

NTT 技術ジャーナル

2

FEBRUARY
2026

Vol.38 No.2

特集

IOWN 2.0時代の技術開発動向
—ネットワークからコンピューティングの領域へ

グループ企業探訪

ジャパン・インフラ・ウェイマーク

from NTTドコモソリューションズ

風力発電所のバードストライク対策AIシステム



URL
DOI

<https://journal.ntt.co.jp/backnumber/2026/vol3802>
<https://doi.org/10.60249/26020000>

4 特集

IOWN 2.0時代の技術開発動向 ——ネットワークからコンピューティングの領域へ

- 6 IOWN 2.0時代の社会実装に向けた取り組み
- 12 DCIの技術開発におけるマルチベンダコンポーザブルサーバ実現の取り組み
- 18 PEC-2 を搭載した大容量・低消費電力な光電融合スイッチ
- 22 APNの領域拡大を支える最新トランスポンダ技術の研究開発動向
- 26 発展するAPNの運用を支える最新コントローラ技術の研究開発動向
- 30 主役登場 史 旭 NTTソフトウェアイノベーションセンタ



31 挑戦する研究者たち

渡邊 淳司

NTTコミュニケーション科学基礎研究所/NTT社会情報研究所 上席特別研究員

学ぶ場、働く場、そして研究の場のウェルビーイング・コンピテンシー



36 挑戦する研究開発者たち

中満 達也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

情報処理技術の専門家として建物環境のIT化を牽引する



特集

41 明日のトップランナー

長谷 宗彦

NTT先端集積デバイス研究所 特別研究員

光通信の限界を突破する、InP系半導体の
極広帯域アナログIC

For the Future

46 グループ企業探訪

株式会社ジャパン・インフラ・ウェイマークメンテナンス技術×ICT・AI技術×ドローン技術で
“支える人を、支えたい”

特別企画

50 from NTTドコモソリューションズ

風力発電所のバードストライク対策AIシステム

挑戦する研究者たち

54 Webサイト オリジナル記事の紹介

3月号予定

編集後記

挑戦する研究開発者たち

明日のトップランナー

グループ企業探訪

本誌掲載内容についてのご意見、お問い合わせ先

NTT技術ジャーナル事務局

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

本誌ご購読のお申し込み、お問い合わせ先

一般社団法人電気通信協会 ブックセンター

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

ホームページ <http://www.tta.or.jp/>NTT技術ジャーナルは
Webで閲覧できます。<https://journal.ntt.co.jp/>

from

IOWN 2.0 時代の技術開発動向 —ネットワークからコンピューティング の領域へ

IOWN(Innovative Optical and Wireless Network)構想は、2023年のAPN(All-Photonics Network)サービス開始に続き、コンピューティング領域へ進展していく。NTT IOWN総合イノベーションセンタ(IIC)は、IOWN 光コンピューティングを社会実装していくために、DCI(Data-Centric-Infrastructure)のマルチベンダ化やAPNの普及拡大をめざした技術開発などを行っている。本特集ではIICに属する各センタの取り組みを紹介する。

IOWN 2.0時代の社会実装に向けた取り組み 6

IOWNの技術開発の動向をユースケース開拓や技術・ビジネス実証の取り組みも含めてNTT IOWNプロダクトデザインセンタが紹介する。

DCIの技術開発におけるマルチベンダコンポーザブルサーバ実現の取り組み 12

DCIを構成する要素の1つであるコンポーザブルサーバ部を多様な製品を柔軟に組み合わせて構成可能とする、マルチベンダコンポーザブルサーバ実現へ向けた課題についてNTTソフトウェアイノベーションセンタが紹介する。

PEC-2 を搭載した大容量・低消費電力な光電融合スイッチ 18

データセンタの省電力化に向けた、光電融合デバイス(PEC-2)を実装した大容量・低消費電力な光電融合スイッチについてNTTデバイスイノベーションセンタが解説する。



APNの領域拡大を支える最新トランスポンダ技術の研究開発動向 — 22

APNのさらなる普及拡大に向けた、用途が多岐にわたるユーザ通信機器をオーブンな技術仕様でAPNに接続可能とする「マックスポンダ」「スイッチポンダ」の関連技術についてNTTネットワークイノベーションセンタが解説する。

発展するAPNの運用を支える 最新コントローラ技術の研究開発動向

26

発展するAPNの運用を支える中核機能として、ネットワーク全体の装置を一元的に監視し、サービス要件に応じて柔軟に連携制御する「APNコントローラ」技術についてNTTネットワークイノベーションセンタが解説する。

主役登場 史 旭 NTTソフトウェアイノベーションセンタ

30

高性能・省電力・柔軟なIOWNコンピューティング基盤の実現に向けて

URL <https://journal.ntt.co.jp/article/38185>DOI <https://doi.org/10.60249/26025001>

IOWN 2.0時代の社会実装に向けた取り組み

本稿では、これまでのユースケース開拓や実証の取り組みを通して得た知見や顧客ニーズを踏まえ、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 2.0時代の技術開発動向を、その効用とセットで紹介します。また、NTT IOWN プロダクトデザインセンタ (IDC) で検討中の適用ユースケースについても紹介します。

キーワード : #APN, #DCI, #実証

さかもと せいじ
坂本 誠治

さかもと たけし
坂本 健

NTT IOWN プロダクトデザインセンタ

はじめに

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) は、さまざまな領域で光電融合 (PEC : Photonics-Electronics Convergence) デバイスを適用し、ネットワークのエンド-エンドの光化に加えコンピュータの内部まで光を届けることでその仕組みを刷新し、エネルギー効率を高めるという、光の技術を軸とした次世代情報通信基盤です。このIOWN構想は、キーパーツである光電融合デバイスの進歩に伴い、IOWN 1.0, IOWN 2.0, IOWN 3.0, そしてIOWN 4.0と段階的に技術を進歩させていく計画となっています⁽¹⁾。

IOWNの最初の実装となるIOWN 1.0は中継装置やデータセンタ間といった比較的長距離通信を担う光電融合デバイス (PEC-1) を用いたもので、高速・大容量・低遅延なネットワークサービス「APN IOWN 1.0」としてすでに2023年からNTT 東日本およびNTT西日本が商用サービスを提供しています。IOWN 1.0に続くIOWN 2.0はボード間接続といった短距離を大容量・低消費電力で接続できる光電融合デバイス (PEC-2) により光電融合のコンピューティング領域への適用をねらうものであり、PEC-2を活用したコンピューティングシステムとしてData-Centric Infrastructure (DCI) の実用化を進めています。

このように、IOWNは通信をメインとする1.0から、コンピューティングに範囲を広げた2.0の時代に入りましたが、このIOWN 2.0の時代ではIOWN 1.0として登

場したAll-Photonics Network (APN)による通信と、IOWN 2.0として登場したDCIによるコンピューティングを組み合わせた「IOWN光コンピューティング」により、さらにIOWNの可能性を広げていきます。

本稿では、IOWN 2.0時代に求められるAPNの高度化、およびIOWN 2.0で新たに登場するDCIについて紹介します。さらにはIOWN 2.0時代の中心となる、DCIとAPNとを組み合わせたIOWN光コンピューティングに向けて、NTT IOWN プロダクトデザインセンタ (IDC) の取り組みを紹介します。

提供中の商用APN

APNでは、2030年の目標性能（電力効率100倍、伝送容量125倍、エンド・ツー・エンド遅延200分の1）の実現をめざし、さまざまな研究開発に取り組んでいますが、「APN IOWN 1.0」の提供開始後、NTT 東日本・西日本は、お客さまのご意見および研究開発成果を踏まえ、さらなる利便性向上に向け「All-Photonics Connect powered by IOWN」の提供を始めています^{(2),(3)}。

その特長としては、従来の「APN IOWN 1.0」の持つ高速・大容量、低遅延・揺らぎゼロに加えて、①ユーザ拠点間の帯域保証型通信としては世界最高水準の最大800 Gbit/sの帯域対応、②提供エリア内の2拠点であればどこでもポイント・ツー・ポイント接続を可能とする広域エリアでのサービス提供、③100 Gbit/s品目および

400 Gbit/s品目におけるイーサネットインターフェース対応、および回線終端装置をNTT通信ビルに設置することによるお客さま拠点の省スペース化・低消費電力化、の3つの機能です。

NTTドコモビジネスからは、お客さまの通信インフラに対する高度化ニーズに対応した都道府県をまたぐ通信サービスである「APN専用線プラン powered by IOWN」を2024年3月より提供を開始し⁽⁴⁾、その後、2025年10月からは、「APN専用線プラン powered by IOWN」を「docomo business APN Plus powered by IOWN」に統合し、オンデマンドで帯域変更が可能な回線メニューの追加や、さらなる広帯域メニューの拡充などの機能強化により、AI（人工知能）時代に最適なAI-Centric ICTプラットフォーム構想を支える中核サービスとして展開しています⁽⁵⁾。

現状のAPNの主なユースケース

APNの国内外での展開については、さまざまな業界においてビジネス利用を拡大中です。

■放送業界への適用

近年、ネットメディアの需要拡大が進む中において競争が激化しており、映像制作の効率化・DX（デジタルトランスフォーメーション）化が強く求められています。スポーツやコンサートなど撮影場所からの臨場感あふれる生放送へ対応するためには、高額な中継車の保有と多くのスタッフの長時間にわたる現地対応に対する効率化が喫緊の課題でした。大容量、低遅延といった特長

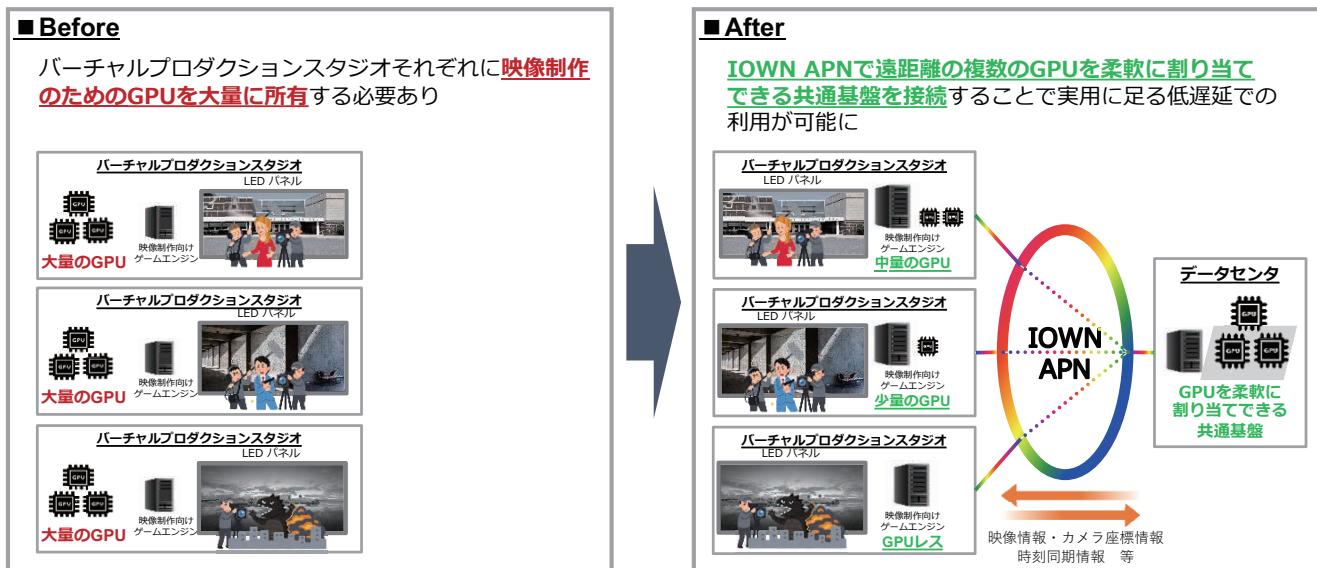


図1 APN経由でのGPU利用による映像プロダクションDX

を持つAPNでさまざまな撮影現場と制作拠点とを接続することで、中継車や多くのスタッフを現地に送ることなく高品質なコンテンツをリアルタイムに制作できる映像プロダクションDXが可能となります。

2025年11月開催のNTT R&D FORUMでは、映像プロダクションDXの1つであるバーチャルプロダクションという手法に関して、遠距離に分散された複数のGPUをIOWN APNで接続することで、制作現場に高性能な機材を常設せずとも、高品質の映像制作を低遅延で実現可能であることを確認しました⁽⁶⁾（図1）。

■建設業や製造業への適用

建設業や製造業において、近年は働き方改革推進や人手不足に対するDX等の対策が急務であり、遠隔地からの機械操作や集中管理による抜本的な業務効率化の検討が進んでいます。

2023年11月開催のNTT R&D FORUMでは、NTT武蔵野研究開発センタに設置したコックピットを用い、千葉のフィールドに設置した油圧ショベル、大阪のフィールドに設置したタワークレーンを操作する実証を行いました⁽⁷⁾、500 kmある東京～大阪それ

ぞれのロケに設置したAPN装置間においても往復わずか数msの遅延を実現するAPNを利用することで、現場での重機操作と遙かに操作性を実現しました。

IOWN Global Forumでは、山岳トンネル施工管理における遠隔化・自動化のユースケースが整理され、遠隔監視・遠隔解析・遠隔臨場・リモートモニタリングでのAPN活用を議論しています⁽⁸⁾。2025年11月開催のNTT R&D FORUMでは、工場と300 km離れたデータセンタからAPN経由でAI外観検査するなどの実証を行い、統一品質基準の確立と生産性の向上につながることを確認しました。加えて、制御ソフトウェアのクラウド化により、制御周期20 ms以内で生産設備の遠隔制御が可能などを確認し、現地派遣工数の削減と、複数の工場をまたがる生産性の向上が期待されます。

■データセンタ間での適用

近年、都市部でのデータセンタの用地確保はますます困難になる中でデータセンタの郊外化による用地・電力確保が急務となっていますが、情報通信インフラと電力インフラの連携を進めていく「ワット・ビット

ト連携」により、情報インフラの拡充とともに再生可能エネルギー等の柔軟な活用により消費電力効率の最大化をめざす動きが加速しています。

都市と郊外のデータセンタ間を接続するようなエリアをまたいだデータセンタ間接続においては、郊外の再生可能エネルギー等を活用した効率的な計算処理を実現できることから、APNによる高速・大容量・低遅延での接続を用いた高度な分散処理が可能となります。

■これからのAPNの進化

さまざまな業種・業態のお客さまにAPNをご活用いただき、課題解決につながることを確認してきましたが、一方で、より柔軟に利用したいというご要望をいただいている、これをIOWN 2.0時代のAPN機能開発に反映し、実用化を進めています。

■お客様のAPNへの期待

放送業界において、例えば、スポーツ中継で映像プロダクションDXに取り組む場合、サッカーと野球では開催場所が異なるため、多数のスタジアムが存在する中で、

スポーツの種別などに応じてAPNの接続先を変更するという利用形態が求められます。スタジアムを利用する際は、中継時間および事前事後の準備に必要となる最低限の期間だけを利用することで、施設利用料を抑制する必要があるため、映像プロダクションDXで活用するAPNもオンデマンドで接続対応を変更できる必要があります。加えて、映像プロダクションの作業場所を複数社でシェアリングする場合に、各社の利用状況に応じて必要なGPUリソース等を効率的に割り当てるといったコンピューティングへのニーズもあります。

建設業においても、例えば、午前と午後で異なる工事現場における重機の作業を遠隔で実施したいというケースがあり、お客さまがAPNを利用したい拠点が短期間で変化するため、APNのオンデマンド利用ニーズがあります。加えて、工事現場に通信機器を設置する場合、同一敷地内のユニットハウスを利用するケースが多く、利用可能なスペースや電力容量が限定的であるため、それらのリソースを効率的に利用したいというニーズがあります。各工事現場での通信機器の数を減らして構成をシンプル化したいという要望もいただいているままで、一方で、今後、施工の遠隔化

や自動化が進んでいくと、AIを活用した工事現場の危険予知などの必要性が想定され、各工事現場からAI処理に必要なコンピューティングリソースにアクセスして利用可能となることへの期待もあります。

■これからのAPNの技術開発

今後、APNの適用ユースケースを拡大・多様化していくうえで、お客さまの利便性向上に資する追加機能開発が求められています。

APN利用時の機器を小型化および機器数を減らし、低消費電力化を実現する技術として、オープンコンバージドトランスポンダ (OCT : Open Converged Transponder) が検討されています。プラガブルモジュール形態の光トランシーバを開発し、スイッチやルータなどのレイヤ2/3の装置に、レイヤ1の伝送機能の一部を搭載することで、装置統合による装置コスト・電力・設置スペースの低減が期待されます。

APN提供のための制御・運用・インテリジェント機能を実現する技術として、APNコントローラ (APN-C) の開発も進めており、前述のOCTを含むマルチベンダーの機器制御を行います。APN-Cは、限られた波長リソースの共有、および効率的

なルート設計・波長設計を可能とする機能などを担い、數十分程度のオンデマンドでの光パス切替を実現することで、APNの接続拠点を柔軟に変更するサービスの提供をめざしています。

そのほかにも波長を活用したさまざまな接続に対応するための波長変換技術や、グローバルへの展開も加速させていく観点から納期短縮に資する光波長パス伝送モード自動最適化技術 (AOPP : Automatic Optical Path Provisioning)，さらなる大容量化を実現する1.6 Tbit/sの光伝送技術など幅広い研究開発を進めています。

通信からコンピューティングへの IOWN展開 (IOWN 2.0)

APNによって立ち上がったIOWN 1.0に続き、光電融合のコンピューティング領域への適用をねらうIOWN 2.0では、光電融合デバイス (PEC-2) を用いてコンピュータのリソース間を接続することにより低消費電力化を実現するDCIがIOWNを支える技術として新たに登場します。これによりIOWNは通信をメインとする1.0から、コンピューティングに範囲を広げた2.0の時代へ移りますが、IOWN 2.0の時代では

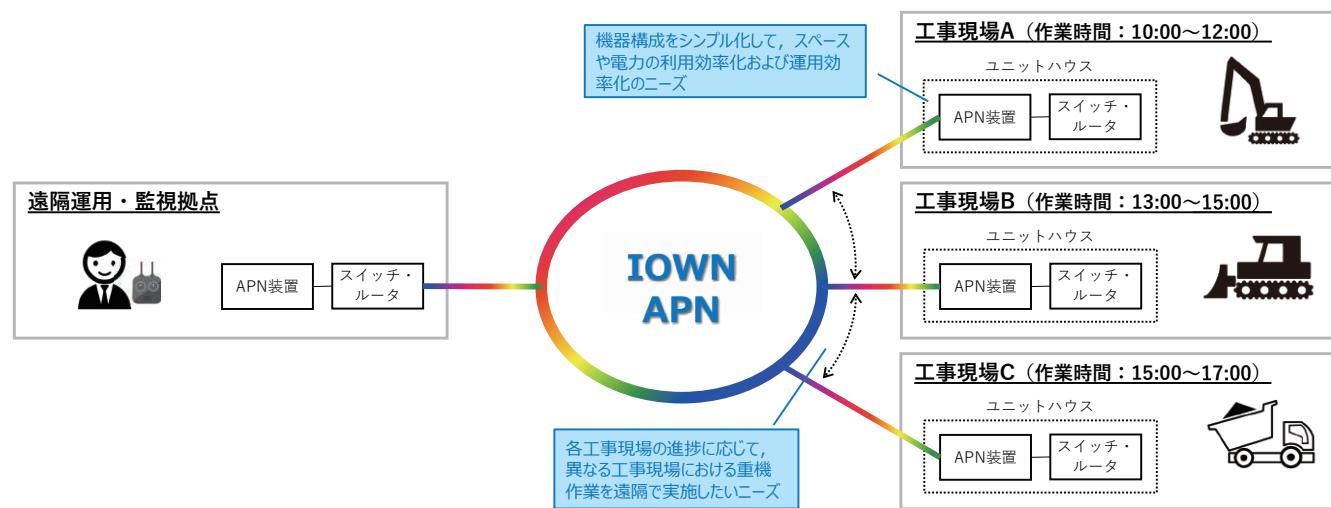


図2 建設業におけるAPNへの期待

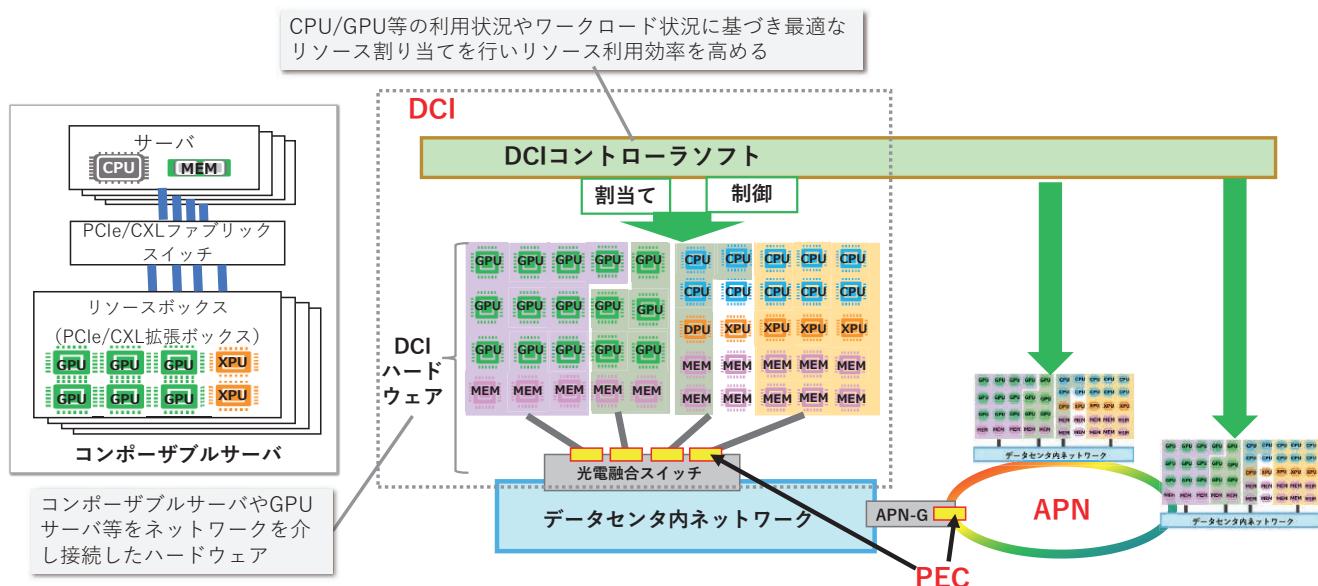


図3 IOWN光コンピューティングの概念

IOWN 1.0として登場したAPNによる通信と、IOWN 2.0として登場したDCIによるコンピューティングを組み合わせた「IOWN光コンピューティング」により、さらにIOWNの世界を拡大していきます。

DCIの取り組み

DCIは、広帯域・低遅延で相互に接続されたCPUやGPUといったコンピューティングに用いるリソースの利用効率を高めることにより、従来より電力効率やコストが優れたコンピューティングシステムを提供するものです。CPUやGPU等のコンピューティングリソースを広帯域・低遅延でつなぐとともに、データの発生場所や保存場所、利用場所といったデータの流れを中心とした「データセントリック」の考え方に基づき、処理の分散（ディスアグリゲート）と接続を最適化することで、演算・メモリ・ストレージや通信といったリソースの利用効率を高めます。このDCIを、光電融合デバイスや低遅延なAPNといった光を活用した技術を用いて具現化したもののが、IOWN光コンピューティングです（図3）。

APNは前述したようにすでにサービス提供されており、実サービスに基づくユーザースケース開拓が進んでいますが、DCIについても、その実用化に向けてPoC（Proof of Concept）や実証を積極的に実施しています。その実証の1つとして、2025年の大阪・関西万博でフィールド実証を行いました。以下にDCI技術の詳細と、IOWN光コンピューティングのフィールド実証での結果を紹介します。

DCIを支える技術

図3に示されるように、DCIとは複数のコンポーザブルサーバやGPUサーバ等ネットワークを介して接続したハードウェアと、この相互に接続されたCPUやGPU等のリソースを最適に割り当てる「DCIコントローラ」によって構成されます。それぞれの構成要素について、以下に説明します。

■コンポーザブルサーバ

従来のサーバではCPUやGPU、メモリ、ストレージなどを1つの箱の中に収め「サーバ」を構成するのに対し、コンポーザブルサーバはCPUが載った複数のサーバと複

数のGPUやストレージを収容できるBOX、多数のCXLメモリが載ったBOXなど、各種コンピューティングリソースが載った箱をPCI-eまたはCXLファブリックスイッチによって接続したものであり、CPU、GPU、ストレージ、CXLメモリを自由度高く組み合わせて利用できるものです。従来のサーバでは、例えば1つのCPUと4個のGPUが載ったサーバがあった場合、1つのCPUに2個のGPUが欲しいユーザに対しては2個のGPUが余ってしまいます。これに対しコンポーザブルサーバでは、CPUに組み合わせるGPUやメモリなどのコンピューティングリソースの数を要求に合わせ比較的自由に組み合わせることができます。コンポーザブルサーバの詳細は本特集記事『DCIの技術開発におけるマルチベンダコンポーザブルサーバ実現の取り組み』にて解説されていますので、そちらをご覧ください。

■PEC-2

DCIではコンポーザブルサーバなどを大

量に効率良く接続するデータ用ネットワークが重要な役割を果たします。特に今後のAI用データセンタでは複数のサーバ(GPU)がお互いに連携し大量のデータをやり取りして処理を進めるため、通信帯域が著しく増大し、かつ通信帯域を確保するためにサーバに複数のネットワークカードを搭載するケースなどもあり、ネットワークのポート数も増大しています。そのため、通信装置のコスト・電力が無視できないほど大きくなってきており、ネットワークスイッチの大容量化・低電力化の要求が強まっています。このネットワークスイッチの大容量化・低消費電力を実現するのがPEC-2と呼ばれる光電融合デバイスです。PEC-2とは、大容量スイッチを小型・低電力で実現する際に重要になる電気と光の変換を行う光トランシーバを、従来技術に比べ飛躍的大容量・低消費電力にできる技術であり、後述の大阪・関西万博においては、OIF標準に準拠した400 Gbit/sのトランシーバの8倍となる3.2 Tbit/sの通信速度を1台のモジュールで実現するPEC-2デバイスを用いました。このPEC-2では従来のトランシーバより帯域当り電力が半分程度に削減でき、AIデータセンタに必要となる大容量かつ低消費電力なスイッチを実現するキー技術となります。万博時のPEC-2は3.2 Tbit/sでしたが、現在さらに6.4 Tbit/sに大容量化された改良版のPEC-2デバイスを開発中です。PECの詳細については、本特集記事『PEC-2を搭載した大容量・低消費電力な光電融合スイッチ』に詳細が説明されています。

■DCIコントローラ

IOWN光コンピューティングの概念で重要な役割を果たすのが、これらを統合して制御するDCIコントローラです。DCIコントローラは1つのデータセンタだけでなく、複数データセンタのリソース・電力状況を考慮しつつ適した計算資源の割り当てを実施できます。このDCIコントローラは「アプリケーションフレームワーク」と「動

的ハードウェアリソース制御(DHRC: Dynamic Hardware Resource Controller)」からなり、アプリケーションフレームワークがDCIのリソースを効率的に利用できるようチューニングしたソフトウェアのテンプレートを提供します。さらに、DCI上でのアプリの実行に際しては、現在のリソース利用状況とワーカロードに対し最適なリソースの割り当てがDHRCによって行われます。これらにより、リソースの利用効率を高めることができ、コストや電力の削減を実現します。

IOWN 2.0サービスの実例

2025年4月13日から10月13日までの184日間、大阪市の夢洲で開催された大阪・関西万博において、NTTは「時空を旅するパビリオン」というコンセプトのもとパビリオン展示を行いました。

今回、会場-データセンタ間をAPNでつ

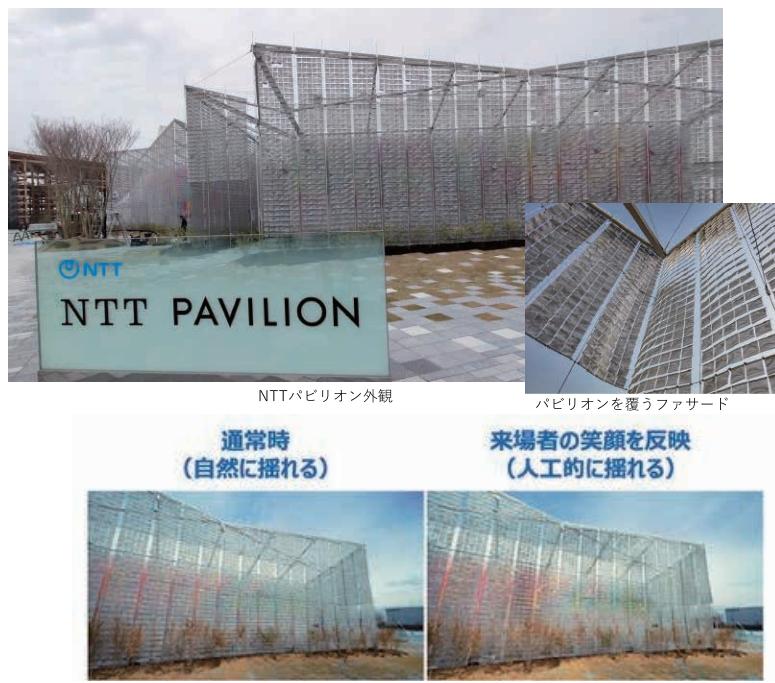
なぎ、データセンタに設置したDCIを用いてNTTパビリオンでのサービスを提供することにより、IOWN光コンピューティングの概念を実証しました。大阪・関西万博のNTTパビリオンでDCIを用い提供的したサービスは、以下の2種類です。

■ファサード制御(表情分析)

NTTパビリオンは「感情を纏う建築」という建築コンセプトにより、「感動や熱狂と呼応して振動し、パビリオン全体が感情を持った生命体のように蠢(うごめ)く」という斬新な演出を行いました。図4にNTTパビリオンの外観を示しますが、パビリオン来訪者の感情を反映し、盛り上がり状態に応じてパビリオンを覆う幕を人工的に揺らすという演出にあたり、この来訪者の表情を読み取り、感情の推論を行うシステムにDCIを利用しました。

■会場内みまもり(転倒者検知)

NTTパビリオンの安全かつスマースな運用のために、カメラ映像からパビリオン



<https://group.ntt.jp/expo2025/topics/250326.html>

「感情を纏う建築」

図4 大阪・関西万博NTTパビリオン

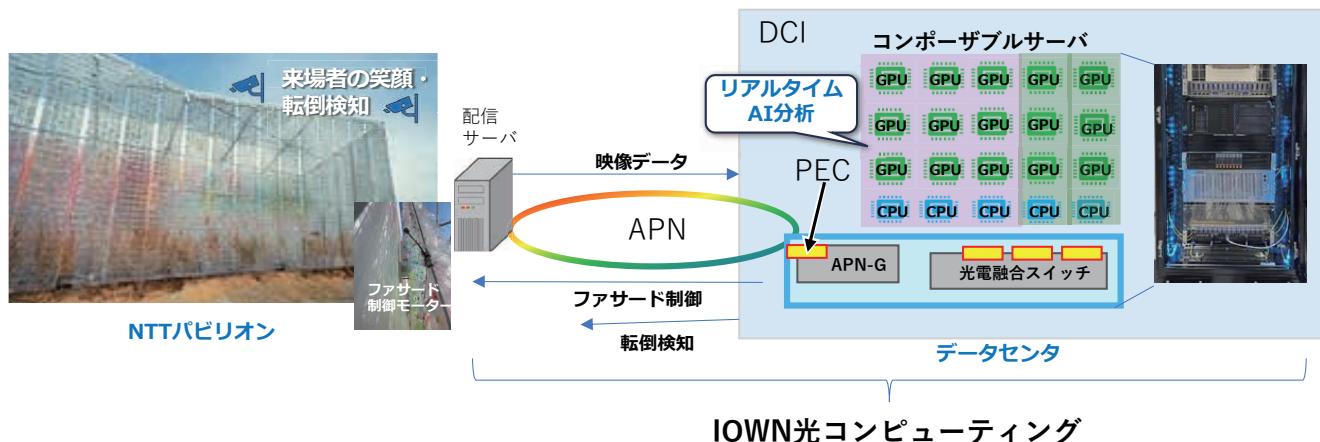


図5 NTTパビリオンでのIOWN光コンピューティング利用

の混雑状況や入場数のカウントを行う解析や、パビリオンのエリア内にて体調不良で倒れた来訪者や事故等を検出するための映像解析にもDCIを利用しました。

■万博で利用したシステム構成

図5に万博で利用したシステム概略を示します。会場ではパビリオン内部で十分なサーバースペースや電力の確保が難しかったため、電力消費が大きいGPUを利用せず、消費電力が少ない小型のサーバだけ設置し、消費電力が大きいAI分析を行うサーバは万博会場から数10 km離れた電力やスペースが十分確保できる大阪市内のデータセンターで処理する構成としました。

万博会場にはカメラで撮影したデータをデータセンタへ送る配信サーバが配置されており、この配信サーバからAPN経由で映像データがデータセンタへ送信されます。データセンタには複数のGPUを搭載したコンポーザブルサーバやGPUサーバが設置されており、表情分析と転倒者検知のアプリの要求に合わせGPUが適切に割り当てられています。送信されたデータを、従来のスイッチより消費電力が少ない光電融合スイッチを経由して各サーバのGPUに適切に割り振り、それぞれのAI分析を実施し、その結果をファサード制御の情報としてNTTパビリオンへ送り返すとともに、

転倒検知等の通知を行います。

このように、万博会場からAPNで遠隔のデータセンタに接続し、光電融合スイッチで接続されたサーバ上のGPUをアプリケーションごとに適切に割り当てるというIOWN光コンピューティングの概念を具体化した構成によって、APNやDCIの各要素を利用しなかった場合と比較し優れたGPU利用率や低い消費電力で184日間にわたり実サービスを提供し、万博の成功に貢献しました。

今後の展望

本稿では、IOWN 1.0として立ち上がったAPNの活用例とそこから得られたお客さまの期待、それらをもとにしたAPNの将来に向けた技術開発動向の概要を説明しました。さらにIOWN 2.0を支えるDCIの技術について説明し、DCIとAPNを組み合わせたIOWN光コンピューティングの大坂・関西万博での実装例について紹介しました。今後は、IOWN 2.0に向けて高度化されたAPNやDCIのさらなる実用化実証を通じて、IOWN 2.0の社会実装に貢献していきます。

■参考文献

- (1) <https://journal.ntt.co.jp/article/37949>
- (2) <https://business.ntt-east.co.jp/service/koutaiikiaccess/>
- (3) <https://business.ntt-west.co.jp/service/network/iown/>
- (4) <https://www.ntt.com/about-us/press-releases/news/article/2024/0229.html>
- (5) <https://www.ntt.com/about-us/press-releases/news/article/2025/0918.html>
- (6) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2025/11/14/251114a.html>
- (7) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/11/09/231109b.html>
- (8) <https://journal.ntt.co.jp/article/37050>



(左から) 坂本 誠治 / 坂本 健

お客さまやパートナー企業様との実証を通じて、各ステークホルダの方々のニーズや期待をしっかりと受け止め、課題解決に資するような付加価値を、ご利用いただきやすい方たちで提供できるように、IOWNのサービス化・プロダクト化を推進していきます。

◆問い合わせ先

NTT IOWNプロダクトデザインセンター
企画担当

DCIの技術開発におけるマルチベンダコンポーザブルサーバ実現の取り組み

NTTソフトウェアイノベーションセンタでは、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想実現に向けたDCI (Data-Centric-Infrastructure) の技術開発の取り組みを進めています。本稿では、DCIの構成要素であるコンポーザブルサーバにフォーカスし、マルチベンダ機器を組み合わせたインフラ構築・運用のための仕組み（機器管理インターフェースやフレームワーク）とNTTにおけるマルチベンダコンポーザブルサーバ実現へ向けた課題について紹介します。

キーワード : #DCI, #コンポーザブルサーバ, #マルチベンダコンポーザブルサーバ

こうだ けんすけ
幸田 健介
 にのかた かずお
ニノ方 一生

NTT ソフトウェアイノベーションセンタ

はじめに

NTTソフトウェアイノベーションセンタ(SIC)では、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想実現に向けたDCI (Data-Centric-Infrastructure) の技術開発の取り組みを進めています。DCIはIOWN Global Forumが定義する全体アーキテクチャにおいて、分散データセンタ環境やヘテロジニアスなコンピューティング環境における高効率なデータ処理

を可能とする基盤レイヤとして位置付けられています。IOWNの全体アーキテクチャにおける重要な基盤の1つであり、これまでの特集記事において、IOWN Global ForumでのDCIの機能アーキテクチャやコンピュートクラスタのリファレンス実装モデルの文書化についての取り組み⁽¹⁾や、2025年日本国際博覧会(大阪・関西万博)のNTTパビリオンにおけるDCIを活用したハードウェアリソースの効率的な利用と低消費電力化の取り組み⁽²⁾について紹介し

てきました。また、NTTではDCIが複数のコンポーザブルサーバやGPUサーバ等ネットワークを介して接続したハードウェアと、この相互に接続されたCPUやGPU等のリソースを最適に割り当てる「DCIコントローラ」によって構成されるものとしています。

本稿では、デバイスを柔軟に組み合わせて利用が可能なコンポーザブルサーバを用いたDCI構成に注目します(図1)。コンポーザブルサーバとはホストサーバと

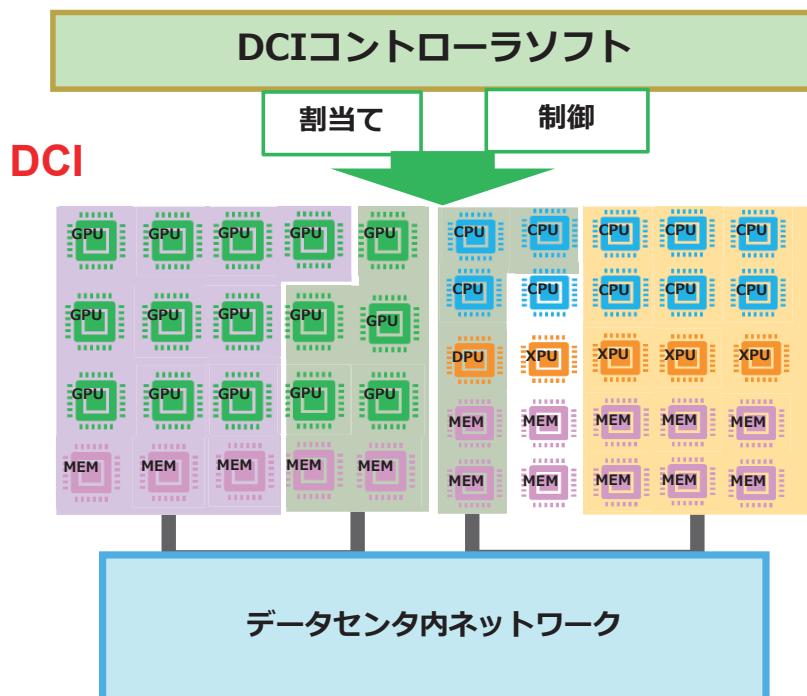


図1 コンポーザブルサーバを用いたDCI構成

PCIe/CXL拡張ボックス(リソースボックス)をPCIe/CXLファブリックスイッチ(ファブリックスイッチ)で接続しCPU, GPU,ストレージ, CXLメモリを自由度高く組み合わせて利用できるものです(図2)。

NTTではコンポーザブルサーバの製品ベンダ各社とも連携して、複数ベンダの製品を組み合わせたシステムの構築や運用の検証を行ってきました。また、DCIコントローラソフトを介して、複数ベンダの製品を組み合わせたマルチベンダコンポーザブルサーバの構築およびコンテナ基盤と連携した運用を可能とすることをめざしています。

本稿では特に、DCIコントローラソフトの実現において活用を検討している、マルチベンダコンポーザブルサーバの管理標準やフレームワークについて、その成立の経緯を含めて紹介します。その次に、NTTにおけるマルチベンダコンポーザブルサーバを実現するための課題を紹介します。管理標準としては、データセンタインフラを制御することを目的にDistributed Management Task Force(DMTF)⁽³⁾によって仕様策定され、サーバやネットワーク機

器に機能実装されてきたRedfish⁽⁴⁾インターフェースについて紹介します。また、Open Fabrics Alliance(OFA)⁽⁵⁾が提唱する、Sunfish Framework⁽⁶⁾について詳述します。Sunfishは、ベンダが異なるコンポーザブルサーバのハードウェア(サーバ、メモリ、アクセラレータ等)を、Redfish等の標準的な管理インターフェースを通じて統一的かつ一元的に管理することができます。また、物理構成に依存しないコンピューティングリソースの管理と動的構成(ライフサイクル管理)を可能とする論理モデルを提供することから、NTTが実現をめざすDCIコントローラソフトでも活用可能なサービスフレームワークと考えています。Sunfishの2025年12月時点のバージョンは0.5版であり、OFAにおいて、今後のバージョン1.0版の仕様リリースに向けた活動が活発に進められています。

マルチベンダコンポーザブルサーバに関する標準化の動向

ここではマルチベンダコンポーザブルサーバの構築・運用を可能にするための仕組み

である、標準管理インターフェースやフレームワークの設計について紹介します。

近年にみられるようなクラウドや仮想化、ハイパースケール環境の普及により、大量のサーバの管理を、統一APIを用いて自動化する必要が生じています。一方で、サーバ機器等の製品の管理インターフェースとして、これまでIPMI(Intelligent Platform Management Interface)が広く用いられてきましたが、IPMIは1998年に策定された古い規格であり、大量のサーバをREST APIで扱うことはできず、また拡張性に乏しいといった問題もありました。そのような経緯もあり、2015年、DMTFがRedfishを標準化しました。Redfishは、RESTful API/JSON/HTTPSベース、セキュリティの強化、構造化されたハードウェア構成情報の提供、スケールアウト管理に適した設計といった特徴があります。具体的にはRedfishのデータモデルは階層的なURI構造を通してアクセス可能なツリー構造(リソースツリー)となっています。

大手ベンダもRedfishを採用し、モダンなデータセンタ管理全般に用いられるようになってきています。またコンポーザブルサーバのように、データセンタ内にあるサーバやPCIe/CXL拡張ボックス内のデバイスをプール化(リソースプール)し、動的に再構成しながら使用するといった新たな需要も出てきています。この需要にこたえるべく、DMTFは2017年ごろからComposabilityの概念を標準仕様に追加し始めしており、コンポーザブルサーバの制御にRedfishが適用できるようになってきています⁽⁷⁾。

また、Redfishのようにインターフェースを規定するだけでなく、コンポーザブルサーバを運用しやすくするためのフレームワークを策定する動きとして、OFA Sunfishがあります。Sunfishは、コンポーザブルサーバを運用管理するためのオープンアーキテクチャであり、CPU、メモリ、ストレージ、GPUなどのデバイスをネットワーク越しに接続し、それらを柔軟に組み合わせて論理的なサーバ(論理サーバ)を構成するフ

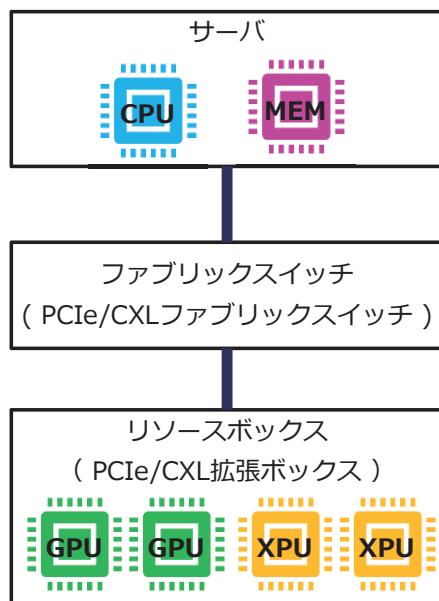


図2 コンポーザブルサーバの概要

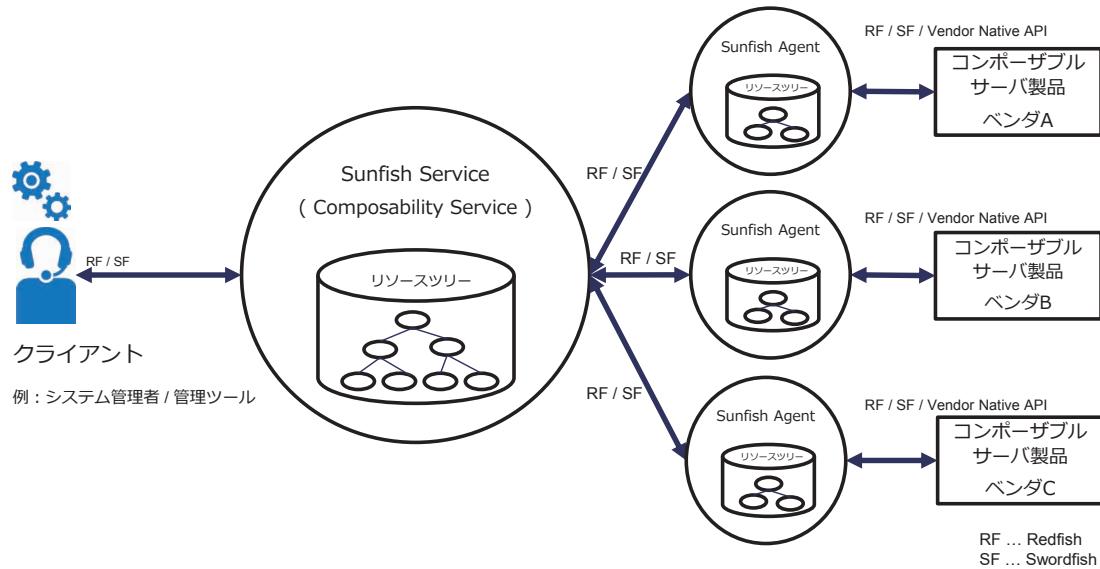


図3 Sunfishのアーキテクチャ概要

レームワークです。Sunfishのアーキテクチャを図3に示します。

ここで、Sunfishの特徴として以下の3点があげられます。

- ① ベンダニュートラル
- ② 抽象化されたリソース表現モデル
- ③ 標準ベースでオープンな管理インターフェース

1番目の特徴は、ベンダニュートラルなところです。各ベンダ製品がRedfishを提供している場合、それぞれの名前空間が重複する可能性があります。Sunfishでは、それら製品に対してSunfishの管理空間内でユニークなIDを割り当てることでこの問題に対応しています。また、ベンダ独自のAPIやツールを提供している製品に対応するために、インターフェースをRedfishに変換するレイヤ (Sunfish Agent) を設けています。このように複数の異なるベンダ製品を統一的かつ一元的に管理することを可能とするリポジトリ・サービス設計となっています。

2番目の特徴は、抽象化されたリソース表現モデルのことです。Sunfishは、Sunfish ServiceにおいてSunfish Agentを介して収集されたサーバ、ストレージ、

ファブリック構成に関する情報を、Redfishのリソースツリーとして抽象化して管理します。これにより管理者や管理ツールといったクライアントがどのサーバにGPUがあり、どのメモリがどこにつながっているかなど、物理面を意識せずに論理レベルでリソースをプール、割り当て、再構成できるよう設計されています。

3番目の特徴は、標準ベースでオープンな管理インターフェースであることです。APIはDMTF RedfishおよびSNIA Swordfish⁽⁸⁾を利用しています。これらが提供するRESTful APIをとおしてリソースの管理、論理サーバの構成を実施できるため、将来的な拡張性や異種ハードウェアの統合にも耐え得るようになっています。

続いてSunfishの管理方法について説明します。各機器のRedfishのリソースツリーを基に全体を管理するRedfishのリソースツリーが統合、構成されます(図4)。各機器はSunfish Serviceへの登録時、Sunfishの管理空間内でユニークなIDがSunfish Serviceから割り振られ、この仕組みによって各機器のRedfishのリソースツリーの名前空間の重複は回避されます。この結果、クライアントは、Sunfish Serviceが割り

振ったIDに基づいて、統合されたリソースツリーを操作することが可能になります。また、Sunfish ServiceはIDの対応表を保持し、任意のSunfish Agent配下のコンポーザブルサーバ製品を操作する際には、そのSunfish Agentが管理する名前空間のIDに変換したうえで操作を要求します。

最後に、Sunfishを用いた論理サーバの作成の流れについて説明します。なお、簡単のために論理サーバの構成に必要なリソースの情報は事前に把握できているものとします。

- ・クライアントは、Sunfish Serviceが管理する名前空間のIDを用いて、Sunfish Serviceに対して論理サーバの作成を要求する。
- ・Sunfish Serviceはクライアントの要求に従い、記載されているリソースを持つSunfish Agentに対して論理サーバを構成するリソースの確保を要求する。このとき、リソースのIDは、そのSunfish Agentが管理する名前空間のIDに変換される。
- ・Sunfish AgentはSunfish Serviceの要求に従い、コンポーザブルサーバ製品に対するリソース確保を要求する。

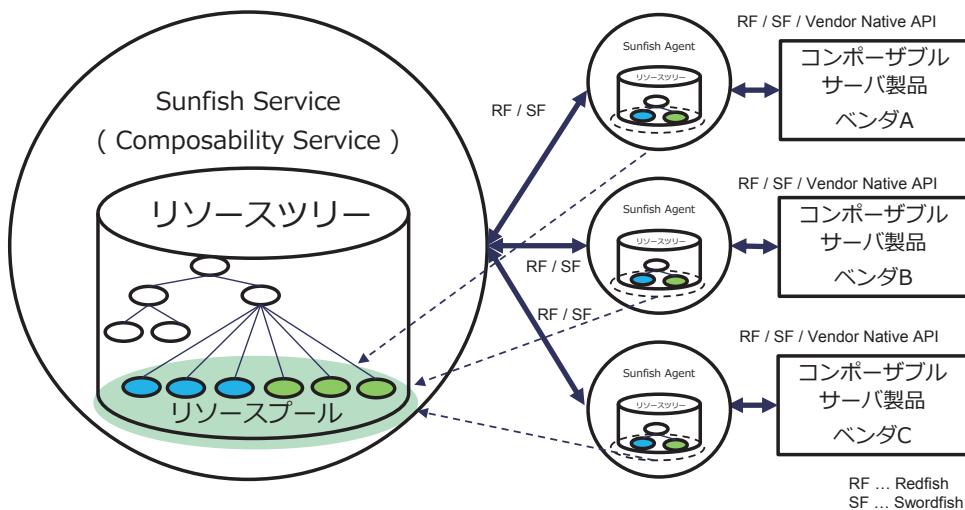


図4 Sunfish Serviceによるリソースの統合管理

- ・コンポーザブルサーバ製品はSunfish Agentの要求に従ってリソースを確保する。
- ・Sunfish Serviceは自身のRedfishのリソースツリーの構成情報を更新する。

Sunfishではリファレンス実装にも取り組まれており、上述した機器登録の機能が実装されています。一方で、上記の論理サーバの作成の流れを実現するには、Sunfish Agentが持つリソースをどのように認識し、Sunfish ServiceのRedfishのリソースツリーへどう組み込むか等を実装する必要があります。また、Sunfish Agentをどの単位で構成するかといったアーキテクチャとしての検討も必要です。

マルチベンダコンポーザブルサーバの実現へ向けた課題

マルチベンダコンポーザブルサーバを実現するためには、私たちは大きく以下の2つの課題に取り組む必要があると考えています。

■統合管理の実現へ向けた課題

前述のとおり、OFAにおけるSunfishのようにマルチベンダコンポーザブルサーバの統合管理に向けた標準の策定も進んでいますが、実運用までを考慮すると、製品と

のギャップやアーキテクチャ上の課題がいくつか残っていることが、これまでのSICによる検証を通じて分かってきています。ここではその中でも2つの課題について紹介します。

(1) リソースの抽出、管理方法

Sunfishでは各製品のリソースを、Sunfish ServiceのRedfishのリソースツリーで統合管理します。ここでは、Sunfish Agent配下のリソースの情報をどのようにしてSunfish Serviceに通知、統合させるかという問題があります。物理的な接続構成により依存関係にあるリソース群も存在するため、その考慮も必要となります。私たちはRedfishのComposability機能を備えるファブリックスイッチ製品を対象に現在Sunfishを介した構成に必要な機能の実装および構成操作を試行しています。しかし、リソースボックス内のデバイスをサーバに割り当てる際に、製品仕様によってはデバイス単位での割り当てではなく、それらを取りまとめるポートに対してデバイスを割り当てる手続きとなっています。またポートがデバイスと一対一対応していないこともあります。こうした製品仕様を考慮に入れたリソースの抽出機構が必要であることが分かってきています(図5)。

(2) Sunfish Agentの構成単位

Sunfish Agentの構成単位も検討が必要な課題の1つです。Sunfish Agentの構成単位は図6に示すとおり、大きく以下の2パターンが存在します。

・パターン1 ホストサーバ、ファブリックスイッチ、リソースボックスごとにSunfish Agentを構成：この場合の利点は、ホストサーバ、ファブリックスイッチ、リソースボックスをそれぞれ異なるベンダ製品を用いてコンポーザブルサーバを構成できる点です。欠点はリソースの抽出、管理方法の課題と同じく、機器間の物理的な接続構成といった依存関係をSunfish Service側で保持する必要があるためSunfish Serviceへそのような機能を実装する必要がある点です。

・パターン2 依存関係のある機器をまとめて1つのSunfish Agentを構成：この場合の利点は、Sunfish Service側で物理構成を把握する必要がない点も利点の1つです。また、依存関係ごとにSunfish Agentが存在しているため、障害発生時の製品の影響範囲を特定しやすい点です。欠点はSunfish Agentに障害が発生した際の復旧作業が複雑になる点です。Sunfish Agent

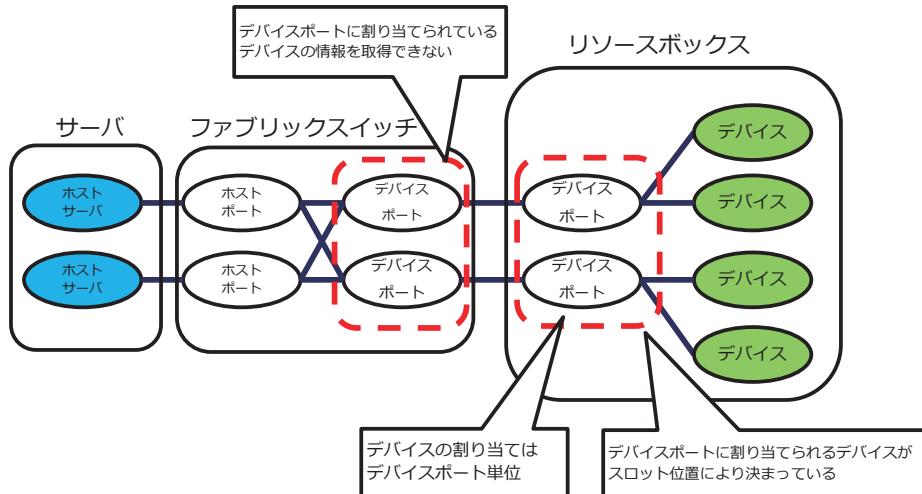
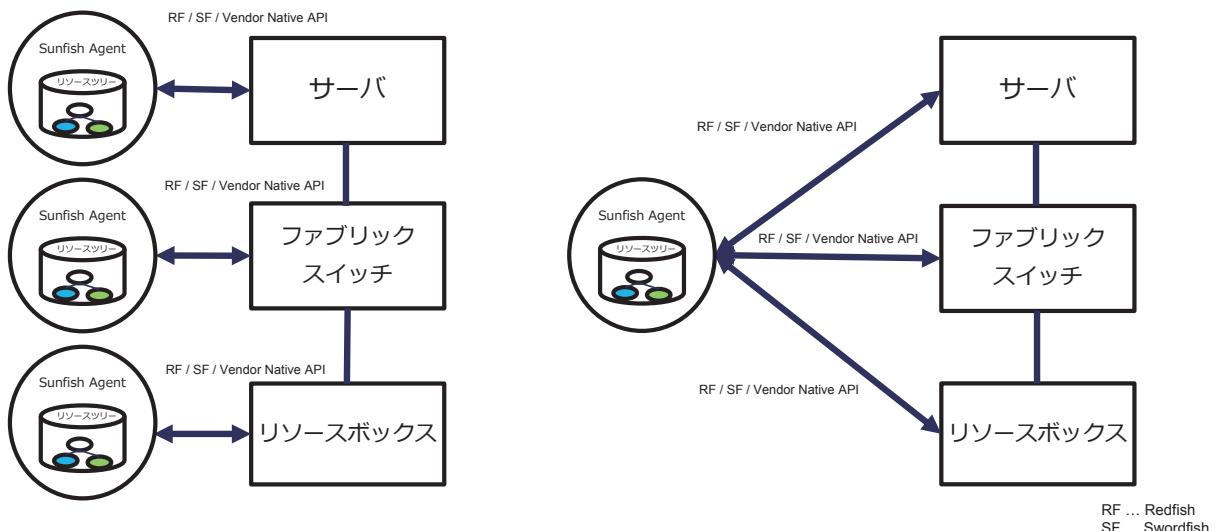


図5 製品仕様によるリソース管理の難しさ



パターン1：機器ごとにSunfish Agentを構成

パターン2：依存する機器をまとめてSunfish Agentを構成

図6 Sunfish Agentの構成単位

に障害が発生した際、それが管理しているすべての機器の状態を依存関係に基づき整合性のあるかたちで復旧する必要があります。

このように、Sunfish Agentの構成単位には複数パターンが存在し、それぞれに利点、欠点が存在します。Sunfish ServiceとSunfish Agentの独立性が保たれることから、私たちはパターン2の実現をめざしています。

■コンポーザブルサーバの実運用に向けて

最後にコンポーザブルサーバの機能検証等で得られた実運用に向けた課題について共有します。

- (1) 論理サーバの作成、構成変更に要する時間

論理サーバを作成、再構成する際にはそれに要する時間が運用上課題となり得ます。サーバの再起動には時間を要するため、リソースの割り当て・解除といった操作では、

可能な限りサーバを再起動することなく操作が完了できる必要があります。論理サーバの作成、再構成時にサーバの再起動が必要な動的構成変更機能は一部ベンダで提供されています。

- (2) 物理構成情報の管理、更新機構
サーバとリソースボックスの物理的な接続情報は、Sunfishによるリソースを抽象化するうえで必要な情報です。そのため、このような物理的な接続情報をコンポーザ

ブルサーバから取得できることはSunfishにおいて重要です。そうでなければ物理的な接続情報を手動で管理することになり、インフラの運用コストが増大するほか、オペレーションミスにより障害を招く可能性も考えられます。コンポーザブルサーバによりシステム全体の複雑さが増していることを考慮しても、物理構成情報の管理、更新機構は必要です。マルチベンダコンポーザブルサーバを実現するために、本機能を具備するよう各コンポーザブルサーバベンダーへの働きかけをしていくことを検討しています。

(3) 機器間のケーブル接続作業の増大
PCIe拡張ボックス、PCIeファブリックスイッチはレーン数にはよるもの、基本的に多くのPCIeケーブルを要します。また、世代によりケーブルの太さも大きく変わり、例えば第5世代の場合は、太いえにケーブル長も短いため、ケーブルの取り回しが容易でないほか、ケーブル長の制約により接続するサーバ機器などを含め、物理的なラッキング位置も考慮が必要でした。さらにPCIe拡張ボックスに関しては、例えばGPUの補助電源ケーブルはベンダ提供の製品でないと使用ができず、市販品等、ベンダ提供ではない製品を使用するとボックスが故障するといった問題もみられるなど、作業時に考慮すべき点が多くありました。

(4) 可用性の向上

コンポーザブルサーバは大きく、サーバ、ファブリックスイッチ、リソースボックスの3つで構成されます。そのため、ファブリックスイッチやリソースボックスに対して可用性の向上が必要ですが、どのようにそれを実現するかも重要です。例えば、リソースボックスを、その中に搭載されているデバイスを含めて、リソースボックス単位で単純にアクティブ・スタンバイ構成をとると、待機系のリソースを持て余すことになり、リソースの効率活用というコンポーザブルサーバの本来の目的に反する結果となります。

(5) 低レイヤまで見据えた構成の必要性
論理サーバの構成時、単にリソースプールから構成可能なリソースを選択するだけでなく、可能な限り、その上で動作するワーカードを考慮した、より低レイヤを意識した構成が望ましいと考えます。例えば、NVIDIAのGPUDirect RDMAといったオフロード機能を使用する際には、PCIeスイッチやルートコンプレックスを意識したリソースの選択がワーカードの性能やデータ処理の効率性に影響を与えます。

(6) 構成オペレーションの安全性確保

コンポーザブルサーバはその状態管理に不整合が起きるとシステムが停止するおそれがあります。マルチベンダコンポーザブルサーバを実現するうえでは、これらトランザクション管理の徹底が非常に重要です。

今後の展開

本稿では、DCIの技術開発におけるマルチベンダコンポーザブルサーバ実現の取り組みとして、統合管理として現時点で有力と考えるSunfishや、その設計およびコンポーザブルサーバの実運用上の課題を紹介しました。

今後は、2026年度の商用化をめざすDCI-2⁽⁹⁾の実現に向けた研究開発を強化していきます。具体的には、Sunfishの設計思想を取り込みながらマルチベンダコンポーザブルサーバをDCI-2のシステムに統合していきます。さらに、現状のSunfishの仕様やそのリファレンス実装に不足している機能等をOFA Sunfishに提案し、統合管理の標準化と普及を推進していきます。そのうえで、マルチベンダコンポーザブルサーバとコンテナ基盤との連携した運用を可能とするための取り組みも行っていきます。具体的には、コンテナ基盤のデファクトスタンダードとなっているKubernetesでは、動的リソース割り当て機能(Dynamic Resource Allocation)が提供され始めていますが、本機能と連携して、例えばコンポーザブルサーバのリソースボッ

クス内のデバイスをワーカーノードに動的に割り当てるような取り組み⁽¹⁰⁾も始まっており、NTTも参画しています。また、DCIの各種オペレーション機能の拡充に向けて、DCIコントローラソフトの技術開発やIOWN Global Forumへのシステムリファレンスの提案を行いつつ、AI・映像処理を必要とするモビリティユースケースや、そのほかのユースケースへの技術の展開も図ります。

■参考文献

- (1) <https://journal.ntt.co.jp/article/33807>
- (2) <https://journal.ntt.co.jp/article/35374>
- (3) <https://www.dmtf.org/>
- (4) <https://www.dmtf.org/standards/redfish>
- (5) <https://www.openfabrics.org/>
- (6) <https://www.openfabrics.org/openfabrics-management-framework/>
- (7) <https://www.dmtf.org/dsp/DSP2050>
- (8) <https://www.snia.org/forums/smi-swordfish>
- (9) https://www.rd.ntt/forum/2024/keynote_2.html
- (10) <https://github.com/CoHDI>



(左から) 幸田 健介 / ニノ方 一生

IOWNはネットワークだけでなく、コンピューティング基盤に変革をもたらす構想です。その構想の実現に向けて、IOWN Global Forum等でのアーキテクチャ議論やパートナ企業との連携を行い、技術開発の取り組みを推進していきます。

◆問い合わせ先

NTTソフトウェアイノベーションセンター

PEC-2 を搭載した大容量・低消費電力な光電融合スイッチ

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 2.0 では、ネットワークの消費電力を大幅に削減可能な光電融合技術として、PEC (Photonics-Electronics Convergence) -2 の実用化をめざしています。本稿では、これまでの光電融合技術の進化を紹介するとともに、コンピューティング領域への適用に向けて開発を進めている PEC-2 の技術について解説します。また、コンピューティングインターフェースとして活用すべく研究開発を進めている、PEC-2 を搭載した光電融合スイッチと大阪・関西万博での活用事例を紹介し、商用化に向けた今後の展開について述べます。

キーワード: #IOWN, #光電融合, #DCI

むらなか ゆうすけ いとう つよし
村中 勇介 / 伊藤 猛
 ありかわ ゆうき せのお かずのり
有川 勇輝 / 妹尾 和則

NTTデバイスイノベーションセンタ

光通信と光電融合技術

NTTでは長年にわたり、通信インフラの高度化を目的として、伝送路の光化を進めてきました。光信号は電気信号に比べて伝送中のエネルギー損失が極めて小さく、減衰を抑えながら遠距離まで安定的に届けられるという大きな利点があります。この特性を最大限活用するため、光通信システムでは光トランシーバと呼ばれるデバイスが重要な役割を担っています。光トランシーバは、電気信号を光信号へ、またその逆に変換するインターフェースとして機能し、情報処理装置と光ネットワークをつなぐ要となるデバイスです。

光トランシーバを用いた光伝送は、これまで主に長距離通信を中心に活用されてきましたが、近年ではデータセンタ内の短距離通信にも適用範囲が広がっています。サーバ間で大量のデータが往来する現在のデータセンタでは、電気信号だけでの伝送では消費電力面で限界が見え始めており、短距離領域でも光伝送の利点が注目されています。今後は、より短距離なデータ伝送

にも光技術を適用することで、新たな性能向上が期待されます。

このような背景のもと、NTTでは電気による情報処理と光による伝送を統合する光電融合技術に注力しています。光電融合は、光通信システム全体の消費電力低減に寄与し、NTTが提唱する次世代ネットワーク構想 IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) の実現に向けた中核技術として位置付けられています。

NTTの光電融合技術

光電融合技術とは、電子回路と光回路を一体化し、光トランシーバ機能をより小型・高効率なかたちで集積化する技術です。NTTはこの技術を用いて開発したデバイス群をPEC (Photonics-Electronics Convergence) デバイスと総称し、IOWN 構想に合わせて段階的に実用化してきました。

図1にNTTのPECデバイスのロードマップを示します。IOWN 1.0では、2023年より商用サービスが開始されたAPN (All-

Photonics Network)において、PEC-1 を活用したデジタルコヒーレント光トランシーバを導入しました。これは既存の光ネットワークに比べ高効率で安定した長距離伝送を可能にするもので、IOWNの基盤となる通信品質の向上に寄与しています。

さらにIOWN 2.0 に対してはネットワーク領域だけでなく、より大規模なデータ処理が行われるコンピューティング領域でも光電融合技術を活用すべく研究開発を進めました。データセンタではデータ通信量が急速に増えており、電力消費は大きな課題となっています。そこで短距離接続向けの低電力なPEC-2 を用いて低消費電力・大容量のインターフェースを構築し、IOWN 2.0 のコンピューティング基盤を支える技術の実用化を進めています。

その後、将来のIOWN 3.0以降に向けてはさらに小型かつ低消費電力なPEC-3 や PEC-4 として、半導体パッケージ間やパッケージ内といったコンピュータ内部の領域へと光接続を拡張し、コンピュータアーキテクチャそのものの革新をめざしています。

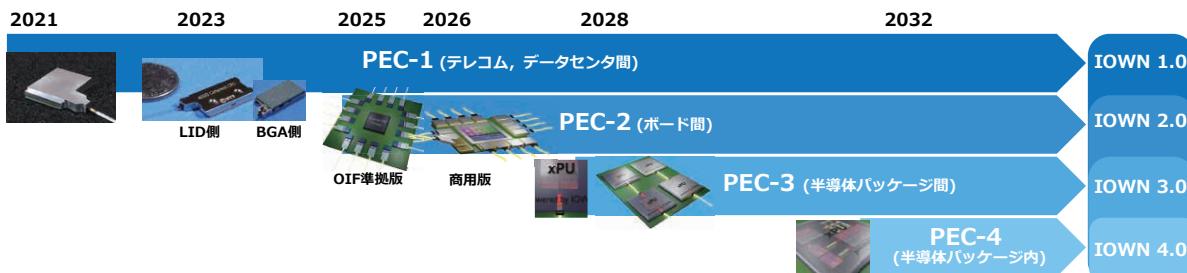


図1 NTTのPECデバイスロードマップ

光電融合技術のコンピューティング応用

AI（人工知能）の急速な発展は、これまでにない規模のデータ生成と演算需要を生み出し、世界中のデータセンタが扱う情報量は指数関数的に増加しています。高い計算性能を実現するためには大量の電力が必要となるため、現在ではデータセンタの電力消費は世界的な課題として議論されるほど深刻化しています。

特に問題となっているのが、取り扱うデータ量の増大と合わせて半導体の性能向上が進み、データ伝送にかかる電力が大幅に上昇している点です。従来のコンピューティングシステムでは、データは電気信号のままサーバ間やラック間を伝送する仕組みが基本でした。しかし、AI開発や大規模分散処理の普及により、通信距離が以前より長くなり、伝送されるデータ量そのものも拡大しているため、電気伝送は限界に近づいています。

電気信号によるデータ伝送は、信号周波数が高くなるほど、また伝送距離が長くなるほど消費電力が急速に増えてしまいます。これは、電気伝送の物理的制約による避けられない特性です。その結果、今後さらに高い信号周波数で伝送するデータ量が増えることを考えると、電力消費の増大は避けられない問題として浮上しています。

そこで注目されているのが、電気のまま伝送する方式を光伝送へ置き換える光電融合技術です。光伝送は高周波信号を低損失で長距離伝送できるため、電気伝送で問題となる消費電力の急増を抑えることができます。光を用いた伝送を活用することで、電力消費を劇的に抑えながら高性能な計算環境を維持できる可能性があり、世界的にも大きな期待が寄せられています^{(1), (2)}。

光電融合技術は単に省電力化を実現するだけでなく、通信性能を底上げし、結果としてコンピューティング全体の能力を引き上げる重要な鍵となっています。

光電融合技術を活用したコンピュータアーキテクチャ

現在のコンピューティングシステムでは、要求される性能の上昇に対して演算を行う

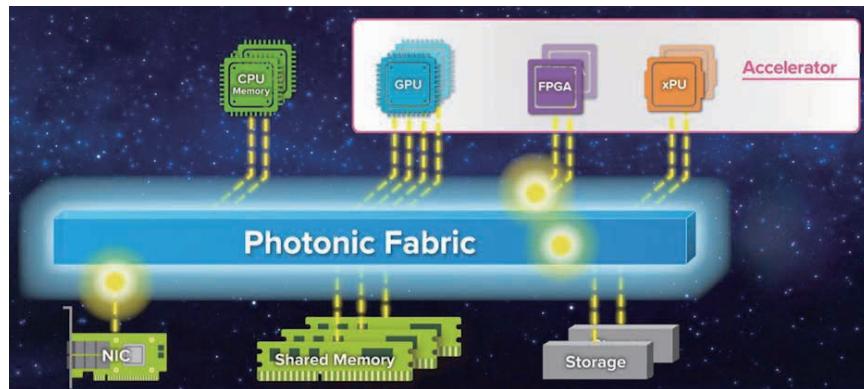


図2 光ディスアグリゲーテッドコンピュータ

半導体性能がついていけず、単一のサーバ筐体にGPU等の高性能リソースを詰め込む従来の設計思想では、需要にこたえきれなくなりつつあります。AIトレーニングや大規模データ処理では、複数のサーバ間で膨大なデータをやり取りする必要が生じるため、サーバ内部とサーバ間で通信特性が大きく異なることが新たなボトルネックとなっています。

サーバ間のネットワークは、内部バスに比べて遅延も大きく、電力効率も低いため、サーバ内部と同じ感覚でリソースを扱うことは困難です。その結果、従来のアーキテクチャでは、サーバ内部に多種多様な計算リソースを搭載し、高性能化を図らざるを得ませんでした。しかし、このアーキテクチャはコスト・消費電力・冗長性のすべての点で非効率です。

こうした課題を解決するアーキテクチャとして、図2に示すような光ディスアグリゲーテッドコンピュータを提案しています。これは、光電融合技術によってサーバ筐体の垣根を越えて計算リソースを高速・低遅延に接続し、まるで1つの大きなコンピュータのように扱える仕組みです⁽³⁾。

このアーキテクチャでは、リソースをサーバ単位ではなくプール単位で管理し、計算タスクに応じて最適なアクセラレータやメモリを柔軟に組み合わせることができます。また、アクセラレータは汎用目的である必要がなく、用途特化型の回路を集中的に活用できるため、高性能かつ効率的な計算処理を実現できます。

実現には、リソース間で膨大なデータをやり取りする必要があるため、大容量・低遅延・低消費電力を兼ね備えた光インター

コネクトが不可欠であり、ここに光電融合技術の価値が最大限発揮されます。

PEC-2世代の光電融合技術

光電融合技術の実装形態として注目されているのが、OIF (Optical Internet-working Forum)において標準化が議論されてきたCPO (Co-Packaged Optics) 技術です。CPOは半導体ICと光トランシーバを近接実装することで、従来のトランシーバ方式で必須だった長距離の高速電気配線を大幅に削減し、信号損失や電力増大の課題を根底から解決するアプローチです。NTTが研究開発を進めるPEC-2においてもこのCPO技術を採用しています。

OIFが公開した3.2 Tbit/s CPOの実装仕様 (IA: Implementation Agreement) では、51.2 Tbit/sクラスのイーサネットスイッチへの適用が想定されています⁽⁴⁾。これは、スイッチチップ近傍に複数のCPOモジュールを並べて実装し、電気配線の距離を極限まで縮めることで、高密度かつ低消費電力の大容量スイッチを実現するという考え方に基づいています。

図3に従来のスイッチ構成とCPOを活用したスイッチ構成の比較を示します。従来のスイッチ構成では、フロントパネルにプラガブル型トランシーバを装着する構造が主流であり、スイッチチップからトランシーバまでの電気配線で大きな電力を消費するため高速化の妨げとなっていました。

これに対してCPOでは、スイッチチップ直近で電気信号と光信号の変換を行うため、装置内部に光配線を広く取り入れることができ、同じ大容量を扱う場合でも電力

を大幅に削減できます。

現在、OIF の仕様を基にしたCPO を活用したイーサネットスイッチ装置は複数のベンダで開発が進められ、次世代のネットワーク装置の標準形態として実用化が加速しています。

PEC-2 搭載光電融合スイッチ試作機の実現と万博活用

NTT の PEC-2 の研究開発においても、OIF 規格に準拠した3.2 Tbit/s CPO の形態を基にデバイス技術の確立を進めてきました。PEC-2 では、シリコンフォトニクス技術を用いて変調器や受信器を高密度に集積し、DSP (Digital Signal Processor) による高度な信号処理により、電気信号と光信号の効率的な変換を可能にしています。

1台のPEC-2 当り32チャネル、合計3.2 Tbit/s の帯域を実現でき、100 Gbit/s PAM4信号に対応しています。光インターフェースにはOIF 準拠の光ファイバピッゲイルを用いており、1モジュールで400GBASE-DR4規格8チャネル分の出力を提供できます。

図4 に PEC-2 と同等の帯域を実現するために必要な従来のプラガブルトランシーバとの比較を示します。PEC-2 は1台で3.2 Tbit/s の帯域を持つため、400 Gのプラガブルトランシーバ8台分に相当します。モジュールの大きさを比較すると、PEC-2 によって87%の削減が可能となります。また、PEC-2 はOIF 規格で定められた消費電力の最大値を満たすため、消費電力12 Wの従来プラガブルトランシーバ8台分に比べて、50%削減した48 Wで実現可能となります。

今回このPEC-2 を搭載した「光電融合スイッチ」の試作機を作製しました。51.2 Tbit/s のスループットを持つスイッチチップ近傍にPEC-2 を実装することで、イーサネットフレームを転送するスイッチ装置が実現できました。図5 に示すようにNTT はこのスイッチを19インチラックに収容できるサイズで試作し、空冷に加え水冷を取り入れた効率的な冷却設計によって、高発熱のスイッチチップやPEC-2 を安定動作させています。

フロントパネルには16心MPOコネクタ

(a) 従来のスイッチ構成

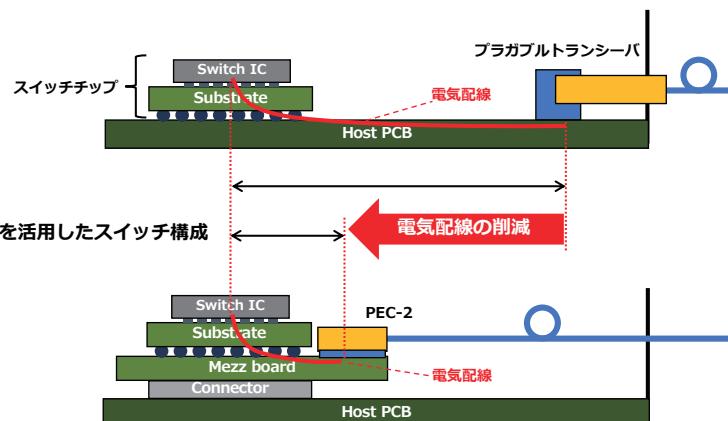


図3 従来のスイッチ構成とCPOを活用したスイッチ構成の比較

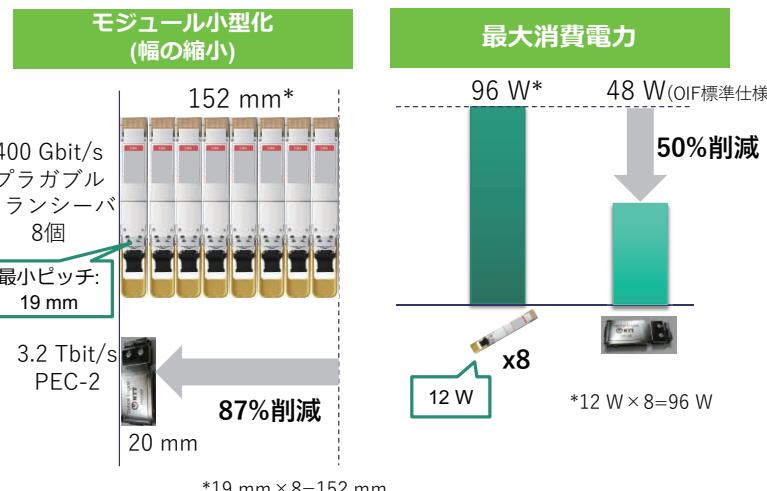


図4 PEC-2とプラガブルトランシーバの比較

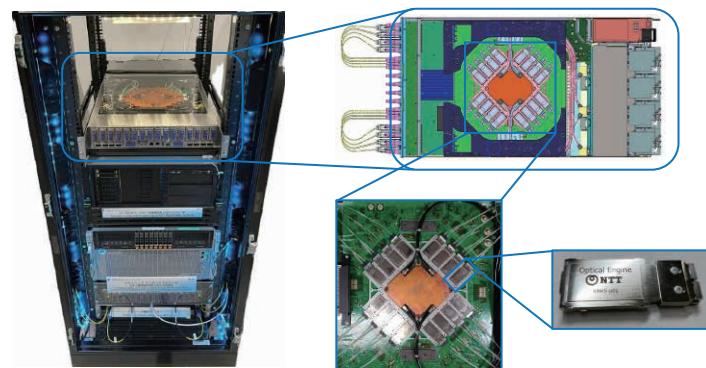


図5 光電融合スイッチ試作機

を採用し、1コネクタ当り400GBASE-DR4 規格を2チャネルを収容します。合計64コネクタで51.2 Tbit/s を実現し、コンパクトかつ高密度な実装が可能となりました。また、400GBASE-DR4 に加え、100GBASE-DRへのブレイクアウトにも対応できます。

この光電融合スイッチ試作機は効率的な冷却機構と多心のMPOコネクタを用いた高密度なフロントパネルの光インターフェースにより、大容量なイーサネットスイッチ装置でありながら、2RU (Rack Unit) という極めて小型なサイズで装置を実現しま

した。

さらにNTTが試作した光電融合スイッチ試作機は、光ディスアグリゲーテッドコンピュータのコンピューティングインターネットとして実際のシステムの一部に組み込まれ活用されました。

2025年4月13日から10月13日にかけて開催された大阪・関西万博において、NTTはパビリオンを出展しその中でIOWN光コンピューティングとして、光ディスアグリゲーテッドコンピュータのアーキテクチャを採用したコンピューティングによるサービスを提供しました（図6）。会場内に設置された多数のカメラ映像をリアルタイムでAI分析し、その結果をパビリオンの展示に活用するという取り組みです。万博に関する内容については、本特集記事『IOWN 2.0時代の社会実装に向けた取り組み』に詳細が説明されています。

このシステムの中で、光電融合スイッチ試作機は膨大な映像データを複数のGPUアクセラレータへ効率的に振り分ける役割を担いました。万博期間の6ヶ月にわたり安定運用を完遂したことで、PEC-2を含む光電融合技術が実サービス環境における有用性を備えていることが示されました。

PEC-2搭載光電融合スイッチの商用化に向けて

万博に活用した光電融合スイッチ試作機は、OIF規格に準拠したCPO構成を活用しましたが、商用化に向けてさらなる高性能化を実現すべく研究開発を進めています。従来のイーサネットスイッチでは光トランシーバを装置のフロントパネルにて挿抜するプラガブルトランシーバを採用していたため、ユーザーの手で交換できることから故障時の修理が容易でした。一方でCPO構成では、従来の光トランシーバに相当するPEC-2が装置内部のスイッチチップ近傍に半田付けで実装されているため、交換が容易ではありません。メンテナンスに際して装置を停止し、分解したうえでのデバイス交換が必要なため、修理コスト・運用コストがかかります。そこでNTTイノベーションデバイスではCPO構成としてスイッチチップに直接実装できる形態をとりながら、プラガブルトランシーバのように付け

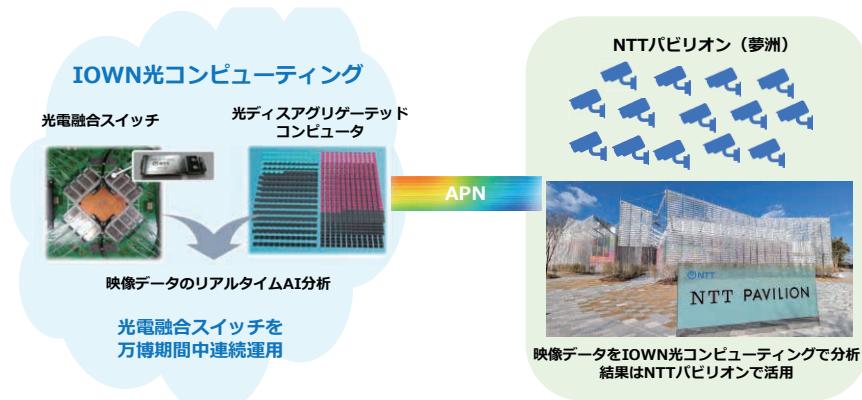


図6 大阪・関西万博での活用

外しができる実装形態（ソケット型実装）を提案し、実用化を進めています（図7）。さらに基本特性である通信容量の拡大と大幅な消費電力の低減を進めており、6.4 Tbit/sのPEC-2を実現し102.4 Tbit/sのスイッチチップに実装することで、従来のプラガブルトランシーバを使用したスイッチ装置と比較して50%の電力削減を実現すべく開発に取り組んでいます。

上述の性能向上を実現したPEC-2の商用版については、2026年にサンプルを提供できるよう検討を進めています。

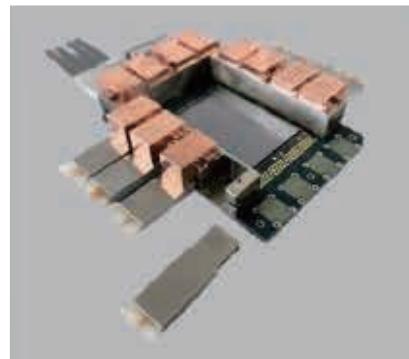


図7 ソケット型実装

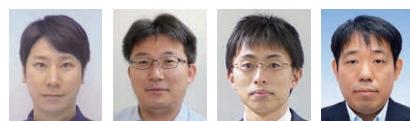
化に取り組んでいきます。

今後の展開

本稿では、コンピューティング適用に向けて検討を進めている光電融合技術について紹介しました。NTTは光通信の強みを活かし、電気処理と光伝送を融合する光電融合技術を用いたデバイスの研究開発を進めています。これらの技術をPECデバイスとして体系化し、IOWN 1.0ではAPNにPEC-1を導入しました。さらにIOWN 2.0からは、光電融合技術の適用範囲をコンピューティング領域へと拡大していきます。まずはPEC-2による低消費電力・大容量インターネットの研究開発を推進し、将来はパッケージ内部まで光接続を拡張するPEC-3やPEC-4によって、コンピュータアーキテクチャそのものの革新をめざします。PEC-2の実用化に向けては、OIF規格に準拠した3.2 Tbit/sのPEC-2を搭載した光電融合スイッチ試作機を開発し、大阪・関西万博で実運用することで、その有効性を確認しました。今後もPEC-2のさらなる高性能化に向けて研究開発を進め、商用

■参考文献

- (1) <https://journal.ntt.co.jp/article/35349>
- (2) <https://journal.ntt.co.jp/article/36078>
- (3) <https://journal.ntt.co.jp/article/33807>
- (4) <https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-Co-Packaging-3.2T-Module-01.0.pdf>



（左から）村中 勇介 / 伊藤 猛 /
有川 勇輝 / 妹尾 和則

光電融合技術はネットワークの消費電力を削減できる技術です。この光電融合技術を用いて、電力問題を解決する革新的なコンピューティングを実現すべく、研究開発を進めています。

◆問い合わせ先

NTTデバイスイノベーションセンタ

URL <https://journal.ntt.co.jp/article/38180>DOI <https://doi.org/10.60249/26025004>

APNの領域拡大を支える最新トランスポンダ技術の研究開発動向

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 2.0時代ではAPN (All-Photonics Network) のさらなる拡大に向け、マルチベンダに対応した伝送設計技術、高度な故障原因分析を可能にする高頻度モニタリング技術、そして伝送装置のユーザ拠点設置に向けた伝送装置とルータの一体化を実現するための監視制御権限分離技術が不可欠です。本稿では、これらの技術について紹介します。

キーワード : #APN, #トランスポンダ, #オープン光インタフェース

APN拡大に向けた課題と取り組み

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 2.0時代のAPN (All-Photonics Network)⁽¹⁾は、放送業・建築業・製造業など、さまざまな分野での活用が期待されており、その実現に向けてネットワークをさらに広げていくことが重要になっています。その中核となるのが、クライアント信号をAPNに収容するトランスポンダですが、APNの拡大にあたっては大きく3つの課題があります。

1番目は、伝送設計に関する課題です。特定ベンダによるロックインを回避し、コストを最適化するには「マルチベンダ化」が重要です。伝送装置のマルチベンダ化を実現するためには、標準規格に準拠したインターフェース⁽²⁾を実装するだけでは不十分であり、設計段階から「異なるベンダ装置どうしで本当に伝送できるか」を事前に判定する仕組みが必要になります。

2番目は、故障原因分析に関する課題です。

APNが広がるにつれ、多数のベンダの装置が混在してネットワークを構成するようになります。単一ベンダで構成されたネットワークであれば、想定される故障パターンを事前に把握しやすく、原因特定も比較的容易です。しかし、マルチベンダ環境では予期せぬ故障が起こりやすく、その原因分析は格段に難しくなります。そのような原因分析にはトランスポンダのログ情報を詳細に解析する高度な分析技術が必要ですが、高度な分析には光信号の状態が高頻度

でモニタリングされている必要があります。トランスポンダの従来のモニタリング間隔では、このような高度な分析について十分な情報が得られないという課題がありました。

3番目は、ユーザ拠点へのトランスポンダの設置に伴う課題です。これまでAPNでは、主にNTT拠点にトランスポンダを設置してクライアント信号を収容してきました。しかしAPNをより広く活用するには、ユーザに近い場所でAPNへ接続できることが望ましく、ユーザ拠点にトランスポンダを設置する必要が出てきます。一方で、ユーザ拠点にスイッチやルータに加えてトランスポンダまで置くと、装置スペースが増加し、保守運用も複雑化してしまいます。そこで、スイッチやルータが持つL2/L3機能と、トランスポンダの伝送機能を一体化した「スイッチポンダ」を導入する構成が

検討されています。しかし、APNサービス事業者は伝送機能を監視・制御したい一方で、L2/L3機能はユーザ側で管理したいため、1台のスイッチポンダ内部で監視や制御に関する権限を分離する仕組みが求められます。

これら3つの課題を解決するための技術が、本稿で紹介する「オープン光伝送可否判定技術」「高頻度パフォーマンスマニタリング技術」「監視制御権限分離技術」です(図1)。NTTネットワークイノベーションセンタ(NIC)では、これらの技術確立に加えて、本技術を適用したトランスポンダであるOCT (Open Converged Transponder) の開発も進めています。OCTには、クライアント信号を多重化してAPNに収容する伝送機能を持つ「マックスポンダ」と、伝送機能に加えてL2/L3機能も提供する「スイッチポンダ」の2種類

APN領域拡大を支える3つの技術

技術① : オープン光伝送可否判定技術=>マルチベンダAPNでの伝送設計を可能に

技術② : 高頻度パフォーマンスマニタリング技術=>故障発生時に高度な原因分析を可能に

技術③ : 監視制御権限分離技術=>L2/L3機能と伝送機能の制御権限を分離可能に

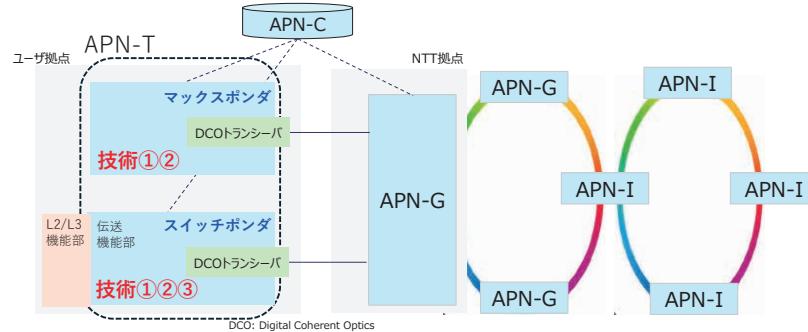


図1 APN機能拡大を支える3つの技術

が想定されており、IOWN 2.0時代の多様なユースケースに柔軟に対応できるトランスポンダとして位置付けられています。

マックスポンダ・スイッチポンダ共通関連技術

マックスポンダ・スイッチポンダは共にオープンなインターフェースを持つことで異ベンダ APN-I/Gとの接続が期待されますが、標準規格に準拠したインターフェースを実装するだけでなく、机上での伝送網の設計段階において光学的に接続可能か判定する技術が必要です。さらに、APNのマルチベンダ化や長延化に伴い、従来の監視制御では十分に監視や解析ができない間欠故障の顕在化が懸念されており、今まで以上に高度なモニタリング技術が必要とされています。ここではこれらの技術に関して紹介します。

■オープン光伝送可否判定技術

APNを構成する際には、「この地点Aから地点Bまで、光信号を問題なく通せるか」を事前に判定する仕組みが必要です。これを光伝送可否判定システムと呼びます。もしこの判定をせずに機器を接続してしまうと、通信経路上で光信号が想定以上に劣化してしまい、通信ができなかったり、不安定になったりする危険性があります。

従来の光伝送可否判定システムには、大きな制約がありました。ラインシステム(APN-I/G)とトランシーバ(APN-T)の詳細な特性を、システムベンダが自社の中だけで管理しており、そのベンダが「この組み合わせならOK」と認めた機器しか利

用できませんでした。たとえトランシーバやトランスポンダを他社製に変えたくても、ベンダが想定していない組合せだと、伝送可否を判断できないため、実質的には選択の自由がありませんでした。これはマルチベンダ構成のネットワークをつくりたい事業者にとって、大きな課題となっていました。

この問題を解決する考え方が「オープン光伝送可否判定技術」です(図2)。これは、ネットワークを構成する機器が複数ベンダにまたがっていても、共通のルールとパラメータを使って「伝送できるかどうか」を判断できる技術です。特定ベンダ内だけで管理している光特性に依存せず、オープンに評価できるのがポイントです。

オープン光伝送可否判定技術は、大きく2つの要素から構成されます。

1番目は、トランシーバ(APN-T)の特性を推計する技術です。ここでは、そのトランシーバ固有の雑音量(ノイズ)を正確に見積もり、さらにさまざまな雑音や波形の歪みが、実際の光信号の品質にどのような影響を与えるかを測定しモデル化します。例えば、どの程度の雑音までなら、ビット誤り率が許容範囲に収まるか、といったことを数値として扱えるようにします。

2番目は、推計されたトランシーバ特性とラインシステムの特性から実際に伝送可否を判断する伝送設計技術です。具体的には、ある拠点間の光パスごとに、ラインシステムのパラメータを信号の雑音量や波形の歪み量に変換し、特定のトランシーバを使った場合に、最終的な信号品質(ビット誤り率など)が許容範囲内に収まるかを計

算します。さらに、長期間の運用で機器が劣化したり、環境が変化したりすることも見越して、安全係数(マージン)を上乗せします。そのうえで、特定の対地区間に於いて候補のAPN-Tを利用できるか、伝送可否を判定できるようにします。

このように、オープン光伝送可否判定技術では、①トランシーバの特性推計、②トランシーバとラインシステムの特性に基づいた伝送設計という2つのステップに分けて考えることで、ベンダに依存せずに光パスの可否を判断できるようになります。その結果、事業者は複数ベンダの機器を自由に組み合わせつつ、安定した光伝送ネットワークを設計・運用できるようになります。

■高頻度パフォーマンスマニタリング技術

トランスポンダのマルチベンダ化やAPNの長延化が進むと「間欠故障」と呼ばれる、一瞬だけ発生してすぐ消えてしまうようなエラーが増加するリスクがあります。間欠故障は原因を特定することが難しく、現場の保守作業が増えることが懸念されています。

従来の監視方法では、APN-Tが送受信している光信号の状態を15分ごとに記録していました。これは経年劣化などの長期的な傾向を把握するには十分ですが、数秒～数十秒だけ発生する一時的な故障は、15分ごとのスナップショットに映らないことがあります。つまり、実際には一瞬エラーが起きていても、ログ上では何事も起きたことになってしまい、サイレント故障が増えるリスクがあります。

この課題を解決するために考えられたのが、「高頻度パフォーマンスマニタリング

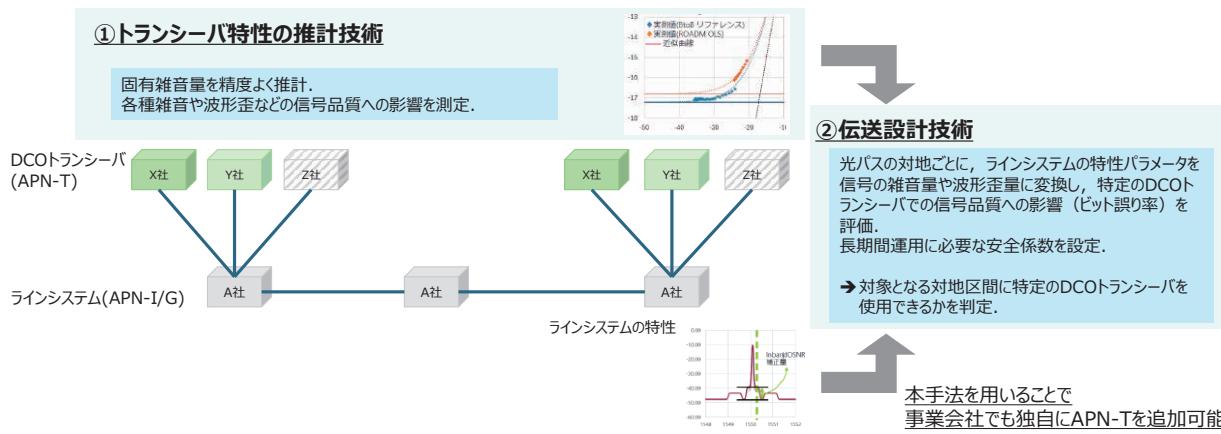


図2 オープン光伝送可否判定技術

技術」です(図3)。これは、APN-Tの状態を約10秒ごとといった短い間隔で監視し、光信号の状態が大きく変化したときに、その前後のデータを集中的に記録する仕組みです。本技術により故障の兆候や原因をより正確に追いかけることができます。

しかし、単純に10秒ごとにログを残すとすると従来のロギングシステムでは課題が存在します。例えば、従来のように15分ごとの情報を保存する場合に比べて、10秒ごとに保存するとデータ量は約150倍にも膨れ上がってしまうため、大容量のストレージが必要となります。

そこで今回のロギングシステムでは、ストレージを1次保存領域と2次保存領域の2段構成に分けて使う工夫をしています。まず、1次保存領域には直近数分間だけの情報を保存します。ここは一時的なバッファのようなもので、常に最新のデータだけが残り、古いデータは上書きされていきます。

もし監視中に、光の状態が大きく変化した(=故障や異常の可能性がある)ことを検知した場合、そのタイミングで1次保存領域にたまっている直近数分間のデータを、2次保存領域へコピーします。さらに、変化が起きた「その後の数分間」のデータも、2次保存領域に追加で保存します。こうすることで、「異常が起こる前の様子」と「異常が起こった後の様子」の両方を、細かい粒度(約10秒間隔)のログとして確保できます。

この方法のポイントは、常に大容量のログを取り続けるのではなく、怪しい変化があったときだけ、その前後を詳しく残すという点です。これにより、必要以上にストレージを増やすずに、高精細な監視データを効率良く蓄積することができます。

2次保存領域に残されたこれらの詳細ログは、上位の制御装置であるAPN-Cに送られます。APN-Cは、この高精度なログ情報を使って故障原因の分析を行い、どの機器や区間に問題があったのかをより正確に切り分けられるようになります。その結果、サイレント故障が発生した場合でも、現場での原因切り分け作業(人手による調査や交換作業など)を減らすことができ、保守稼働の削減やネットワークの信頼性向上につながります。

スイッチポンダ関連技術

NICでは、多様なAPNサービスの提供形態の実現に向け、スイッチポンダの開発に取り組んでいます。「スイッチポンダ」は、Ethernet/IPによるパケット転送を行う「スイッチ」とEthernet/IPベースの電気信号を伝送用の光信号に変換する「トランスポンダ」からなる造語で、APNにおける光パスの終端点となるトランシーバ(APN-T)とEthernet/IPによるパケットの転送機能を併せ持つネットワーク装置です⁽³⁾(図4)。

近年、デジタルロコヒーレント光技術の発展により、トランシーバの小型化と省電力化、高性能化が進み、プラガブル型のトランシーバとしてスイッチやルータへ直接搭載できるようになっています。このように、ルータやスイッチにDWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing)機能を統合し、直接光ネットワークに接続する技術はIP over DWDMと呼ばれます。IP over DWDMにより、従来ではルータ

と伝送装置の間に光と電気の変換を行うトランスポンダ装置が必要なところ、ルータやスイッチを直接光ネットワークに接続することができ、装置コストの削減や省スペース化を見込むことができます。また、お客様さまは、NTTから提供されたトランシーバを自身が所有するルータ・スイッチに装着することで、簡単にAPNへ接続することができます。

IP over DWDMが注目されるきっかけの1つにOpenZRH規格の登場があります。OpenZRHは、OIF(Open Internet-working Forum)が定める400ZR標準仕様に、光伝送装置で広く採用されているOpenROADM(Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer)機能を統合したMSA(Multi-Source Agreement)です。QSFP-DDやOSPFといったルータ・スイッチで広く使われているフォームファクタでもサポートされており、100~400 Gの柔軟なレート対応や最大600 kmのリーチによるメトロ・リージョナル用途への対

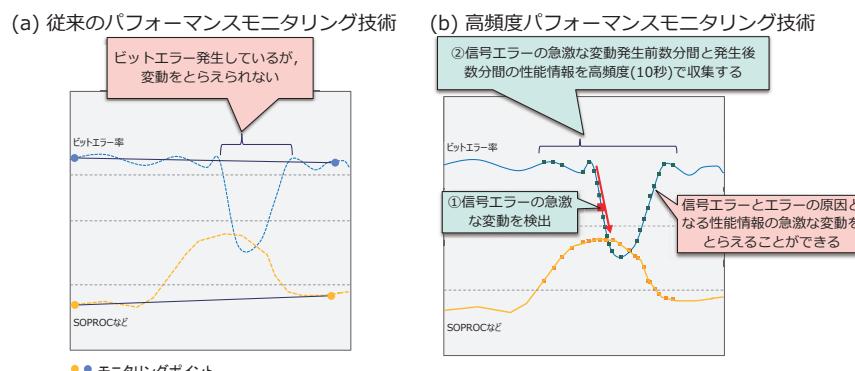


図3 高頻度パフォーマンスマニタリング技術

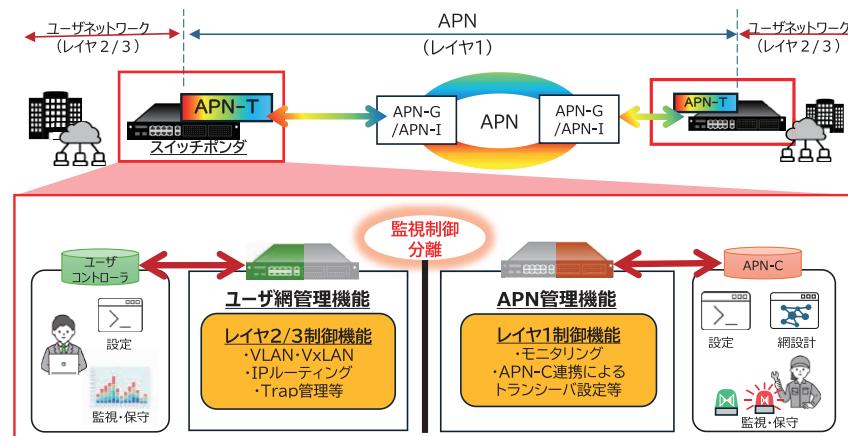


図4 スイッチポンダの概要

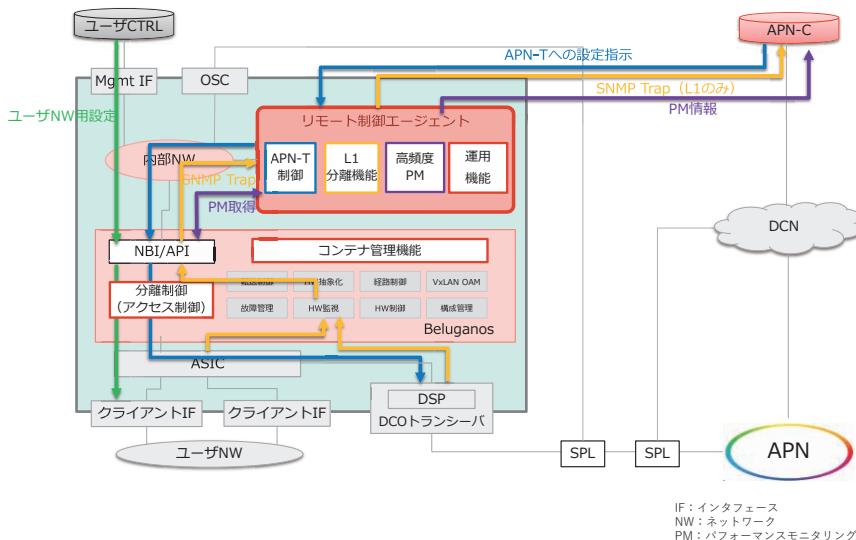


図5 監視制御権限分離技術

応、そして高い電力効率などの特徴があります。現在、800 G OpenZR+準拠のトランシーバも出始めており、AIやクラウドトラフィック急増に対応するための高容量・長距離接続を可能にする規格として、ハイパースケーラや通信事業者に期待されています。

NICでは、ホワイトボックススイッチと内製ネットワークOSであるBeluganos⁽⁴⁾、および400 G OpenZR+準拠のトランシーバを用いたOCTスイッチポンダタイプの開発を進めています。OCTスイッチポンダタイプは、OCTマックスポンダタイプと同様に、オープン光伝送可否判定機能と高頻度パフォーマンスマニタリング機能を備えていることに加え、Ethernet/IPのレイヤ2/3の管理とAPN-Tのレイヤ1の管理を切り離し、それぞれ独立で制御できるようにするための制御権限分離機能を持ちます。

■監視制御権限分離技術

監視制御権限分離技術は、主にユーザとAPNサービス提供事業者とでネットワーク装置に対する設定および監視を行う制御範囲を分離するための機能です（図5）。従来の光伝送サービスでは、サービス提供事業者が光パス設計や運用管理を担い、品質を担保しています。本機能により、トランシーバの設定や管理をAPNサービス提供事業者が保有するコントローラ（APN-C）から自動で行うことができます。

本機能は、NACM（Network Configu-

ration Access and Control Model）と、スイッチポンダのホストOSのKubernetes上で動作するコンテナアプリケーションRCA（Remote Control Agent）から実現されます。NACMはネットワーク装置の制御用インターフェースであるNETCONF/RESTCONFに対するアクセス制御モデルで、利用者ごとに使用可能な操作種別（readやwrite）やアクセスできるデータを制限することができます。これにより、ユーザとAPNサービス提供事業者がアクセスする機能範囲を分離することができます。RCAは、ホストOSとコントローラとの間のインターフェースを仲介する役割を担います。レイヤ2/3の制御を行うルータ・スイッチとレイヤ1の制御を行う伝送装置では、求められる機能やデバイス管理のデータモデルが異なります。RCAがトランシーバの制御や監視に使用するデータモデルを変換することで、OCTスイッチポンダはOCTマックスポンダやほかの伝送装置と共に通のインターフェース仕様で制御・管理することができるようになります。

RCAは、ほかにも高頻度パフォーマンスマニタリング機能や警報通知機能など、伝送装置としての管理に必要な機能を備えます。コンテナアプリケーションとして実装することで、APNサービス用途など、必要に応じてアドオンして使用することができます。

今後の展開

本稿ではAPNの領域拡大を支える3つの技術（オープン光伝送可否判定技術、高頻度パフォーマンスマニタリング技術、監視制御分離技術）について紹介しました。NICではこれら3つの技術を適用したOCTの実用化に取り組んでおり、2025年10月に実施したフィールドトライアル⁽⁵⁾では、商用環境において、OCTスイッチポンダとAPN-Cを連携させた自動リストレーション切り替えおよびオンデマンド増速の実証を行いました。今後も多様化する次世代のユースケースにも対応できるAPNの実現をめざし、技術確立と伝送装置の実用化を進めていきます。

■参考文献

- (1) 齊藤・茶木：“APNサービス提供に向けた取り組み,” NTT技術ジャーナル, Vol. 35, No.7, pp.18-30, 2023.
- (2) 西沢・可児・濱野・高杉・吉田・安川：“IOWN Global Forumにおけるオープンオールフォトニクス・ネットワークの検討,” NTT技術ジャーナル, Vol. 34, No. 3, pp. 12-16, 2022.
- (3) https://www.rd.ntt/iown_tech/post_68.html
- (4) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/03/28/230328b.html>
- (5) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2025/12/18/251218a.html>



（上段左から）村上 正樹／伊達 拓紀／
本間 俊介
（下段左から）臼井 宗一郎／高橋 賢

本稿ではIOWN 2.0時代を支えるオープン光伝送可否判定技術、高頻度パフォーマンスマニタリング技術、監視制御分離技術を紹介しました。今後も次世代のサービスを提供できるAPNの実現に向けて取り組んでいきます。

◆問い合わせ先

NTTネットワークイノベーションセンタ
企画部

発展するAPNの運用を支える最新コントローラ技術の研究開発動向

さらなる大容量・低遅延の実現やオンデマンドな利用に向けて、ますます発展する IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) APN (All-Photonics Network) ですが、これを運用していく中で APN コントローラが担う役割はより一層重要になっています。本稿では APN コントローラの研究開発における最新動向として、発展する APN を支える 5 つの技術について紹介します。

キーワード: #IOWN, #APN コントローラ, #運用高度化

はじめに

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) APN (All-Photonics Network)⁽¹⁾においては APN Step2 のフェーズを迎え、NTT グループ各社で順次 APN サービスが開始され、さらなる大容量・低遅延の実現やオンデマンドな利用に向けてますますの発展を遂げています。本誌 2023 年 11 月号では APN の運用において重要な役割を担う APN コントローラの基本的な機能について紹介しました⁽²⁾。本稿ではさらにその先の研究として、発展する APN の運用を支える 5 つの技術（①分割光パス開通運用技術、②APN 設計・光バスフロースルーブルーザー開通技術、③APN-T マルチベンダ化対応制御技術、④プロアクティブ保守技術、⑤オンデマンド光バス開通・切替技術）を紹介します（図 1）。

分割光パス開通運用技術

IOWN APN は複数セグメントをまたがる高速・高信頼・低遅延な光バスの提供を目指しており、私たちはその実現に向けて各セグメント間で連携しながら光バスの開通や保守運用を実現する APN コントローラ機能の研究開発に取り組んでいます。市中製品の EMS (Element Management System) には、単一セグメント内での光バス開通や保守運用機能を具備していますが、複数のセグメントをまたがる光バス開通や保守運用の機能は具備していません。その課題感に着目し、私たちは「複数セグメントをまたがる光バスの構成情報を管理する機能」「構成情報を基に各セグメントにて光バスの開通設定を行う機能」「各セグメント内の警報や性能情報を共有する機能」について、方式検討および試作実装を進めています。また、私たちは実際に前述

木原 拓 / 林 裕平
 出水 達也 / 伊藤 健
 渡邊 紘平 / 並木 雅俊

NTT ネットワークイノベーションセンター

の技術を実装した APN コントローラを用いて大阪・関西万博会場と東京とを結ぶ商用環境にてフィールドトライアルを行い、セグメント間で連携し複数セグメントをまたがる光バスの開通や、トラブル時におけるセグメント間で連携した切り分けが可能であることを実証し、商用環境においてもセグメントをまたがった光バス開通と保守運用の実現性について確認しました（図 2）。トライアルでの運用時に得られたフィードバックを基に新たな要件の整理を行っており、今後さらなる機能向上の研究開発を推進していく予定です。

APN 設計・光バスフロースルーブルーザー開通技術

APN は多数の装置が互いに接続されて構成されているため、APN の規模が大きくなればなるほどエンドユーザの利用拠点

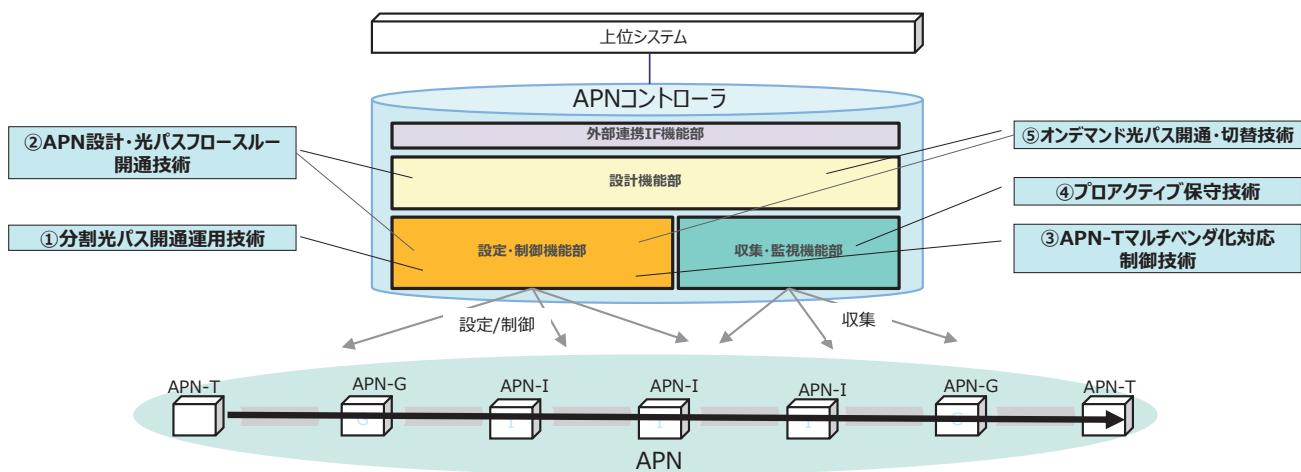


図 1 APN コントローラのアーキテクチャおよび主要技術

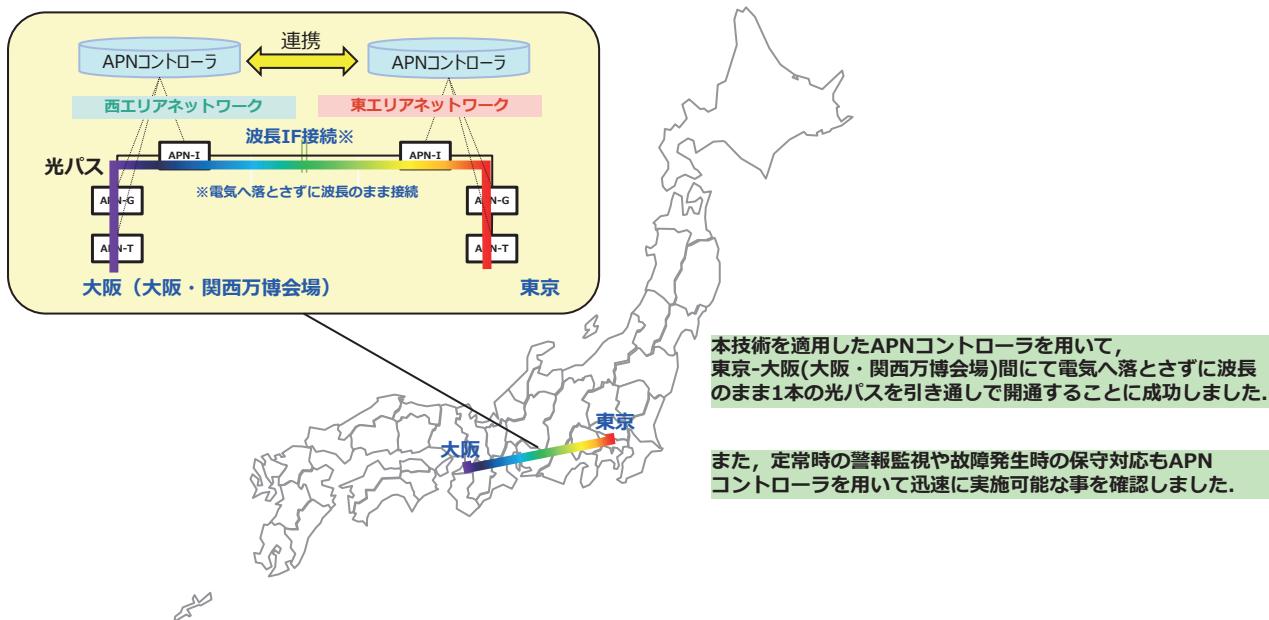


図2 分割光パス開通運用技術のフィールドトライアル概要

間を結ぶ経路の選択肢が増えています。また、APNの装置を設置している中継拠点間を結ぶ光ファイバの種類や敷設状況、設置されている装置機種によって通信可能な帯域や波長帯が異なります。さらに、多数のエンドユーザが光ファイバや装置を共用しているため、中継拠点間の一部でリソースが足りず、その経路での新たな通信提供ができなくなっている場合もあります。このように、通信サービスをエンドユーザへ提供するためには、都度これらの膨大な組み合わせや制約条件を踏まえながら最適なものを探し出すことになるため、長期間を要する煩雑な作業を必要としていました。

そこで私たちはこれらの作業を自動化するAPN設計技術を開発しました（図3）。この技術では、エンドユーザの利用拠点の情報や、利用帯域条件、耐障害性向上の観点から地理的に経路を分散させる条件等の必要な情報を入力するだけで、膨大な経路の組合せや制約条件を自動的に考慮した最適な経路候補を複数個算出することができます。さらに、これらの経路候補ごとに、構成する光ファイバや装置情報等を基に、想定される通信品質を自動的に算出することができます。

併せて、私たちはAPNを構成する多数の装置に対して、通信経路を確立するため必要な設定を自動的に投入する光パスフロースルーオン技術も開発しました（図3）。

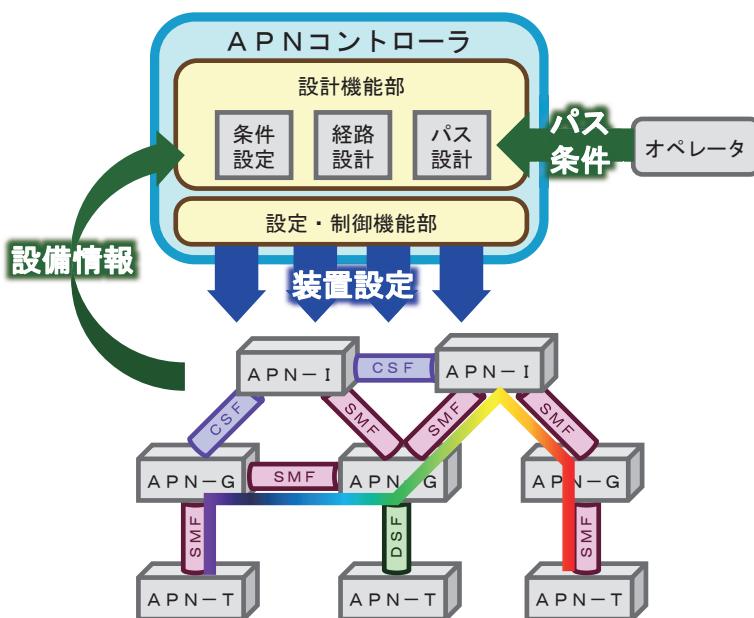


図3 APN設計・光パスフロースルー開通技術

APN設計技術と光パスフロースルーオン技術を組み合わせることで、オペレータが必要な情報をAPNコントローラへ入力するだけで、膨大な組合せや制約の中から自動的に最適な通信経路とその通信品質を算出し、さらに実際にAPNを構成する装置に設定を投入して通信経路を確立し、エンドユーザに通信サービスを提供することができます。

APN-Tマルチベンダ化対応制御技術

APNでは、圧倒的大容量・低遅延通信を安価にユーザーへ提供するために、また、ユーザーに合わせたさまざまなサービスを柔軟に提供可能とするために、さまざまな装置が使われています。特にAPNのサービスを提供するうえでユーザー向けの種々のインターフェース(IF)を提供する役割を持つAPN-T¹においては、ユーザーニーズに柔

軟にこたえるべく種々のIFを提供できるよう、用途に合わせたさまざまな装置ベンダの機種を利用可能とすることを志向しています。

一方で、これらAPN装置の運用においては、機種が異なると光パス開通のための設定方法や保守運用機能の操作方法などが異なることから、ネットワークの運用者は各装置機種に合わせた設定方法や保守運用の操作方法を学習し、各装置に合わせた方法でそれらを使い分けて運用する必要が出てきます。そのため、APNを運用していくうえで扱うAPN装置の機種が増えるほど、ネットワークの運用者にとっては負担が大きくなるという課題があります。

こうした課題を解決するため、私たちはAPN-Tマルチベンダ化対応制御技術の開発を行いました。本技術の特徴としては、オープンな制御IFを活用することで種々のAPN-Tを共通的に制御可能としている点にあります。具体的にはネットワーク機器をベンダやプロトコルに依存せず、一元管理するための共通的なデータモデルやAPI仕様として策定が進むOpen Configを活用することで、異なる機種のAPN装置に対して共通的な操作の提供（例：光パス開通、警報監視など）を実現しています。APN-Tの多くの機種では上記Open Configを制御IFとして採用しており、本技術を用いることでそれらを一元的に運用でき、

ネットワーク運用者の負担を大きく軽減することができます。

また、種々のAPN-Tを効率的に運用可能とすることで、APNサービスの中でユーザーに合わせた柔軟なIFの提供を実現しています。

プロアクティブ保守技術

APNの展開により中継用のルータやトランシッパの削減が可能となり設備コスト削減効果が期待される一方で、光区間が長延化されることにより、光信号品質の劣化起因によるサービス中断が発生した際に、その切り分け対応が難しくなり、設備復旧が長期化してしまう懸念があります。そこで、私たちは、光信号の物理特性情報を積極的に活用し、構成情報と紐付けて解析を行い、被疑個所の早期検知を実現するプロアクティブ保守技術をAPNコントローラの保守高度化機能として開発しました（図4）。具体的には、大きく2つの機能を開発しています。

1番目は、APNノードからPM（Performance Monitoring）というAPNノードが管理する光信号に対する送受信パワー等の各種統計情報を収集する機能です。本機能は全APNノードから15分間隔のPM情報を常時収集し、また、過去の日付にさかのぼっても解析できるよう最大30日間分

のPM情報を保存できる仕組みになっています。収集したPM情報は、APNコントローラが持つGUI画面上に構成情報と紐付けて表示することができます。

2番目は故障判定機能です。本機能は、APN-Tから収集したPM情報のビットエラーのカウントをトリガーに、対象の光信号が通過するすべてのAPN-I/G^{*2,3}IFの送受信パワーをPM情報から確認し、そのパワーの変動幅から正常・異常を判断し、異常と判断されたIFの最上流IFを被疑個所と判定します。併せて、被疑個所と判定したIFを通過するすべての光信号を影響信号としてGUI画面上に表示します。また、送受信パワーの変動が顕著でない場合においても、同時刻帯にビットエラーカウントがあった光信号をまとめ、その光信号群が通過する共通の区間（IF間）を被疑区間と判定する機能も開発しています。

本開発機能により、APN-I/Gでの送受信パワー変動起因による光信号品質劣化が発生した際に、早期にその被疑個所を動的

*1 APN-T : APNトランシーバは光パスの端点であり、光信号の送受信機能を持ちます。

*2 APN-I : APNインターチェンジは光パスの中継機能部であり、波長クロスコネクト、インターフェース間のアダプテーションの各機能を持ちます。

*3 APN-G : APNゲートウェイは光パスのゲートウェイであり、収容するAPN-Tに対する制御チャネルの設定、光パスの合分波等の機能を持ちます。

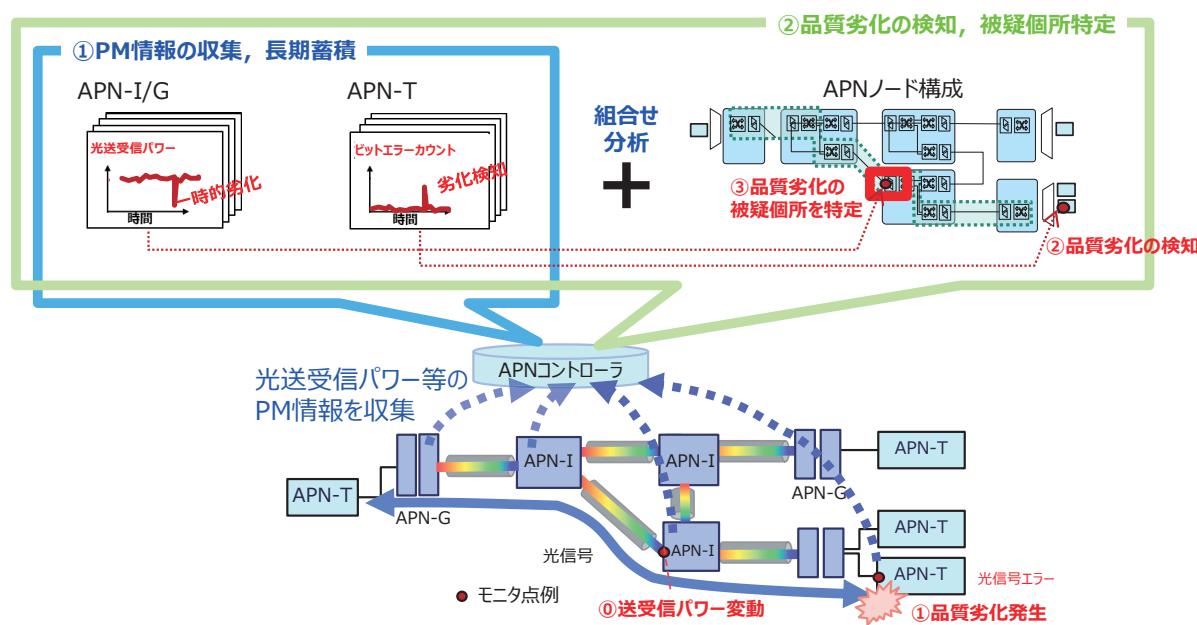


図4 プロアクティブ保守技術

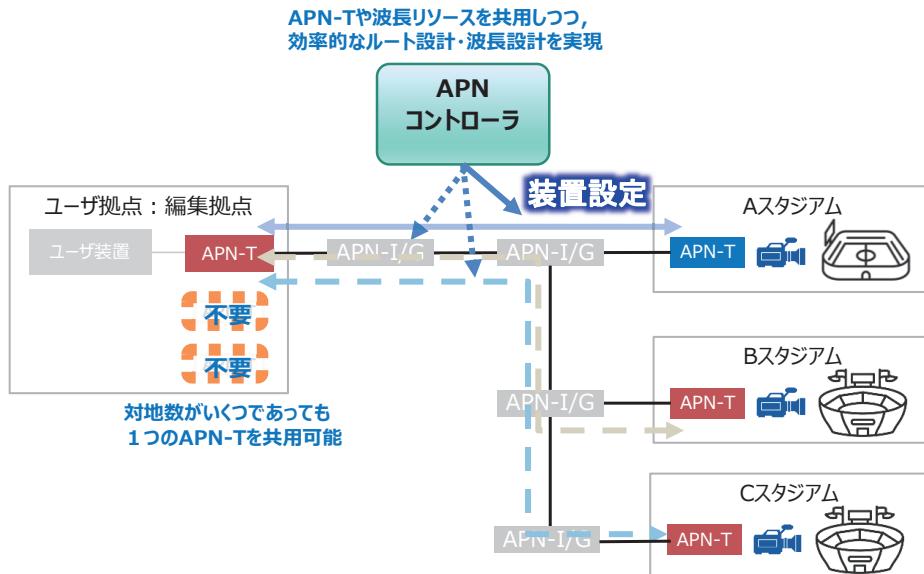


図5 オンデマンド光パス切替技術

に特定することができます。また、全国規模のネットワークにおいて送受信パワーが変動しない事象においても対応が可能です。

オンデマンド光パス開通・切替技術

私たちは、APNコントローラで光パスを長期間利用し続ける従来型のサービス形態に加えて、短期間での柔軟な光パスの開通・廃止を実現するオンデマンド光パス開通技術や共通のリソースを活用して必要な対地に接続先を柔軟に切り替え可能とするオンデマンド光パス切替技術の研究開発を実施しています。本技術により、短期間利用を含むユーザのニーズに応じたオンデマンドでの光パスの経済的な利用を実現します。また、リモートプロダクションにおける各スタジアムと編集拠点間の接続のように、接続先を期間によって切り替えたいユーザースケースにもAPNによる高信頼かつ低遅延な光パスが利用できます（図5）。本技術では、従来人手で行っていたルート、波長、伝送品質等の計算を設計機能部において自動化し、設計データに基づく光パスフロースルー開通技術と連携することで、設計から開通までの一連のフローをユーザ要求に基づいて自動で実施することが可能となりました。また、ユーザの要求に基づいた迅速な光パスの提供を可能とするだけではなく、激甚災害時などの迂回においても最

適な迂回ルートを光パスの切替先のルートとして自動設計させることで、迅速な迂回の実現につなげることができます。

本技術を実装したAPNコントローラを利用して、共同でフィールドトライアル⁽³⁾を実施しました。ユーザが制御するIPコントローラからAPI経由での要求に基づいて、光パスの開通を行い、ユーザ側でのL2/L3設定、アプリケーションサーバ間でのトラフィック疎通までを含めてオンデマンドでの開通が可能なことを実証しました。また、激甚災害時の故障を模擬したシナリオにおいて、波長変換器も含む光パスの迂回切替を実施し、10分以内の光パス切替を実証しました。

今後の展望

本稿では、私たちが日々研究開発を進めているAPNコントローラ技術について、新たに創出した最新の5つの技術を紹介しました。今後はAPNのさらなる発展へ向けて、より一層の展開が進み大規模なネットワークとなるAPNにおいて種々の装置をより効率的に収容・管理するための制御技術や、多くの装置を運用していく中での設計や開通等のさらなる高度化技術、APNにおける大容量・低遅延通信の主要なユーザースケースであるデータセンタ間通信に適用可能な運用・制御技術などの創出をめざして研究開発を進めていく予定です。

■参考文献

- (1) IOWN Global Forum : "Open All-Photonic Network Functional Architecture," NTT, ref. Dec. 2024.
- (2) <https://journal.ntt.co.jp/article/23716>
- (3) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2025/12/18/251218a.html>



(上段左から) 木原 拓 / 林 裕平 /
出水 達也
(下段左から) 伊藤 健 / 渡邊 純平 /
並木 雅俊

APNの発展に伴いAPNコントローラが担う役割はますます重要となってきます。私たちはAPNのますますの発展、新たな価値の創出に向けてAPNコントローラの研究開発を推進していきます。

◆問い合わせ先

NTTネットワークイノベーションセンタ
企画部

URL <https://journal.ntt.co.jp/article/38176>DOI <https://doi.org/10.60249/26025006>

主役登場

高性能・省電力・柔軟なIOWN コンピューティング基盤の実現に向けて

史 旭 Kyoku Shi

NTTソフトウェアイノベーションセンタ
AI基盤プロジェクト 主任研究員

AI（人工知能）やIoT（Internet of Things）をはじめとする大量データ処理が日常化する現代では、計算性能の向上と同時に電力消費の増大が進み、データセンタにおける電力や用地の不足、性能要件の高度化に伴うコストパフォーマンスの低下、そして顧客ニーズに応じたシステム構成の変更やサービス開発・運用の迅速化など、さまざまな課題が顕在化しています。私自身、こうした課題に日々向き合う中で、データ収集・活用の加速と環境に配慮したカーボンニュートラルの両立の難しさを強く実感してきました。その解決に向け、試行錯誤を重ねながら、アクセラレータを中心とした省電力・低遅延・柔軟性を兼ね備えた新しいコンピューティング基盤「Data-Centric Infrastructure (DCI)」の実現をめざしています。

私は、2025年の大阪・関西万博における映像AI分析を題材とした「万博DCIプロジェクト」に技術面での中核メンバとして参画しました。その過程では、設計段階から想定していなかった制約やトラブルに幾度となく直面しましたが、その都度、構成の見直しや設定の調整、現地での検証を重ねることで、アクセラレータ活用の高度化・柔軟化による電力効率改善の効果を実証できました。そして現在、これらの成果を踏まえて、DCIの中核を担う「DCIコントローラソフト」の商用開発を進めており、実用化・事業化に向けた具体的な検討を行っています。

開発中のDCIコントローラソフトは、大きく2つの技術で構成されます。1つは、動的ハードウェアリソース制御技術（Dynamic Hardware Resource Con-

trol: DHRC）です。DHRCは、アクセラレータの有効活用やハードウェア構成・アプリケーション配備の最適化を目的として、柔軟なハードウェアリソース割当とテナント間でのリソース共有、通信設定管理機能を提供します。従来、テナントや拠点ごとに個別設計・固定運用されていた基盤に対し、DHRCでは各テナントの利用状況をリアルタイムに監視し、動的かつ最適なリソース割当を実現することで利用率を大幅に向上させます。また、運用要件に応じた高度なスケジューリングを可能とし、リソースの片寄せや冗長化の担保にも対応します。さらに、Commercial Off-The-Shelf/Composable Disaggregated Infrastructureなど異なるサーバーアーキテクチャを抽象化し、All-Photonics Network等で接続された遠隔拠点間のリソース共有を実現することで、拠点をまたいだ効率的なリソース活用を可能とします。

DCIコントローラソフトのもう1つの構成技術は、アプリケーションフレームワーク（Application Framework : APFW）です。アクセラレータを有効に活用し、高効率かつ低消費電力なAIアプリケーションを開発するためには、AI処理に適した技術の組込みが不可欠となります。しかし、SmartNICを介したCPU非介在のデータ転送（例：Remote Direct Memory Access）や、データ処理中ににおけるデータコピーの回避などには、センシティブなメモリ操作が必要となるため、高度な専門知識を要します。また、AI推論に関する一連の処理（デコード、前処理、行列演算、後処理）をバッチ化し、GPUへフルオフロー

ドするためには、GPU高効率化に関する高度なオフロード技術の知識やOSSの使いこなしスキルが求められることから、開発難易度は非常に高いものとなります。APFWでは、GPUやSmartNICといったアクセラレータを効果的に扱うための技術・OSSの設定やチューニング等のノウハウを機能モジュールとして実装し、拡張しやすいかたちで提供します。これにより、高度な専門知識がなくても高性能かつ省電力なアプリケーション開発を容易にし、開発期間の短縮と品質の安定化を実現します。また、DHRCと連携する機能も提供することで、APFW上のAIアプリケーションが高いスケーラビリティと可用性を備えた分散構成を容易に実現できます。

私は、DCIコントローラソフトの事業導入により、高性能・省電力なアプリケーション開発と運用の効率化を実現し、AIサービス提供者におけるコストパフォーマンス向上を現場で実感してもらえる技術にしていきます。さらに、都心部データセンタで深刻化する用地・電力不足といった社会課題に対して、DCIとAll-Photonics Networkを組み合わせ、Location-freeなAI基盤の実現を通じて、技術者として貢献します。

今後は、さらなるビジネス拡大をめざし、大規模言語モデルなどを含むマルチAIエンジニア分野における高性能化・省電力化、そして新たなアクセラレータへの適用による機能拡充を進めていく予定です。私は、DCIをIOWN時代におけるデータドリブン社会を支える中核として、持続可能で高性能・省電力かつ柔軟なIOWNコンピューティング基盤に発展させていきたいと考えています。





NTTコミュニケーション科学基礎研究所/NTT社会情報研究所
上席特別研究員

渡邊淳司 Junji Watanabe

学ぶ場、働く場、そして研究の場の ウェルビーイング・コンピテンシー

昨今、経済的な価値だけでは測れない人の存在や心のあり方に価値をおいたウェルビーイング(Well-being)の重要性が高まっています。また、技術の急速な発展や社会情勢の劇的な変化など、先を予測できない時代では、多様な価値や急転する状況に合わせていく柔軟な思考力や行動力を持ち、皆で道筋をつくり調整しながら目標に向かい進んでいくことが必要です。NTTコミュニケーション科学基礎研究所の渡邊淳司上席特別研究員は学校教育や企業活動における実践の場でウェルビーイング・コンピテンシーを身に付け、実際に活用できる具体的な手法を提案、展開しています。今回は、最近、特に注力している領域や自身の研究スタイルについて伺いました。



○ ウェルビーイングに生きるために 実践的な資質や能力を育む

最近のウェルビーイング研究に関する活動について教えてください。

2025年9月に『ウェルビーイング・コンピテンシー-学びの現場にウェルビーイングを取り入れるための考え方と実践方法-』(平・渡邊・横山:東洋館出版社)という書籍を出版しました。本書は、学校教育の現場で、主に児童や生徒を対象にウェルビーイング・コンピテンシー(WBコンピテンシー)をどのように育んでいくことができるのか、現場の先生方にも直接役立てていただけるよう、具体的な実践手法も含めて、これまで検討してきた内容をまとめたものです。

この出版の背景の1つとして、2023年6月に閣議決定された第四期教育振興基本計画の中に、「日本社会に根差したウェルビーイングの向上」が明記されたことが挙げられます。ウェルビーイングが教育の一環としてオーソライズされ、未来社会をつくるうえでの共通言語として誰もが理解しておくべき概念と位置付けられたときに、先生方にとっては「いきなりそのようなことを言われても…」と一定の不安を感じるであろうと容易に推測できました。特に現場の先生方にとって、学習指導要領などが更新されることも想定され、児童・生徒に向けたウェルビーイングの学びを具体的にどう指導していくべきものかと、お困りになることもあると思います。私たちは本書を通じて、ウェルビーイングという

考え方と現場の先生方の実践との橋渡しをしていけたらと考えています。

現場で働く先生方はとてもお忙しいので、「また余計なものを持ってきたな…」と思われてしまうと本末転倒になってしまいます。まず先生方に対しては、ウェルビーイングの学びは、現在実践されている学びを置き換えるものではなく、それらを新たに価値付けるものであるとお伝えしています。すなわち、各教科の壁を越えて、これまで実践してきた教科指導や生徒指導を、ウェルビーイングという視点でもう一度、とらえ直してみませんか、とメッセージしています。

WBコンピテンシーについて少し触れてきます。「コンピテンシー(Competency)」とは、知識の理解だけでなく社会や問題に向かう態度や、具体的な状況での判断力・行動力まで含む分野を限定しない実践的な資質や能力をさします。WBコンピテンシーとは文字どおり「ウェルビーイングに生きるために実践的な資質や能力」のことです、各人が毎日の生活でさまざまな環境、状況で自らのよいあり方を見出し、周囲と協働して実現していく力が必要であるということです。それぞれの人のウェルビーイングが実現されるためには、受け身で待っているだけではなく、各人がそれぞれアプローチしていくことが大切になります。

WBコンピテンシーを教育の場で展開していくために、私たちは「ウェルビーイング・コンピテンシー モデル」を提案しています(図1)。ウェルビーイングを実現するかかわりの範囲として「I:自分」「WE:身近な人々」「SOCIETY:不特定多数を含む社会」「UNIVERSE:より大きな存在」の4つのカテゴリーに

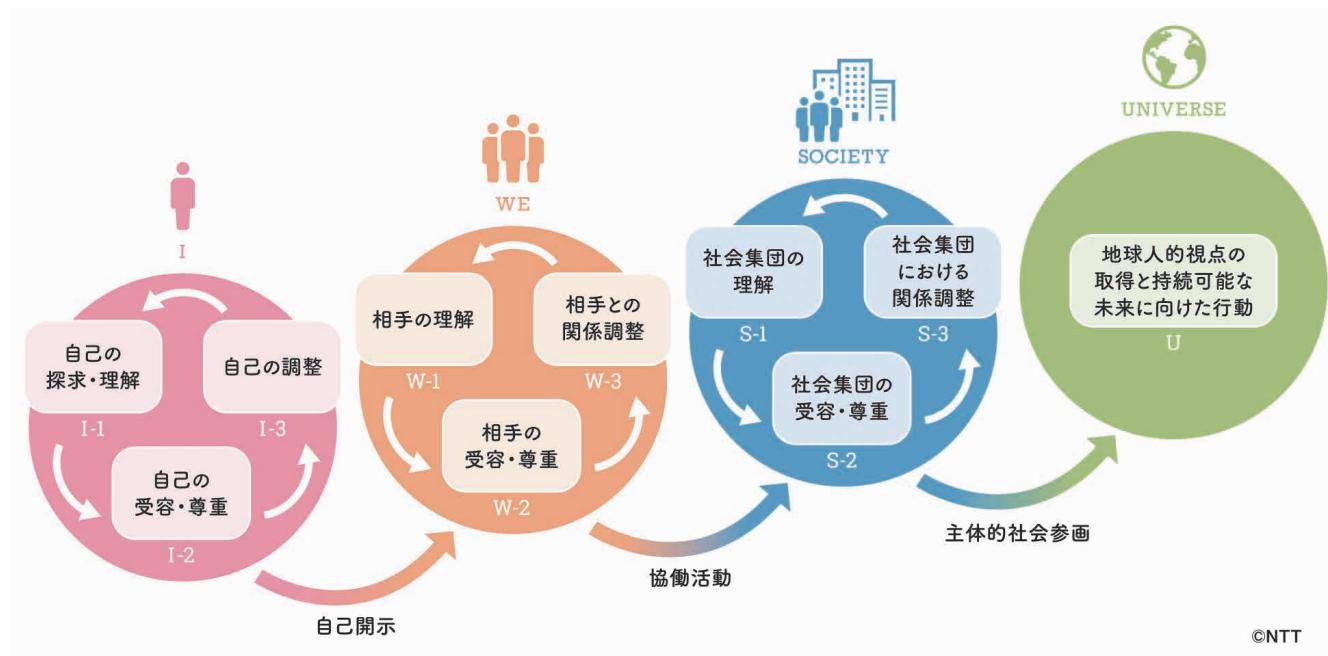


図1 ウェルビーイング・コンピテンシーモデル（NTT-KIT 2024年度版）

©NTT

分け、「I」「WE」「SOCIETY」にはそれぞれ認知、感情、行動の3つの観点から計9つのコンピテンシー、「UNIVERSE」のカテゴリーには1つのコンピテンシーを設け、合計10のコンピテンシーを獲得すべきWBコンピテンシーとして設定しました。

自己理解、自己受容、自己調整に関する「I」のコンピテンシーを獲得すると、近しい相手へ自己開示ができるようになります。また「WE」のコンピテンシーを身に付けると、身近な人々との協働活動ができるようになるでしょう。さらに「SOCIETY」のコンピテンシーが身に付くと、主体的な社会参画が可能になると期待されます。このように、さまざまな範囲でコンピテンシーを身に付けることが必要ですが、もちろん、どの順番でないといけないということはありませんし、それぞれのカテゴリーのコンピテンシーは相互に影響を与え合っています。

前述のモデルを使いながら、学校現場でWBコンピテンシー獲得の実践が行われているのですが、本書では、その実践を大きく「ターゲット型」と「アレンジ型」に分類しています。ターゲット型というのはWBコンピテンシーの獲得・向上を主たる目的とする教育活動のことで、「総合的な学習（探求）の時間」「特別の教科 道徳」「学級活動」などの科目と親和性が高いでしょう。一方で「アレンジ型」は、すでにある国語科や社会科などの教科内容の学びを第1の目標に掲げ、そこにウェルビーイングの考え方を副次的に取り入れた教育活動のことです。

教育の現場では、教科ごとに1年間の授業時間が学習指導要領で定まっていますので、そこへウェルビーイングの授業をさらに取り入れるのはとても難しいのですが、既存の教育活動をベース

にしているアレンジ型は、日常の授業や活動の中に無理なく取り入れられる方法です。例えば、国語科ですと「主人公の気持ちになって考えてください」という問い合わせを「主人公はどのようなウェルビーイングを大切にして行動したのか考えてください」と変えるだけでも、「I」のコンピテンシーに関連した課題設定ができます。家庭科で「家族のウェルビーイングを考慮して料理をつくってみましょう」という課題は「WE」にかかわる学びと紐付けられるでしょう。あるいは社会科では「過疎地域の方々がウェルビーイングに暮らすために、自分にはどのようなことができるだろうか?」と「SOCIETY」へも展開できるのではないかでしょうか。

他のアレンジ型の実践としては、学級活動での実践が挙げられます。朝の会で日直が「今日、クラスで大事にしたいウェルビーイング」を全員に紹介し、その毎日の記録を「I」「WE」「SOCIETY」などのカテゴリー別に色分けし、1カ月のカレンダーを作成することにより、クラスで大事にしたいことを可視化したり、行事による日々の変化をひと目で把握できるようになりました（図2）。これにより、クラスの前日の反省を自分の今日の行動に活かすなど、生徒は自分自身のことだけではなく、クラス全体について考えることを習慣化できるようになったとのことです。

合唱コンクールや運動会、学習旅行といったイベントにおいて、大事にしたいことを各人が記載して、相互理解のために活用する事例もあります。同じ1つのイベントであってもそれぞれ異なる考え方を持っていることを感じ、価値観の違いを理解し、WBコンピテンシーを獲得していく過程は、児童・生徒にとって意義深いと考えられます。一方で、この営みを通じて、教科の壁を越えた先生

どうしのつながりを深める効果もあります。例えば、音楽で合奏をすることと、スポーツでチームプレーをすることはともに「WE」



品川区立富士見台中学校 提供

図2 学級活動におけるウェルビーイング・コンピテンシーの育成
(朝の会でのウェルビーイングカレンダーの例)

に関連したWBコンピテンシーの獲得につながりますので、異なる教科を担当する先生の間でも会話が進んできているようです。

企業のエンゲージメントへもウェルビーイングの考え方を展開されているようですね。

教育で取り組んできたウェルビーイングの知見を企業のさまざまな実務へも展開していきたいと考えています。まず最近の話題としては、NTT総務部門と連携した従業員エンゲージメントに関する取り組みがあります。NTTグループ全従業員に対して毎年実施されている調査では、2023年度から「ウェルビーイング価値観」の視点で作成した質問を導入いただいている(図3)。

詳細はWebサイト⁽¹⁾に掲載されていますが、ここでは調査の分析の一部を紹介します。まずNTTグループ全体では、全国をつなぐ使命を担うインフラ企業ならではの「信頼する・される」「感謝する・される」「社会に貢献する」といった価値観が上位にありました。その中で役職別では、職位が上がるにつれて、心の平穀や成長・達成に関する「I」の価値観だけでなく、信頼や感謝といった「WE」の価値観、社会貢献を重視する「SOCIETY」の価値観が増えていく傾向がみられています。さらに年齢による違いをみると、若い社員では、「I」の価値観を選ぶ傾向があるのにに対し、50代の社員では、「WE」や「SOCIETY」が増えています。

これらの結果から、若い社員に対しては、心が休まる場や挑戦の機会を提供することが重要であるといえますし、年齢が上の社員や役職の高い社員に対しては、人と人のつながりや社会への貢献も意識した施策を整えることが必要でしょう。こうした社員そ

<input checked="" type="checkbox"/> 自分で決められる	<input type="checkbox"/> 多様な価値観を持つ人と働く	<input type="checkbox"/> 感謝する・される	<input type="checkbox"/> みんなで協働する	<input type="checkbox"/> 仕事での縁を大事にする
<input type="checkbox"/> 達成感を持てる	<input type="checkbox"/> 決まりを守って働く	<input type="checkbox"/> 心安らかに働く	<input type="checkbox"/> お互いに価値観を理解・尊重する	<input type="checkbox"/> 仕事に希望を持てる
<input type="checkbox"/> いつも通りに仕事を行う	<input type="checkbox"/> 自己への気づきがある	<input type="checkbox"/> お互いに受け入れあう	<input type="checkbox"/> 成長できる	<input type="checkbox"/> 自然環境や生命へ配慮する
<input type="checkbox"/> 社会に貢献する	<input type="checkbox"/> 新しい人間関係をつくる	<input type="checkbox"/> 熱中・没頭できる	<input type="checkbox"/> 思いやを忘れない	<input type="checkbox"/> 過去や未来とのつながりを大事にする
<input type="checkbox"/> あこがれたり、尊敬したりする人を持つ	<input type="checkbox"/> 親しい関係になる	<input type="checkbox"/> 挑戦できる仕事をする	<input type="checkbox"/> 信頼する・される	<input type="checkbox"/> その他(自由記述)

NTT研究所発触感コンテンツ+ウェルビーイング専門誌 ふるえ Vol.61 より引用

図3 NTTグループのエンゲージメント調査で利用されたウェルビーイング価値観

それぞれの価値観を理解したうえでの目標設定や業務配分、日々のコミュニケーションを実施することが、エンゲージメントの向上につながるのではないでしょうか。今後私たちは、会社組織としていかにエンゲージメントを高められるのか、分析手法に加え、研修などの施策も組み合せてNTTグループ内外での実証を進め、従業員それぞれのウェルビーイングに立脚したエンゲージメント計測・分析・向上の方法論を体系化していければと思っています。

○ ウェルビーイングをもたらすサービス開発へと領域を広げていく

今後の展開について教えてください。

私はNTTというICT企業に身をおき研究活動をしていますので、このウェルビーイングという考え方を学校教育にとどめておくのではなく、企業の経営や働き方、さらにはサービス開発などへも適用できればと考えています（図4）。前述のエンゲージメント調査の取り組みは、その1つですし、教育分野でも、NTTグループの事業会社は、文部科学省のGIGAスクール構想に沿って、回線やタブレット端末などを提供・管理するサービスを行っています。現在の取り組みとの連携として、ウェルビーイングの教育コンテンツを通信サービスの付加価値として取り入れることも考えられるかもしれません。また、そもそもサービスとは、利用者のウェルビーイングを向上させることだけでなく、利用者と提供者でウェルビーイングをつくり合うことであり、サービス開発への適用はこれから特に重要な分野だと思っています。

そして、ウェルビーイングに資するサービス開発の考え方は、ウェルビーイング教育の考え方とも親和性があります。学校教育におけるWBコンピテンシーの学びでは、「ターゲット型」と「アレンジ型」の実践について触ましたが、この分類はサービス開発にも適用できます。何らかのウェルビーイングの要因を中心にお

いたサービス開発もあれば、機能性や生産性の向上を基本機能として、そこにウェルビーイングの体験を付加価値とするサービス開発もあります。これら2つを合わせると広範囲なサービス領域を網羅できるでしょう。例えば、メンタルヘルスケアや美容・健康、働き方などにかかるサービスは比較的ターゲット型サービスが多く、素材開発やB2Bのビジネスはアレンジ型によるサービス開発が適用しやすいと考えられます。

アレンジ型について具体例を挙げて考えてみましょう。例えば、スポーツシューズという製品は、その基本機能として「スポーツを行う際の、足の保護、パフォーマンスの向上」があります。そして、そこにアレンジとして、走った距離を記録するアプリとの連動を考えると、ユーザーは達成感を感じやすくなるでしょう。別のアレンジとして、一緒にトレーニングする仲間とペアデザインが選べる特典が付いたら、関係性を深めることができるでしょう（図5）。同じ基本機能でも、どのようなウェルビーイングに着目してアレンジするかで、そのサービスの価値が変わるのであります。

ご自身の研究スタイルや取り組み方、後進に向けたメッセージをお聞かせください。

研究者というと、取り組みたい対象が明確にあり、得意な専門性を持ち、その分野で第一人者をめざしていくことを目標に置く方が多いのではないでしょうか。どちらかというと私は、まず世の中の流れを感じ、それとのかかわりを大切にしている点で、一般的な研究者と色が異なるかもしれません。無為自然に世が流れしていく方向へ身を任せつつ、時にはさまざまアレンジしていくことで、自分自身や周囲の方々、そして社会としてもよいと思えるような場所へたどり着ける、そのような貢献ができたら思います。

このとき、貢献とはどういうことか。自分を素材に見立て、どうすれば一番うまく役立てられるのかと考えます。自分よりでき



図4 企業活動におけるウェルビーイングの取り組み

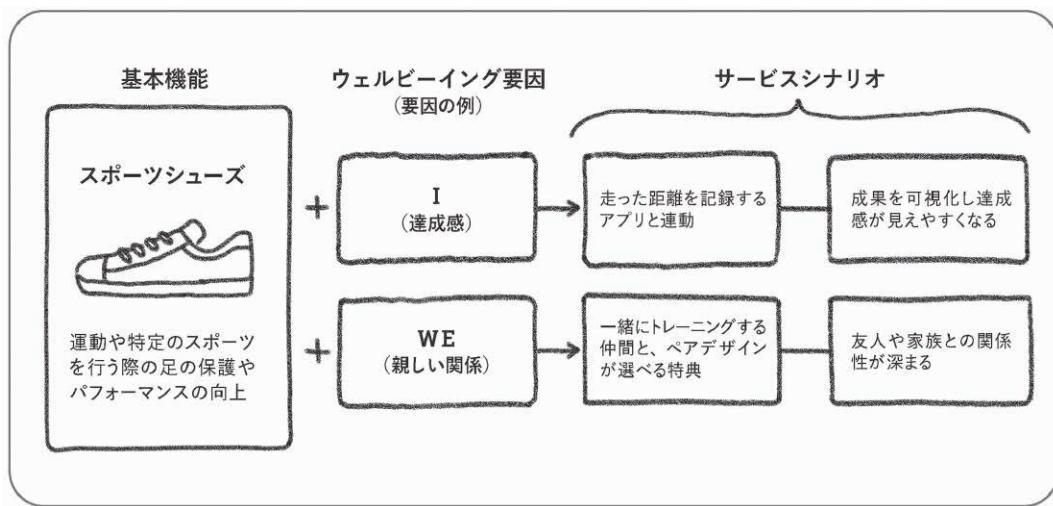


図5 スポーツシューズを例にしたウェルビーイング要因付加の例

る人がいるのであればその人に任せることも大切だと思います。世の中には各分野の専門家やステークホルダがたくさんいらっしゃいます。私自身は、心構えとして、専門であることにこだわらないから、いろいろなものを組み合わせて価値を生み出すことに向いているのかもしれません。

このようなことを言っていると、「それって研究者のやることなのですか？」と問われたこともあります。正直、自分の専門性にこだわりすぎると、自分の考えられることしかできませんし、自分でやれることには限りがあります。一部の例外を除き、一人の人間が研究という枠組みの中で影響力を持てる時間はそんなに長くありません。自分も残された時間の中で、専門でなかつたとしても、自分が「かかわる」ことが誰かの価値になるのであれば、できるだけのことをしようと思っています。

そういう意味で、私は「かかわり」ということを大事にしています。私は大学院修了後、科学技術振興機構（JST）のさきがけ研究員を経て、学生時代から縁のあったNTTに入社させていただき十数年が経過しました。この間、さまざまなかつたとして、自分が知らないところで誰かが気にかけてくれたり、逆に誰かに迷惑をかけていたということがあったと思います。自分が意識している以上に、誰かとかかわってきたのだと思います。なので、できるだけ目の前にいる他者だけでなく、さらにその向こうにいる人々との間合いやバランスにも想像力を働かせながら、自分の役割を果たすことができたらと思っています。

ちなみに、私は、さまざまなかつた人々の活動や研究の流れの結節点に価値を見出し、見えるようにしたり感じられるようにする行為を「研究を編集する」と表現することができます。自分も含め、関係者の誰が、いつ、どこで、何をすると、個人とグループの両方にウェルビーイングが生まれるのか、そういった視点から行動するイメージです。このとき、「相手が自分を便利に活用できる

こと」も大事にしています。何かあったとき、その人の頭に自分が浮かんでくるならば、その人と新しい活動が始まる機会になります。これまでに研究者はもとより、経営者、教育者、政治家など数多くの分野の方とコミュニケーションしてきました。こうした出会いは自分の財産であり、価値を考える地図を広げてくれていたと思います。また、現在、研究の編集的な活動としては、NTTと東京大学との「サステナブルウェルビーイング 社会連携講座」⁽²⁾において、私自身はNTT側の担当者として、講座全体のコンセプトに合わせて、研究者と研究者をつなげる立場としても取り組んでいます。

後進に向けてですが、自分がやりたいことだけにこだわらず幅広い視野で研究に取り組む姿勢を大切にしていただきたいです。その一方で、その中で役割を果たし、自分という存在を編集し、他者やグループにとって何らか価値あるものとして表現してください。そうすることで、他律的な価値と自律的な価値の両方が生まれてきます。まず、大きな流れに流されながらもアウトプットをして、今度はそれを材料に独自の価値を編集する。またそれを誰かの流れの中で使ってもらい別のアウトプットにする。そして、また自身の価値を再編集する。それを繰り返すのです。もちろん、このようなやり方を実現する力、具体的には、物事の遂行力や変化への適応力、異なるものから価値を見出す編集力を身に付けるにはそれなりの訓練が必要です。ただ、それらの力は、少なくとも私にとっては、研究の場でウェルビーイングであるために欠かせないWBコンピテンシーでした。

■参考文献

- (1) https://furue.ilab.ntt.co.jp/book/202511/index.html#anchor_contents1
- (2) <https://sw.iii.u-tokyo.ac.jp/>

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

中満 達也 Tatsuya Chuman

情報処理技術の専門家として 建物環境のIT化を牽引する

人がオフィス内で暑さ、寒さを感じる要因とは何でしょう。それはエアコンで制御される温度や湿度、風速だけではありません。人が身に付けている衣服の着衣量や人自身の活動量も重要な因子になります。NTTファシリティーズの中満達也氏は、AI（人工知能）に基づいた空調制御技術で建物の省エネルギー化に取り組むとともに、オフィス在室者が感じる快適性の定量化についても情報処理技術の切り口から挑んでいる、建物IT分野のスペシャリストです。今回、最新の検証状況に加え、建物の設計・維持管理を本業とする企業でのIT技術者としての思いや今後の研究ビジョンについて伺いました。



これまでにない、腕まくりの状態を 反映した新たな空調制御手法を提案 現在手掛けているホットな研究テーマについて教えてください。

2050年の脱炭素社会の実現に向け、建物設備においても省エネルギーの推進が課題となっています。昨今の調査では、ビル内の熱源や熱搬送によるエネルギー消費はビル全体で高い割合（約40%）を占めており、省エネルギーを目的としたBuilding and Energy Management System (BEMS) のデータを用いた空調制御の最適化技術が盛んに研究されています。

一方、オフィスでは室内の省エネルギー化とともに、執務空間の快適性についても重要視されるようになってきました。その客観的な評価指標として予想平均温冷感申告 (PMV : Predicted Mean Vote)^{*1, (1)}が一般的に用いられています。PMVは「温度、湿度、放射温度、風速」の物理的要素および「着衣量 (CLO)、活動量 (MET)」の人間側の計6要素から算出され、人体の温冷感を-3(寒い)～+3(暑い)の7段階で表します。この6要素のうち、着衣量は室内の温度と強い相関を持つ重要なパラメータであり、同じ室温でも着衣量が増えるほどPMVは高く（=暖かく）なり、着衣量が少なければPMVは低く（=寒く）なります。そのため、着衣量を正確に把握することは快適性評価において不可

欠です。

これまで、PMVを空調制御へ直接利用する試みは行われてきましたが、実運用においては着衣量・活動量の取得が困難であったため、着衣量のパラメータには、季節に応じて長袖シャツ、半袖シャツなどの固定値を使用するのが一般的でした。しかし近年、カメラの性能向上や機械学習の進化により、これまでのカメラ画像からでは取得が困難であった執務者1人ひとりの着衣量を正確に把握できるようになってきました⁽²⁾。

こういったイノベーションにより、人の着衣量や活動量のパラメータを、従来の固定値から現場の実態を反映する可変値に変換することが可能になります。具体的には半袖シャツ・長袖シャツの着用率や、デスクワーク・歩いている人の割合など、1人ひとりの着衣量や行動を加味し、より正確なPMVを算出できるようになります。

また、これまでの研究では着衣量の状態を「厚着・半袖シャツ・長袖シャツ」といった限定的なカテゴリーから選択する手法が一般的でした。しかし実際のオフィスでは長袖シャツを着ている人が暑さを感じると腕まくりするケースが多くみられ、私はこのような変化も考慮することで、在室者の着衣量を正確に反映することができると言えました。そこで、従来の衣類種検出に加え、長袖シャツの腕まくりの状態についても正確に検出する手法を考案していくと研究に着手したのです。

腕まくりの検出方法について先行研究を調査してみたのですが、これを対象とする検討はこれまで実施されていませんでした。畳み込みニューラルネットワーク (CNN) 等の深層学習を用いて画像分類モデルを作成する場合、腕まくりの人物が撮影された大

*1 予想平均温冷感申告：人間の感覚量から温熱快適性を表示したもので、1967年にデンマーク工科大学のオレ・ファンガーが提唱。温度、湿度、気流、輻射、代謝、着衣量の6要素から導かれる温熱快適性を表現する環境指標。

量の画像データを必要としますが、半袖シャツや長袖シャツと比較してこの腕まくりのサンプルデータ数が非常に少なく、検討を進めるうえで大きな壁になっていました。また、各執務者により腕まくりの程度も異なるため、この度合いを解析するのに膨大な学習用データを必要とする点もネックです。

したがって、腕まくりを推定するためには教師データを必要としない解析手法でアプローチすべきであることは明白でした。そこで、私がかつて提案した人物の骨格情報と皮膚露出領域とを組み合わせた着衣量推定手法を、この「長袖シャツ腕まくり状態」の検出に拡張させていこうと考えるようになりました（図1）。

まず骨格推定モデルでは、画像中の人物を検出した後に、骨格情報を推定する一般的なTop-Down手法^{*2}を採用しました。一方、皮膚露出領域推定モデルは、着衣量の推定精度向上をめざし、自らラベリングしていくことから始めるなど一から新しいモデル

を構築することで、高精度に露出領域を判定できるようになりました（図2）。

本モデルにおける皮膚露出領域の判定には、一般に公開されているスキンセグメンテーションデータセットを使用しています。これは世界各地、さまざまな環境下で撮影された膨大な数からなる人物肌部の写真データベースであるため、照射条件や撮影環境の変化に左右されず、さまざまな被写体の肌領域を高確度に識別することができます。

なおこれらの画像を検出するカメラについて、多くの研究では高価なサーモカメラを使用していますが、私はスマートフォンや監視カメラで通常使われている安価で実用的なRGBカメラを採

*2 Top-Down手法：複雑な問題を「大きな問題」から始め、「より小さな部分問題」へと再帰的に分解して解いていくアルゴリズムによるアプローチ方法。

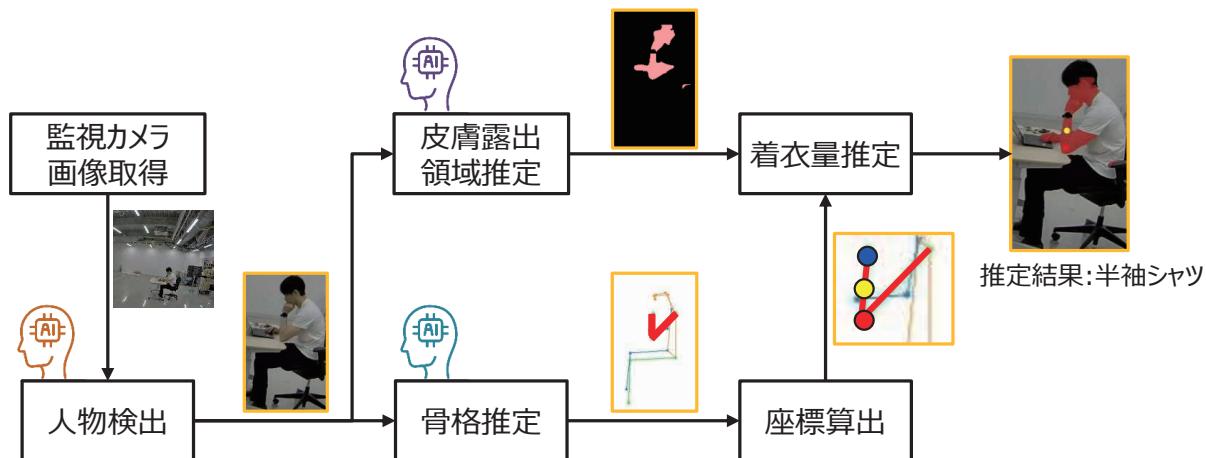


図1 皮膚露出領域推定と骨格推定を組み合わせた着衣量推定手法

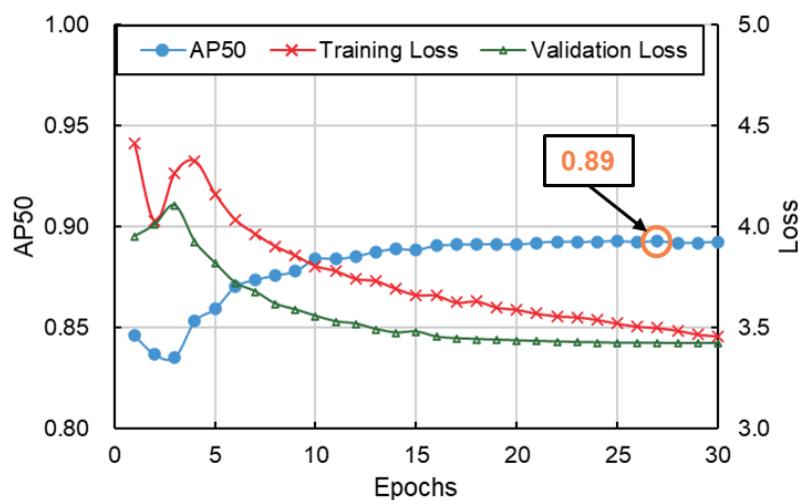


図2 皮膚露出領域推定モデルの学習結果

用しています。

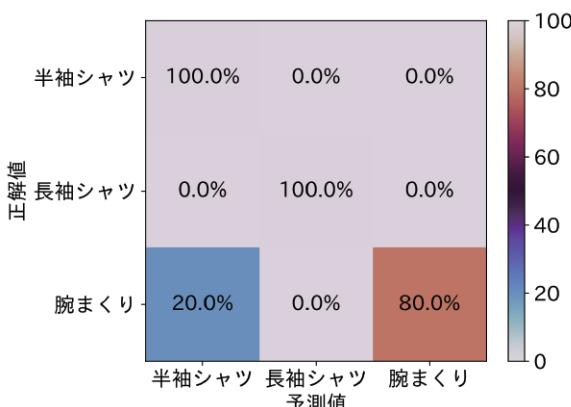
これまで検討してきた骨格推定モデルで検出できる手首と肘の座標に、今回検討した皮膚露出領域推定モデルを組み合わせたところ、肘の座標が皮膚露出領域内に含まれていれば半袖、手首と肘の中間点座標が皮膚露出領域内であれば腕まくりと高確度に判定することができるようになりました。また、この中間点と肌露出領域をさらに細かく分割することによって、少し暑い体感である狭い範囲の腕まくりや、かなり暑い体感とされる広い範囲にわたる腕まくりの違いなども、判別することが可能になりました。このように、既存の機械学習モデルでは困難であった人の腕まくりの状態を、本方法で初めて判定できるようになったことは世界的にみても大きな成果であったと思います。

本提案手法の評価結果を図3、4に示します。提案手法は正面から撮影した画像、横向きから撮影した画像とともに、半袖シャツ、長袖シャツ、そして長袖シャツ腕まくりをおよそ精度良く推定できています。しかし、横向きで撮影した場合では、一定量の画像において推定が難しいことも判明しています。正面からの画像では、どのような姿勢であれ少なくとも片腕は写っている可能性が高く、

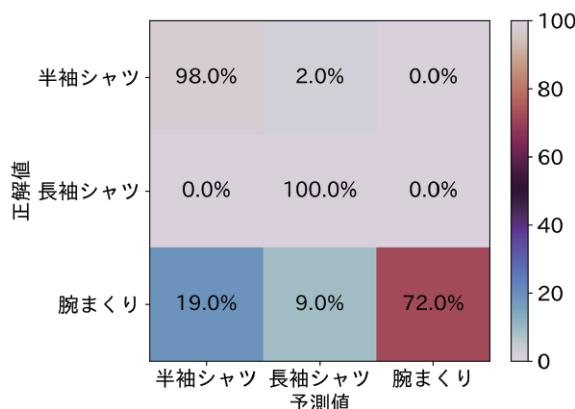
腕まわりにおいて何かしらの皮膚露出情報が得られやすい一方、横向き画像では片腕の情報だけしか得られない可能性が高く、多少腕を曲げただけでも全く皮膚露出の情報が得られない確率が高まり、皮膚露出領域の誤推定につながってしまうと考察しています。

この課題に対する解決策の1つにもなるのですが、現状では静止画像を対象に検証を進めているところを、今後は動画像でも進められるよう基礎的な検証を開始しているところです。つまり、静止画像の“ある瞬間”では横向きのため腕の情報を得づらかった人物も、動画像では時間の経過とともに姿勢を変化させていくことで腕の様子をクリアにとらえる瞬間が期待できます。また、遮蔽物によりカメラから見えない位置にいる人物やカメラから遠い場所にいる人物も、室内での移動を追っていくと着衣の情報をとらえる瞬間が訪れます。

また動画像を導入することで、寒さ・暑さを感じてジャケットなどをはおったり、脱いだりするなど上着を調整する人、暑さのあまり汗を拭いたり、うちわであおいだりする人などさまざまな動作をとらえることができるでしょう。さらにオフィス共用部などにおける在室者の動き方などの情報をとらえ、これをPMVの



(a) 正面から撮影した画像の評価結果



(b) 横向きから撮影した画像の評価結果

図3 提案手法の評価結果



推定：半袖シャツ
正解：半袖シャツ



推定：長袖シャツ
正解：長袖シャツ



推定：腕まくり
正解：腕まくり



推定：長袖シャツ
正解：腕まくり

図4 提案手法による着衣量推定画像例

活動量変数へ反映させることなども可能になります。このように動画像を活用することで、オフィス内で人が寒さ、暑さを感じるパラメータを幅広く、しかも動的に取得できるようになることから、最終的にはこれらの動画像のデータを活かして、きめの細かいダイナミックな空調制御を実現していきたいと考えています。

動画像に関するホットな話題として、2025年大阪・関西万博のNTTパビリオンにおいて、監視カメラ映像から来場者の着衣量をリアルタイムで推定し、快適性指標であるPMVを算出しました。これには、弊社のAI（人工知能）活用技術であるカメラ画像を用いた着衣量推定技術を提供しており、人物の骨格情報と皮膚露出量を組み合わせることにより、従来は推定困難で固定値を用いざるを得なかつた着衣量を、より高精度な変数として推定し、快適性指標に反映しています。そして、これに基づき室内ユーザーの温熱快適性を損なわずに、室内設定温度を自動で上下させるという、快適性と省エネルギー性を両立させた制御ロジックの確立に寄与しました。

大学との共同研究で画像転送時のプライバシー保護についても取り組まれているようですね。

本手法では大容量のカメラ画像をAIで解析しているわけですが、プライバシーに関する懸念がよく持ち上げられます。現状では、カメラ画像を細工することなくAIに直接読み込ませていますので、とりわけパブリッククラウドを利用してのAI解析となると、プライバシー保護の観点から問題が生じると認識しています。この課題を突破していくことを目的に、現在大学と共に研究しているところです。ここでは、その進捗について触れたいと思います。

現状、AWSなどパブリッククラウドのサーバ上で画像を処理する際には、原画像を送信する必要があるので、プライバシーを考慮すべき画像は一般的にオンプレミスサーバで処理する必要があります。そこで、クラウドサーバでも画像のプライバシーを保護しながら、画像の分類や認識などを深層学習できるよう、さまざまな画像暗号化法の研究が盛んになっています。ところが先行研究で使われた画像暗号化法⁽³⁾を用い、着衣量推定の精度を評価

してみたところ、暗号化の際に分類精度が大幅に低下する課題が明らかになりました⁽⁴⁾。そこで私は、最先端のモデルであるVision Transformer (ViT)^{*3}に適用できる画像暗号化法を用いた着衣量の推定方法を考案しました⁽⁵⁾。

今回採用した画像暗号化法では先行研究と異なり分類精度は暗号化後も低下することなく、半袖シャツ、長袖シャツ、ジャケット着用等による厚着などすべての分類項目において先行研究の精度を上回っていることが分かりました（厚着の画像分類で正解率が先行研究で57.44%のところViTに適用できる画像暗号法では93.33%）（図5）。今後はこの方式をベースに、クラウド上でもプライバシーが保護された状態でAI画像解析を実現していければと考えています。

このように、大学との共同研究では最新技術に触れる機会が多くあり、この技術を題材とした研究を進めていくスピードも早く、質も高いため、企業で研究をしている私は常に刺激を受けています。例えば論文について、会社で研究を進めていると、ややもすれば執筆は後回しになりがちなところを、共同研究では原稿の締切りが厳しく、高い質も要求されるため、会社に勤める者にとっては通常業務との両立が難しい面があります。しかし、この営みはアカデミックに技術を仕上げていく価値を確認できる良い機会と前向きにとらえています。この共同研究の実施先は、私自身がかつて社会人ドクターを取得した研究室でもあり、現在も良好な関係が構築できています。この関係を今後も大切にしながらNTTファシリティーズでの研究開発を進化させていきたいと思います。

○ オフィスにとどまらず建物トータルを 最新のITで快適にしていきたい 今後の研究開発の方向性について教えてください。

現在、データセンターなど最先端マシンが高密度に配置されて

* 3 Vision Transformer (ViT)：自然言語処理で活用されたTransformerモデルを画像認識に応用した深層学習モデル。従来手法の畳み込み層を用いずに高い精度を実現するのが特徴。

モデル	画像暗号化法	半袖シャツ	長袖シャツ	厚着
ViT	なし	98.55	96.02	93.33
	ViT-based	98.55	96.02	93.33
ResNet18	なし	97.46	93.15	83.33
	先行研究 (Pixel-based)	82.60	76.21	57.44

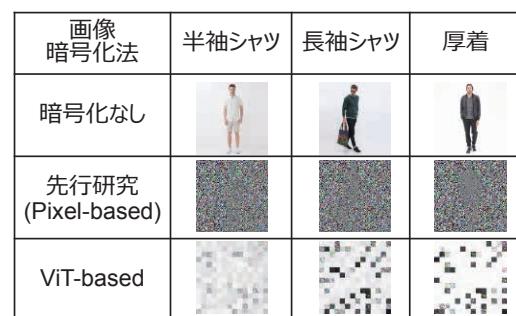


図5 画像暗号化技術における着衣量分類精度の比較

いる建物では、最新のITが数々備わっている姿を見ることがあります。私のように情報処理を専攻していた技術者からすると、このデータセンターとは対照的に一般的な建物の業界においては、生成AIはもちろんのこと、まだまだ通常のITの活用ですら十分でない状況にあるといえます。

NTTファシリティーズへ入社以降は、建築学会や空気調和・衛生工学会などへ参加していますが、電気・電子・情報系の学会や国際会議に比べると、利用しているソフトウェアや情報処理技術に差があることを実感しています。こうした現状を踏まえ、建物設備にもITの最新技術を少しずつ取り入れ、業界全体がより早く時代の流れに追いつけるよう取り組む必要性を感じています。

今回、オフィス空間の快適性をターゲットとした研究についてお話をさせていただきましたが、同時に私は、BEMSデータを使用した熱負荷予測技術の研究も行っています。近い将来においては、万博でもお見せしたとおり、この両者の技術をパッケージにしたソリューションを一般市場に展開していくのではないかと考えています。つまり、今回の手法で算出した着衣量や活動量を代入したPMV値と室内の熱負荷予測値とを組み合わせた高精度な空調制御技術をいち早く実用化させ、サービスとして販売できるようにしていきたいということです。

また、今後はより広い視野に立ち、建物全体にわたり利用者が気持ちよく過ごせる環境整備をめざした研究開発へと発展させていくビジョンも描いています。例えば、エントランスの温湿度環境の向上に向けては、人流の変化により変動する温湿度に応じたインテリジェントな空調制御もテーマになります。これを実現していくには、今回のようにカメラの画像や映像を活用し、人の密度や着衣量、活動度などを観測することで、快適性と省エネ性を賢く両立させる空調制御技術を検討していく必要があるでしょう。

同じくエントランスでは不特定多数の人物が入退出するため、防犯面において安心・安全を確保していく必要があります。そこで、人物の行動をカメラの映像情報から取り入れ、AIにより判定していく監視ソリューションについても考えていきたいと思います。

このように建物施設のようなITがまだ未開拓である領域へ情報処理工学的な最新技術を適用していく試みは、NTTファシリティーズにとっても自分にとっても大きなチャレンジでありチャンスでもあることはいうまでもありません。

AIから最新情報を収集することは大切 ○ だが、鵜呑みにせず自らアルゴリズム をつくりデータを取得

日頃の研究活動で大切にされていることや後進へのメッセージをお聞かせください。

NTTファシリティーズは主に建物を専門とする人材で構成され

ていますが、前述のとおり私は学生時代、情報工学を専攻していました。そういった経験もあり、私は現在、得意とする情報処理技術のスキルを活かして、オフィス空間の快適性を追求する研究に従事しています。NTTファシリティーズでは情報系の技術を所有している人材は少なく、今でもほぼ1人でこのテーマに取り組んでいますので、責任は重く、忙しい毎日で大変な面もありますが、一方で、私の裁量で自由に研究を組み立てられる環境に大きなやりがいを感じています。

日頃の研究活動では、常に新しい技術を積極的に取り入れ、自ら手足を動かすことを意識しています。かつては論文を印刷し、通勤電車内で集中的に読むなど、情報の収集にはかなりの手間や時間がかかっていましたが、昨今はWebで論文などの最新版を読めたり、生成AIを利用して要約文も作成できたりと、手軽に良質な情報を手に入れられる時代へと変わってきました。そういう恵まれた環境であるからこそ、これまで以上に新しい知識の積極的な習得が必要だと思っています。

Webコンテンツの中には信頼できない情報も混在している場合があり、100%信頼しているわけではありません。一見、高速で完璧な回答を返してくれそうなAIも補助的な手段として適切に使いこなし、得られた情報の真偽は専門家として自ら確かめながら研究を進めていく必要があります。自らの足でも地道に情報を拾い集め、自らの手で汗をかきながらアルゴリズムをつくり、自ら丹念に生のデータを取得し、自らの頭で考察し改善していく営みが技術力の向上、ひいてはハイレベルな研究成果へつながると思います。

■参考文献

- (1) P. O. Fanger : "Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering," Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering, 1970.
- (2) 中満：“令和6年技術動向 6.ICT利用 6.2カメラ画像解析による着衣量の推定手法,” 空気調和・衛生工学, Vol.98, No.12, pp.77-82, 2024.
- (3) W. Sirichotedumrong, Y. Kinoshita, and H. Kiya : "Pixel-based image encryption without key management for privacy-preserving deep neural networks," IEEE Access, Vol. 7, pp. 177844-177855, 2019.
- (4) 中満・東谷・海藤・二渡：“プライバシー保護を考慮した着衣量推定手法の検討,” 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.89-90, 2024.
- (5) H. Kiya, R. Iijima, A.P. Maungmaung, and Y. Kinoshita : "Image and model transformation with secret key for vision transformer," IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E106-D, No.1, pp.2-11, 2023.

URL <https://journal.ntt.co.jp/article/38170>DOI <https://doi.org/10.60249/26021301>

NTT先端集積デバイス研究所
特別研究員

長谷宗彦 Munehiko Nagatani

光通信の限界を突破する、 InP系半導体の極広帯域アナログIC

増大する通信トラフィックを支える通信環境の進展は、デジタル信号処理や集積回路の性能改善によって支えられてきました。しかし昨今、ハードウェア性能の制約で抜本的な改善が見通せない状況が顕在化しつつあります。この問題に風穴を開けるのが、「極広帯域アナログIC」技術です。この新技術によって、従来のシリコン系半導体の微細化による性能改善だけに頼った方法からの脱却が可能となります。今回はこの「極広帯域アナログIC」のトップランナー、長谷宗彦特別研究員にお話を伺いました。

◆PROFILE：2005年上智大学 理工学部3年時に飛び級で同大学院理工学研究科に進学。2007年修士課程修了。同年、日本電信電話株式会社入社。フォトニクス研究所、デバイスイノベーションセンタを経て、先端集積デバイス研究所、未来ねっと研究所に所属。超高速アナログICの研究開発に従事。2021年上智大学 博士（工学）取得。2022年文部科学大臣表彰・若手科学者賞、前島密賞・奨励賞、2025年IEEE Tatsuo Itoh Award、電子情報通信学会・エレクトロニクスソサイエティ賞など受賞。

「極広帯域アナログIC」がこれからの光通信の進展の鍵となり、未来を切り拓く

■極広帯域アナログICの研究を開始されたきっかけやこの技術が求められる背景を教えてください。

高精細映像配信などの普及や拡大を中心に世界的に通信トラフィックは増加の一途を辿っています。特にコロナ禍を経て在宅でのリモートワークやオンライン会議などの需要も急激に拡大し、生成AI（人工知能）の普及なども重なって、今後もこの通信トラフィックの増加は続く見込みです（図1）。こうした社会背景から、2012～2013年ごろにデジタルコヒーレント*と呼ばれる新しい技術が商用導入され、シリコン系半導体の微細化の進展とともに、大規模なデジタル信号処理回路（DSP : Digital Signal Processor）、デジタル／アナログ変換器（DAC : Digital to Analog Converter）やアナログ／デジタル変換器（ADC : Analog to Digital Converter）の性能改善が進み、当初は1波長当たり100 Gbit/sの伝送容量だった光通信が、現在は400 Gbit/sを超え800 Gbit/sまでに進展しています（図2）。

こうした伝送容量の拡大は、上記のDSPやDAC、ADCなどの集積回路（IC : Integrated Circuit）の性能改善に大きく依存しているのですが、今はこうした半導体の微細化・高速化の物理的な限界が危惧されています。現在、実用化されているシリコン系半導体のテクノロジノードは3 nmとされ、ニュースなどでも取り上げられているように2 nmの量産化に向けた技術開発が活発化しています。この微細化により、回路の集積密度や信号処理



効率の改善は期待されるものの、速度性能面の改善は限定的であり、特にDACやADCといった回路の帯域性能（速度性能）については、抜本的な改善が難しい状況となっています。そこで今後の伝送容量増大に対応するために、このようなシリコン系半導体の微細化だけに頼らない新しいアプローチが求められています。

私は2007年にNTTに入社してフォトニクス研究所に配属されてから、光通信向けの高速アナログIC、特に受信器向けの増幅器やADCの研究開発に携わっていました。その後は送信器側の増幅器やDACの研究開発も行ってきました。2014年ごろにこうしたそれまでの経験や知見から、これら回路のハードウェアとしての性能限界を予見して、この問題を解決する新しいアナログIC技術の研究に着手しました。それが、現在取り組んでいるアナログマルチプレクサ回路（AMUX : Analog Multiplexer）およびアナログデマルチプレクサ回路（ADEMUX : Analog De-Multiplexer）などの「極広帯域アナログIC」技術となります。

■デジタルの通信容量を増やすためになぜアナログ技術が必要になるのですか。

デジタル信号処理というのは「0」と「1」の組合せで信号を処理する仕組みです。初期の光通信では、レーザの点灯と消灯を組み合わせその信号を送っていたわけです。ただ、それでは効率

* デジタルコヒーレント技術：デジタル信号処理とコヒーレント検波を組合せ、光の強度・位相・偏波に効率的に情報を乗せ、通信の大容量化と長距離化を実現する技術。



日本国内のインターネットトラフィックの推移

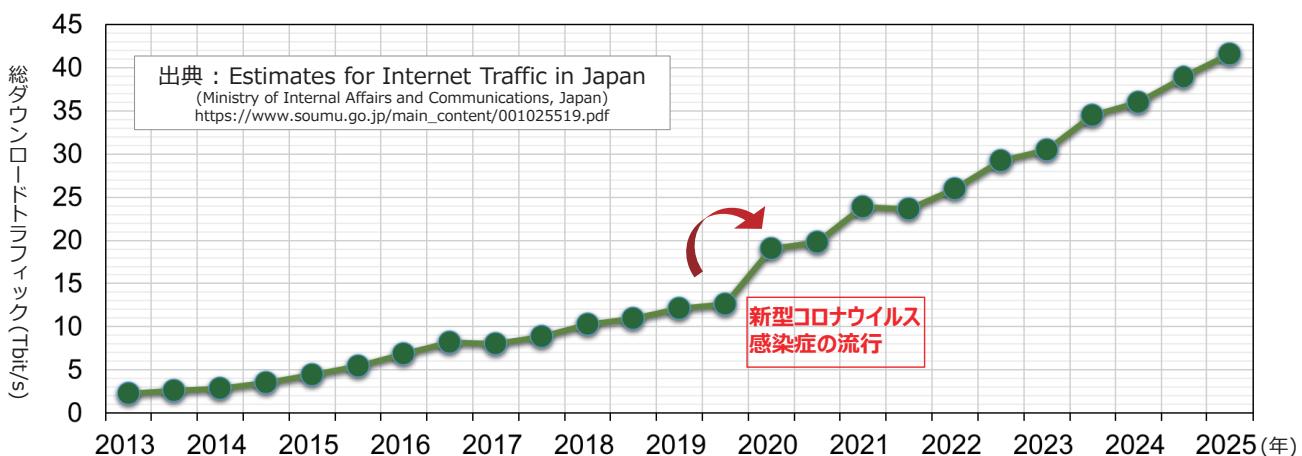


図1 今後も増加が予想される通信トラフィック

コアネットワーク大容量化の変遷と実装された技術

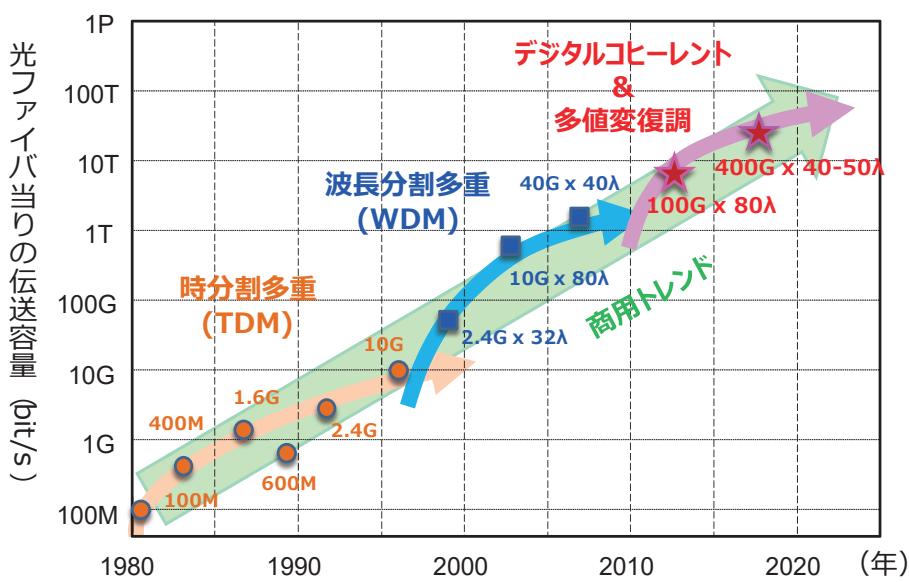


図2 伝送容量を拡大するために生まれた数々の新技術

が悪いため、その中間の状態でも信号を送ることを可能にする技術が生まれました。電灯の明るさで例えると分かりやすいですが、もっとも明るい状態と完全に消えた状態以外に、光量を抑えたかたちでの点灯も電灯なら可能です。この中間の「0.8」とか「0.6」とか「0.4」といった異なる強度の明るさでも信号を送ることができます。

きるようにしたのが、現在の「デジタルコヒーレント」光通信技術です（厳密には光の強度だけではなく、光の波としての位相や偏波にも情報を乗せています）。この「0」でも「1」でもない中間状態に信号を乗せるために、デジタル信号をいったん「アナログ信号（=多値の信号）」に変換する必要があります。これを

送信側で行うのが前述のDACであり、送られてきたアナログ信号を受信側で再びデジタル信号に変換するのがADCというわけです。このように「0」でも「1」でもない中間の状態でも情報を送ることが可能となったため、伝送容量は格段に上昇しました。

私の研究は、このDACやADCの部分に周波数変換などの複合的な機能を備えた「極広帯域アナログIC」を加えることで、さらに飛躍的に伝送容量を上昇させようというものです。

■極広帯域アナログIC技術について教えてください。

私が提案している「極広帯域アナログIC」には、送信側に設ける「AMUX」と受信側に設ける「ADEMUX」があります。これらのICはアンプ（増幅）とミキサ（周波数変換）、そしてコンバイン（合波）などの機能を併せ持つICです。これらのICを従来のDACやADCと組み合わせて使用することで、従来の光送信器や光受信器が有している帯域性能面での制限要因をなくし、限界を突破しようと考えています（図3）。

現在の汎用的なICにはシリコン系半導体（CMOS：Complementary Metal Oxide Semiconductor）が主に使われていますが、2019年の段階ではNTTが長年研究開発を進めてきた「InP HBT（リン化インジウム系ヘテロ接合バイポーラトランジスタ）」という高速トランジスタ技術を活用したICを設計し、作製しました。このInP系半導体は、シリコン系半導体に比べて集積規模（多機能性）や量産性などいくつかの不得手な部分はみられるものの、

高速性や高耐圧性においては目覚ましい向上を図ることができます（図4）。その結果、世界に先駆けて110 GHz帯域を持つAMUXおよびADEMUXを実現しました。

これ以降も、NTT未来ねっと研究所と連携して1波長当り1 Tbit/sを超える長距離光伝送の実証に成功し、さらに同研究所との連携を推し進めて前人未到の200 GHz帯域性能を実証、世界レコードを更新する1波長当り2 Tbit/sの光伝送にも成功しました。

これらの「極広帯域アナログIC」についてはハイエンドの計測・実験用途として製品化・実用化を進めているのが現状です。そして、この状況に甘んじることなく10年後には300 GHzを達成目標に、この技術をさらに進めていきたいと考えています。

■研究で苦労された点や今後のご研究に向けた課題点を教えてください。

AMUXやADEMUXは、これまでにない機能を持つ全く新しいアナログICです。そのため光通信システムへ組み込むにあたって、どの程度の性能が必要になるかといった性能要件が全く不透明な状況から手探りでスタートせざるを得ませんでした。完成した試作品を実際の光伝送実験などへ適用し、その結果からフィードバックを得るという試行錯誤を繰り返し、多岐にわたる回路特性がどうあるべきかを導き出し、何度も試作を重ねて改善を加えてきました。また実験への適用も、一朝一夕にはいきませんでした。ICの中核回路が完成しても、それをパッケージに格納して同軸ケー

「極広帯域アナログIC」を用いた光送信器の帯域性能拡張（送信側AMUXの場合）

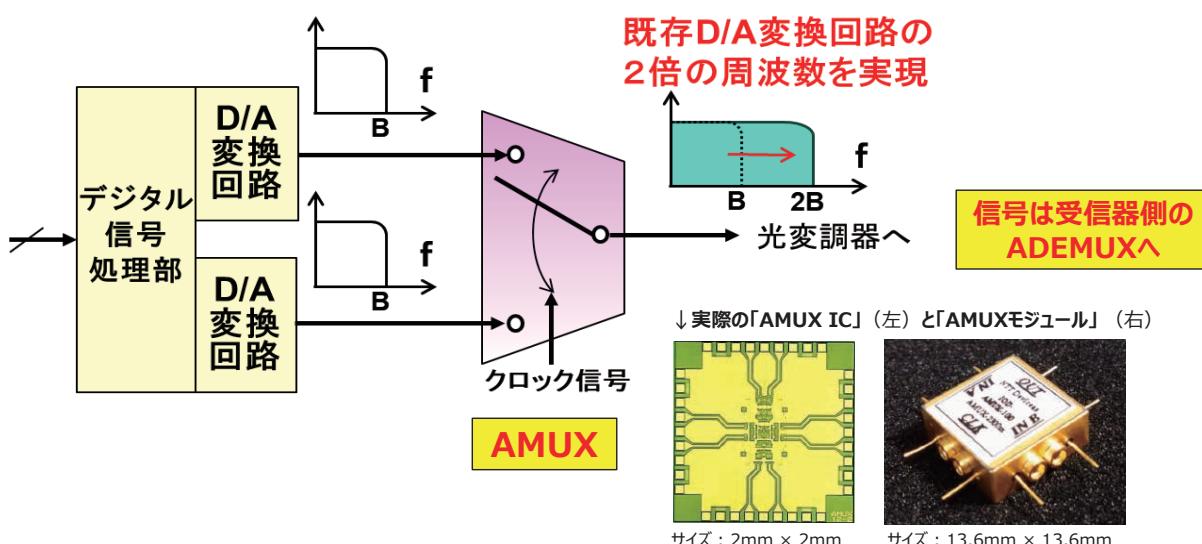


図3 「極広帯域アナログIC」の仕組み



シリコン系とリン化インジウム（InP）系のトランジスタの比較

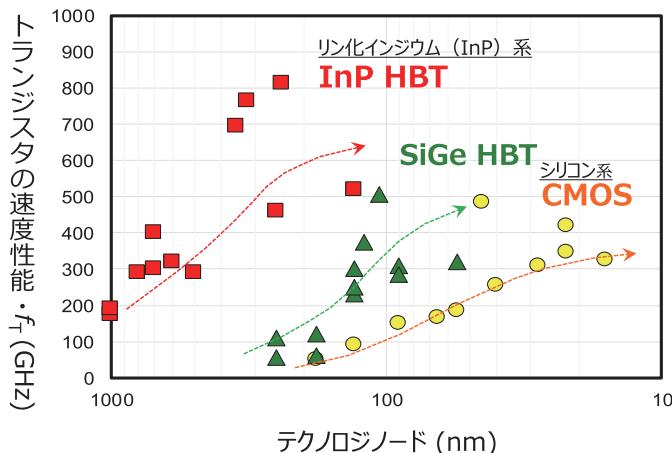


図4 素材で変わるトランジスタの性能

ブルなどではほかの装置と接続できるモジュール形態に仕上げなければ実験に使用できませんし、ユーザにも使ってもらえません。まだ世に出ていない帯域性能のICを格納するための低損失な高周波パッケージも当然ありませんでしたから、新たに専用の高周波パッケージを作製するのに数年がかりとなりました。

こうしたテクニカルな面はもちろんですが、グループ会社でのこの技術の製品化においては、研究開発の早い段階から潜在ユーザーと対話を重ね、ふさわしい適用領域を決定する必要もありました。また、私1人できることには限界があるため、周りの人たちと目標を共有し協力していただくことが大変重要でした。まだかたちになっていない段階から、労を惜しまず協力していただいた皆さんには本当に感謝しています。これまで本研究開発にかかわってくださった方のどなたか1人でも欠けていたらここまで進めるることはできなかったと思います。

私たちの目的は「持続的な通信の進展を支える」ことなので、本技術が真に通信が必要となったらタイムリーに技術展開できるよう、今後さらに研究開発を進め技術を磨いていくつもりです。技術的には、さらなる広帯域化（200 GHzを超える帯域）と機能集積化を進め、電力・サイズ共に厳しい制約がある光送受信器により適合するよう技術を上げていく予定です。また、実用展開の側面では、ボリュームをさばく必要がある通信応用では製造性、量産性の改善がポイントになりますので、協力していただける仲間をさらに増やしていく必要があります。

高速性	シリコン系	<	InP系
高耐圧性	シリコン系	<	InP系
さらなるスケーリングの期待	シリコン系	<	InP系
集積規模	シリコン系	>	InP系
量産性	シリコン系	>	InP系

InP HBTは、速度と耐圧性能の両面で優位性を有しており、高速かつ高出力パワー回路の実現に好適

光量子コンピューティングにも手を伸ばして、新たなアプリケーションの世界へ

■この技術によって実現される事象や応用先について教えてください。

現状、この「極広帯域アナログIC」技術のメインの応用先は光通信になりますが、すでに研究開発用のハイエンドな実験や計測分野での実用化に着手しています。現段階でもこの技術の潜在的なニーズは広く存在し、「無線通信」や「センシング」など広帯域信号を扱うほかの分野への展開も視野に入っています。また、NTTが近年力を入れて取り組んでいる「光量子コンピューティング」の分野では今後この技術が求められる可能性があるため、応用先は通信だけにとどまらず、これからは新たなアプリケーションの開拓にも挑んでいきたいと考えています。

NTTがめざすIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想では、光通信のシステム容量を今まで以上に拡張していく必要があります。本技術は伝送容量を改善するための手段の1つとして役立てることができます。また、IOWNの描く世界では光電融合技術をベースとして、現在は電気配線が主流となっている近距離接続まで光に置き換えていくことをめざしていますが、広帯域な光デバイスと帯域に制限のある電子デバイスの間ではどうしても性能ギャップが生じるため、電気から光への変換部の効率については改善余地があるととらえています。私たちが本研究テーマで提案する技術は、この電気から光への変換部分の効率改善にも大きく貢献できるはずです。

■研究にあたって大事にしていることや理念などはありますか。

今回のインタビューで改めて考えてみると、誰もやっていないこと、誰もやれていないことに挑戦することを常に意識して研究開発に臨んでいるということです。

一言で言うなら「進取果敢」でしょうか。ただ、それが独りよがりなものにならぬよう、現在使われている技術やその動向を正しく理解、分析し、まだ誰も気付いていない問題や潜在的な課題をいち早く見つけ出し、新たな解を導き出すという流れで研究をしてきました。そして行動するときには決断力を持って大胆に。これからもトレンドに乗るのではなく、新たなトレンドを生み出すような仕事をしていきたいと思います。

■所属されているNTT先端集積デバイス研究所について教えてください。

NTT先端集積デバイス研究所は、事業や社会で新たな展開や大きなインパクトを産むような競争力あるデバイス技術の研究開発を進めています。例えばフォトニクス（光）、エレクトロニクス（電子）、マテリアルサイエンス（材料科学）、バイオサイエンス（生物科学）の領域で、驚きを創出する新技術の創出をめざしています。

またNTT研究所では全社的に実施されている実践的な育成システムがあります。入社1年目は研究者としての基礎的なトレーニング期間ですが、2年目からは自分でテーマを立案し、そのテーマに沿って、指導者（入社10～15年目の先輩社員）や複数名のアドバイザー（それぞれの研究内容に則した専門家）のもと、主体的に研究を進めていきます。さらに3年目には、研究経過や成果を数百人規模の研究者たちの前で発表する機会があります。これによって研究の着手の仕方や進め方、どのように課題設定しその課題に対してどのようにアプローチしていくのか、などを具体的に学ぶことができます。また、私自身もそうですが、入社後に博士号を取ることも奨励されています。特に海外の学会などでは、博士号を取得すると大きく扱いが変わりますので、大変有効な施策だと思います。このような育成システムを徹底することによって、海外でも通用するプロフェッショナルな研究者を数多く輩出し続けています。

■研究者・学生・ビジネスパートナーの方々に向けてメッセージをお願いいたします。

私は2007年にNTTに入社してから、すでに20年近く研究者として過ごしてきました。今回は現在比較的順調に進められている研究テーマをお話しさせていただきましたが、過去には研究から開発、実用化への移行に失敗し、道半ばで断念せざるを得なかつた経験もあります。その研究が断念に至った理由はさまざまです

が、研究をスタートした時点と断念した時点での社会的ニーズの変化を上手にとらえきれなかったことが一因であったと今では理解し、反省しています。この私の経験のように、研究は決して自己完結させるものではありません。成果を具体的な価値として社会に提供することが重要で、そのためには協力者や潜在的なユーザなど他者との議論や協力が必要となります。その時々に何が求められているかを理解し、時節に合わせて認識を随時アップデートしていくことが不可欠となります。私も過去の反省を活かして、現在の研究ではことあるごとに今の研究の価値とは何か、今の取り組みが誰の役に立つかを客観的に考え、他者とも議論しながら進め方を見直すことを意識的に行っています。

最後になりましたが、NTTには多岐にわたる技術領域において、一線で活躍されている研究者が数多く在籍しています。研究から実用化までを一気通貫で主体的に取り組める環境もあります。また、1950年の吉田五郎初代所長の言葉、「知の泉を汲んで研究し実用化により世に恵みを具体的に提供しよう」というメッセージが、まさに私たちの進むべき方向を示してくれています。私も引き続き、皆さんとも意見を交換しながら、「世に恵み」を具体的に提供すべく研究開発に邁進していきたいと思います。

そしてこれからの方々に1つだけ伝えたいことは、何事も諦めずに「進取果敢」にチャレンジしてほしいということです。誰もやったことのない誰もやれていないことの中に何か大事な発見があるのだと私は信じています。

吉田
五郎
の
想
い



（今回はリモートにてインタビューを実施しました）



株式会社ジャパン・インフラ・ウェイマーク

<https://www.jiw.co.jp/>



メンテナンス技術×ICT・AI技術×ドローン技術 で“支える人を、支えたい”

高度経済成長期に整備された日本のインフラ設備は、敷設から50年以上が経過し、老朽化が深刻な課題となっています。加えて、維持管理にかかる技術者不足と財源不足は年々深刻化しており、従来の点検手法だけでは対応が困難な状況にあります。このような「100年に一度の大転換期」にある社会課題の解決に向け、ドローンとICTを駆使したインフラ点検サービスで注目を集めているのが、ジャパン・インフラ・ウェイマークです。2019年の設立以来、全国6200件以上の橋梁、鉄塔、道路で点検を手掛けてきました。今回、矢倉良太社長に事業内容、最新の取り組み、および「支える人を、支えたい」というミッションに込めた思いについて伺いました。



ジャパン・インフラ・ウェイマーク
矢倉良太社長

最先端テクノロジと現場ノウハウの融合により、持続可能なインフラメンテナンスの実現をめざして

■設立の背景と会社の概要について教えてください。

ジャパン・インフラ・ウェイマーク (JIW) は、NTT西日本の100%子会社として2019年4月に設立されました。社名の「ウェイマーク (Waymark)」は「道標」を意味し、NTT西日本グループで培ってきた設備管理の実績を基に、これからの中長期点検のあるべき姿を示していくという決意を込めています。

私たちが立ち向かう社会課題は、「技術者不足」と「社会インフラ老朽化」の2つです。少子高齢化により、2030年には15~65歳の生産年齢人口比率が6割以下となり、労働需要に対する人材不足は644万人まで拡大すると予想されています。建設業や製造業では、労働力人口の減少に伴い人員自体が不足しているのに加え、経営者が求める理想のスキルを持った熟練労働者が不足している状態も大変深刻化しています。

一方、社会インフラの老朽化は高度経済成長期に多くの土木構造物が建造されたことに起因しており、道路橋では50年以上経過する施設の割合が2030年3月で54%、2040年3月には75%と加速的に高くなります。インフラの寿命を延ばし、ライフサイクルコストを縮小するためには予防保全に基づいた計画的な更改マネジメントを行う必要があり、そのためには点検により適正に設備の現状を把握することが重要です。

こうした課題に対し、JIWは「支える人を、支えたい」を合言葉に、まさに「社会インフラを支える人を最新技術で支える」べく、メンテナンス技術×ICT・AI（人工知能）技術×ドローン技術に

よりインフラ設備の点検を革新し、新技術をすべての人が使える世界をめざしています。

JIWの最大の強みは、最先端のテクノロジ（ドローン、AI、ソフトウェア）に精通した社員と、橋梁点検士のようなインフラ点検の現場に精通した社員が共に働いていることです。この2つの専門性を持つ技術者集団として、さまざまなインフラ点検に対するベストソリューションを提供しています。

ドローン点検のパイオニアとして累積6200件以上の点検を実施

■どのような事業を展開しているのでしょうか。

JIWは設立7年目で、累積6200件以上の点検を実施してきました。ドローン点検のパイオニアとして、さまざまなPoC (Proof of Concept) を経ながら点検対象の拡大も進めています。

橋梁点検においては、点検支援技術性能能力タログに掲載している「全方向衝突回避センサを持つ小型ドローン技術」などを活用し、全国で年間約300橋の点検を行っています。JIWでは、米ドローンメーカー (Skydio社) と共同開発した点検特化ドローンを使用することで、非GPS環境下でも飛行でき、狭い部でも衝突回避機能により進入し対象を撮影することができ、高精度に損傷を検出することができます。

また、高性能な機体とこれまでの橋梁点検で蓄積してきた運用ノウハウに加え、既存手法も含めた橋梁点検を熟知したメンバとで点検内容をコーディネートしています。発注元の建設コンサルタントからの要望を踏まえ、ドローンなどの新技術と既存技術の

優位性を交え、橋梁の状況に合わせた点検を提案しています(図1)。

さらに、自社開発のポート型ドローン(Waymark Boat)による洗堀^{*1}調査を行っています。「レッドロープ測定」と呼ばれる、重錐付きロープを用いて橋上から河床高さを測定する従来手法の場合、測定者のスキルや強風の影響により測定誤差が発生するだけでなく、橋梁上の交通に対する作業員の安全確保に課題がありました。ポート型ドローンによる調査では、従来手法と比較して測定数を容易に増やせ品質向上が期待できるほか、安全な場所から測定でき、作業時間の短縮も見込めます(図2)。

JIWは、紙の調書(野帳)のデジタル化やAI活用による整理業務DX(デジタルトランスフォーメーション)にも力を入れています。従来の橋梁点検作業では、野帳に手書きで記録し、後から写真と照らし合わせる方法が一般的でした。5年間で全国約1000橋のドローン点検を実施してきましたが、手書きの修正や写真整理の手間、記載ミス、現場点検後の写真整理の煩雑など多くの課題に直面しました。折角現場の橋梁点検をドローンにより効率化できても、その後の整理業務に多くの時間を要していたのです。そこで、2025年5月に現場の困りごとを解消するための真に必要な9つの機能を盛り込んだ「Waymark Note」をリリースしました。現在、インフラ業界では、产学研官が一体となりイン



図1 ドローンを用いたインフラ設備点検イメージ

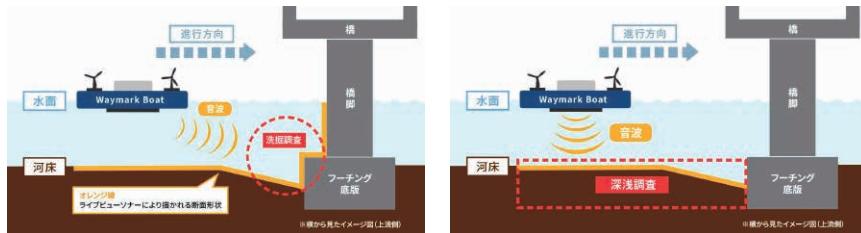


図2 洗堀調査・深浅調査イメージ

fra DXを進めていますが、この業界ではDXが実現される前段でデジタイゼーション(アナログ・物理データのデジタルデータ化)、デジタライゼーション(個別の業務・プロセスのデジタル化)の2つのステップを乗り越える必要があります。このステップで現場作業の効率化を支援するアプリケーションとして開発を続けており、広く業界に根差していくことをめざしています。

暗渠・下水道点検から風車無停止点検、「空飛ぶ避雷針」まで新領域へ挑戦

■最近のホットなテーマについて教えてください。

地震や線状降水帯による豪雨など、日本では災害が後を絶ちません。これにより道路・橋梁をはじめとする社会インフラの倒壊や河川の氾濫が発生し、住民の穏やかさが脅かされています。

一方で、これまで人間の出入りが困難で点検が難しかった場所にも、前述のポート型ドローン等を活用し、点検ができるようになりました。そこで湾岸護岸や区間の大部分が暗渠となっている用水路、下水道などの点検・実証実験を実施してきており、建設コンサルティング会社などから多数相談をいただいている。2024年1月に実施した樋管函体内部における水上ドローンを使用した点検例について紹介します。樋管とは、河川堤防を横断して設置される構造物で、内部には水が流れおり、人による点検が極めて困難な施設です。第1回目の点検では、樋管函内でドローン本体との通信接続が切れるおそれのあることが課題として挙げられました。この課題を受けて、JIWは60 GHz無線通信装置を搭載した全方向水面移動式ポート型ドローンを自社で開発しました(図3)。60 GHz帯では直進性が高く、トンネル状の構造物内でも安定した通信が可能になります。また2024年7月の第2回目の点検では、この新開発のドローンを使用し、搭載された高解像度カメラにより、ひび割れの長さや剥離の面積などの定量的な把

*1 洗堀：川の流れで橋の足元が削られる現象。

*2 ecdi：株式会社パナソニックシステムネットワークス開発研究所製の60 GHz帯を用いた小型・軽量の無線通信装置。有線LAN同等の高速・低遅延通信を無線で実現。



図3 カメラ搭載式ポート型ドローンと
60 GHz無線通信装置(ecdii)^{*2}

握が可能な3Dテクスチャモデル化の検証も実施しました。従来は点検員の経験と勘に頼っていた損傷評価を、客観的なデータに基づいて実施できることが大きな進歩です。

次世代の技術として、さまざまな基礎研究における実証を依頼されることもあります。これまでNTT研究所からもさまざまな実証実験を依頼いただいており、風力発電をはじめとした風車を無停止で点検する技術開発や米TIME誌「Best Inventions of 2025」に選出された「空飛ぶ避雷針」の検証などに携わらせていただいているいます。

「空飛ぶ避雷針」プロジェクトでは、JIWが雷雨下におけるワイヤ装着ドローンの安定運行を担当しました。2024年12月～2025年1月の期間、島根県浜田市山間部でワイヤをつけたドローンを高度300mまで飛行させ、ドローンを使用した誘電に世界で初めて成功しました。また、誘電後も耐雷ケージを具備したドローンは安定して飛行を続けていたことを確認しています。

風力発電風車の無停止点検技術においても、JIWは2機の自律飛行ドローンの飛行について担当しました。この屋外実験に向けては、2機のドローンが一定の距離を保ちながら同期して飛行するための制御技術を開発し、実際、上空30mでの微弱無線の送受信に成功しました。さらに、JIWが独自制作したAIカメラによるドローンの風車追従自律飛行技術を開発しており、回転する風車ブレードをドローンが自動追尾しながら点検する技術の実現をめざしています。

2040年時点に約3600基の洋上風力発電の風車が日本沿岸に建設される計画であり、保守運用効率化が課題となっています。このような最先端の技術開発に、JIWのドローン技術で貢献していくければと考えています。

■今後の展望についてお聞かせください。

日本の労働人口の減少は続いている、既存手法による点検だけでは社会インフラが維持できなくなる未来が迫っています。今後もJIWの開発の強みを活かした新たな点検手法でインフラ寿命を延ばし、ライフサイクルコスト低減を図り、持続可能な社会の実現を下支えしたいと考えています。またNTT研究所をはじめとするNTTグループ各社とも連携し、AI技術の高度化や自動飛行技術の確立など、さらなる技術革新を推進していきます。

「新たなインフラ点検手法を創造し、携わるすべての人が使えるようになること」をビジョンに掲げ、お客様のニーズや時代に合ったサービスを提供するとともに、既存手法にイノベーションを起こし、お客様に支持され、地域の皆様にも頼りにされる会社を社員一丸となってめざしていきます。

担当者に聞く

現場経験を活かし、建設コンサルタントなどへ新技術を提案

事業推進部

インフラDX推進担当

担当課長

下庄 孝弘 さん



■担当されている業務についてお聞かせください。

建設コンサルタントやインフラ構造物の管理者へ向けたドローンなど、新技術を活用した点検サービスの営業を担当しています。インフラ構造物の点検は有資格者により実施されるため、サービスの品質やスピードなど弊社の技術力を上手にPRできなくては、土木の専門技術者である顧客に理解は得られません。よって打ち合わせだけでは伝わりにくい技術的な優位性を、いかに分かりやすく示せるかが鍵となります。

私は、従来手法での点検実務を行ってきた経験を活かし、お客様や業界の課題に適した新技術の提案を進めています。その際、受託点検の現場へも足を運び、直接お客様と対応し、生の声を聞くとともに、現在自社が行っている点検業務の実態を把握し、さらなる生産性の向上やDX推進のための課題を見つけています。併せて、システム化の必要性がある課題については、自らそのシステムを試行し、実用化が見込めるものについては社内活用や外部サービス化を検討しています。

■今後の展開についてもお聞かせください。

JIWの強みは、点検技術者とハード開発者、ソフト開発者が共に協力し合いながら働いている体制にあります。業界のニーズを的確にとらえ、新たな提案を重ねることで、47都道府県で1200橋を超える点検業務を実施してきました。

一方、これまで得意分野を持った少数精銳のスペシャリストたちが、各自の技術力で会社の礎を築いてきましたが、今後のさらなる事業規模の拡大に向けては組織化が重要になります。技術レベルを落とすことなく規模を拡大し組織化していくため、蓄えてきた尖った技術を標準化することにより集団での技術レベルの平準化を的確に進めていきたいと考えています。建設コンサルタントに対しても専門的な技術支援ができる水準を維持しつつ、土木業界で特に深刻な人手不足の課題に立ち向かうべく、DXの推進に貢献していきます。

現場起点の改善で、品質と生産性を両立するDXをめざす

開発部

開発担当

主査

森田 賢徳 さん

■担当されている業務についてお聞かせください。

私は、橋梁点検等支援アプリ「Waymark Note」の開発を担当しています。小規模チームのため、現場ヒアリングから改善企画、UI (User Interface) / UX (User Experience) の設計や実装、運用・保守まで一気通貫で担っています。Waymark Noteは、野帳のデジタル化を起点に、点検後の帳票作成・集計までをつなぎ、業務全体の稼働低減をねらうアプリです。

ところで、橋梁点検の現場は依然として紙運用が中心です。DXが定着しにくい最大の要因は「現場での作業時間がタイト」であることでした。つまり、従来のアプリでは後工程の省力化を優先しすぎたため、現場での入力が膨らんでしまい、点検時間が長引き、結果として「忙しいときほど紙に戻ってしまう」という



アプリが定着しない現象が起きていたのです。

この反省を踏まえ、Waymark Noteでは「手書きに近いスピードで迷わず記録できる」入力体験を最優先に、熟練点検メンバと短いサイクルで改善を回しています。加えて、マークシート型入力やCSV出力、集計の自動化など、現場と後工程を分断せずにつなぐ改善も進めています。

また、現場で不具合が発生すると点検のやり直しや一時中断につながるため、データの安定性確保は最重要課題です。全件保存・高頻度バックアップなどにより入出力処理が増加するため、ユーザによる体験やOS差異に起因する不具合まで含めた検証テストを重ねています。さらに少人数による開発でもアプリの品質を担保できるよう、生成AIを活用したコードレビュー支援、テスト設計、試験自動化などにも取り組んでいます。

■今後の展開についてもお聞かせください。

橋梁に限らず多くのインフラの管理について、人手不足や若手育成、老朽化は深刻な社会的課題です。これらに対し、単なるペーパレス化にとどまらず、現場の負荷を増やすことなく点検の品質を上げていくDXをめざします。

具体的には、どのような業務や現場にも対応できるアプリの汎用性（適応力）の向上、ターゲットユーザーの拡大、標準化・可視化による技術者育成のハードル低減に取り組み、現場起点で改善を横展開していきたいと考えています。

ジャパン・インフラ・ウェイマーク ア・ラ・カ・ル・ト

■全国を飛び回る技術者集団の日常

JIWではハードウェア開発を行っているため、専用の開発室があるとのことです（写真1）。試作中のドローンや部材作成用の3Dプリンタなどもあり、雰囲気はさながら大学の機械系研究室のようです。打合せに来られたお客様も興味津々のこと、技術開発の現場を見せていただくことで、JIWの技術力への理解を深めていただいているのではないかでしょうか。一方、点検現場では、ドローンによる点検の実力を見るために、発注した自治体など関係部署の方が見学に来られることもしばしばあるようです。見学会にとどまらず、即席の意見交換会が開かれることも多いとのことで、現場でのリアルなコミュニケーションを通じて、お客様のニーズをより深く理解する機会となっているのではないでしょうか。また全国で案件を獲得していることもあり、事務所にはさまざまな地域のお土産が並ぶそうです（写真2）。誰かが置いていく差し入れもあり、リフレッシュエリアはいつも充実しているとのこと。全国各地で活躍する社員どうしのつながりを感じられる、温かい職場環境が形成されているようです。



写真1 開発室の様子



写真2 全国各地のお土産が並ぶ

風力発電所のバードストライク対策AIシステム

再生可能エネルギーの1つである風力発電事業では、飛来する鳥の風車ブレードへの衝突（バードストライク）が野生生物保護と風力発電推進の両立をめざすうえで課題となっています。周辺の自然環境との調和とともに社会インフラを維持することが重要視される中で、その対策が求められています。NTTドコモソリューションズはAI（人工知能）活用による「バードストライク対策AIシステム」（広角カメラで遠方の鳥を検出、PTZカメラで追尾拡大撮影、AIで鳥種を画像判定するシステム）を開発し、風力発電事業者と共に各地のフィールドで実証を行っています。本稿ではこのシステムの必要性と技術について解説します。

バードストライク対策について

風力発電の適地は自然豊かな地域が多く、飛来する鳥も多岐にわたります。いつどのような鳥が、どのような飛翔経路をとるのかを把握し適切な対策を立てることは、自然環境への配慮のためにも重要です。脱炭素と生物多様性を両立するため、多くの知見と最新の技術を融合したソリューションが求められています。NTTドコモソリューションズでは、風力発電の事業運営において適切な対策を可能とするために、鳥類飛来を監視・画像分析・データ活用を行う「バードストライク対策AIシステム」を提供しています。

NTTドコモソリューションズの「バードストライク対策AIシステム」の構成

「バードストライク対策AIシステム」の構成としては、遠方で飛翔する鳥の検出、拡大撮影、鳥種判定、衝突防止対策という流れとなります（図1）。

遠方で飛翔する鳥の検出として、理想的には1km以上先の鳥を検出し、衝突コースにないかを自動判定することになりますが、これには光学の広角カメラや、船舶用の電波レーダーが使われることが多く、それぞれメリット、デメリットがあります。それに関しては後述しますが、現在、NTTドコモソリューションズでは光学カメラを使用して鳥の検出を行っています（図2）。

拡大撮影では超望遠のPTZカメラ^{*1}が使われることが多い、

*1 PTZカメラ：パン、チルト、ズームの制御ができるカメラ。

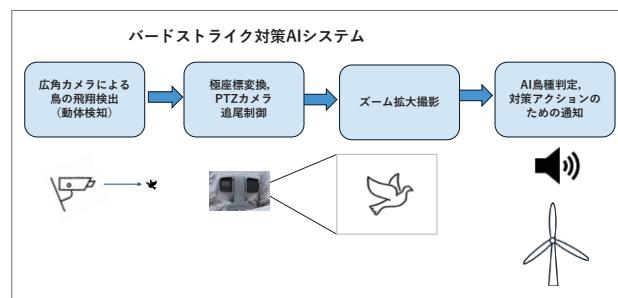


図1 システム処理のフロー

このカメラではパン、チルト、ズームを制御し、カメラの向きを調整し、飛翔体を追跡、追尾し、拡大撮影を行います。

鳥種判定では、飛來した鳥がどのような種類の鳥かを判定します。拡大撮影画像からDeepLearningなど画像認識AI（人工知能）で判定します。本システムでは後述するマルチモーダルAIにより、複数のAIを組み合わせ、より精度の高い判定を行います。AI鳥種判定の後は、検知した情報を基にオペレータに通知して対策アクションを促します。

光学カメラと電波レーダによる検出システムの比較

■光学カメラによる検出システム

広角カメラで広い視野をカバーしようとすると遠方での解像度が不足します。視野角を60~90度にすると、これは一般的な広角カメラの画角の中では狭い方ですが、それでも700~800m離れた鳥のサイズは撮影画面上で数ピクセルの黒い点になってしまい、鳥の飛翔と判定するのは非常に困難となります。また、天候（霧、ガス）や日照（照度不足）の影響も受けると、遠距離での認識はさらに困難なものになります。これにはカメラの複数設置化による視野の分割、分担や、撮像素子の解像度アップ（4K、8K化）で対応する必要があります。光学カメラのメリットとしては機材の価格が、電波レーダなどに比べて比較的安価ということがあげられます。

■電波レーダによる検出システム

電波レーダでは水平方向360度全周で鳥を検出できますが、丘陵地などで地面からの電波反射ノイズを考慮すると、仰角が低い水平線方向の監視は非常に困難です。これは水平方向へレーダ電波を発射すると丘など大地からの反射波に鳥の反射波が埋もれてしまい鳥を検出することができないからです。よって、水平線近くで低高度を飛ぶ鳥は発見しにくくなります。

また、カメラで見ると違い、1台のレーダでは水平方向と同時に縦方向（垂直方向）にアンテナを回転させることができず、飛んでいる鳥の高度を計測することができません（図3）。カメラではY軸方向の位置で高さが分かります。

しかし、レーダは上空においては天候や日照の影響を受けずに2~3kmの距離を見通せる大きなメリットがあります。

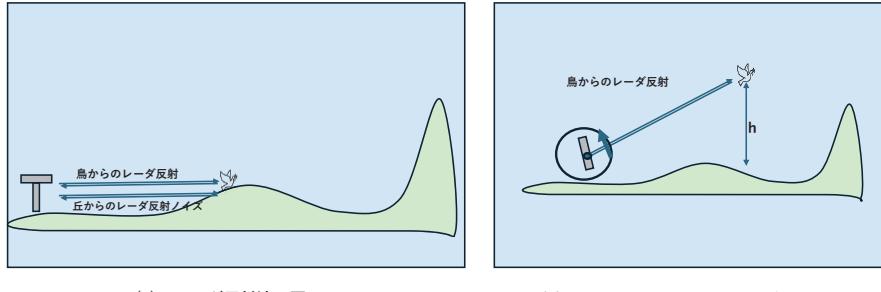
レーダでもっとも課題となるのは電波使用に関する手続きです。



(a) 実証中の本格設置システム

(b) 環境アセスメント用仮設設置システム

図2 バードストライク対策AIシステム



(a) レーダ反射波の図

(b) 高度の測定に必要なレーダの縦回転

図3 電波レーダによる検出システム

船舶用レーダを陸上で使うためには、サイトごとに無線局の免許申請、許可が必要になるうえ、無線従事者資格を持った人員を用意、配置する必要があります。さらに他の電波施設との関係で、電波を放出する方向に規制を受けることもあります。また、レーダ機器の設備コストは一般的に非常に高価なものとなります。

これらのことから光学カメラシステムの方が使いやすく、メリットが大きいことが推測されます^{*2}。

NTTドコモソリューションズの「バードストライク対策AIシステム」では光学的な広角カメラとPTZカメラによる追尾拡大撮影部を持ち、AIによる鳥種判定を行っています。システム各部についてさらに詳細に説明します。

広角カメラによる移動体検知とPTZカメラによる追尾拡大撮影

■極座標変換による追尾誤差の最小化

本システムでは広角カメラで見た遠方のXY平面画像上の視線方向を極座標に変換し、PTZカメラを向けていますが、これには事前の校正（機器やシステム自体の微調整）が大切で、正確に追尾できるよう、カメラ設置当初に各座標の位置合わせを行う必要があります（光軸の調整）。これには、遠方にマーカーとなるもの

を置き、両カメラ視線方向の位置合わせを行う方法と、遠方景色の特徴点を使いコンピュータビジョン上で正確に位置合わせを行う方法があります。いずれの方式でも、正確に座標位置（光軸）を合わせて校正する必要があります（図4）。

■動体検出、追尾

追尾ではまず、広角カメラで遠方の鳥を認識しますが、この撮影画像上では数ピクセルの点にしか見えません。この状態ではAI認識を行うことはできないため、AIによる鳥種判定は拡大撮影した後に拡大した画像に対して行うことになります。

この数ピクセルにしかならない動く点を画像処理の動体検知技術で識別し、その方向にPTZカメラを制御しながら向けています。

■移動方向予測と拡大撮影タイミング

PTZカメラを移動体方向に向ける場合、制御のタイムラグが発生するため、ある程度、移動体が動く方向を予測しながらカメラを向けることになります。

また、ズームによる拡大撮影では、いきなりズーム倍率を高倍率に上げると視野が狭くなり、対象の鳥が撮影視野の範囲から外れ見逃す危険があるため、段階的にズームアップ撮影していく戦略をとっています。こうすることで、拡大画像時の撮り損じを抑

^{*2} NTTドコモソリューションズでは今後、両方式を比較検証予定。

えています（図5）。

鳥種識別のため、ズーム倍率が大きいにこしたことはありませんが、あまり大きくしすぎるとフレームアウトするため、適切な傾合いで段階的に拡大ズームし撮影することが重要です。

■複数の鳥飛翔における撮影優先順位

PTZカメラ設置が1台の場合、複数の鳥が飛翔しているときには優先順位をつけ、どの鳥から追尾するか決める必要があります。

これには、風車により近く、より接近する可能性が高いものを推測し、優先順位を決め、順に追尾撮影を行います。

各種課題と対策

■動体検知における各種誤認識対策（認識し、あらかじめ追尾対象から外すなど）

動体検知ではさまざまな「動くもの」が誤認識のノイズとなり

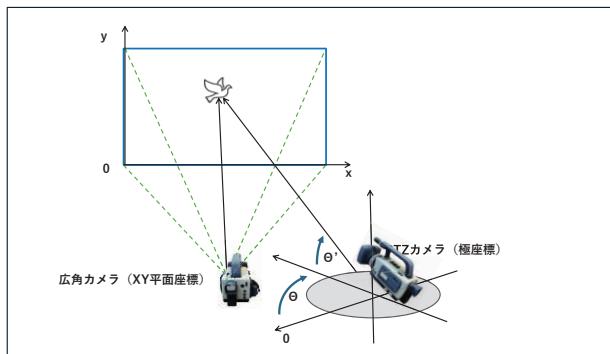


図4 極座標に変換して撮影対象にPTZカメラを向ける

ます。これには、虫、雪、雲、草木の揺れなどがあります。検出対象の鳥が撮影画像上数ピクセルしかないため、いかに誤認識のノイズを減らすかが検出精度向上の鍵となります。

- ① 昆虫：山間部の風車設置サイトでは、特に夏になるとトンボなどの昆虫が多く発生することがあり、この誤認識対策は必須です。
- ② 雪：降雪地帯では、冬場に空中を舞う雪の誤認識対策が必須です。
- ③ 雲：空を流れる雲も、風が強い日は動きが速く、誤認識対策が必要となります。これには、雲を個別に認識判断し除外しています。
- ④ 植物（草木）：特に山間部や丘陵地帯に風車が設置されている場合は、ススキや木の小枝など風で揺れる植物が動体誤検出のノイズとなります。事前に草むらエリアを認識対象外として画像上マスクしておくか、常に揺れている枝葉部分を画像処理技術でまとめて領域化し、その領域部分を自動的にマスクし、取り除くを行っています（図6）。

■山間部の背景における移動体認識の難しさ

青空背景であれば、移動体の検出は比較的容易ですが、山間部などで背景が樹木の場合は移動体検出の難易度は上がります。

動画全フレームで、毎回AI認識処理を使えればよいですが、処理が重く、処理速度が問題となります。また、そもそも検出対象が数ピクセルしかないのでAI認識には適しません。

そういう理由から、海外製品など他社製品では、青空背景限定の製品もあります。NTTドコモソリューションズの「バードストライク対策AIシステム」では、日本では多い山背景の鳥検出も対応可能です。

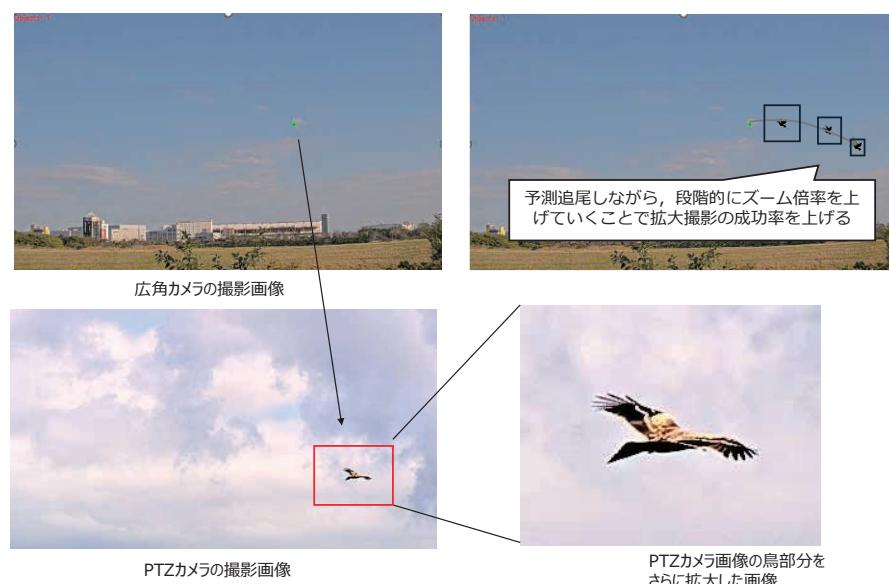


図5 飛翔方向予測追跡と段階的拡大撮影

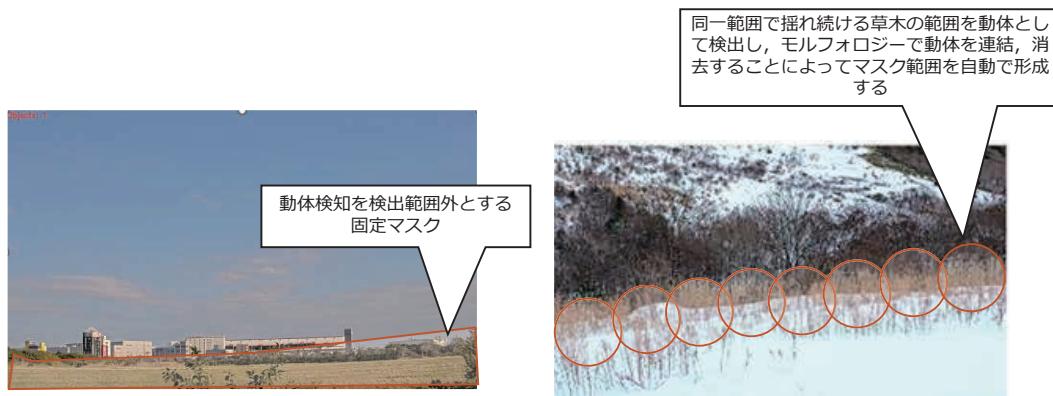


図6 動体検知における誤認識ノイズ対策（揺れる小枝、ススキ）

■マルチモーダルAIによる鳥種判定

複数のAIを組み合わせた鳥種判定。本システムでは、広角カメラの点サイズの鳥の飛翔識別AI、ノイズとなる鳥以外の物体の判定AI、レーダー画像上の鳥識別AI、PTZカメラの鳥拡大画像による鳥種判定AI、鳥の飛翔パターンによる鳥種判定AIなど、複数のAIを組み合わせて鳥種の判定を行っています。複数のAIを組み合わせることで、より精度の高い鳥種判定識別を行うことができます。

■風車サイトの広大さに関する課題

風車は山間部や、丘陵地帯の広大な範囲に設置されています。広大な視野や、見通し距離をカバーするには広角カメラを複数台設置するなどして、視野範囲やゾーンを分割分担する必要があります。これは通常の防犯監視カメラ設置と同様の考え方です。

■通信インフラ・電源整備の課題

山間部の風車サイトでは携帯通信の電波が十分でないところが多くあります。衛星通信も考えられますが、麓の管理サイトと大量の映像をやり取りする必要があるため、光ファイバ設置が理想的です。ただし、ケーブル設置においてはコスト的な課題があります。

また、電源の確保も課題です。風車の根本付近には電源が確保されていますが、風車から離れたところに監視カメラを置く場合は、電源を延長する必要があります。

■洋上風力発電サイトにおける課題

洋上では人による監視が非常に困難です。また、監視カメラの自由な設置も困難なため、風車が設置されている洋上プラットフォームから、自風車に向かって来る鳥を監視する、もしくは隣接した洋上プラットフォーム（風車が立っている）周辺を飛んでいる鳥を監視することになります。プラットフォーム間の距離はおよそ一定ですが、撮影距離を考慮してカメラの配置設計をする必要があります。

山間部などの陸上とは逆に、洋上では電波法の申請や許可のハードルが下がります。また、丘陵地などからの反射がないため見通

せる距離も長くなり、複数の風車を1台のレーダーでカバーできる可能性もあると考えます。

また、洋上では、飛んでいる鳥の種類も飛翔の特徴も異なりますので、洋上特有の工夫が必要となります。

本システムの検証実験は野鳥保護の公園や、干潟周辺、実際の風力発電サイトなどで行っています。

まとめ

このように「バードストライク対策AIシステム」では、実践的な課題に対してさまざまな改善や工夫をしながら機能を高度化しています。

NTTドコモソリューションズでは、鳥類保護、生物多様性保護を実現するため、このシステムをさらに進化させ、実用化を進めています。また、このシステムは風力発電業界だけでなく、鳥類生態系モニタリングによる環境アセスメントや空港でのバードストライク対策やドローン飛行検知等、他業界にも活用が可能です。

実際に2025年度、NTTドコモの無線基地局周辺での鳥類モニタリングにおいても利用実績があります。基地局周辺に本システムを設置し、拡大撮影画像を自動取得し、鳥類専門家の判定知見も借りながら、基地局周辺に生息している鳥種の統計を取得する共同実証を行いました。

企業として、ネイチャーポジティブ（生物多様性の維持・回復）の取り組みは重要かつ喫緊の課題です。NTTドコモソリューションズでは、長年培ってきたAI技術をネイチャーポジティブへ適用・発展させる取り組みを今後も推進していきます。

◆問い合わせ先

NTTドコモソリューションズ
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