

5 先端技術総合研究所

# 知の蓄積・活用・協創を通して価値を創出する 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、物事を深く理解し（知の蓄積）、型にはまらない発想力（知の活用）や外部機関等とのコラボレーション（知の協創）を通じて世界一・世界初の技術や驚きの創出を目指し、IOWN 構想のさらなる進化（IOWN Future）の礎となる基盤技術に取り組んでいる。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

先端総研は未来ねっと研究所（未来研）、先端集積デバイス研究所（先デ研）、コミュニケーション科学基礎研究所（CS研）、物性科学基礎研究所（物性研）の4つの研究所からなり、幅広い技術領域の研究開発を行っている。図1に先端総研の研究開発方針を示す。先端総研がもつフォトニクス、エレクトロニクス、物性科学、情報・メディア科学、人間科学などの分野の専門技術を基盤として、IOWN (Innovative Optical & Wireless Network) 構想が目指す多

様性を受容する持続可能で安心安全な社会の実現に向けて、「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」を推進するとともに、これらを支える基礎研究にも取り組んでいる。本稿では、最近の代表的な研究成果をこれらの技術領域に分けて紹介する。



日本電信電話株式会社  
先端技術総合研究所  
所長 岡田 顕氏

## IOWN APN の進化に向けた「情報処理・通信技術」

次世代基幹光通信ネットワークである IOWN APN (All Photonics Network) においては、増大する通信トラフィックに対応するためにさらなる大容量化を経済的に実現する

必要がある。未来研は将来的に必要とされる1.6テラビット毎秒以上の超高速信号の対応に有効な手段である光1波長あたりの伝送容量拡大を目指した研究開発を、光伝送方式

ならびにデジタル信号処理集積デバイスの両面から進めている。しかしながら、従来の光変調器駆動増幅器では帯域と出力の面で性能が不足していること、また高出力化と高速化に伴う信号歪みの高精度補償技術の確立などの課題があった。

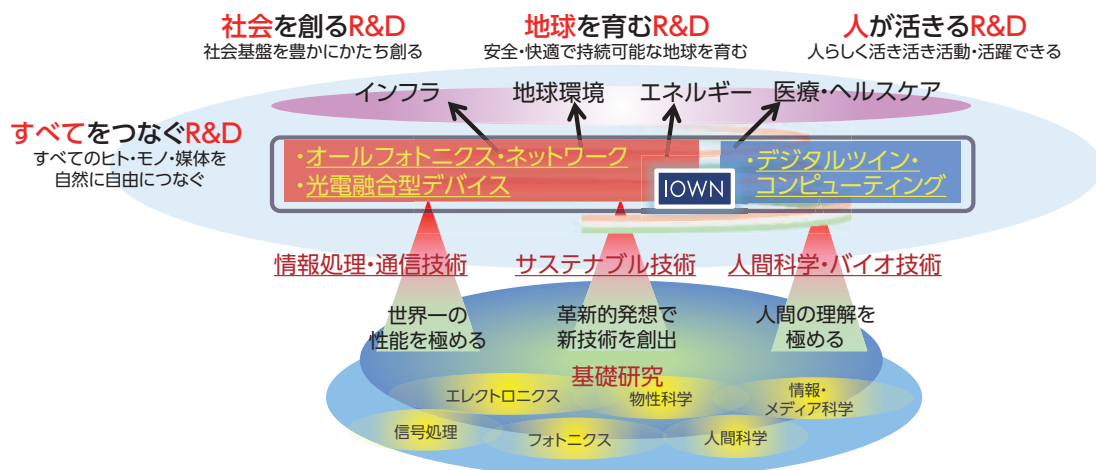
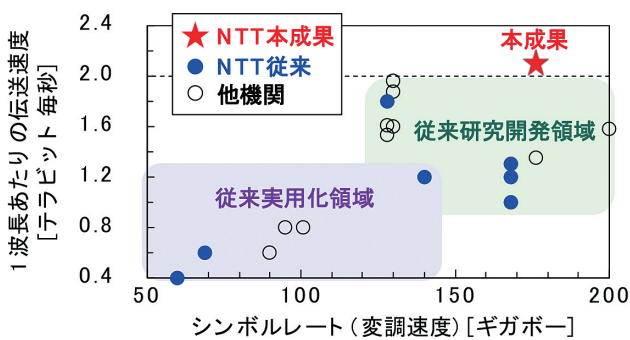
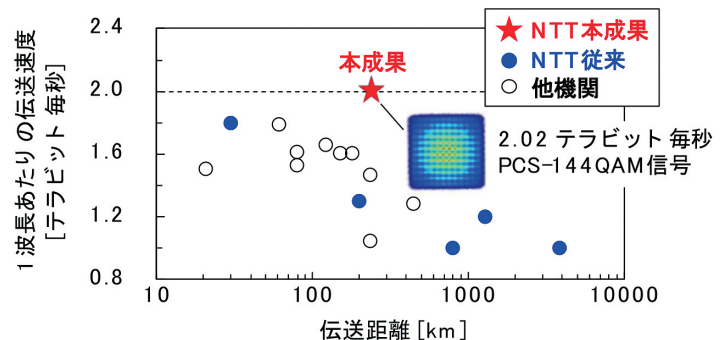


図1 先端総研の研究開発方針



1波長で毎秒2テラビットを超える超高速光信号の送受信技術を実証



2.02テラビット 毎秒(PCS-144QAM信号)の240km 光増幅中継伝送実験に成功

図2 毎秒2テラビット/波長の光伝送実験結果

先デ研は昨年、InP系ヘテロ接合バイポーラトランジスタ技術による超広帯域ベースバンド増幅器集積回路を110GHzまでの周波数に対応する1mm同軸コネクタ付きのパッケージに実装し、超広帯域性能と十分な利得と出力を有するモジュールの実現に成功した。このベースバンド増幅器ICモジュールを光変調器の駆動用増幅器として適用し、超高速信号の生成を可能とした。さらに高出力領域での動作に伴う駆動用増幅器の非線形性による光信号の歪みをNTTが有する世界最先端の超高精度デジタル信号処理技術により補償することにも成功した。これらの組み合わせにより、未来研は世界で初めて1波長あたり毎秒2テラビットを超えるデジタルコヒーレント光信号の送受信を実証し(図2左図)、毎秒2.02テラビット光信号の240km光増幅中継伝送実験に成功した(図2右図)<sup>[1]</sup>。

先デ研では、通信向けとして培ってきた技術を他分野への応用にも取り組んでいる。実用的とされる汎用型量子コンピュータの実現には100万程度の量子ビットが必要とされる一方で、従来の超電導回路を用いた

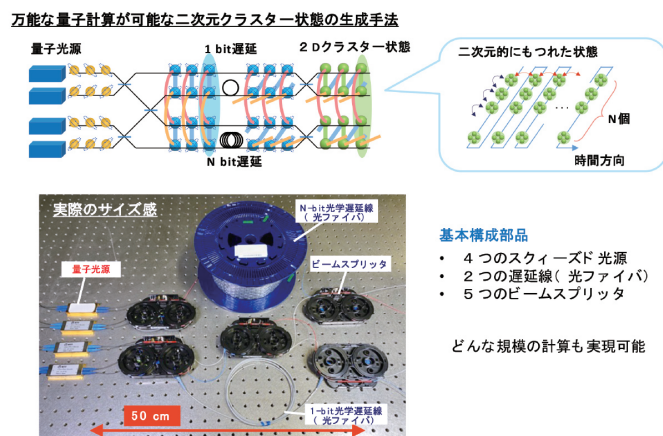
手法による実機は100量子ビットにとどまっております、量子ビットの数の増大が大きな課題となっている。先デ研と東京大学などが進める光量子コンピュータは従来のアプローチと異なり、4つのスキューズド光源、2つの長さの異なる光ファイバ(光遅延線)、そして5つのビームスプリッタという構成(図3)だけで汎用量子計算に必要な2次元クラスター状態の大規模生成が可能である。先デ研はこのうちスキューズド光源として、通信向けに培った周期分極反転ニオブ酸リチウム導波路を応用し、低損失な光ファイバ接続型量子光源

モジュールの開発に成功した<sup>[2]</sup>。

さらに、目的に応じて量子光のパルス波形を自在に制御する手法を開発し、光量子コンピュータをはじめとしたさまざまな量子技術の実現を目指している<sup>[3]</sup>。

### 持続可能な地球を育むサステナブル技術

通信トラフィックの増大はエネルギー消費の面でも大きな懸念材料になっており、ネットワーク機器の増大にともなう環境負荷もその一つである。先端総研は持続可能な地球を育むサステナブル技術の研究開発に取り組



4つの量子光源、2種類の長さの異なる光学遅延線(光ファイバ)、5つのビームスプリッタで原理上どんな規模の計算でも可能。

図3 大規模な光量子もつれ状態を生成するための基本構成。

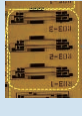
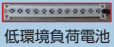


NTTのR&D戦略—IOWNが動き出す

み、電力消費や環境負荷の増大といった課題の解決に取り組んでいる。

電力変換に用いられる半導体パワーデバイス、家電、PC / スマートフォンからサーバー機器、電気自動車など幅広く利用されており、近年ではさらに太陽光発電や鉄道などの大電力領域へとその用途が拡大している。パワーデバイス用半導体材料には、絶縁破壊電界の大きいワイドギャップ半導体を用いることで低損失化、高耐圧化が可能になる。現在では、炭化珪素や窒化ガリウムといったワイドバンドギャップ半導体を用いたパワーデバイスの開発が進められているが、これらよりもさらに絶縁破壊電界の大きなウルトラワイドギャップ半導体を用いることでさらなる性能向上が見込まれる。物性研は2002年に絶縁破壊電界が最大級であり様々な利点を持つ窒化アルミニウム (AlN) の半導体化に世界で初めて成功した<sup>[4]</sup>。しかしながら、AlNを用いたパワーデバイスの実現には、欠陥密度や不純物濃度を低減する結晶成長法やデバイス作製プロセス等の要素技術の確立が課題であった。物性研は先行例のない未開拓な材料の技術開発にひとつずつ取り組み、昨年2022年に、独自に開発した方法により製造した高品質なAlN半導体と、デバイス作製に不可欠な良好なオーミック電極の実現により世界で初めて良好な特性のトランジスタ動作に成功した<sup>[5]</sup>。これにより超低損失・高耐圧パワーデバイス応用の実現に向けた大きな一歩を踏み出した。

IOWN構想の進展により、ありとあらゆるモノがネットワークにつながるデバイスとなり、それらが一般

	構成		構成材料	(参考) 既存材料の一例
	大項目	中項目		
低環境負荷回路 	素子 (半導体)	P型	有機物(C,H,S)	シリコン(Si)
		N型	有機物(C,H,N,O)	添加物:ガリウム(Ga)、ヒ素(As)
		絶縁層	酸化アルミニウム(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) シクロオレフィンポリマー(C,H,O)	シリコン(Si)
		電極	カーボン(C)	タングステン(W)、 ルテニウム(Ru)等
	その他	基板	ポリイミド(C,N,O)	シリコン(Si)
		配線	カーボン(C)	銅(Cu)、アルミニウム(Al)
		封止	-	ポリプロピレン(C,H)等
低環境負荷電池 	電池	電極(正極)	カーボン(C)	二酸化マンガン(Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
		電極(負極)	マグネシウム(Mg)	リチウム(Li)
		電解質	酢酸マグネシウム(Mg,C,H,O)	過塩素酸リチウム(Li,Cl,O)等
	その他	セパレータ	セルロース(C,H,O)	合成繊維(C,H,O)等
		集電材料	カーボン(C)	カーボン(C)等
		筐体	ポリ乳酸(C,H,O)	スチール(Fe,C)等

紫字:有害物質  
赤字:貴金属

表1 低環境負荷センサ・デバイス(回路・電池)の構成材料

ゴミとして捨てられたときに環境に及ぼす影響は無視できないものになる。先デ研は2018年に肥料成分と生物由来材料から構成した「ツチニカエルでんち<sup>®</sup>」の開発を成功させる<sup>[6]</sup>など、廃棄時においても環境・生物への影響が小さい材料を選択したデバイスの研究開発を推進してきた。さらに2022年、低環境負荷電池の高度化を進めるとともに、東京大学と連携し有機半導体技術を適用した低環境負荷回路を作製(表1)、回路動作を確認した。また、低環境負荷回路と低環境負荷電池を組み合わせ、世界で初めて通信信号の生成に成功した<sup>[7]</sup>。現在、低環境負荷を指向したデバイスに関する明確なコンセンサスはないものの、その嚆矢として本研究開発成果について広く議論を行っていく。

**人の well-being 実現を目指す 「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。特に近年は人の well-being 実現を目指す取り組みとして、情報科学、心理学、神経科学という3つの切り口から、人間の脳や身体を対象として、感覚・情動・

運動にかかわる情報処理メカニズムを研究している。このなかでもスポーツ脳科学の研究は、実戦の中で一流のアスリートがどのようにその能力を発揮しているのかを知り、さらにその知見をフィードバックすることによるトレーニング効果を狙ったユニークな取り組みとして注目を集めている。

2021年の世界的なスポーツイベントにおける女子ソフトボール日本代表チームの活躍は目覚ましいものであった。この優勝チームのメンバーは、対戦が想定される投手の球種ごとのフォームとボールの軌道を忠実に再現できるピッチングマシンで打撃練習を行った。これは、投球フォームによるバッターの無自覚的な軌道予測を相手投手にチューニングすることが鍵という洞察に基づきCS研が開発したものである。また、最近ではいわゆる「ボールのノビ(ボールが浮き上がる知覚)」をどの程度感じるかが投球フォームの動きと関連していることをVRを用いた実験により明らかにした<sup>[8]</sup>。CS研では、これら一流のアスリートに関する知見を一般の人々に向けたトレーニングに応用することも研究課題とし、人の well-being 実現を目指



図4 非侵襲グルコースセンサ (左) と深部体温センサ (右)

している。

バイオ技術に関しては特に物性研バイオメディカル情報科学研究センタ (BMC) において、非侵襲グルコースセンサ、深部体温センサ (図4) の研究開発を行い、従来侵襲的に計測していた生体情報をより手軽に計測することを可能としつつある。これらの技術により、身体の状態をリアルタイムに把握、分析し個人に応じたヘルスケアシステムの構築やバイオデジタルツイン<sup>[9]</sup>を目指している。

## 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。ここでは物性研のグラフェンに関する最近の基礎研究成果を1つ紹介する。光信号を電気信号に変換する光検出器は、情報通信、センサー等で利用されているキーデバイスである。特に、広帯域通信や様々な波長領域の光センサーを活用したスマートな社会の実現に向けて、既存技術の帯域制限を超える広帯域かつ高速で動作する光検出器の実現

が求められている。グラフェンは、これらの要求を満たすと期待されている有望な材料である。しかしながら、デバイス構造の問題や測定機器の限界により実証動作速度が理論値よりも大きく下回り、さらにどのようなプロセスによって光信号が電気信号に変換されているのかといった本質的な物性が未解明であった。

物性研は国立研究開発法人・材料研究機構と共同で、消費電力および信号雑音比の観点で応用に向けて必要とされるゼロバイアス動作が可能な光熱電効果に着目して、グラフェンにおける光-電気変換の研究を行った。高速光-電気変換の実現には、光照射の ON/OFF に電流が遅延なく追従できるデバイス構造と、その電流を高速で読み出す技術が鍵となる。そのために、一般的に用いられている金などの金属材料ではなく、酸化亜鉛 (ZnO) 薄膜をゲート材料として用いることでグラフェンとゲートとの間の静電結合に由来する電流遅延を取り除き、電流読み出しにオンチップ THz 分光技術を適用した。その結果、グラフェン光検出器が本来持つと期待されていた高速動作 (220 GHz) を実証することに成功した。さらに、これらの結果を解析することによりグラフェンに

おける光-電気変換プロセスを解明した<sup>[10]</sup>。この成果は、学術的に重要であるだけでなく、情報処理やセンサー等の用途に合わせてグラフェン光検出器を設計するために不可欠な情報である。

## 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 (IOWN Future) の礎となる基盤技術の確立を見据えつつも、優れた技術はタイムリーに社会実装することも意識して取り組んでいる。これからも、世界一・世界初の技術や驚きの創出を目指し、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://group.ntt.jp/newsrelease/2022/09/22/220922a.html>
- [2] <https://group.ntt.jp/newsrelease/2021/12/22/211222a.html>
- [3] <https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/10/29/221029a.html>
- [4] Y. Taniyasu, M. Kasu, and N. Kobayashi, "Intentional control of *n*-type conduction for Si-doped AlN and Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (0.42 ≤ *x* < 1)," Appl. Phys. Lett., Vol. 81, No. 7, pp. 1255-1257, 2002.
- [5] <https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/04/22/220422a.html>
- [6] <https://group.ntt.jp/newsrelease/2018/02/19/180219a.html>
- [7] <https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/10/07/221007a.html>
- [8] [https://www.kecl.ntt.co.jp/openhouse/2022/exhibition\\_21.html](https://www.kecl.ntt.co.jp/openhouse/2022/exhibition_21.html)
- [9] <https://group.ntt.jp/newsrelease/2020/11/17/201117c.html>
- [10] <https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/09/12/220912a.html>