

5 先端技術総合研究所

既成概念を打ち破りパラダイムシフトをもたらす 先端技術総合研究所の研究開発

先端技術総合研究所（先端総研）は、IOWN 構想のもと、豊かで安心安全な社会の持続的発展に貢献するために、様々な角度から物事を深く捉え、既成概念を打ち破り、パラダイムシフトをもたらす基盤技術の研究開発に取り組んでいる。本稿では、最近の代表的な研究成果について紹介する。

はじめに

IOWN 構想が発表されてから約4年が経過し、2023年3月には低遅延かつ揺らぎゼロを実現するサービスを提供できる APN 装置 (OTN Anywhere) ^{*1}が IOWN の最初の世代 IOWN1.0 として開始するなど、構想の具現化に向けて着実に技術開発は進展している。IOWN は顕在化している社会課題を、光電融合技術などの光を中心とした技術で構築する次世代コミュニケーション基盤によって解決しようとしており、2030年に向けて超低遅延 (1/200)、超大容量 (125倍)、電力効率の向上 (100倍) をめざし取り組んでいる。IOWN 構想は2030年の目標が終わりではなく、豊かで安心安全な社会が持続するためには、IOWN も持続的に発展、進化が不可欠であり、そのためには既成概念を打破し、パラダイムシフトをもたらす技術の創出が求められる。先端総研はそれらの技術の創出を実現すべく技術開発を推進し、日々研究開発に励んでいる。

本稿では、先端総研の研究開発方針の柱である、「情報処理・通信技

術」、「サステナブル技術」、「人間科学・バイオ技術」の技術領域とこれらを支える基礎研究について、最近の代表的な研究成果を紹介する。

社会基盤を豊かにかたち創る 「情報処理・通信技術」

先端総研は社会課題の迅速かつ効率的な解決に貢献する情報処理・通信技術の発展と、それらを支えるデバイスの実現に挑戦している。未来ねっと研究所（未来研）は、現在敷設されている光ファイバと同じ直径を保ちながら伝送容量を10倍に拡大可能な空間モード多重光ファイバによる、世界最長となる1300 kmの10空間モード多重信号の光増幅中継伝送に成功した。これにより、将来的なクラウドサービス拡大などにより増大する通信トラフィックを収容可能なペタビット級の超多重スケーラブル光ネットワークの実現に貢献する^{*2}。また、光パラメトリック増幅 (OPA) を用いた広帯域一括増幅中継器を世界で初めて構成し、OPA 中継器としては世界最大となる14.1 THz 帯域を実現、波長多重信号の一括光増幅中継伝送実験に成功した。本成果により、光ファイバ上で使用可能な波長資源



日本電信電話株式会社
研究開発担当役員
先端技術総合研究所
所長 岡田 顕 氏

を、従来増幅中継器の3倍以上に拡張する技術の実現可能性を示した^{*3}。需要が増しているデータセンタ間のネットワーク向けには、先端集積デバイス研究所（先デ研）とアクセスサービスシステム研究所とともに実環境下に敷設した4コアファイバを用いて、世界初となるファイバ1心で毎秒1.6テラビットを超える強度変調直接検波方式による光信号の空間多重光伝送実験に成功した。本成果は、従来の実用レベルの4倍以上となる大容量化を実証し、大規模データセンタネットワークの更なるスケーラビリティ向上の可能性を示したものであり、次世代イーサネットのコア技術として期待される^{*4}。さらに、デバイスイノベーションセンタ、ソフトウェアイ

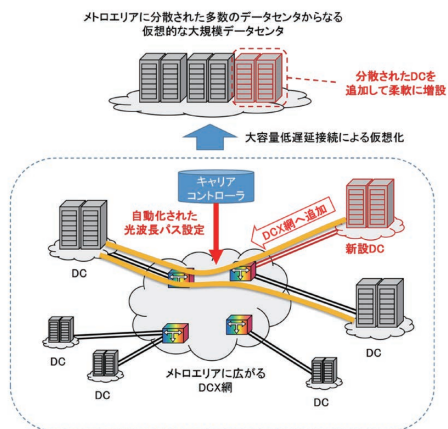


図1 分散されたデータセンタ (DC) 間で大容量低遅延通信を行う DCX サービス

ノベーションセンタ、日本電気株式会社および大学機関と共同で通信需要に応じたデータセンタ間の大容量低遅延接続の実現に向け、光波長パス設計・設定の自動化による大幅な時間短縮技術を確立し、フィールド実証に成功した。本技術は分散されたデータセンタ間で大容量低遅延通信を行うデータセンタエクスチェンジサービスの実現に大きく貢献する (図1) *5。

次世代の超高速光通信に寄与するデバイス技術として、先デ研は100 GHzの超広帯域性能を持った超小型な増幅器 IC モジュールの実現に成功した。本モジュールは、直流成分をブロックする機能を内蔵しながらも超小型なサイズを実現していることから、様々なデバイスへの直結が可能となり、ユーザビリティが高く、ケーブルによる損失も大幅に低減可能な形態と

なっている*6。また、先デ研は2030年代の6Gに向けて300 GHz帯のフェーズドアレイ送信モジュールを東京工業大学と共同で開発し、ビームフォーミングを用いた300 GHz帯高速無線データ伝送に世界で初めて成功した (図2)。本技術により、移動する受信端末に向かって超大容量データを瞬時に転送できるようになる*7。

先デ研ではさらに、情報処理技術として深層学習の低消費電力化や量子コンピュータ実現に向けた技術の研究開発に取り組んでいる。昨年は、東京大学と共同で脳の情報処理から得た着想を基に、深層ニューラルネットワーク (NN) ならびに物理系を計算過程に用いる物理 NN に適した新たな学習アルゴリズムを考案し、その有効性を確認した。これを高速な機械学習器として期待されている光を用いた物理 NN に適用して、学習過程を含めて物理 NN 上で効率的に計算可能であることを世界ではじめて実証し、物理 NN としても世界最高性能を実現した。本技術は人工知能の電力消費や演算時間の大幅な低減につながるものと期待される*8。量子コンピュータ実現の有力な方式として注目される光子量子コンピュータの高速化に寄与する技術として、先デ研は東京大学、理化学研究所と共同で、最先

端の光通信テクノロジーを光子量子分野に適用させる新技術を開発し、光通信用検出器を用いて世界最速の43 GHzリアルタイム量子信号測定に成功した。本技術は、10 GHz超のクロック周波数で動作する高速量子計算の実現に大きく寄与するだけでなく、近年の超高速光通信技術の一つである波長分割多重化技術 (WDM 技術) と組み合わせることで、光子量子コンピュータのマルチコア化も可能とする。将来的には100 GHz帯域の高速性と、100コアの並列性を兼ね備えたスーパー量子コンピュータの実現をめざしている*9。

安全・快適で持続可能な地球を育むサステナブル技術

気候変動を抑制するため、脱炭素化は喫緊の課題であり、NTTグループは2040年にグループ内でのカーボンニュートラルを実現するために再生可能エネルギーの導入やIOWNによる消費電力の削減を進めている。大気中の二酸化炭素 (CO₂) を吸着するために、先デ研は太陽光エネルギーを利用する半導体光触媒とCO₂を還元する金属触媒を電極として組み合わせた人工光合成デバイス (図3) を作製し、世界最長の350時間連続炭素固定を実現した。CO₂変換反応による累積炭素固定量は420g/m²に達し、これはスギが年間で固定する単位面積当たりの炭素量を上回る量に相当する。本技術は、連続したCO₂変換の試験時間が数時間から数十時間レベルに留まるといった従来の課題を、半導体光触媒として用いている窒化ガリウム (GaN) 表面の凹凸をより滑らかにし、光を十分に透過

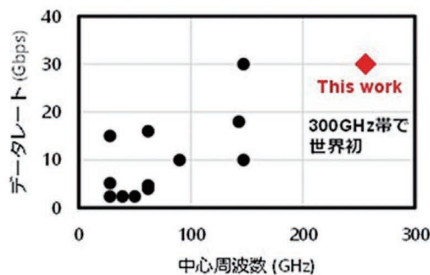
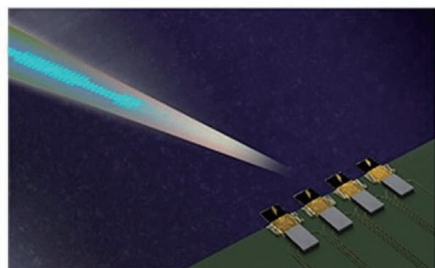


図2 (左) フェーズドアレイ無線機によるビームフォーミングのイメージ図 (右) 従来報告されているビームフォーミング可能な無線機と今回成果の比較

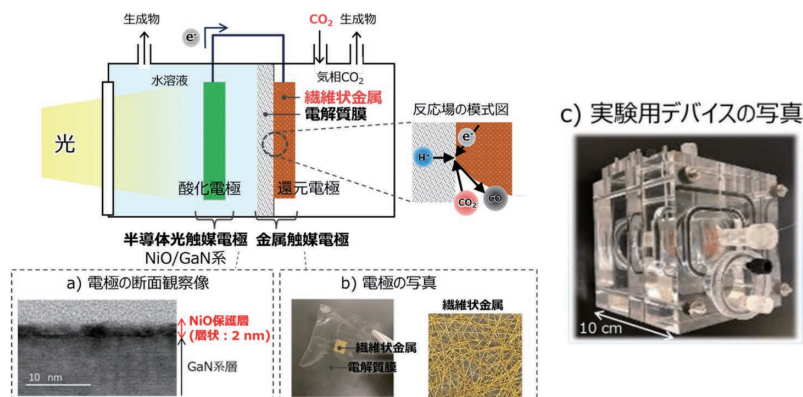


図3 人工光合成デバイスの概略図と写真

する酸化ニッケル薄膜を保護層として形成することで GaN と水溶液の接触を防ぎ、電極の劣化を大幅に抑制することで克服した。さらに、水溶液中に電極を浸漬させることなく CO₂ 変換反応に必要なプロトン (H⁺) を反応場に供給できるようになり、気相の CO₂ を直接変換することを可能とし、従来に比べ 10 倍以上の CO₂ 変換効率を実現した。今後は、より高性能な人工光合成デバイスを実現するために、電極での反応の高効率化、電極の長寿命化の両立を図る。さらに、屋外試験を通じて、太陽光エネルギーを用いた CO₂ 削減技術のひとつとして確立し、気候変動の抑制に寄与し、持続可能な社会の実現に貢献する^{※10}。

社会の持続的な発展のために、インフラを経済的に維持する技術の研究開発は今後ますます重要になってくる。先デ研は無線鉄塔をはじめとする、屋外鋼構造物の保守コスト低減のため、長寿命・高防食な塗料の開発に取り組んでいる。また、インフラや環境のモニタリングを行うための IoT 機器自体の環境負荷を低減するための電池や回路の材料選定や設計に関する研究開発も行っている。

人が生き生きと活躍・活動できる社会の実現をめざす「人間科学・バイオ技術」

先端総研は人間科学やバイオ技術の分野においても長年研究開発を進めてきた。特に近年は、誰しもが持てる力を存分に発揮できるような社会の実現に向けて、心身をコントロールする脳のメカニズムを深く理解するための研究を推進している。卓越した技とメンタルを発揮するトップアスリートを実践の場で多面的に観測し、科学的な分析を重ねることはその理解の一助になる。コミュニケーション科学基礎研究所 (CS 研) はダンディライアンと共同で、サーキットを高速周回中のレーサーの瞬目が極めて再現性高くコース上の特定位置で生じることを世界で初めて発見した。そしてこの瞬目

パターンの背後にドライバーの生理学的要因と運転行動に伴う認知状態変化が関与していることも明らかにした。これは、自然行動中の瞬目パターンがヒトの認知状態変化を読み取るための重要な生体指標になることを示しており、ヒトのデジタルツイン構築に向けた個人の内面のデジタル表現や高度なスキルの伝承などに貢献する (図4)^{※11}。人間の目の動きに着目したもう一つの研究成果として、CS 研は大きな視線の移動とは異なる目の無意識で細かな動きの中に、人の聴覚的注意の状況が現れることを発見した。この事は、聴覚に関連する興味や注意等の認知状態が、目の動きの測定データから読み取れる可能性を示している^{※12}。

物性科学基礎研究所 (物性研) では、人それぞれの身体および心理の精緻な写像であるバイオデジタルツインや、神経ネットワークの機能や薬剤の効き目を調べるための Brain-on-a-chip (脳模倣培養モデル) 実現に向けた取り組みを行っている。昨年は、光刺激で素早く動くハイドロゲル薄膜を、独自のオンチップ構造形成により生体を模した薄膜・管状構造とすることで、生体器官の動きを再現できる運動素子を作製することに成功した。本技術はチップ上に生体内環境を再現する基盤技術であ

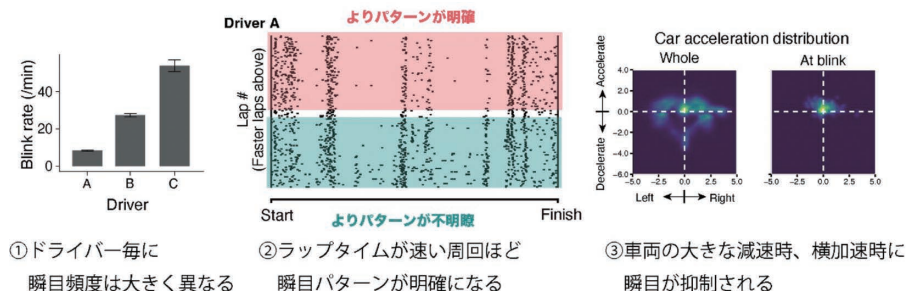


図4 運転中の瞬目パターンを決める3つの要因

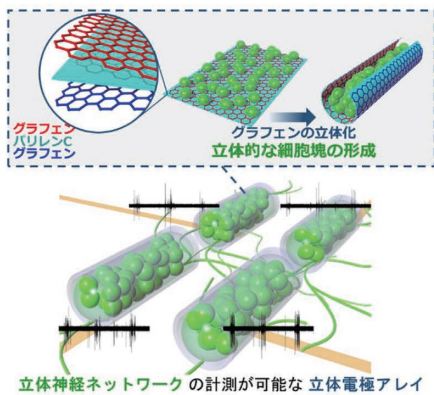


図5 (左) 立体神経ネットワークの計測が可能な立体電極アレイ
(右) Brain-on-a-chip のイメージ

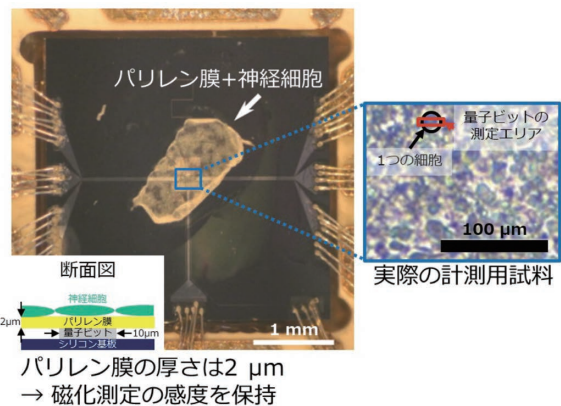
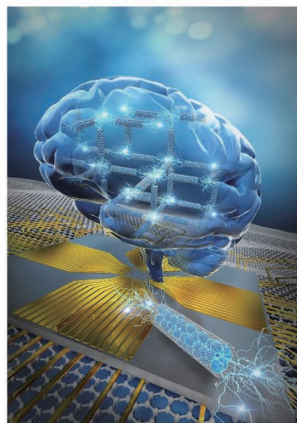


図6 作製したパリレン膜とその上で培養した神経細胞

り、多角的・精細な各種臓器のデータ取得が可能なオンチップ型人工臓器の創製を通じて、バイオデジタルツインの構築・検証につながるものと期待される^{※13}。また、グラフェンを立体化する NTT 独自の技術を用いて、立体的な細胞塊の繋がった神経ネットワークから長期的に神経活動を計測することにも成功した(図5)。本成果は、脳の特徴的な構造を模した培養組織(立体細胞塊のネットワーク)において神経機能を可視化することに成功したものであり、Brain-on-a-chip の要素技術として活用されることが期待される^{※14}。

IOWN 構想の進化を支える基礎研究

IOWN 構想のさらなる進化の礎となる次世代の基盤技術を確立するために、先端総研では基礎研究にも注力し、インパクトファクタの高い学術論文誌に毎年多くの研究成果を発表している。物性研は静岡大学と共同で、超伝導磁束量子ビットをもちいて、世界で初めて単一細胞相当の空間分解能で神経細胞中の鉄イオンの検出に成功した。本研究では、10 マイクロメートル程度の大きさ

の超伝導磁束量子ビットを用いることで、細胞中の鉄イオンの検出・定量が可能であることを実証した。今回は単一細胞相当での検出に関する原理実証を行ったが、今後は、細胞組織内でのイオン分布の可視化などへの応用も期待される(図6)。これにより生体試料の分析に応用範囲を広げることで、細胞単位での空間分解能で微量金属元素が分析可能になると期待され、高精密病理検査の実現へ寄与する^{※15}。

CS 研は複数の話者や話題が混在した音声信号から、話している内容が、画像や音声などで指定した「意味」に適合する音声信号を分離抽出する技術を考案した。本技術は、複数の音声信号が混在した信号から、話されている内容に基づいて目的の音声を取り出すことができる世界初の技術であり、これまでの手法で用いられていた音の到来方向などに依存することなく適用できるという利点がある。様々な情報があふれ、有益な情報を抽出・選択することの重要性が日に日に高まっているなかで、信号処理やパターン処理に意味処理を導入し、多種の情報に対して興味のある情報を高速かつ的確に特定し、

取り出し、活用できる社会の実現をめざしている^{※16}。

おわりに

本稿では、ここ1年の代表的な成果について紹介した。先端総研は、IOWN 構想のさらなる進化をめざし、さまざまな角度から物事を深く捉え、既成概念を打ち破り、パラダイムシフトをもたらす基盤技術の研究開発に取り組んでいく。これからも、世界一・世界初の技術や驚きの創出をめざし、NTT の研究所の理念である、「世界をリードする技術を生み出し、社会や産業、学術の発展に寄与する」を実現すべく研究開発を推進する。

※1 <https://journal.ntt.co.jp/article/22273>
 ※2 <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/03/06/230306a.html>
 ※3 <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/06/16/230616c.html>
 ※4 <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/10/05/231005a.html>
 ※5 <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/10/13/231013a.html>
 ※6 <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/02/20/230220a.html>
 ※7 <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/06/13/230613a.html>
 ※8 <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/01/10/230110a.html>
 ※9 <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/03/06/230306b.html>
 ※10 <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/10/27/231027a.html>
 ※11 <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/05/20/230520a.html>
 ※12 <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/05/30/230530c.html>
 ※13 <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/03/29/230329b.html>
 ※14 <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/05/24/230524a.html>
 ※15 <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/02/06/230206a.html>
 ※16 <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/05/30/230530d.html>