普及によるデータ伝送量の増大に対応するために、ネットワークの通信容量拡大の必要性が高まっています。通信容量拡大には伝送システムの性能向上のほかに、伝送媒体である光ファイバそのものの能力向上も重要な要素となります。これまで、光ファイバ中の光の通り道であるコアを空間的に複数配置するマルチコア光ファイバ（MCF）が開発され、世界最高の12コアを配置したMCFも登場しています。また、光ファイバを透過する光の散乱を利用した損失等の計測といった、非通信応用技術も確立されてきました。このような環境において、4コアMCFの既存技術活用による早期実用化と、光ファイバによる給電という新たな非通信応用に挑む、NTTアクセスサービスシステム研究所 中島和秀上席特別研究員に、4コアMCFの早期実用化に向けた要素技術、光給電技術、光ファイバの国際標準化、そして研究における「接点」の重要さと、それを体現する意識を伺いました。



 **直径125 μm の4コア光ファイバ技術をオンサイトで利用可能なレベルで確立し、早期実用化をめざす**

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。

基本的な研究領域は、「光伝送路の持続的な大容量化」「光ファイバへの機能付与による新たな価値創出」「国際標準化の推進」で、現在は主として「マルチコア光ファイバの実用展開」と「マルチコア光ファイバの非通信応用」に取り組んでいます。

私たちは、大容量化については1本の光ファイバの中に光の通り道であるコアを複数設ける、空間分割多重光ファイバ（マルチコア光ファイバ：MCF）に関する研究を進めており、前回（2022年2月号）のインタビューでは、大容量化の極限値を追究して1本の光ファイバに10モード伝搬可能なコアを12個設けることで、従来の100倍以上のポテンシャルを持つ光ファイバを実現したことをお話ししました。

さて、10モード・12コアのMCFは直径220 μm の光ファイバで実現したのですが、既存の光ファイバは直径125 μm です。既存光ファイバと同じ直径であれば、製造・敷設・接続等において活用できる既存技術が多いため、早期実用化を実現することができま

す。そこで、直径125 μm の光ファイバに4コア（シングルモード）設けた光ファイバをめざして研究を進め、製造技術としてはほぼ実用化レベルに至りました。光ファイバのフィールドへの導入・展開にあたっては、光ファイバどうし、光ファイバとレーザー光の送受信デバイス等との「接続」が非常に重要な要素になります。光ファイバどうしの接続では接続点におけるコア断面のズレにより、光の漏れが発生することで光信号の伝送損失が大きくなるため、光ファイバの10分の1以下の直径のコアを、ズレを最小化して接続することが必須になります。これはレーザー光の送受信デバイス等との接続においても同様です。4コア光ファイバにおいては、空間的に配置された4つのコアすべてに対してこれを行うこととなります。

4コア光ファイバによる光伝送路を構築（実用化）するためには、「側面画像調心技術」「地下クロージャ」「FIFO（Fan-in/Fan-out）デバイス」「局内接続架」の4つの要素技術を、オンサイトで利用可能なレベルで設計技術を確立させる必要があります（図1）。

側面画像調心技術は、対向する2本の4コアMCFの側面画像を観測・解析することで4つのコアの位置を特定し、自動で対向するコアの位置を回転調心することで、接続する4コアMCFのすべてのコアのズレを極小化する技術です。回転軸方向の座標の自動調整の概念は8年ほど前から考案し、回転角度の位置ズレを

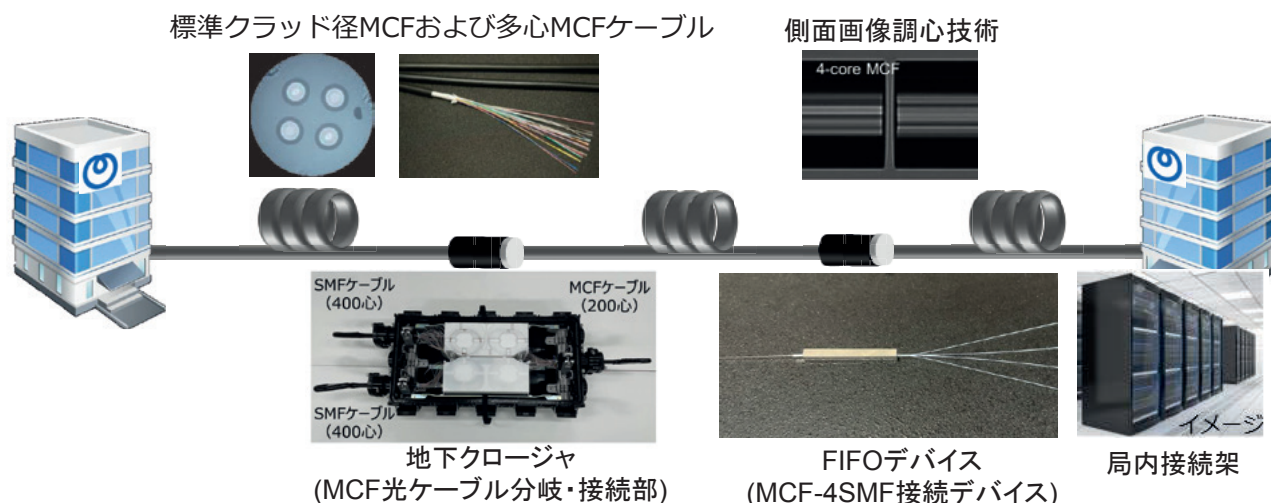


図1 4 コア光伝送路の建設・保守・運用に必要な要素技術

0.5 度以下で調心できれば実用化できるところまでは確認してしました。従来技術では、光ファイバの端面を直接観察して回転軸方向の調心を行うことが一般的でしたが、端面観察のための光学系を組み込む必要があり、小型・可搬型の融着接続器への組み込みは困難でした。そこで、4 コアMCFをターゲットとして側面画像調心技術を検討・開発しました。図1の4 コア光ファイバの断面の黒い点（マーカ）を基準にそれぞれのコアに番号を付与し、側面画像において接続点におけるコアの輝度分布解析を行い、接続されるファイバ双方において輝度分布が一致する回転角度を導出することで、自動調心が行われます。本技術を汎用的な光ファイバ融着接続器に組み込むことにより、実験環境や工場だけでなく、オンサイトでMCFどうしの恒久接続を実現することができます。

地下クロージャは、MCFを実装した細径高密度光ケーブルどうし、もしくは既存のシングルモード光ファイバ（SMF）ケーブルとの地下設備内における接続・分岐を行うものです。4 コアMCFは既存光ファイバと同じ外径であるため、地下クロージャのMCF化においても既存の地下クロージャの基本構造を効率的に流用することができます。

FIFOデバイスは、NTTイノベティブデバイス社との連携により、石英系PLC（Planar Lightwave Circuit）導波路を高さ方向に積層し、1層目と2層目でそれぞれ2コアずつを合分岐する構成を実現し、1本の4コアMCFと1個のコアを持つ既存SMF4本との合分岐を行うものです。石英系PLC導波路は既存の光伝送システムにおける光パワー分岐などにも広く利用されており、高信頼で量産性にも優れる特長を持っています。

局内接続架は、MCFケーブルを局内設備で終端し、架内に実装されたFIFOデバイスを介して既存SMFとの相互接続を行うものです。FIFOデバイスにより4コアMCFを直接コネクタ接続することで、接続に要する断面積を既存光ファイバの場合に比べ4

分の1以下に省スペース化できます。

私たちは、2024年にこれらの要素技術を、光ファイバの基本的な設計技術としてオンサイトで利用可能なレベルで確立させ、2027～2028年のフィールドへの展開に目処をつけることができました。

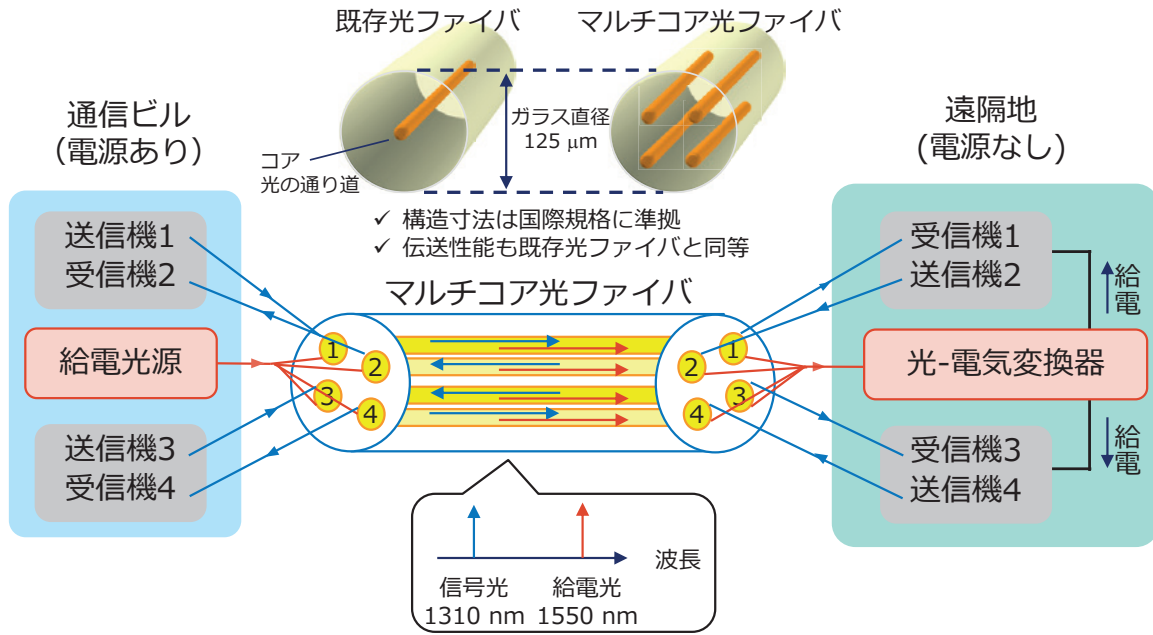
新たなマルチコア光ファイバの非通信 応用技術としての光給電システム

「マルチコア光ファイバの非通信応用」はどのような技術でしょうか。

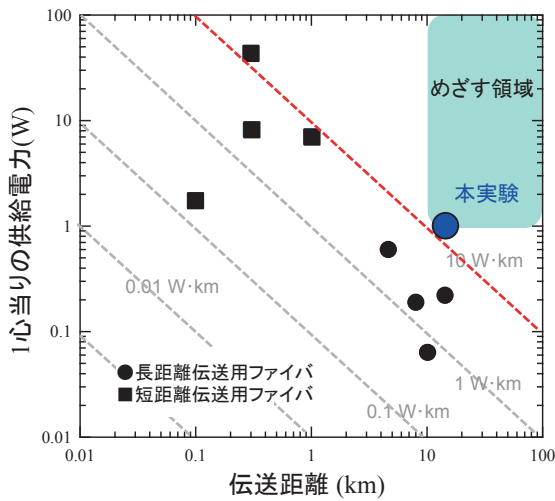
通信用と給電用の2種類の光信号を1本の光ファイバで伝搬する技術です。この技術は、通常の光通信（光給電を必要としない光通信）にも既存の伝送装置と組み合わせ使用することができます。また、各コアが独立して（コア間で光信号の混信を生ずることなく）使用できるため、任意のコアを給電用にも通信用にも、あるいはその双方に割り当てることができます。この技術の基本的な考え方は以前からありましたが、従来の技術では、入力光がある光強度（しきい値）を超えると、入力光が違う波長の光に変換され、出力側の光強度が飽和してしまうため、10 km以上離れた場所に1 W以上の電気電力を供給することは不可能でした。

実験では光給電量を最大とするため、4 コアに波長1550 nmの給電用の光源を入力しました。さらに、通信波長を1310 nmとし、2つのコアをそれぞれ上りおよび下り信号に割り当てることで双方向の光通信を実現しました。このため、4 コアMCFで、2組の双方向伝送システムを構築することができます（図2 (a)）。

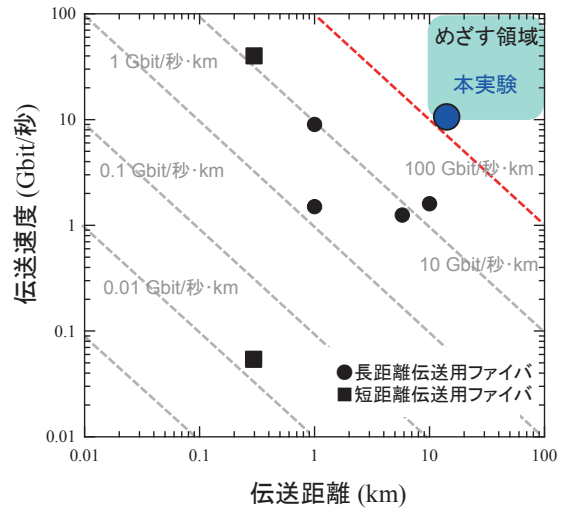
伝送距離と供給電力の積で表す光給電能力は、MCFの適用で単位断面積当りの供給電力を最大化し、光給電効率の劣化要因となるシステム内の戻り光を抑制することにより、世界トップの性能指数である14 W・km（14 km伝送後に約1 Wの電力）を得



(a) 光給電システム概要



(b) 光給電能力



(c) 光給電伝送性能

図2 マルチコア光ファイバを用いた光給電システム

ることができました (図2 (b)).

さらに、自己給電による伝送速度として、現在、一般ユーザ用にサービス提供している光通信の最高速の伝送速度である10 Gbit/sの双方向光通信も実証しました。実験では、2コアで上り

下りの1システムの構成により、14 km伝送後で良好な伝送特性を確認しました。伝送速度と伝送距離の積を自己光給電伝送における伝送性能の指標と考えると、世界最高の伝送性能140 Gbit/s・kmを実現することができました (図2 (c))。

この技術により、災害時・緊急時には、電源回復が困難なエリアに通信ビルから給電光を送出することで通信装置を遠隔駆動しネットワークのレジリエンスが向上できます。また、将来的には平時においても河川・山間部などの非電化エリアや、強電磁界や腐食などによる電化困難エリアなど、あらゆる場所で光通信を提供可能とすることができ、多様なIoT (Internet of Things) 機器と連係したセンシングネットワークの実現にも貢献できると考えられます。

国際標準化の活動も継続されているのでしょうか。

引き続きITU-T (International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector) のSG (Study Group) 15 (Transport, access & home) のWP (Working Party) 2において「Characteristics and test methods of optical fibres and cables, and installation guidance」を検討課題とするQuestion5のラポーターとして活動しています。Question5では、将来的にMCFが必要になるということで、2015年ごろから検討が進められてきています。

WP2においては、2020年ごろから直径125 μm、4コアのMCFを国際標準化の対象とする方向で議論が進み、2025年3月のSG15の会合で勧告(国際標準ドキュメント)策定を決議する方向です。そして、1年ほどかけてドラフティング(文書化)を進めて、最終的にGシリーズの勧告として制定されることになると考えています。そこに向けて日本国内でも、IEC (International Electrotechnical Commission) で光ファイバのコネクタ等の国際標準化を行っているメンバとITU-T SG15の参加メンバが情報共有しながら、本件に関する今後の国際標準化を日本がリードしていこうと意識合わせをしています。

技術や人と人の「接点」を見つけて、 新たな発想により研究の幅を広げる

研究者として心掛けていることを教えてください。

あるテーマについて研究を続けていると、トップデータや研究成果のところを注視する傾向が出てきますが、テーマの周囲の部分との「接点」を見つけることを心掛けています。FTTH (Fiber To The Home) に関する研究が全盛期だったころ、私たちは「曲げフリー光コード」の研究に取り組んでいました。従来の光ファイバは石英ガラスでできていたので、曲げることで光の伝送損失が大きくなり、さらには光ファイバ自身が折れてしまいます。当時、私たちは石英ガラスと複数の空気の孔だけで構成する新しい光ファイバの研究をしていたのですが、当時のグループリーダーが空孔光ファイバの技術を曲げフリー光コードに応用してみてもどうかという発想で、研究に取り組み実用化することができました。

これは他技術との「接点」の1つの例なのですが、「接点」は技術に限らず人と人をはじめあらゆるところにあるので、現在の私たちの研究においても、さまざまな意味において何かの接点を見つけていこうと常に意識しています。

標準化の会議においては、大事なことは休憩時間のロビー活動等で話がまとまり、その結果が会議の場で合意されるといったことがよくあります。これもまさに人と人の「接点」が意味を持っており、こういった場で存在感を出していくためにも重要なポイントです。同様に、学会においても発表後に発表者のところへ行き、質問や議論をすることで見識を深め、双方の研究が前進することもよくあります。これについても、自分が動くことで「接点」が生まれます。

さて、MCFの研究は1980年ごろから始まっていますが、複数のコアどうしを接続する技術がないため概念が先行してきました。私の入社時に先人たちの想像力と挑戦に影響を受けて、MCFに興味を持って研究に取り組んできたのですが、それが30年以上経って現実のものとなりつつあり、非常に感慨深いものがあります。ただ、光ファイバやケーブルの世界では、フィールドに導入していくためには既設の設備との相互接続や後方互換性が非常に重要で、常に意識していることです。新しい技術だからいい、というわけにはいきません。それが現実のものになりつつあるのは、光ファイバ設備のアップグレードをどのようにしていくのかという考え方をフィールド側から発信してきたこと、それを研究サイドでウォッチし続けてきたことが大きく寄与していると思います。4コアMCFのフィールドへの導入という最終ステージに向けて、これを意識していきたいと思います。また、標準化の世界においても、他の技術との接点を意識しつつ、こうした経験を踏まえながら概念とのギャップを埋めていくつもりです。

自分の価値観を研究課題に結び付けて 可能性にチャレンジ

後進の研究者へのメッセージをお願いします。

最近、それぞれの研究者が持っている価値観を、自分の研究課題に結びつけることがすごく重要なのではないかと考えています。研究者は、技術課題を的確に認識していて、どのように研究を進めていくのかということは分かっているのですが、そこに自分の価値観を持って研究課題と進め方を考えることにより、自分自身の研究に深みとか味わいのようなものが加わるのではないかと思います。若手の皆さんには、研究をその1つの技術課題としてとらえて純粋な技術論で進めるだけではなく、そこに自分の価値観を加えることでどのような新しいものが生まれるのかという発想を持っていただきたいと思います。それにより、すごく面白いことができるのではないのでしょうか。そして、その可能性にチャレンジしていただきたいのです。


NTTファシリティーズ サービスイノベーション部
研究開発部門 環境ソリューション担当 主任研究員

二渡直樹 Naoki Futawatari

時流を読み、現場を意識、本質を見極める力を持って研究開発に取り組む

日本国内のデータセンタの年間消費電力量は、2022年度に8000 GWhであったものが、デジタルトランスフォーメーション（DX）の進展、ITシステムの継続的な投資とその基盤となるクラウドサービスの利用拡大を背景に、2030年度には1万7000 GWh、さらに2050年度には4万1200 GWhになると予測されています。この消費電力のうち、3～4割は空調に要するものだといわれています。一方、「国連気候変動枠組条約締約国会議（COP）」において合意されたパリ協定を踏まえ、日本では、中期目標として、2030年度のCO₂をはじめとする温室効果ガスの排出を2013年度の水準から26%削減することが目標として定められました。この実現に向けて、省エネルギー化やカーボンニュートラルに関する取り組みが各方面で行われています。技術が非常に成熟している空調分野において、新冷媒の採用と省エネルギー化を実現した空調機の開発により、国際課題への対応を前進させた、NTTファシリティーズ サービスイノベーション部 二渡直樹氏に、データセンタ用空調機「FMACS-VI (M)」の開発の概要と、現場を意識して、本質を見極める力を持って研究・開発に取り組む思いを伺いました。



 **年間消費電力量20%削減、環境負荷の低減、既設設備のリプレースを意識した装置サイズを目標とした「FMACS-VI(M)」を開発**

現在、手掛けている業務の概要をお聞かせいただけますか。

データセンタ用空調の研究開発に取り組んでいます。

通信ビル（通信機械室）やデータセンタに集約設置されているICT装置に供給される電力は、装置の動作に使われるほか熱に変わってしまいます。装置の性能向上に伴って消費電力は増大し、発熱量も増えてきています。ICT装置は温度が高くなると故障率が上昇するため、通信インフラ等の安定的運用を確保するためには、一般の空調機と比較して大風量で24時間365日冷却し続ける必要があります。こうした要件に対応していくため、NTTファシリティーズは通信ビルやデータセンタ向けの専用空調機であるFMACSシリーズを開発・提供しています。

昨今、地球温暖化防止やカーボンニュートラルを推進するためには省エネルギー化や再生可能エネルギーの利用等が注目を集めて

おり、ICT装置はもちろん、家電機器、自動車等あらゆる方面で省エネルギー化への取り組みが推進されています。ICT装置の性能向上に伴い通信ビルやデータセンタの消費電力が増加する中、データセンタ用の空調機の消費電力はこうした施設の全消費電力の3～4割を占めており、データセンタ用空調機に対する省エネルギー化への対応は急務となっています。

データセンタ用空調方式は、室内ユニット、冷媒配管、室外ユニットがパッケージ化された「個別分散空調方式（パッケージ式）」と、冷凍機や冷却塔、冷却水配管などからなる熱源システムと室内ユニット群で構成され、建物全体の熱源システムを構築する「中央熱源空調方式」があり、状況に応じ最適な空調方式が採用されます。通信ビルでは通信需要の拡大に応じ逐次増設が容易な「個別分散方式」が多く採用されており、当社はデータセンタ用パッケージ式空調機であるFMACSシリーズを1980年から開発・提供し続けています。

FMACSシリーズは、冷房専用パッケージ式空調機として業界最高水準の効率を実現するとともに、データセンタ用空調機として備えるべき機能・性能を実装しています。これまで、パッケージ式空調機の省エネルギー化技術の研究開発成果や最新技術の適

用、長年の構築・運用による蓄積技術からの改良、より環境にやさしい冷媒への転換を続け、第5世代の「FMACS-V」までを提供し、CO₂排出削減量として累計1400万t-CO₂の貢献をしてきました。また、FMACS-Vでは、より高い省スペース性を実現したFMACS-V slimシリーズや、冬期は寒冷な外気冷熱を利用し冷却する省エネ強化のFMACS-V hybridシリーズも提供しており、私も2015年からこれらの開発に取り組んでいます。そして、後継機である「FMACS-VI(M)」を開発し、2024年1月から提供しています。

「FMACS-VI(M)」はどのような空調機なのでしょう。

冷房の基本的原理は、冷媒の蒸発による気化熱で室内の熱を吸収し、圧縮機で冷媒を高温高圧にして室外に送り、室外で熱を放出した冷媒が液体となり室内に戻り、膨張弁で圧力を低下させることでさらに温度を下げ、室内の熱を吸収する、というヒートポンプと呼ばれる仕組みにより室内外で熱の吸収・放出を行うことで冷房をしています。この原理は非常にエネルギー効率が高いため、技術開発が進みかなり成熟した技術となっています。また、熱交換、熱搬送のために使用する冷媒は、CO₂の数千倍の温室効果を持っているため、国際的な取り組みとして段階的な利用制限が始まっています。

こうした中で、冷媒転換の状況等を注視しつつ、業界において代替冷媒の決まっていない時期から試作評価を行うなどして、後継機の開発目標を検討してきました。そして、FMACS-Vに対して、年間消費電力量20%削減、環境負荷の低減、既設設備のリプレースを意識した装置サイズを開発目標として、「FMACS-VI(M)」を開発しました(図1)。

開発にあたっては、「R32」という冷媒をデータセンタ用空調機としては日本で初めて導入しました。R32は、温室効果(地球温暖化係数)が従来のデータセンタ用空調機で用いられている冷媒であるR410Aの3分の1であり、すでにルームエアコンや店舗・オフィス用エアコンに採用されています。一方で、微燃性という特性があるため、冷媒充填量の多いデータセンタ用空調機のような大型空調機の場合、R410A等と比較しその取り扱いが難しいと



(a) 室内ユニット (b) 室外ユニット

図1 FMACS-VI(M) 外観

いった課題がありました。これについては、一般社団法人日本冷凍空調工業会などでリスクアセスメントと対策検討がなされており、冷媒の検知器、警報装置等の設置、冷媒の漏洩時に冷媒濃度が濃くなる部屋への換気設備設置といったデータセンタ用空調機に充填される微燃性冷媒を採用・安全に使用方法が、日本冷凍空調工業会標準規格(JRA規格)、日本冷凍空調工業会ガイドライン(JRA-GL)にまとめられています。

通信ビルやデータセンタにおける空調の設計、工事、管理、保守などを担っている社内外の関連部署とJRAやJRA-GLへの準拠について協議を重ねながら、対応方法の検討・整理を行い、空調機の構成を安全な構成とするとともに、安全に扱うための設置条件を定め、標準構成では従来のFMACS-Vと同じ機器構成とすることを可能とした、微燃性冷媒採用の基礎技術を築いてきました。

消費電力削減については、高効率なR32の採用、マイクロチャネル熱交換器、高効率モーター、高効率ファンの搭載に加え、シミュレーションを駆使して空調機内空気抵抗の最小化を図り、従来のFMACS-Vから年間消費電力量約20%削減を実現しました(図2)。

また、パッケージ式空調機であり、室内ユニットは冷水を使わないため漏水によるICT装置の水損を気にせず自由な室内配置が可能であり、室外ユニットも低速静音化による配置自由度を持っています。加えて、圧縮機を室内ユニットに搭載することで配管長が長い場合の圧力損失による能力低下の抑制と、配管サイズの径化により高い経済性を実現するとともに、リプレースへの配慮もなされています。

さらに、震度6強クラスの揺れでも運転が継続できることを耐震試験により確認し、電磁ノイズに関する規格VCCIクラスA機器、CISPR 35に準拠し、FMACS-VI(M)からの発生ノイズがICT装置に影響を及ぼさないような対応を行うとともに、周囲のICT装置からのノイズによって誤動作を起こさないノイズ耐性を備えています。

温室効果の低い冷媒R32の日本初採用や高い省エネ性によるカーボンニュートラルへの貢献が評価され、FMACS-VI(M)は2024年12月に省エネ大賞 製品・ビジネスモデル部門「省エネルギーセンター会長賞」を受賞しています。今後はFMACS-VIのラインアップ(大容量タイプ等)の拡充を予定しています。

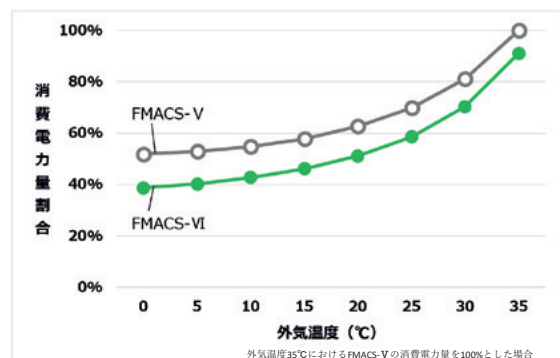


図2 FMACS-VIの省エネルギー性能

常に現場を意識して、本質を見極める 力を持って研究・開発に取り組む

研究開発者として意識していることは何でしょうか。

常に現場を意識して、本質を見極める力を持って研究・開発をステップアップしていきたいと考えています。とはいえ、一般的なビルの空調設計の経験はあるものの、FMACSについては開発担当であり、導入に際しての設計の経験はありません。設計・施工の現場においては、さまざまなシチュエーションがあると思います。その中で大きな困りごとや課題については開発サイドにフィードバックしてもらえますが、日々のちょっとしたカイゼンや、現場で対応できてしまうような課題が数多く現場にはあると思います。そういった課題の中に、潜在的に大きな課題として機能向上につながるべきものが存在するのではないかと考えています。現場は、知識の宝庫で、私の知らない知見やノウハウも数多くあり、また、自分だけでは得られない着眼点や課題感を得ることができると思います。だからこそ、常に現場を意識すること、そして現場との接点を持つ機会やそれをつくり出すこと、そのうえでしっかりと意見交換することが大切なのです。

そして、現場で得た観点、知見を多面的に評価して本質を見極めることも大切です。現場は課題の宝庫でもあり、その課題は幅の広がりや深さという点において、千差万別です。そこで、本質的な課題を見極めて取り組むことで、研究開発に深みが出てきて、それが結果として成功のカギとなるのではないかと考えています。

開発におけるスキルの維持、スキルアップはどうしていますか。

私は2013年にNTTファシリティーズに入社し、当初の2年間は一般ビルの空調設計を行い、2015年からFMACSに携わるようになりました。専門的なスキルは、学生時代からデータセンタの空調に関するテーマに取り組んできたこともあり自身のコアスキルではあるのですが、最近ではデータセンタ用空調機に限らずさまざまな分野で技術革新が進み、それをいち早く取り込んでいく、そのためにアンテナを指向性が広く、高いものにしていくことが必要だと思っています。

この一例として、R32への冷媒転換があります。オゾン層を破壊するおそれのある物質を指定し、これらの物質の製造、消費および貿易を規制することを目的としたモントリオール議定書の中で、「キガリ改正」という温室効果が高い冷媒の使用量削減に関する国際的な枠組みができて、日本ではフロン排出抑制法が改正されてそれに対応するというかたちになっています。フロン排出抑制法の中に指定製品制度というものがあり、その中でFMACSが属する電算機用空調機に対する規制は、2024年3月に審議会で承認（2024年10月に省令公布）され、2029年までに、温室効果が

ある程度抑えられた冷媒に転換していくことになりました。

広い指向性と高いアンテナで調査を続けて冷媒転換の動向をつかみ、中長期的な目線で得た情報を分析していくことで、次起こる変化を想定しながら、それをFMACS-VIの研究開発計画に落とし込んでいくことで対応ができました。また、方向性を想定することができた段階で、当社が独自でリスクアセスメントまで実施したことで、必要な構成を考えることができ、結果としてリリースを早めることができました。

こうしたスキルを活かして将来的に何を経験したいのでしょうか。

研究開発者として、お客さまとの接点を増やしていきたいと思っています。データセンタ等におけるデータセンタ用空調機の開発を進める中で、お客さまとお話をさせていただく機会があるのですが、この機会だけではお客さまが現状をどのようにとらえていて、今後どのようにしていきたいのか、といったお客さまの考えるポイントのところまでリーチしきれていないのではないかと考えています。空調技術者の立場でお客さまとの接点を意識的にとり、意見交換や情報収集を行うことで、それを新たに空調機に展開し、お客さまにプロアクティブな提案ができるようにしていきたいと思っています。

成熟した技術分野でも、成果を普遍的 に展開させるような仕組みを持たせる ことで大きな影響力を持つ

後進へのメッセージをお願いします。

研究開発の成果は、単体でみれば小さな効果のものもあり、新しい萌芽的なテーマであれば非常に大きいインパクトを与えることができるといったように、多種多様です。その中で、空調関係は成熟した技術分野ではありますが、成果を普遍的に展開させるような仕組みを持たせることで、単体でみれば小さな効果であっても大きな影響力を持つことができます。データセンタでは大量の電力消費があるので、その数%を削減するだけでも社会的インパクトが大きい、というのはその一例で、私はそれを研究のモチベーションにしています。

そのために本質をとらえるようにして、現場を見て、普遍的に展開できそうなポイントを常に自問しています。インパクトに関して、私の場合は省エネルギー化が出口だったのですが、研究テーマにより、その出口もさまざまだと思います。萌芽的な分野では大きな成果、成熟した分野では大きな展開について、研究テーマを設定検討するときに意識してみたらどうでしょうか。

■参考文献

- (1) 総務省：“令和6年版 情報通信白書,” 2024.
- (2) 経済産業省：“第7回デジタルインフラ（DC等）整備に関する有識者会合 資料5,” 2024.



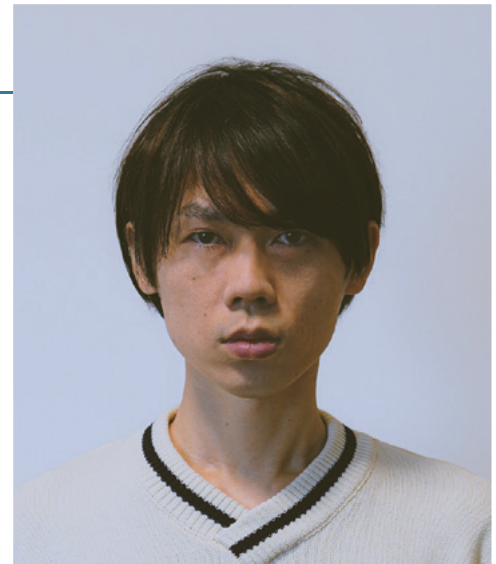
NTTコミュニケーション科学基礎研究所
特別研究員

横坂 拓巳 Takumi Yokosaka

誰でも触覚体験デザインの際に利用できる「マップ」や「図鑑」をつくる

存在しない触り心地を感じる現象や、他人の指を自分の指だと感じる現象など、多くの触覚の錯覚現象が私たちの日常生活に潜んでいます。今回は、これらの錯覚現象を用いて人間の感覚体験を理解する研究を行い、NTTの錯覚体験ウェブサイト Illusion Forum (イリュージョンフォーラム) で多くの触覚の錯覚を公開されている、横坂拓巳特別研究員にお話を伺いました。

◆PROFILE: 2013年大阪大学大学院博士前期課程修了。同年、日本電信電話株式会社入社。2018年東京工業大学大学院博士後期課程修了。博士(学術)。2023年より特別研究員。人間の触覚や身体感覚の原理解明をめざし、錯覚現象を用いた心理物理の研究に従事。



触覚体験をデザインするための出発点となる理解体系を構築する

■どのような研究をされているのか教えてください。

私の研究のテーマは「外界と自己に関する触覚体験のデザイン科学」です。「外界に関する触覚体験」とは、人が物体に触れた際にチクチクやフワフワなどの手触りをどのように感じるのかという触感の原理を調べる研究です。そして「自己に関する触覚体験」は、人が自分以外の物体に触れる際、どのような物体ならば自分の体らしく感じるのかという身体認識の原理を調べる研究です。

私は触感を「外界」、身体感覚を「自己」と呼んでいます。例えば指でフォークの先に触れた際に、フォークの形状に合わせて自分の指先の皮膚が凹みます。これは自分の皮膚が凹んで変化するという「自己」の体に対する体験であると同時に、フォークの先が凸凹しているという「外界」のモノに対する触感の体験でもあります。私はこの自己と外界の触覚体験は表と裏の関係で相補的なものだと考えており、両側面から触覚を研究することが重要だと考えています。

次に、触感と身体感覚の「デザイン科学」について、これは製品開発やDIYなどで心地良い触感のものをつくる時や、義手やメタバースにおけるアバターのような自分の体として違和感のない体をつくる時に利用可能な、デザインの理解体系を構築することを意味します。デザインと聞くと一般的には製品の見た目や機能、ユーザインタフェースなどの設計をイメージすると思いますが、本来デザインとは、「何か」を構想してそれをかたちとして実現する行為のことであり、誰もが日常的に行う人間的な行為でもあります。

例えば「クレヨンでお絵描き」をするときには、描きたいものを構想してさまざまな色のクレヨンを組み合わせて実現します。

本来、色は光の波長によって変わるもので物理的には明確な区切りはないのですが、クレヨンは赤や青など、人間が理解しやすい色体系に整理されています。クレヨンがあることで、人間はクレヨンのさまざまな色を使い、それらを組み合わせ、描きたいものを実現することが可能になります。このクレヨンの色体系を構築することがデザイン科学であると私は考えています。

このように「何か」を構想して実現するためには、その「何か」の構成要素やルールなどをまとめた理解体系や知識体系が必要です。そしてモノをつくるための土台や出発点となる理解体系をつくるのが、私の考える「デザイン科学」です。

■今の研究を始めるまでの経緯や、この研究の魅力について教えてください。

私が入社して最初に取り組んだのは「触り方」の研究でした。その研究では、さまざまな物体に触れている時の手や目の動きから、その人の感じている触り心地を推定する、というテーマに挑戦しました。この研究を論文にする際に、手の動きや目の動きと、粗さ感や硬さ感などの触感の関係を体系的に表現した「マップ」をつくりました⁽¹⁾(図1(a))。このマップは、手の動きや目の動きをどう組み合わせれば、所望の触感を推定できるかという理解体系になっていて、まさに私が先ほど説明した「デザイン科学」の考え方に沿っており、振り返ればこの経験が今の研究につながっているように感じます。

そして人間の触覚体験を俯瞰的に理解したいという思いから、「マップをつくる」というアプローチが徐々に確立されてきました。例えば、ベルベットハンド錯覚(硬く粗い針金の触感が柔らかくなめらかな触感に変調する錯覚)における触感変調の様子を触覚マップの上で表現する研究をしました^{(2),(3)}(図1(b))。

その後、私が所属するグループのリーダーからデザイン科学の

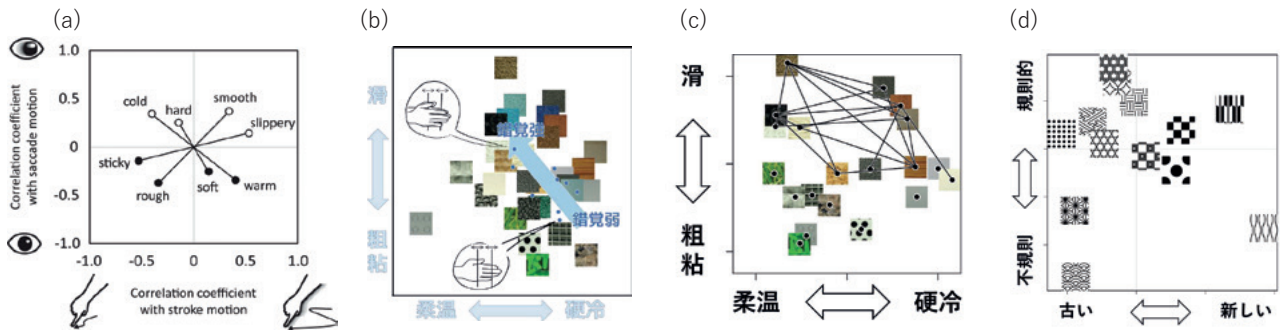


図1 触覚の関係を体系化するマップの例

(a) 触覚の錯覚の体験方法

Home > 錯覚 > 形状知覚 > 回転する砂時計の錯覚

30秒以上、回し続けてください

動画を再生してください。一方の手で短い棒をつまみ、他方の手でその棒を回転させ続けると、棒の形はどのように変化するでしょうか？

説明

片手でつまんだ短い棒を、もう一方の手で回転させ続けると、棒のつまんでいる部分が砂時計のようによくひれて短くなります。この錯覚は30秒から40秒程度、長く回すと顕著になります。

実際の形

指で感じられる形

これは棒をつまんで回転させたと感じる圧力の分布が不均一になるためと考えられています。つまり、つまんでいる関節中心部分では指先に強い圧力を感じ、関節部分では強い圧力を感じるために、中心部分は周辺部分よりも短くなると解釈される、という仮説です。

(b) 触覚の錯覚は現在、全部で34件公開

Home > 錯覚一覧

錯覚一覧

Illusion Forumに掲載されている錯覚一覧です。下記のタブより、錯覚、錯覚、多感覚統合、錯覚一覧(テキスト)を切り替えることができます。

錯覚一覧 錯覚一覧 錯覚一覧 錯覚一覧(テキスト)

錯覚一覧

形状知覚

回転する砂時計の錯覚 回転ディスクの棒の錯覚 凸凹の錯覚 角の錯覚 リットラフ錯覚 くし錯覚

知覚的補完

水や角の穴に近づくと錯覚 ユーザーリサーチ錯覚 テルーフ錯覚 垂直水平錯覚

位置・空間知覚

タコとカッター 赤色錯覚 錯覚知覚(「ソフトムーン」錯覚) ウェーバーの錯覚 丸の大きさの錯覚

(c) これからも多くの触覚の錯覚を公開予定



図2 NTTのイリュージョンフォーラム上で公開されている触覚の錯覚の解説

考え方を学び、自分の関心はデザインにも利用可能な理解体系の構築であると感じ、デザインへの貢献も視野に入れた研究に取り組み始めていました。現在ではどのような触感の素材を組み合わせると心地良い触感が生まれるかを表現するマップ⁽⁴⁾(図1(c))や、簡便な模様デザインのルールによって生み出される触感を表現するマップ⁽⁵⁾(図1(d))を研究しています。

この研究の魅力は、知識体系が単にデザインのために役立つだけでなく、その体系自体を楽しめることだと思います。通信省時代から今でも多くの方々に語り継がれている「知の泉を汲んで研究し実用化により世に恵を具体的に提供しよう」という、電気通

信研究所 吉田五郎 初代所長の言葉があります。私は「知の泉」とは実用化につながる基礎研究の知見だととらえており、私の研究でいえば、研究の成果として得られた知識体系が知の泉に該当します。私は、このような知識体系は、何かしらの製品やサービスを実現する段階に至っていない状態でも、世に恵みを提供できる可能性があると感じています。

実際、私たちは知識体系そのものを楽しむ場面がよくあります。例えば図鑑やカタログ、コレクションブックなどはある種の知識体系で、分かりやすく整理されており眺めるだけでも面白いものです。私の取り組みでいえば「Illusion Forum (イリュージョン



図3 ベルベットハンド錯覚研究の実験風景

フォーラム)」が知識体系の図鑑に該当します⁽⁶⁾。イリュージョンフォーラムとは、NTTが25年ほど前から公開している錯覚体験ウェブサイトです(図2)。

以前までは見た目の錯覚(錯視)と、聞こえの錯覚(錯聴)が体験できる130以上のコンテンツを提供していました。私も触覚研究者として携わっており、2023年にさまざまな触覚の錯覚(錯触)を集め、新たなコンテンツとして公開しました。そのイリュージョンフォーラムは、教育利用をはじめとしてさまざまなシーンで多くの方々に使っていただいています。眺めるだけでも楽しいという感想も多くいただいています。また、SNSにおいて日常で起こった不思議な体験について、イリュージョンフォーラムを参照して説明をつけようとするケースもみられます。これはイリュージョンフォーラムが錯覚の図鑑や辞典の役割を果たしており、先人たちが発見した錯覚現象とそれを体系化したものが、人々の知的好奇心を刺激し、日常での感覚体験に対する解像度を高めるかたちで知識を提供しているのだと思います。「知の泉」はそのまま飲んで美味しい、ということです。

■ご自身の研究環境について教えてください。

私の研究には大きな設備は必要ありません。ただし、モニタのような視覚提示ディスプレイや、スピーカのような聴覚提示ディスプレイに相当する、触覚提示ディスプレイは現時点で確立されていないため、実験室を使い日常で触れ得るさまざまな素材を人の手で繰り返し提示する、というアナログな方法で実験しています(図3)。実験では、私が一定の速度で素材を動かしたり、もしくは実験参加者の方には触り方を統一してもらったり、触る時間を5秒に限定したり、とさまざまな制限を設けています。この実験は自動化ができないことが悩みの種で、先日の実験では素材を入れ替える作業を1日で1600回も繰り返し、大変な思いをしました。

また、実験で提示する素材は布や木、金属、プラスチック、ゴムなど日常生活で触れる機会が多い物体をメインに集めます。これらの素材の選定の仕方には、いまだに確立された基準や決まった規格のようなものはありません。そこで、先行研究で調べられている素材を参考にしながら、自分で100円ショップなどで素材を探し集め、実験に使えるように形や厚みを整えたりしています。

■体や、その体を通じて感じられる世界も、デザインできるようにしたい

■これまでの成果や今後の課題、これからの展望について教えてください。

これまでお話しした触感マップ以外にも、身体感覚のマップもつくっています。これは名古屋市立大学の小鷹研理先生たちとの共同研究で、麻痺錯覚という身体錯覚を起こす素材の触感について調べるものです⁽⁷⁾。麻痺錯覚とは、自分の指と他人の指をくっつけてもう片方の指でつまんで擦ると、他人の指が自分の指のように感じられ、さらにその指がまるで麻痺したように感じられる身体錯覚現象です(図4(a))。

他人の指の代わりにペンをくっつけて擦ったときにはこの錯覚が起こりにくいことから、他人の指が持つ触感が身体錯覚に重要なのではないかと議論されていました。私は、具体的にどのような触感の物体がこの錯覚を起こしやすいのかを解明できれば、自己身体と錯覚しやすい触感について理解できると考えました。そこで他人の指をさまざまな触感を持つ物体で代替して、そのときの錯覚の強さを調査しています(図4(b))。その結果得られたマップは、どのような素材が強い錯覚を起こすのかを表しており、赤い領域のような柔らかく滑らかな素材のほうが錯覚を強く起こす傾向があることが分かります(図5)。

そして、この研究は人間らしい触感をデザインするためのマップとしても有用だと考えています。例えば、義手のように自分の体に取り付けるものや人型ロボットに人間の肌感を求める場合や、反対に人間らしさを排除した製品を求める場合の、素材マップとして本研究の知見が使えるのではと考えています。

今後は新たに世の中に現れるテクノロジー群を、どのように使ったり組み合わせれば、所望の触感や身体感覚、さらには「感じられる世界」をもデザインできるのかを追求したいと考えています。

例えば、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) のめざしているデジタルツインコンピューティングが実現して、他人や人間以外の生き物が感じている世界をシミュレートできるようになれば、私たちがその人や生き物の世界を追体験できるかもしれませんし、大容量・高速通信の実現により、地球の裏側や月で起こる出来事をリアルタイムに体験できたりするかもしれません。つまり新しいテクノロジーにより、新たな身体感覚や新しい世界体験の実現が期待できます。そのときに大事なことは、人が自律的に触りたい触感や、なりたい身体、浸りたい世界を選択できることです。そのため私は、触感や身体感覚、「感じられる世界」などが体系的に記述されたレシピブックを基に、誰でも簡単にデザインできる未来をつくりたいと考えています。

「感じられる世界」について補足すると、私たちが見ている世界や感じている世界は私たちの体の形状や機能に合わせて変化します。例えば、新しいテクノロジーによって、自分の体に羽が生えたとします。そうすると、今まで気にもとめてこなかった高い位置の看板や屋根などが、自分の足場になる場所や、避けるべき場所に見えてきたり、今まで気にしていた急な坂道や階段などを意



図4 身体錯覚のセットアップと身体錯覚を起こす素材の触感を調べる実験

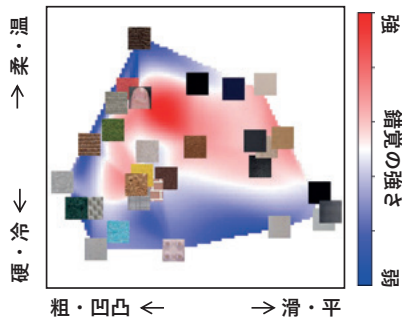


図5 身体錯覚を起こしやすい素材の触感を表したマップ

識しなくなったりするでしょう。

このように自分の体が変わることで、世界との相互作用が変わり、その結果世界の感じ方が大きく変化します。このような身体機能と結びついた新たな世界を生み出し続けているのが、ビデオゲームです。あるビデオゲームで、天井を自在に通り抜ける能力があります。面白いことに、このビデオゲームを経験した人たちの中には現実世界でふとベランダに出て上の階の天井を見たときに「あ、ここ通れるな」と、これまで意識しなかった天井に新たな意味を見出してしまうことがあります。このケースに限らず世の中にあるたくさんのビデオゲームは、非常に多様かつ自由なとらえ方で仮想世界をつくり出しています。

これらの世界を構成する要素を理解し、体系化できれば、将来的に浸りたい世界をデザインする際にも有用だと考えており、同研究グループのメンバや大阪芸術大学などの方々も巻き込んで、ビデオゲームにおけるプレイや体験の研究も始めています。特に、そのグループの丸谷和史主幹研究員と着想した、ビデオゲームのリメイク作品の分析で具体的な成果が出始めています^{(8),(9)}。リメイク作品はオリジナル作品がつくり出す世界を、より現代的なテクノロジーによって再構成したものです。

実存するビデオゲームのリメイク作品に関するアンケートを調査した結果、自分が主人公に深く自己投影できることや、現実世界での行動結果をシミュレーションできることなどが、ビデオゲームの生み出す世界の重要な軸になることが分かってきました。今後は、これらの軸を体系化し、マップにすることで所望する世界をつくり上げるためのレシピブックを実現したいと考えています。

研究上の課題として、私の研究は「誰でも理解可能な知識体系をつくる」ことが目標のため、直感的に理解可能なマップをどう

つくるかが大きな課題だと感じています。図1では触覚体験を2次元マップで図示していますが、実際には人間の触覚体験はもう少し多次的なものです。しかし多次元空間を人間が直観的に理解することは難しいので、人間が理解可能なエッセンスは何かを見極めて、単純化することが必要だと考えています。

■若き研究者の方、学生、ビジネスパートナーへメッセージをお願いします。

私のみでできること、また私の分野のみでできることには限界があるので、できれば私の知らないことに取り組んでいる方々と一緒に仕事をしたいと考えています。自分が所属する分野や周辺分野だけを見ていると考え方も凝り固まりますし、自分のスキルセットで対処しようのない問題の解決を保留してしまう可能性もあります。冒頭で掲げたデザイン科学の考えが独りよがりにならないように、皆さんの力をお借りしている様々な分野へと発展させていき、思いもよらなかったような応用先に結び付けられたらと思っています。

学生の皆さんにとっても、自分の専門分野のみでなく、いろいろな分野に触れることは、有用な姿勢だと思っています。私も日本民俗学会やいろいろな研究会に参加したり、さまざまな分野の論文や本を読んだりしましたが、ほかの分野に踏み込むと、視野が広がるのを実感します。ある意味、知識という新しい体を手に入れたことで、見えている世界が変わったともいえます。見えている世界が広がれば、自分にしかできないユニークな研究ができるわけで、ほかの研究者にはない自分だけの強みを手に入れることにつながるのではと思います。

■参考文献

- (1) T. Yokosaka, S. Kuroki, J. Watanabe, and S. Nishida : "Linkage between free exploratory movements and subjective tactile ratings," IEEE Transactions on Haptics, Vol.10, No.2, pp.217-225, 2017.
- (2) T. Yokosaka, S. Kuroki, and S. Nishida : "Describing the sensation of the 'velvet hand illusion' in terms of common materials," IEEE Transactions on Haptics, Vol.14, No.3, pp.680-685, 2021.
- (3) <https://journal.ntt.co.jp/article/14487>
- (4) T. Yokosaka : "Textural 'Marriage': Tactile Pairing Principles for Everyday Materials," IEEE Haptics Symposium 2024, Long Beach, U.S.A, April 2024.
- (5) T. Yokosaka, R. Sumida, T. Ohtani, and K. Maruya : "Aesthetic and affective dimensions explaining variation in tactile perception of periodic patterns," Eurohaptics 2024, Paris, France, June 2024.
- (6) <https://illusion-forum.ilab.ntt.co.jp/>
- (7) T. Yokosaka, Y. Sato, and K. Kodaka : "Tactile properties of everyday materials for inducing a body illusion," Eurohaptics 2024, Paris, France, June 2024.
- (8) T. Yokosaka, K. Miura, Y. Isogaya, T. Ohtani, and K. Maruya : "Factors of player experience in describing the relationship between remade and original works," 2024 IEEE Conference on Games (CoG), pp. 1-4, Milan, Italy, Aug. 2024. doi: 10.1109/CoG60054.2024.10645618.
- (9) 丸谷・横坂・磯谷・大谷 : "ゲームのリメイク作品に対する評価を決定づける体験要素," エンタテインメントコンピューティングシンポジウム2024論文集, pp.255-260, 2024.

ICT機器の排出熱に基づくCO₂排出量算出AIモデルと今後の応用可能性

昨今の生成AI（人工知能）等の技術革新により、今後データセンタの需要はますます拡大し、それに伴ってデータセンタの消費電力量も大幅に増加すると考えられています。これまで、データセンタの消費電力量はフロアやラック単位での把握は可能でしたが、ICT機器ごと、あるいは利用者単位での把握は困難となっていました。NTTコムウェアではこの課題に着目し、ICT機器に手を加えることなく、非接触の温度センサを用いてICT機器ごとの消費電力量を把握する技術を開発しました。

昨今のデータセンタの状況について

国内データセンタの電力消費量は、2030年には2018年の約6.4倍の900億kWhに増大する⁽¹⁾と推計されています。生成AI（人工知能）の技術革新や今後の普及によりデータ処理量が增大することによるさらなる電力消費量の増加が懸念される一方で、データセンタ事業者には環境負荷の低減が求められています。環境負荷を示す指標の1つとしては、CO₂排出量を計測・開示する方法がありますが、実際にCO₂排出量を計測することは難しいため、一般的には消費電力量とその電力がどのようにつくられたか（火力・原子力・水力等）から概算する方法を用います。現在のデータセンタでは、フロアや複数のラックをまとめた分電盤ごとに消費電力量を把握し、CO₂排出量を推定しています。しかし、より正確にICT機器単位、データセンタに機器を預ける利用者であるお客さまごとの消費電力を把握するためには、個々の機器について国の認可を受けた電力計の導入が必要となります。初期構築の段階においては電力計導入の費用が課題となり、すでに利用されているお客さまへの導入においては、電力計設置の際に発生する電源断や通信断などのサービス停止を伴うため、お客さま説明や対応が必要となり、費用や現場作業員の負担も増加します。そもそも、電力計設置のために一瞬でもサービスを停止することは難しいといった課題も存在しています。

データセンタには大きく分けて「クラウド型」と「ハウジング型」、「コロケーション型」という3つの形式が存在します。クラウド型とはAWS（Amazon Web Services）のような「データセンタ事業者が自らサーバを準備し管理する形式」、ハウジング型は「お客さまのサーバ等ICT機器を設置するラックなどの小規模な場所をデータセンタ事業者が貸し出し、事業者がICT機器を管理する形式」、コロケーション型は「お客さまのICT機器を設置する個室等比較的広いスペースをデータセンタ事業者が貸し出し、事業者がICT機器を管理する形式」を指します。ハウジング型ではクラウド型やコロケーション型と比較してICT機器ごとの消費電力の把握がより難しくなります。なぜなら、ハウジング型ではお客さま自身がサーバ等ICT機器を運用するため、通信断を伴う電力計や監視ツールの導入をデータセンタ事業者が実施することが困難であり、ICT機器から直接消費電力量等のデータを取得できないためです。コロケーション型は貸し出しの形態としてはハウジ

ング型に似ていますが、フロア、分電盤、ラック単位の電力が把握できるため、消費電力を把握する観点であればクラウド型の特徴に近くなります。

今回開発した技術の紹介

NTTコムウェアでは、前述のデータセンタ分野の消費電力量およびCO₂排出量把握の課題に関し、消費電力量と強い相関があると考えられるICT機器の排気熱を非接触の温度センサで測定し、独自のAIを用いて、排気熱の温度から消費電力量の推定が可能であるか実証実験を行いました。非接触の温度センサを選定した理由は、ターゲットとするハウジング型データセンタにおいて、お客さまのICT機器に影響を与えることなく、すなわちサービス停止させることなく計測が可能となるためです。今回は主なICT機器としてサーバについて実証を行いました。サーバの排気口の近くに非接触の温度センサを取り付け、サーバのハードウェアやソフトウェア構成を変更することなく、消費電力量の推定やCO₂排出量の算出を可能としました。

本技術は、NTTコムウェアが現在取り組んでいるデジタル技術を活用したスマートインフラメンテナンス「SmartMainTech[®]」*1に含まれる、マルチAI制御フレームワーク「Infratecor[®]コア」*2の1つであり、これまでNTTコムウェアが培ってきた、マルチAI・マルチモーダルAI技術開発のノウハウを活かして開発・検証したものとなります。

実証実験の概要

実証実験の形式について、図1に示します。図に示すとおり、今回の実験ではNTTコムウェアのデータセンタにて、3台のサーバ（1、2、3号機）を対象とし、排気熱の温度から消費電力量を推定するAIを作成し、その精度を確認しました。さらに追加実験として、サーバに監視ツールを導入しCPU使用率のデータを取

*1 「SmartMainTech」は、NTTコムウェア株式会社の登録商標です。

*2 Infratecorコア：複数のAI画像認識の組合せやAI画像認識と統計解析など異なるAIの組合せ、あるいはAI判定の前後処理の組合せなど、AIの社会実装を進めるうえで必要となる開発を総合的にサポートする部品化フレームワーク。「Infratecor」は、NTTコムウェア株式会社の登録商標です。

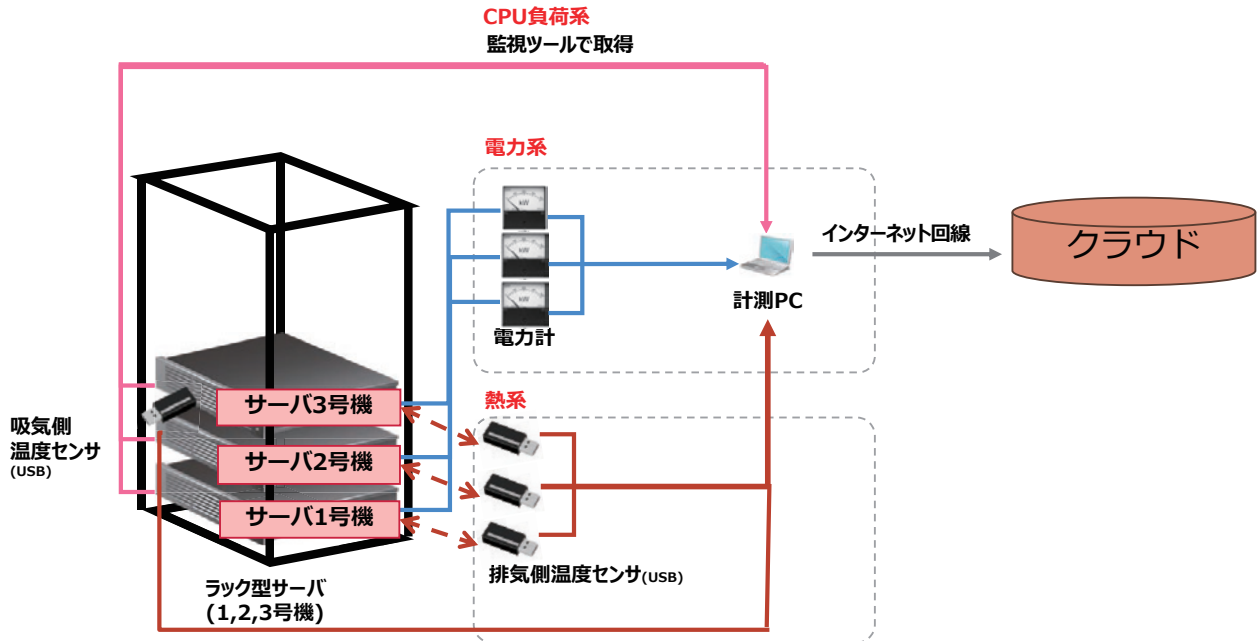


図1 実証実験形式

表 排気熱の温度、消費電力量、CPU使用率間の相関係数

相関係数	
排気熱の温度×消費電力量	0.9460
CPU使用率×消費電力量	0.9210

得することで、AIを用いて CPU使用率から排気熱の温度と消費電力量の推定が可能であるか確認を行いました。

温度センサについては、各サーバの排気部分に1台ずつ、さらにサーバの吸気側に1台の計4台を設置しました。これにより得られる排気側と吸気側の温度センサの値の差を、今回は排気熱の温度として扱っています。吸気側の温度センサを1台としたのは、データセンタのサーバの吸気側は、空調で温度が一定に保たれており、近隣のサーバごとに変化がないためです。電力については、サーバごとに電力計で計測を行いました。

排出熱の温度、消費電力量、CPU使用率の相関係数の結果

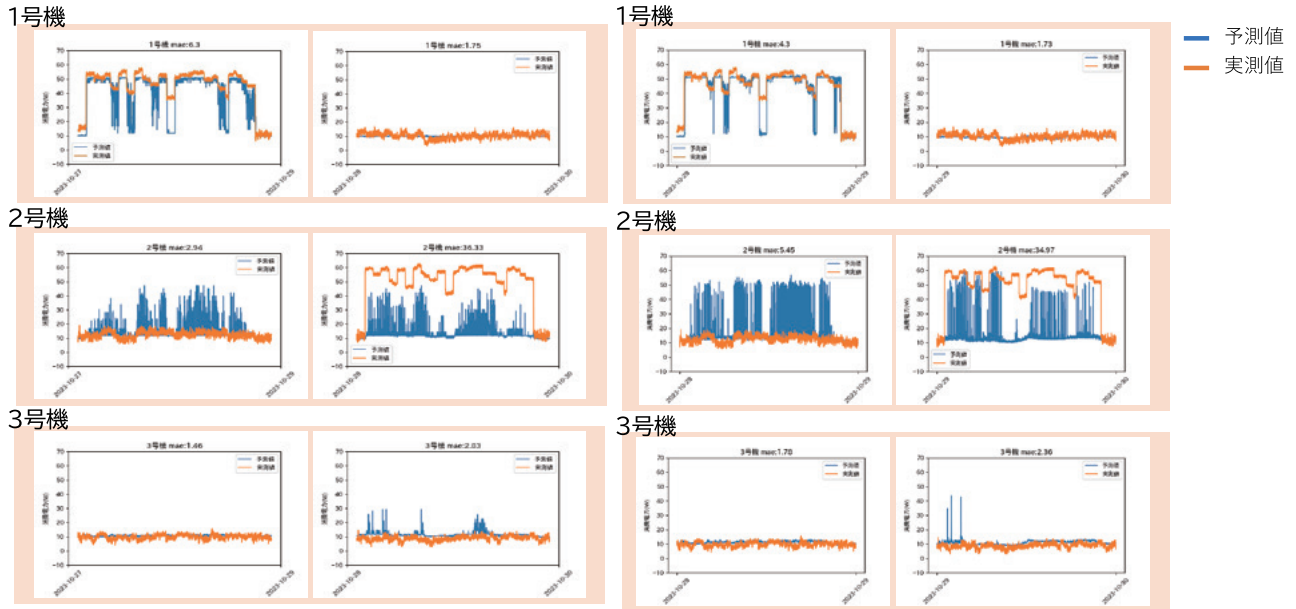
ここからは実証実験で得られた結果について示します。まず、AIを作成するにあたり、排気熱の温度、消費電力量、CPU使用率それぞれの相関係数を求めました。各値の間の相関係数については表に示しています。CPU使用率と消費電力量、排気熱の温度と消費電力量の間で、どちらも0.9以上の高い正の相関を示していることが分かります。これにより、消費電力量、排気熱の温度、CPU使用率それぞれの値の変化から他の値の変化を高精度で推測可能であると考えられます。

LightGBM, LSTMを用いた時系列温度データからの消費電力量推定

前述のとおり、消費電力量、排気熱の温度、CPU使用率の各値は正の高い相関関係を持つことから、相互互換ができると考えられます。ここではAIを用いた相互互換が実際に可能であるか実証を行った方法と結果を示します。

今回のAI作成においては、LightGBM (Light Gradient Boosting Machine) とLSTM (Long Short Term Memory) の2つのフレームワークを選択しています。この2つのフレームワークを選択した理由としては以下のとおりです。LightGBMは全体的な上昇や下降傾向などのトレンドの反映は難しいですが、ある程度のデータ範囲内での予測に強いという特徴があります。室温が安定しており、消費電力量も特定の範囲内を推移すると思われるデータセンタ内の環境におけるデータ予測に適していると考え採用しました。LSTMは時系列データを扱うのに適した有名なニューラルネットワーク構造であり、今回扱う排気熱の温度や消費電力量も時系列データであるため、採用しました。

検証内容としては、3台のサーバのデータを標準化し汎用モデルとして各サーバの消費電力量等の予測を行う形式で行いました。汎用モデルで検証を行った理由は、ICT機器の型番やメーカーなどの細かい仕様の違いに適応していくには膨大なパターンの学習データと調整が必要となるため、今後サービスとして展開していく方法を考えるにあたり、なるべく1つの軸となるAIモデルで予測精度を確認するためです。今回は一例として、各サーバの排気熱の温度から消費電力量を推定した際の実測値と推定値の結果を図2に示します。LightGBMの汎用モデルでの結果を図2(a)、LSTMの汎用モデルでの結果を図2(b)、2つの手法の平均絶対値誤差



(a) LightGBMでの推定値と実測値の比較

(b) LSTMでの推定値と実測値の比較

	1号機		2号機		3号機	
日付	10/28	10/29	10/28	10/29	10/28	10/29
a:LightGBM	6.3	1.8	3.0	36.3	1.5	2.8
b:LSTM	4.3	1.7	5.5	35.0	1.8	2.4

(c) MAEによる2つの手法の比較

図2 AIモデルによる排気熱の温度からの消費電力量予測と2つの手法の比較

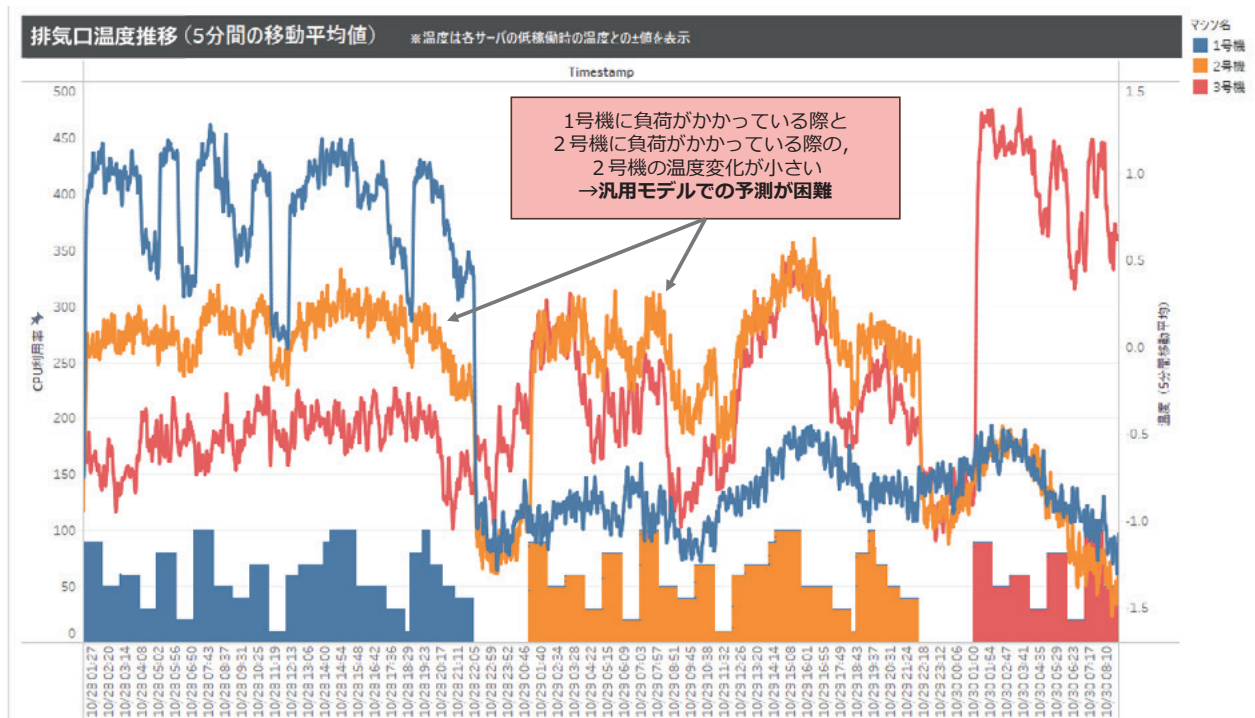


図3 各サーバの排気熱温度とCPU負荷推移

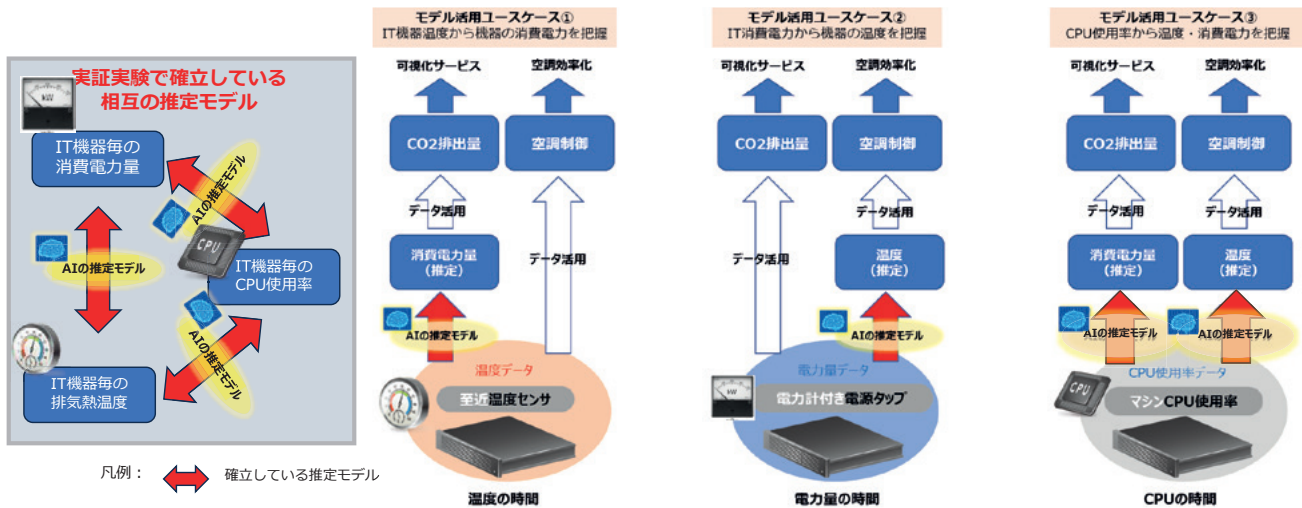


図4 本ソリューションの技術要素まとめ

(MAE : Mean Absolute Error) による比較を図2(d)に示します。結果としてはサーバ3台中1号機と3号機に関してはどちらの手法でも高精度で推定できていますが、2号機についてはどちらの手法でも大きく誤差が出る結果となりました。この結果になった原因として、2号機はラック内で下に位置する1号機の排熱影響を大きく受けたためと考えられます。また、2つのモデル(LightGBM, LSTM)でMAEの値を比較したところ、10/28の1号機と10/28、29の2号機で差があり、10/28の1号機、10/29の2号機ではLSTMのほうが誤差が少なく、10/28の2号機ではLightGBMのほうが誤差が少ないという結果になっています。しかし、どちらの結果もモデルに起因した誤差であるという特徴はみられず、全体的にみるとLSTMのほうがわずかに精度が良いが大きく変わらないという結果になりました。

続いて、2号機の排熱影響について考察していきます。図3にテスト期間の一部における排気熱の温度の推移を示します。棒グラフは各サーバのCPU負荷を表し、折れ線グラフは各サーバの排気熱の温度変化を示しています。このグラフを確認したところ、1号機だけにCPU負荷がかかった際に、2号機の温度センサも2号機だけにCPU負荷がかかった際と同程度に温度が上昇していることがわかります。その後の3号機のみCPU負荷がかかった際は2号機の排気熱の温度も低下していることから、センサの故障などではなく1号機の排熱影響を受けた可能性が高いと考えられます。これは汎用モデルを使用していくうえでは課題になると考えられます。

今回の実証実験では隣接するサーバ3台の場合のみでの検証となりましたが、今後の精度向上に向け、さまざまな機種やサーバ配置パターンでの検証を進めることで、機種ごとの特性や隣接するサーバの排熱影響を考慮したAIモデルへ発展させることができると考えています。

今後の応用

今回の実証実験から、図4に示すように消費電力量、排気熱の温度、CPU使用率は各値の相関関係により相互変換可能であることがわかりました。この結果から、当初想定していたデータセンタにおける消費電力量からのCO₂排出量可視化にとどまらず、さまざまなユースケースに適用可能だと考えられます。

例えば温度に関しては、データに基づく精緻な空調制御による電力コスト低減、ICT機器の異常な温度変化の早期発見によるメンテナンス性向上などが考えられます。消費電力量に関しては、具体的なグリーンICTの検討や環境負荷低減施策の効果測定などに利用できると考えられます。

また、本ソリューションはICT機器だけでなくさまざまな設備へ応用可能であることから、データセンタの運用高度化、GX (Green Transformation) 化のみならず、社会インフラ分野や製造業の工場など多様な設備を持つ企業へも展開していきます。

参考文献

(1) <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2020-pp-03-gaiyou.pdf>

◆問い合わせ先

NTTコムウェア
 エンタープライズソリューション事業本部
 ビジネスイノベーションソリューション部 第1ソリューション部門
 SmartMainTech担当
 E-mail bi-bid-ma_ito-g@srv.cc.nttcom.co.jp