

NTT 技術ジャーナル

ISSN 0915-2318 平成2年3月5日第三種郵便物認可
令和4年6月1日発行 毎月1回1日発行 第34巻第6号(通巻399号)

6

JUNE
2022
Vol.34 No.6

特集

オールフォトニクス・ネットワーク (APN)
の実現を支えるデバイス技術

光を用いた次世代コンピューティングを
実現するデバイス技術

グループ企業探訪

NTTデータ ザムテクノロジーズ



NTT 技術ジャーナル

6 JUNE
2022
Vol. 34 No. 6

CONTENTS

4 特集

オールフォトニクス・ ネットワーク (APN) の 実現を支えるデバイス技術

- 6 400 Gbit/s 40 kmの伝送を実現する高光出力光送信器と高感度光受信器
- 11 大容量ネットワークの柔軟性を実現するC+LバンドCDC-ROADM
- 15 IOWNの実現に向けたメンブレン光変調器の開発
- 20 電流注入結合フォトニック結晶レーザを用いた例外点縮退の観測
- 25 主役登場 進藤 隆彦
NTTデバイスイノベーションセンタ



26 特集

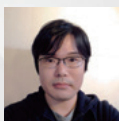
光を用いた 次世代コンピューティングを 実現するデバイス技術

- 28 光による次世代コンピューティングと光デバイス技術
- 32 高速光量子コンピュータ実現に向けた連続波・広帯域スウィーズド光源
- 35 光を用いて計算する次世代コンピューティングに向けた光回路技術
- 39 光デバイスによるリザーバコンピューティングの物理実装
- 43 主役登場 中島 光雅
NTT先端集積デバイス研究所



44 挑戦する研究者たち

秋山 満昭
NTT社会情報研究所
上席特別研究員



あらゆる技術者がセキュリティの素養を持つことが
当たり前の世界になったらいい

50 挑戦する研究開発者たち

池田 大造
NTTドコモ
サービスイノベーション部
担当部長



信念とパッションを胸に妄想しよう!
心の声に耳を傾けてワクワクする未来を描く

55 明日のトップランナー

山崎 裕史
NTT先端集積デバイス研究所
特別研究員



信号を「折りたたんで」送信。
帯域幅のボトルネックを解消する「帯域ダブル技術」

58 グループ企業探訪

株式会社NTTデータ ザムテクノロジーズ
AM (Additive Manufacturing) 市場を
牽引するAMソリューション専業会社



Webサイト オリジナル記事の紹介 62

7月号予定

編集後記

NTT技術ジャーナルはWebで閲覧できます。

<https://journal.ntt.co.jp/>



本誌掲載内容についての
ご意見、ご要望、お問い合わせ先

日本電信電話株式会社
NTT技術ジャーナル事務局
E-mail journal@ml.ntt.com

本誌ご購入のお申し込み、
お問い合わせ先

一般社団法人電気通信協会
ブックセンター
TEL (03)3288-0611
FAX (03)3288-0615
ホームページ <http://www.tta.or.jp/>

企画編集

日本電信電話株式会社
〒100-8116 東京都千代田区大手町1-5-1
大手町ファーストスクエア イーストタワー
NTTホームページ URL <https://group.ntt.jp/>

発行

一般社団法人電気通信協会
〒101-0003 東京都千代田区一ツ橋2-1-1 如水会ビルディング6階
TEL (03)3288-0608 FAX (03)3288-0615
URL <http://www.tta.or.jp/>

©日本電信電話株式会社2022

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます●

※本誌に掲載されている社名、製品およびソフトウェアなどの名称は、
各社の商標または登録商標です。

オールフォトンクス・ネットワーク(APN)の実現を支えるデバイス技術

NTTでは、IOWN(Innovative Optical and Wireless Network)構想で提唱しているオールフォトンクス・ネットワークの実現に向け、ネットワークの大容量・低遅延化や柔軟性の向上、装置の低消費電力化、小型化等を可能とするデバイス技術の研究開発を行っている。本稿では、これらの取り組みのうち、高出力・高感度な光送受信器や、マルチキャストスイッチ、メンブレン光変調器、フォトリック結晶レーザ等に関する研究開発状況を紹介する。

オールフォトンクス・
ネットワーク

光送受信器

マルチキャストスイッチ

光変調器

フォトリック結晶レーザ

All Photonics Network

400 Gbit/s 40 kmの伝送を実現する高光出力光送信器と高感度光受信器 ————— 6

高光出力化のキーデバイスであるAXEL (SOA Assisted eXtended reach EADFB Laser) と高感度化のキーデバイスであるAPD (Avalanche PhotoDiode), およびこれらキーデバイスを搭載した400 Gbit/s動作光送受信器について紹介する。

大容量ネットワークの柔軟性を実現するC+LバンドCDC-ROADM ————— 11

C+Lバンドで動作する光送受信器収容部を持つCDC-ROADM(Colorless, Directionless, Contentionless - Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexing)の構成, およびその可能性について紹介する。

IOWNの実現に向けたメンブレン光変調器の開発 ————— 15

シリコンフォトニクス回路上に化合物半導体を異種材料集積したメンブレン光変調器の概要, および現在の研究開発の状況について紹介する。

電流注入結合フォトニック結晶レーザを用いた例外点縮退の観測 ————— 20

利得および損失の精緻な制御が可能な電流注入フォトニック結晶レーザによる, 例外点と呼ばれる非エルミート系特有のモード縮退と, それによる特異な発光増強の実証について紹介する。

主役登場 進藤 隆彦 (NTTデバイスイノベーションセンタ) ————— 25

未来のネットワークを支える半導体レーザ

400 Gbit/s 40 kmの伝送を実現する 高光出力光送信器と高感度光受信器

NTTでは、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想で提唱しているオールフォトニクス・ネットワーク (APN) の実現に向けて、長距離伝送向けの高光出力光送信器、高感度光受信器の開発を行っています。本稿では、高光出力化のキーデバイスであるAXEL (SOA Assisted eXtended reach EADFB Laser) と高感度化のキーデバイスであるAPD (Avalanche PhotoDiode)、そしてこれらキーデバイスを搭載した400 Gbit/s動作光送受信器について紹介します。

かなざわ 金澤	しげる 慈	しんどう 進藤	たかひこ 隆彦
なかにし 中西	やすひこ 泰彦	なだ 名田	まさひろ 允洋
はだま 葉玉	こういち 恒一	ちん 陳	みんしん 明晨
たつみ 辰己	しょうこ 詔子	かんだ 神田	あつし 淳
なかむら 中村	ひろたか 浩崇		

NTTデバイスイノベーションセンタ

はじめに

クラウドサービス、自動運転、遠隔医療といった新しいサービスの進展とともに、通信ネットワーク内で扱われるデータ量は飛躍的な増加傾向を示しており、これに伴いトラフィック量も急激な増加を示しています。今後も伸び続けるトラフィックへの対応と、さらなる大容量化、低遅延、低消費電力、かつ柔軟性に優れた通信ネットワークを提供するため、NTTは新たなネットワークIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想の実現を提案しました。

IOWN構想を構成する3つの柱の1つ、オールフォトニクス・ネットワーク (APN) は、ネットワークから端末まであらゆるところにフォトニクス技術の導入を図るというものです。APNでは、ネットワークにおける短距離伝送から長距離伝送に至るあらゆる

情報伝送において、フォトニクス (光技術) の利用を図り、圧倒的な低消費電力、高品質・大容量、低遅延の伝送を実現します。

NTTデバイスイノベーションセンタでは、ネットワーク内の光インタフェースの小型化、低消費電力化、伝送容量拡大をめざし、小型化、低消費電力化に優れた強度変調方式を用いた長距離伝送用光送受信器の開発を行っています。長距離伝送実現のためには、光送信器の光出力パワーの高出力化、光受信器の高感度化が鍵となります。そこで、私たちは高光出力化のキーデバイスであるAXEL⁽¹⁾ (SOA^{*1} Assisted eXtended reach EADFB Laser^{*2}) と高感度化のキーデバイスであるAPD (Avalanche PhotoDiode) を研究開発し⁽²⁾、40 km伝送を実現する400 Gbit/s動作可能な光送受信器を開発しました^{(3), (4)}。本光送受信器により、強度変調方式の適用領域が拡

大可能となり、ネットワーク機器の小型化、低消費電力化に寄与します。

SOA集積型EADFBレーザ (AXEL)

高出力光送信器の心臓部である、高速高光出力送信デバイスについて説明します。1チップ当たり100 Gbit/sとなる高速な光信号を生成する光送信器では一般的にEADFBレーザと呼ばれる半導体デバイスが送信デバイスとして用いられます。このEADFBレーザは単一波長の光を発するDFBレーザ部と、電気信号を光信号に変換するEA変調器部で構成されていて、高速で高品質な光信号が生成できます。しかし、従来のEADFBレーザでは、

*1 SOA : Semiconductor Optical Amplifier. 光半導体増幅器。

*2 EADFB Laser : ElectroAbsorption modulator integrated Distributed FeedBack Laser. 電界吸収型光変調器集積DFBレーザ。

EA変調器部での光損失が大きく、光信号の高出力化が難しいという課題がありました。

この問題の解決に向け、私たちは高速高光出力を実現できる送信のキーデバイスとして、SOA集積型EADFBレーザであるAXELを開発してきました（図1）。SOAは電流注入によって駆動し、SOAに入射した光は内部を伝搬しながら増幅されます。一般的なEADFBレーザでは、DFBレーザが発した光はEA変調器で変調される際に光強度が低下してしましますが、AXELではSOAによって光を増幅す

ることで高出力な光信号が得られます。また、SOAはDFBレーザやEA変調器と同じ半導体材料から作製されるため、これらを同一チップに集積したAXELは、同一プロセスで大量に作製可能であり、小型かつ低コストでの作製が可能となります。また、SOAは1チップ当り100 Gbit/sの高速光信号を増幅する必要があります。そこで、このSOA部に、電流を効率的に光に変換し、光波形劣化の少ない光増幅層を新たに採用し、100 Gbit/sの光信号も品質を低下させることなく光出力を増幅することが可能となり

ました。これにより、本開発で作製したAXELチップは、100 Gbit/sの高速光信号を+8.0 dBm以上と高強度に出力することが可能となりました⁽¹⁾。このAXELチップを4台搭載することで、400 Gbit/sの光信号を生成する光送信器が実現できます。

アバランシェフォトダイオード (APD)

高感度光受信器の心臓部である、高速高感度受信デバイスについて説明します。一般的な受信デバイスであるフォトダイオードは、その光電変換効率は理論最大値で100%になります。しかし、ほとんどの場合は、フォトダイオードに入射する際の損失や、フォトダイオード内において光が吸収されない等の理由により、実際は数10%程度にとどまります。私たちは、高速高感度を実現するために、アバランシェフォトダイオード (APD) と呼ばれる特殊なフォトダイオードを、受信のキーデバイスとして開発しました。APDは、デバイス内に高電界を誘起し、発生した光電子をイオン化衝突させることでさらなる電子、正孔を発生させます。結果、100%を大きく超える光電変換効率が可能であり、受信器の高感度化を実現します。開発した高速高感度受信APD（図2）は、主に光吸収層と、アバランシェ増倍層により構成されています。光吸収層において光信号を電子/正孔に変換し、発生した電子をアバランシェ増倍層において増幅します。

また、本開発では、1つのAPDは100 Gbit/sの信号を光から電気に変換する必要があります。一般的に、フォトダイオードは高速動作を実現するためには受光感度を犠牲にする必要があり、また入射する光信号をフォト

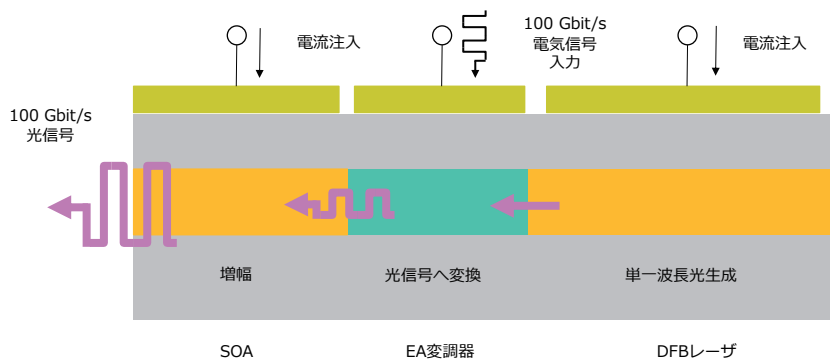


図1 AXELチップの概略図

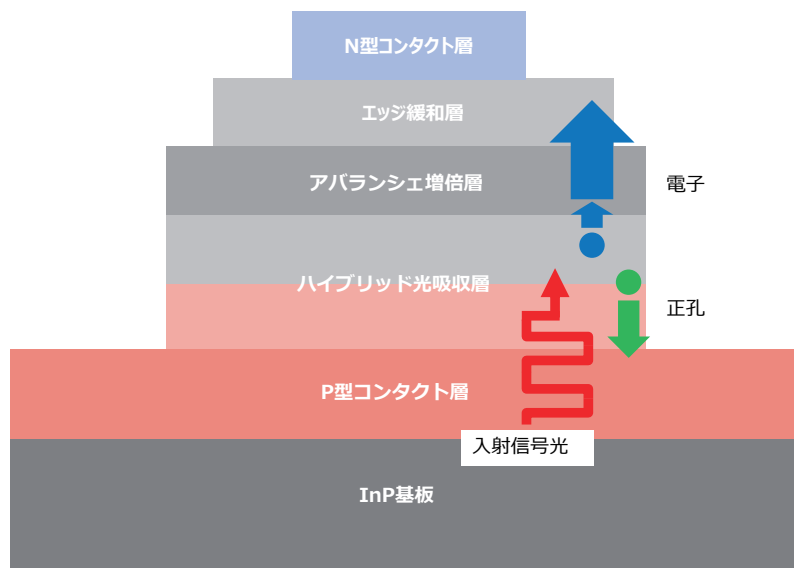


図2 APDチップの概略図

ダイオードに光学結合させることが困難な導波路形状を採用する必要があります。私たちの開発したAPDは、光吸収層として、電子拡散が主なキャリア輸送機構となる光吸収層と、正孔ドリフトが主なキャリア輸送機構となる光吸収層の2層を組み合わせたハイブリッド光吸収層を適用することで、受光素子100 Gbit/sの光信号に対応できる高速動作が可能でありながら高い感度を維持し、さらに光学結合が容易な垂直入射構造を採用しています⁽²⁾。このAPDチップを4台搭載することで、400 Gbit/sの光信号を電気信号に変換する光受信器が実現できます。

400 Gbit/s 動作高出力光送信器

高出力化の鍵となるAXELチップを搭載した4チャンネル光送信器を紹介します⁽³⁾。図3(a)は本開発品である400 Gbit/s動作4チャンネル光送信器の内部の概略図になります。内部には

AXELチップを搭載したサブアセンブリを4台搭載しており、各サブアセンブリ上のAXELチップからは、100 Gbit/sの光信号が出力されます。各サブアセンブリから出力される光の波長はLane 0, 1, 2, 3、それぞれ1295.5, 1300, 1304.5, 1309.1 nmとなっており、LAN-WDMグリッドと呼ばれる標準化規格で決められたものとなっています。出力された光は第1レンズを介して平行光となり、波長フィルタとミラーとそれらを搭載したガラスブロックから構成される光合波器へ入力されます。合波され、合計400 Gbit/sの信号となった光信号はアイソレータと第2レンズを介して、LCレセプタクルと呼ばれる部品内部の光導波路に結合されます。図3(b)は作製した4チャンネル光送信器の写真になります。長さ18.2 mm、幅6.2 mm、高さ5.4 mmと非常に小型の光送信器となっており、QSFP-DD (Quad

Small form Factor Pluggable-Dense Double Density) と呼ばれる小型の光トランシーバにも搭載可能なサイズとなっています。

作製した4チャンネル光送信器を400 Gbit/s動作させたときのアイ波形、光出力パワーを測定しました。チップ温度は50度一定とし、AXELチップ内のレーザには80 mA、SOAには40 mAの電流を印加しました。また、電気信号は53.125 Gbaud, 4-PAM (Pulse Amplitude Modulation) 信号、振幅電圧は0.75 Vppとしました。アイ波形の観測にはサンプリングオシロスコープを用いており、26.6 GHz帯域のローパスフィルタと、TDECQ (Transmitter Dispersion Eye Closure Quaternary) フィルタと呼ばれる等化処理を行った後の光信号波形を観測しました。測定結果は図4に示したものになります。波形品質の指標値であるTDECQは全レーンにおい

(a) 400 Gbit/s 光送信器の概略図

(b) 光送信器の写真

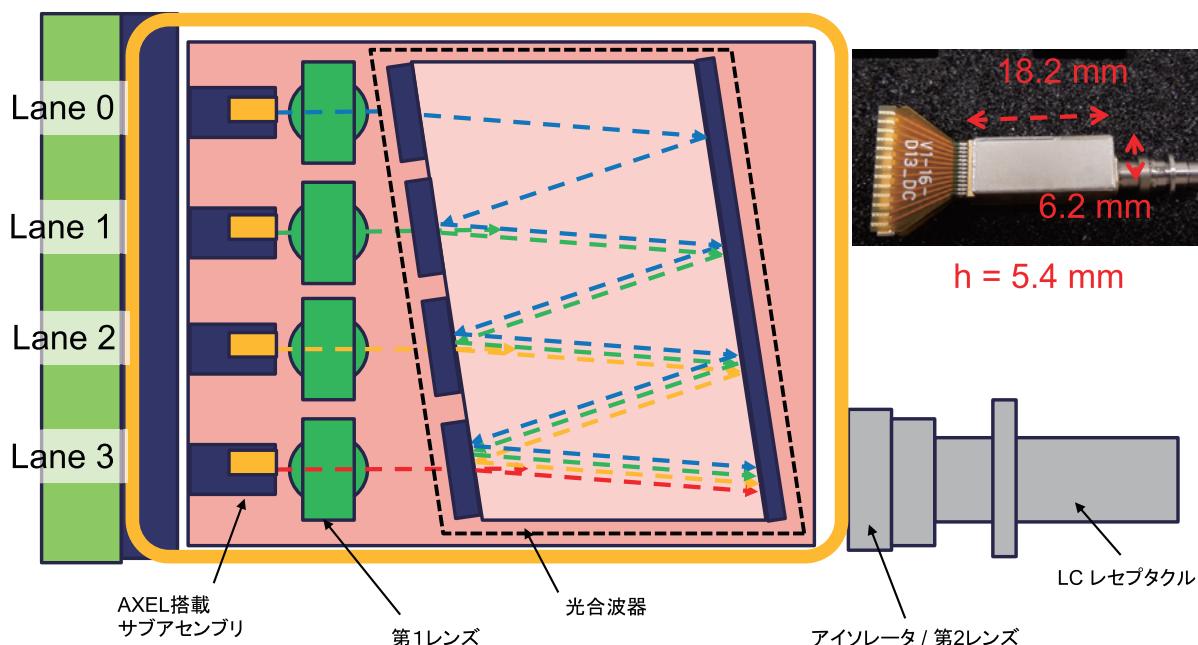


図3 400 Gbit/s動作光送信器の概略図

て、2.4 dB以下の良好なアイ波形が観測されています。また、光出力パワー（OMA：Optical Modulation Amplitude）についても全レーンにおいて+4.7 dBm以上の光出力パワーを確認することができ、AXELチップによる高出力な特性を確認することができました。

400 Gbit/s 動作高感度光受信器

APDチップを搭載した4チャンネル光受信器を紹介します⁽⁴⁾。図5(a)は本開発品である400 Gbit/s動作4チャンネル光受信器の内部の概略図になります。光受信器はLCレセプタクルから出力される光を平行光にするレンズ、波長多重した光信号を分波する光分波器、4チャンネルレンズアレイ、4チャンネルAPDアレイおよび4チャンネルTIA（Trans-Impedance Amplifier）によって構成されています。光送信器から波長多重信号として出力された光信号は、光ファイバを伝送し光受信器に入力されます。光受信器に入力された光信号は光分波器によって1295.5 nm、1300 nm、1304.5 nm、1309.1 nmごとに分波されます。分波された光信号はレンズアレイを通して、4チャンネルAPDアレイチップに入力され、APDによって光信号は増幅された電気信号へ変換されます。各チャンネルの電気信号はTIAを介して1チャンネル当り100 Gbit/sの電気信号を受信器外部へ出力します。図5(b)は作製した4チャンネル光受信器の写真になります。長さ16.7 mm、幅6.2 mm、高さ5.3 mmと非常に小型の光受信器となっており、前述の光送信器同様QSFP-DDサイズトランシーバに搭載可能なサイズとなっています。

作製した4チャンネル光受信器の受信特性を評価しました。評価系の概要を図6

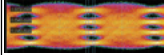
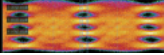
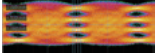
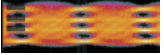
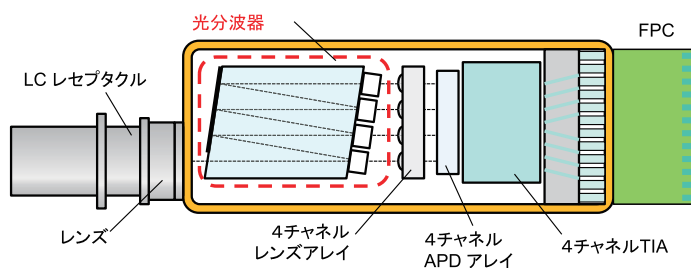
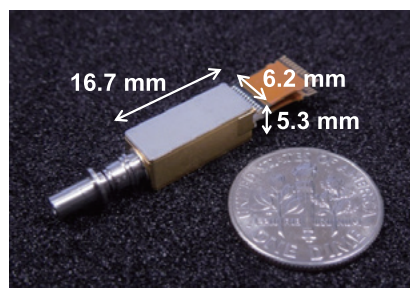
	Lane 0	Lane 1	Lane 2	Lane 3
アイ波形				
TDECQ (dB)	1.8	2.4	1.2	1.8
消光比 (dB)	3.9	4.2	3.8	4.3
OMA (dBm)	4.7	5.8	5.8	6.3

図4 400 Gbit/s動作時のアイ波形



(a) 400 Gbit/s 光受信器の概略図



(b) 光受信器の写真

図5 400 Gbit/s動作光受信器の概略図

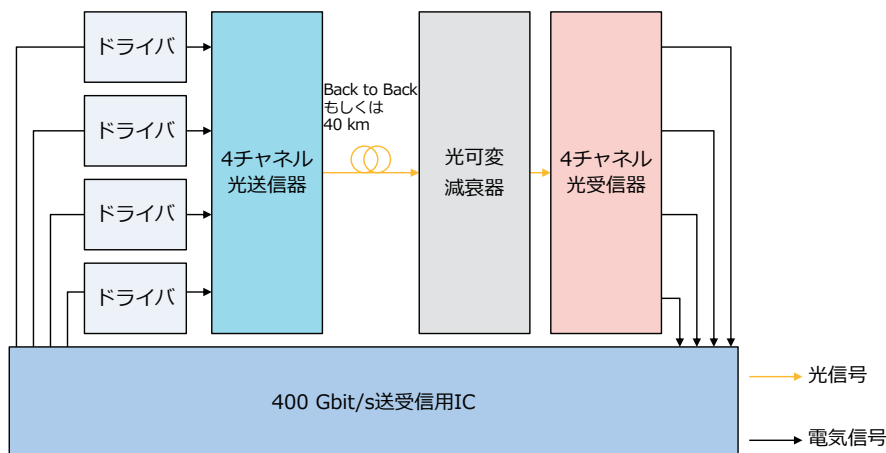


図6 評価系の概要

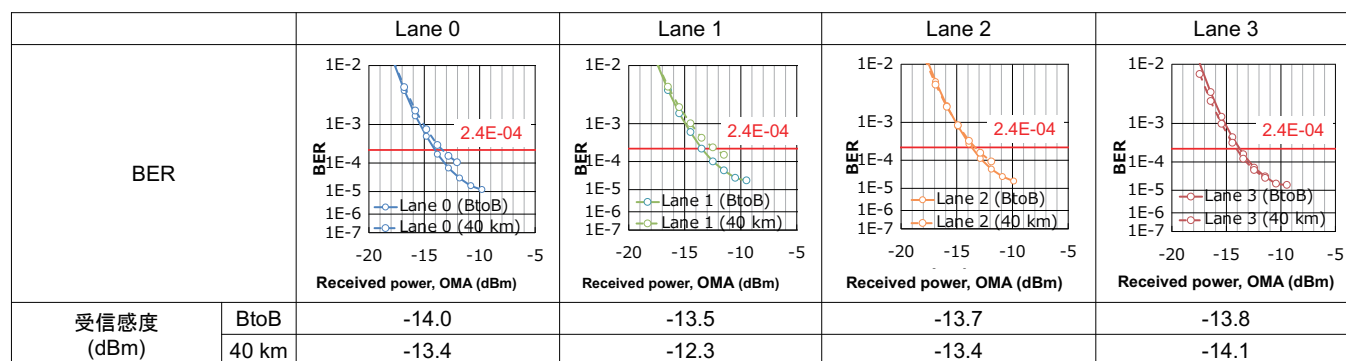


図7 400 Gbit/s動作時のBER特性

に示します。4チャンネル光送信器を用い、1チャンネル当り100 Gbit/s、4チャンネル合計で400 Gbit/sの光信号を生成しています。光信号の消光比は、3.9~4.3 dBです。光信号は可変減衰器を介して、4チャンネル光受信器入力され、電気信号へ変換され出力されます。出力信号は、400 Gbit/s送受信ICにて復調し、ビットエラーレートを算出します。ビットエラーレートの評価は各チャンネルの信号の単独入力の元で実施しました。

各チャンネルのビットエラーレートを図7に示します。光送信器と光受信器をほぼ直接接続したBack to Back (BtoB) 構成でのビットエラーレート 2.4×10^{-4} における最小の受信感度はOMAで-13.5 ~ -14.0 dBmになります。また伝送路として40 kmの一般的なシングルモード光ファイバを接続した構成での最小の受信感度はOMAで-12.3 ~ -14.1 dBmになります。本結果から、AXELを搭載した4チャンネル光送信器とAPDを搭載した4チャンネル光受信器を組み合わせることで、強度変調方式を用い400 Gbit/s伝送サービスにおいて、伝送距離を40 kmまで拡大できる可能性があることを示しています。

おわりに

高出力なAXELチップと高感度なAPDチップを開発し、これらのチップを搭載した400 Gbit/s動作可能な小型4チャンネル光送受信器を実現しました。本開発の光送受信器により、低消費電力化が期待される、強度変調方式を用いた400 Gbit/s信号の40 km光ファイバ伝送という、長距離伝送を実現します。本開発のデバイス、ならびに光送受信器によって、より小型・低消費電力なネットワーク実現が期待されるとともに、IOWN構想実現に寄与するものと考えています。

参考文献

- (1) T. Shindo, N. Fujiwara, S. Kanazawa, M. Nada, Y. Nakanishi, T. Yoshimatsu, A. Kanda, M. Chen, Y. Ohiso, K. Sano, and H. Matsuzaki: "High Power and High Speed SOA Assisted Extended Reach EADFB Laser (AXEL) for 53-Gbaud PAM4 Fiber-Amplifier-Less 60-km Optical Link," Journal of Lightwave Technology, Vol. 38, No. 11, pp. 2984-2991, 2020.
- (2) M. Nada, T. Yoshimatsu, F. Nakajima, K. Sano, and H. Matsuzaki: "A 42-GHz Bandwidth Avalanche Photodiodes Based on III-V Compounds for 106-Gbit/s PAM4 Applications," Journal of Lightwave Technology, Vol. 37, No. 2, pp. 260-265, 2019.
- (3) S. Kanazawa, T. Shindo, M. Chen, N. Fujiwara, M. Nada, T. Yoshimatsu, A. Kanda, Y. Nakanishi, F. Nakajima, K. Sano, Y. Ishikawa, K. Mizuno, and H. Matsuzaki: "High Output Power SOA Assisted Extended Reach EADFB Laser (AXEL) TOSA for 400-Gbit/s 40-km Fiber-Amplifier-Less Transmission," Journal of

Lightwave Technology, Vol. 39, No. 4, pp. 1089-1095, 2021.

- (4) A. Kanda, T. Yoshimatsu, M. Nada, S. Kanazawa, Y. Nakanishi, F. Nakajima, H. Matsuzaki, and K. Sano: "400-Gbit/s High-Sensitivity APD-ROSA for 4 λ LAN-WDM 40-km Optical Link," OECC2020, T4-5-4, 2020.



(上段左から) 金澤 慈/ 進藤 隆彦 / 中西 泰彦/ 名田 允洋/ 葉玉 恒一

(下段左から) 陳 明晨/ 辰己 詔子/ 神田 淳/ 中村 浩崇

NTTデバイスイノベーションセンタの強度変調方式向け、高出力光送信器、高感度光受信器について紹介しました。IOWN構想のめざす、よりスマートな社会の実現に向けて、これからも光送受信器の基盤技術の研究開発に取り組んでいます。

◆問い合わせ先

NTTデバイスイノベーションセンタ
企画部

TEL 046-240-2403

FAX 046-270-3703

E-mail dic-kensui-p@hco.ntt.co.jp

大容量ネットワークの柔軟性を実現する C+LバンドCDC-ROADM

NTT未来ねっと研究所とNTTデバイスイノベーションセンタでは、CDC-ROADM (Colorless, Directionless, Contentionless - Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexing) と呼ばれる物理レイヤにおいてもっとも自由度の高い光ネットワーク構成のC+Lバンド化の検討を行いました。CDC-ROADMに不可欠なマルチキャストスイッチデバイスの動作波長範囲をC+Lの2つのバンドに拡大することで、構成がシンプルでバンドを意識することなく運用が可能なシームレスな光ノードが可能になります。

すずき
鈴木やまもと
山本きさか
木坂けんや
賢哉^{†1}しゅうと
秀人^{†2}よしあき
由明^{†2}はだま
葉玉たにくち
谷口こういち
恒一^{†1}ひろき
寛樹^{†2}NTTデバイスイノベーションセンタ^{†1}NTT未来ねっと研究所^{†2}

IOWNにおける

オールフォトニクス・ネットワークと 光ネットワークのマルチバンド化

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) を構成する3つの技術分野の1つであるオールフォトニクス・ネットワーク (APN) は、フォトニクス技術を活用し、現在のエレクトロニクス技術では実現困難な、情報処理基盤のポテンシャルの大幅な向上を達成しようというものです⁽¹⁾。APNでは、伝送容量を125倍にすること、ネットワークから端末のエンド・ツー・エンドで最大限光技術を導入することを目標に掲げています。大容量の光伝送には、空間多重技術などのまだ実用化されていない技術の適用に加えて、現在、光ネットワークに適用されている波長分割多重技術の拡大も重要です。すなわち、光ファイバ通信に用いる波長帯域を拡大することで大容量化を図ります。また、波長分割多重方式における波長帯域の拡大は、エンド・ツー・エンドでの光技術適用にも

有効です⁽²⁾。エンド・ツー・エンドで光技術を適用するには、開通可能な光パス数を増やす必要があります。この場合にも、波長分割多重技術における波長帯域の拡大は重要な課題の1つであるといえます。

ROADMネットワークの C+Lバンド化

光ネットワークにおいては、光を光のままルーティングするために光スイッチが重要です。これまでに光ス

イッチを用いた光ネットワークとして、各ノードにおいて光信号の分岐・挿入を可能とするROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexing) システムが導入されてきました。複数のリング間で電気再生中継を介さない光信号の転送を実現することで、ネットワークを柔軟に再構築することができ、運用やメンテナンスのコストの低減が可能です。近年は、図1に示すように従来の単一リングネットワークから、より経済的なマルチリングネット

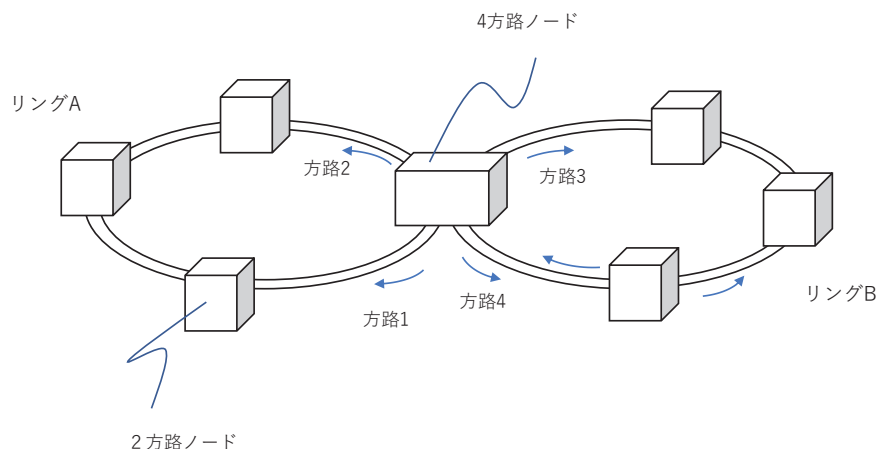


図1 マルチリングネットワークの例

ワークへの拡張も進められています⁽³⁾。

図2に示すCDC-ROADM (Colorless, Directionless, Contentionless - Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexing) と呼ばれる光ノード構成は、マルチリングやメッシュネットワークなどの多方路のネットワークにおいて効率的なデータ通信を行うための方式であり、通信資源の効率的な運用に有効であるのみならず⁽⁴⁾、激甚災害時の光伝送路断などの際の迅速な復旧にも寄与が期待されます⁽⁵⁾。

また、最近の光伝送技術のトレンドとして光信号のボーレート化に関する

議論があります⁽⁶⁾。高ボーレート化は大容量信号を長距離にわたって伝送するのに好適です。これは、同じビットレートの信号と比較したときに、高いボーレートの信号は多値度のレベルを低減することに寄与するため、信号対雑音比耐性を改善する効果が見込めるためです。しかし、高ボーレート信号は広い信号帯域幅を占有するため、ROADMシステムで利用可能な波長数を減少させるという課題を引き起こします。図2に示すように、例えば、100 Gbit/sの信号は32 GHz程度の占有帯域であり、現在用いられているC

バンド (1530~1565 nm) もしくはLバンド (1565~1625 nm) の波長帯域⁽⁷⁾において、それぞれ90波程度の波長チャンネルの配置が可能であるのに対して、64 GHz程度の占有帯域を持つ500 Gbit/s級の信号や、130 GHz程度の占有帯域を持つ1 Tbit/s級の信号では、それぞれ60波、もしくは30波程度配置されるのみです。この解決には、C、Lバンドの両方の波長帯の活用が効果的です。

C+LバンドCDC-ROADM

CDC-ROADMは、システムに設置された光送受信器をもっとも効率的に活用できる方式の光ネットワークノード構成です。光ノードは他の方路に存在する光ノードとの通信をつかさどる必要がありますが、CDC-ROADMノードでは、もっとも少ない制限で自ノードに設置された光送受信器を任意の方路との通信に使うことができ、通信リソースの有効活用に効果的です。

図3(a)は典型的なCDC-ROADMの構成です。CDC-ROADMは光クロスコネクタと光送受信器集約部の2つ

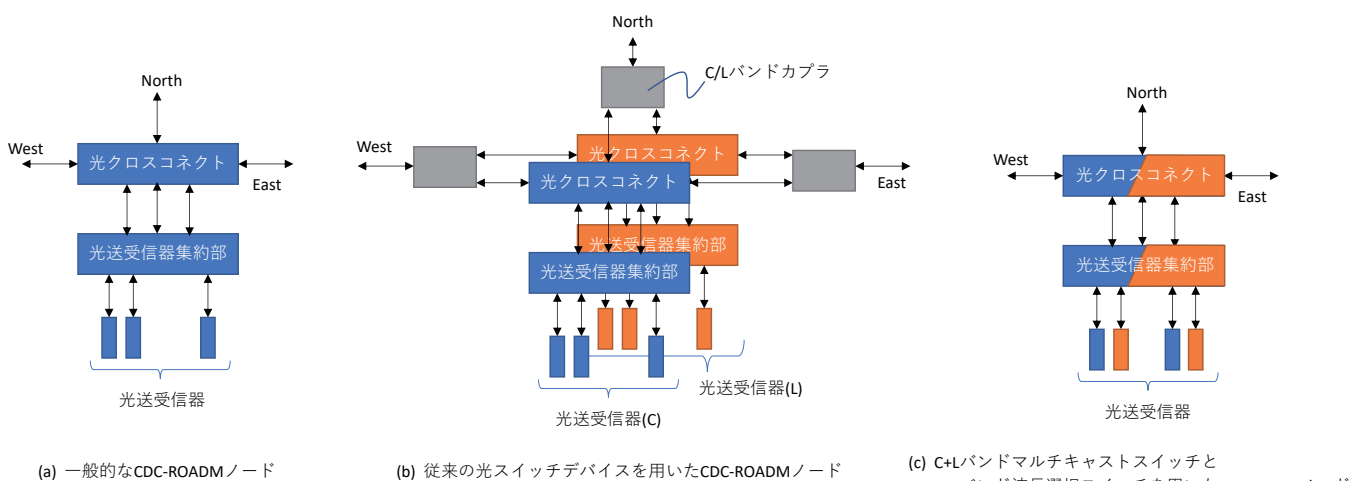
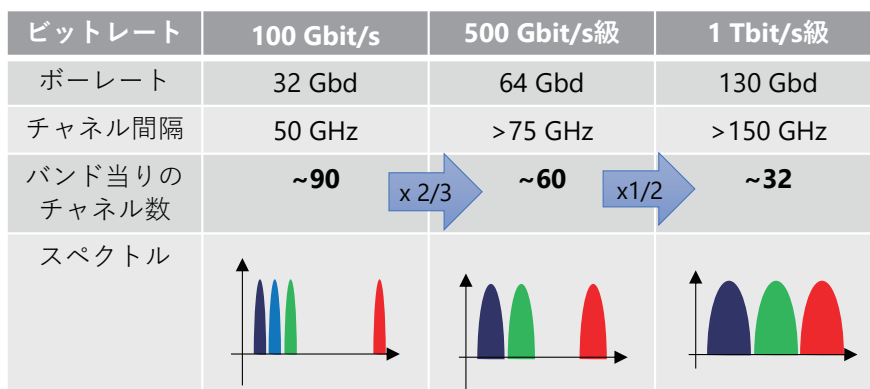


図3 CDC-ROADMノードの構成

から構成されます。光クロスコネクタ部は、異なる方路からの信号をそのまま他の方路にパスするか（例えば、WestからEastなど）、自ノードとの通信に使うかを切り替えます。光送受信器集約部は、自ノードで扱う光信号について光クロスコネクタ部と光送受信器の接続を制御します。CDC-ROADMでは光送受信器集約部がポイントです。従来のROADMシステムでは、光送受信器はある特定の方路との通信にしか使えない（Directioned）、もしくは同じ波長の光送受信器は1台しか扱えないか（Contensioned）という制約を有していました。CDC-ROADMは、マルチキャストスイッチ⁽⁸⁾と呼ばれる「光を光のままスイッチするデバイス」を用いることで、その方路の波長がすでに使われていない限り、任意の光送受信器を任意の方路との通信に使うことができる自由度の高い光ノード構成です。マルチキャストスイッチはNTTデバイスイノベーションセンタが世界に先駆けて実用化に成功したデバイスです。

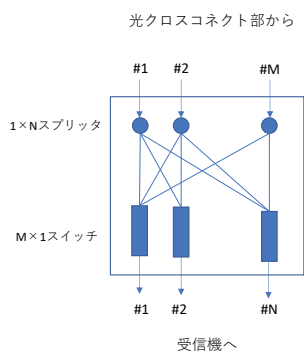
光伝送のマルチバンド化に伴って、これまではCもしくはLの単一のバンド構成されていたCDC-ROADMもマルチバンド化する必要があります。従来のCもしくはLバンドのみで動作する光スイッチデバイスを用いてCDC-ROADMを構成する場合は、図3(b)に示すような複雑な構成になってしまいます。光送受信器集約部、光クロスコネクタ部ともにCバンド用、Lバンド用を用意し、それぞれが扱う光信号をC/Lバンド合分波器で合波・分波して伝送ファイバとやり取りする必要があり、装置やデバイスの数は従来の単一バンドの場合に比べて倍増しま

す。加えて、バンドを意識しての光送受信器の設置など、運用においても複雑性を増す可能性があります。これに対して開発したC+Lバンドに動作波長帯域を拡大したマルチキャストスイッチを用いることで、図3(c)に示すような簡単な構成のCDC-ROADMノードが実現されます。Cバンド、Lバンドの光送受信器の設置時には、そのバンドを意識することなくC+Lバンド光送受信器集約部に接続すればよく、作業時のミス等の低減にも寄与すると考えられます。

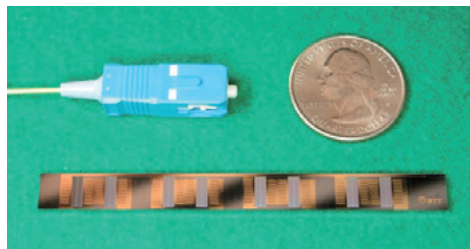
ところで、光送受信器集約部を構成するマルチキャストスイッチは、その構成上原理的に損失を有します。図4(a)は、M方路×N光送受信器を収容する典型的なマルチキャストスイッチデバイスの回路トポロジであり、自ノードで光信号を受信するドロップ側の例です。併せて図4(b)に、作製したC+Lバンドのマルチキャストスイッチの光回路チップの外観を示します。図4(a)に示されるとおり、マルチキャストスイッチは、入力された信号をN分岐するスプリッタが内包されます。これは、原理的な損失要因であり避けることはできません。したがって、分

岐数を可能な限り低減することが光伝送特性上好ましいですが、一方で分岐数を減らすと、達成可能なアドドロップ率も減少するという課題があります。

しかし、高ボーレート伝送を扱う場合は、分岐数を減らしたとしても、従来と同程度のアドドロップ率を保てるのが分かります。すなわち、130 Gbaudなどの高ボーレートのシステムでは、前述のとおりバンドに配置可能な波長の数も減少します。そのため、分岐数の減少によるアドドロップ率の低下は、従来の32 Gbaudのシステムと比較して同程度に保つことが可能です。表は、従来の32 Gbaud信号の単一バンドのシステムと130 Gbaud信号のC+LバンドのCDC-ROADM構成におけるアドドロップ率をまとめたものです。前者ではチャネル間隔を50 GHz、Cバンドに96信号を割当て、後者では間隔を150 GHz、CバンドとLバンドの両方で64信号を使用すると仮定しました。また、アドドロップ率は光クロスコネクタ部の波長選択スイッチの規模に依存しますが、本稿では、従来の単一バンドのみのシステムでは、単一バンドシステムが開発されたときに利用可能な



(a) マルチキャストスイッチの構成



(b) C+Lバンドマルチキャストスイッチ回路の外観

図4 マルチキャストスイッチ

表 マルチキャストスイッチの光送受信器側ポート数(分岐数)と信号ボーレートに対するアドドロップ率の依存性

	マルチキャストスイッチの光送受信器側ポート数				
	4	8	12	16	24
Cバンドノードにおいて32-Gbaud信号を扱う場合	6.8%	13.5%	20.3%	27.1%	40.6%
C+Lバンドノードにおいて130-Gbaud信号を扱う場合	13.0%	26.0%	39.1%	52.1%	78.1%

1×20 WSS (Wavelength Selective Switch) を想定し、C+LバンドROADMでは、最近実用化が始まった1×32 WSSを想定しています。表から分かるように、従来のCDC-ROADMで標準的な構成である8方路ポート、16光送受信器ポートのマルチキャストスイッチを用いたCバンドのみのシステムでは約27%のアドドロップ率であるのに対し、8光送受信器ポートのマルチキャストスイッチで130 Gbaud信号を用いたC+LバンドROADMでも26%のアドドロップ率が得られることが分かります。したがって、マルチキャストスイッチの分岐数を現在主流の16から8に半減させても、従来と同等の運用性を確保できるといえます。実際には、必要な平均アドドロップ率は、総波長数をROADMシステムの搭載ノード数で割った値で見積もるのが妥当です。したがって、ノード数が10程度のネットワークであっても、平均アドドロップ率は10%で済みます。表に示したケースでこの条件を満たすことが明らかです。

まとめと今後の展開

C+Lバンドで動作する光送受信器収容部を持つCDC-ROADMの構成について、その可能性について説明しました。また、前述したC+Lバンドマルチキャストスイッチを用いたC+L

バンドCDC-ROADMノードのフィージビリティ検証実験にも成功しています⁽⁹⁾。

マルチバンド技術は大容量化のみならず、伝送チャンネル数を拡大することでROADMシステムにおける自由度を高めるものです。信号の高ボーレート化に伴う伝送距離の拡大と相まって、光ネットワークの高度化に寄与する技術であるといえます。現在NTTではIOWN構想に向けてAPNの研究開発を進めています。今後は、APNの実現に向けて、1 Tbit/s級の高速化や、さらにSバンドなどのより広い波長帯域を活用する技術や、空間多重技術を用いることにより、伝送容量の飛躍的な拡大ならびに光伝送システムの高度化に向けて研究開発を進めていきます。

参考文献

- (1) <https://www.rd.ntt/iown/0008.html>
- (2) 寒川・富澤・岡田・後藤：“オールフォトニクス・ネットワーク、光電融合技術のめざす未来,” NTT技術ジャーナル, Vol.32, No.8, pp.6-9, 2020.
- (3) 松岡：“経済的なコア・メトロネットワークを実現する超高速大容量光トランスポートネットワーク技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.23, No.3, pp.8-12, 2011.
- (4) 坂巻・河合・福德：“より柔軟な光ノードを実現する光スイッチ技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.25, No.11, pp.16-20, 2013.
- (5) 前田・恵美奈・森澤・高科：“CDC技術を用いたつながり続ける光伝送ネットワークの実現,” NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル, Vol.27, No.4, pp.48-55, 2020.
- (6) 小木曾・尾崎・上田・脇田・金澤・石川：“100Gb超級光送信器実現に向けた超広帯域・低駆動電圧動作InP系IQ光変調器,” 電子情報通信学会論文誌C, Vol.J103-C, No.1, pp.61-68, 2019.

- (7) 川崎：“光ファイバ伝送専門委員会 標準類制定状況 2015年度第4四半期,” TTC report, Vol.30, No.3, pp.35-39, 2016.
- (8) T. Watanabe, K. Suzuki, and T. Takahashi: “Multicast Switch Technology that Enhances ROADM Operability,” NTT Technical Review, Vol.12, No.1, pp.1-5, 2014.
- (9) S. Yamamoto, H. Taniguchi, Y. Kisaka, S. Camatel, Y. Ma, D. Ogawa, K. Hadama, M. Fukutoku, T. Goh, and K. Suzuki: “First demonstration of a C+L band CDC-ROADM with a simple node configuration using multiband switching devices,” Optics Express, Vol.29, No. 22, pp. 36353-36365, 2021.



(上段左から) 鈴木 賢哉/ 葉玉 恒一/
山本 秀人

(下段左から) 谷口 寛樹/ 木坂 由明

光通信デバイスの開発、実用化を通じて、NTTグループや世界のネットワークの高度化に貢献していきます。

◆問い合わせ先

NTTデバイスイノベーションセンタ

TEL 046-240-2403

FAX 046-270-3703

E-mail dic-kensui-p@hco.ntt.co.jp

IOWNの実現に向けた メンブレン光変調器の開発

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想で重要となる高速大容量な光ネットワークを低消費電力で実現するためにSi (シリコン) フォトニクス回路上に化合物半導体を異種材料集積したメンブレン光デバイスの研究開発を行っています。メンブレン光デバイスはコア層への高い光閉じ込めを実現できることから高効率な直接変調レーザや光変調器としての展開が期待されています。本稿で光変調器および光変調器とレーザの集積を中心に現在の研究開発の状況を紹介します。

ひらき
開たつろう
達郎あいはら
相原たくま
卓磨ふじい
藤井たくろう
拓郎たけだ
武田こうじ
浩司せがわ
瀬川とおる
徹まつお
松尾しんじ
慎治

NTT先端集積デバイス研究所

光インターコネクションの進展と メンブレン光デバイス

光インターコネクションは、光ファイバの広帯域・低損失な特長から伝送容量が増大するほど、また伝送距離が長くなるほど電気を用いた情報通信より有利な技術であり、1980年代より長距離通信網において実用化されてきました。インターネットトラフィックの増大とともに、短距離においてもそのメリットが活かされ、現在ではボード間通信にも広く光インターコネクションが使われています。インターネット

に接続されるデバイス数の増大、さらに個々のデバイスからの通信量の増大により、トラフィックの増大は今後も引き続くと考えられるため、すでに光インターコネクションが適用されている領域での大容量化と図1に示すようなさらなる短距離化、具体的にはボード内、チップ内光インターコネクションが今後の研究課題となります。これらの極短距離の光インターコネクションは、ルータやサーバなどの電子機器のスループットの向上に向けて今後重要になってくると考えられています。

これらの課題を解決するうえで前提

条件として重要なのが、低消費電力化と低コスト化です。低消費電力化に向けては小さな電力で高速に光デバイスを変調することが重要となりますが、そのためにはコア層^{*1}の光閉じ込め係数^{*2}を極力大きくすることが必要です。低コスト化に向けては、光デバイスの場合、モジュール化コストの占める割合が大きいことから光集積回路化により複数の送受信素子と光フィル

*1 コア層：信号光を変調するために必要な光強度変化や屈折率変化が生じる領域。

*2 光閉じ込め係数：光導波路内の光とコア層の重なり割合。

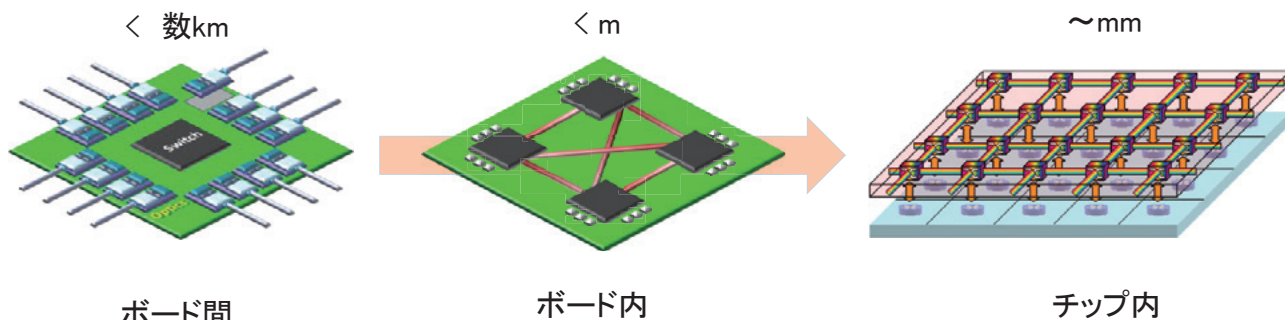


図1 光インターコネクションの短距離化の進展

タなどの機能素子を一体集積し、アセンブリコストを削減することにより大幅な低コスト化が期待されています。この際、Si（シリコン）電子回路で用いられる微細加工技術を利用して低損失な光導波路や高性能な光回路を作製できるSiフォトンクス技術を利用することが重要となります。一方で、Siではレーザや高効率な光変調器が作製できないため、大規模集積化に向けては化合物半導体であるInP（インジウムリン）系化合物半導体を用いた光デバイスの異種材料集積方法が課題となっています。

本稿では、私たちが検討を行っているSi基板上的のメンブレン光デバイスについて説明します。メンブレン光デバイスとは低屈折材料上に作製した薄膜光デバイスであり、私たちは、典型的には250 nm程度の膜厚のInP系化合物半導体を用いたレーザや変調器をSiO₂（二酸化ケイ素）/Si基板上に作製しています。デバイスの上下を低屈折率なSiO₂や空気で挟むことによりコア層の高い光閉じ込めを得ることができ、高い変調効率の直接変調レーザ^{(1)~(5)}や光変調器が作製可能となります。本稿では、光変調器について詳細に述べていきます。

メンブレン光変調器

光変調器は、屈折率を主に変調する位相変調器と吸収係数を変調する強度変調器の2種類に分類できます。位相変調器はマッハツェンダ干渉計と組み合わせたマッハツェンダ (MZ) 変調器として用いられ、複数のMZ変調器を組み合わせ、位相、強度、偏波を変調することにより一波長に対して1 Tbit/sを超えるような大容量化と長距離伝送が特長です。代表的な使用材料はLiNbO₃（ニオブ酸リチウム）、Si、InP系化合物半導体が挙げられま

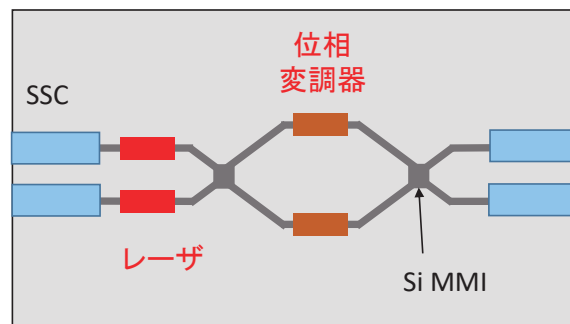
す。トラフィックの増大から将来的にはデータセンタ内のような2 km以下の短距離でも利用が必要になってくると考えられますが、その際には、素子サイズを小さくして大規模集積した低コスト化が重要となります。そのためにはLiNbO₃、Siと比較して一桁程度効率の良いInP系化合物半導体がキーデバイスと考えられます。

一方、強度変調器として代表的な材料はInP系化合物半導体とGeSi（ゲルマニウムシリコン）が用いられています。強度変調器は強度変化のみを信号として用いるためMZ変調器と比較すると一般的には伝送容量は小さくなりますが、構成がシンプルかつコンパクトであるため、より短い距離で大量の送信素子が必要となるときには重要

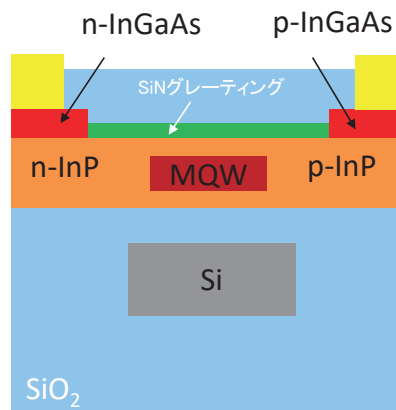
となります。データセンタで用いられる1.3ミクロン帯での利用を考えると、現状ではGeSiは成長に課題があり、InP系化合物半導体が有利となります。

図2 (a)はSiマッハツェンダ干渉計とInP位相変調器を用いたMZ変調器とメンブレンレーザを異種材料集積した光集積回路の構成を示しています⁽⁶⁾。Siフォトンクス技術の特長であるSSC（スポットサイズ変換器）^{*3}を

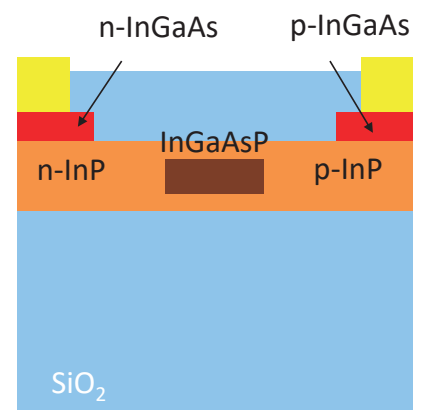
***3** SSC：通常、幅0.5ミクロン程度のSi導波路の先端を0.2ミクロン程度まで細くすることにより光をSi導波路の外に漏らし、外側に作製したSiO_xなどのSiO₂よりわずかに屈折率の高い第2コアに光を閉じ込める構造により、光のスポットの大きさをSi導波路からSiO_x導波路の大きさに変換する素子。これにより光ファイバとのスポットサイズの違いを吸収しレンズなしで高効率な光結合が可能となります。



(a) シリコンフォトンクス回路上のInP系化合物半導体レーザ位相変調器の集積チップの概略図



(b) メンブレンレーザ部分の断面構造図



(c) 位相変調器部分の断面構造図

※ レーザコア層にはMQW(multiple quantum well)層、変調器コア層にはInGaAsP層を用いています。

図2 シリコン導波路上に集積したInP系化合物半導体レーザおよび位相変調器の集積チップ

集積することにより、レンズを用いることなくデバイスを光ファイバと直接密着させることにより高効率にファイバとのアセンブリが可能となります。図2(b)および(c)はメンブレンレーザ、メンブレン位相変調器の断面構造です。変調器のバイアス用のレーザは連続光で高出力と安定したシングルモード性が求められるため、レーザコア層への光閉じ込めを小さくすることが重要となります。そのため、レーザコア層の下にSi導波路を配置しています。メンブレレーザ構造の等価屈折率がSi導波路と同程度であるため、Si導波路の幅を調整することでレーザコア層への光閉じ込め係数を調整できます。一方、位相変調器では、Si導波路はなくして閉じ込め係数を最大化できるようにしています。このように、Si導波路とメンブレン光デバイス間

で光の閉じ込めを自由に設計できることも、メンブレン光デバイスの特長です。

メンブレンMZ変調器とレーザの光集積回路の作製工程を図3に示します。作製手順は次のようになります。

①SOI (Si on Insulator) 基板を用いてSi導波路を作製し、導波路全体をSiO₂で覆った後にCMP (Chemical Mechanical Polish) を用いて平坦化、InP基板上に成長したレーザのコア層になるMQW (Multiple quantum well) 層を平坦化したSiO₂上に直接接合します。②レーザコア層となる部分を除いてMQW層を選択エッチングにより除去し、InP層を露出させます。③再成長によりInP薄膜上に位相変調器のコア層になるn型InGaAsP (インジウムガリウムヒ素リン) 層を成長させます。④レーザ、および位相

変調器のコアとなる部分を除きInP層まで選択エッチングにより除去します。⑤再成長により各コア層をドーピングしていないInP層で埋め込みます。⑥選択的ドーピングを行いn層、p層を形成します。⑦レーザ、位相変調器を分離し、レーザ領域にはグレーティングを形成します。⑧最後にSSCおよび電極を形成します。提案する作製方法の特長はSi基板上で化合物半導体の再成長を行うことです。メンブレン光デバイスの総膜厚が230 nm程度と薄膜のため、SiとInP系半導体の熱膨張係数差に伴う歪に対して耐性を持つことにより、Si基板上での再成長が可能となります。これにより、レーザ活性層と位相変調器層などの異なるバンドギャップを持つInP系半導体を一度に作製可能になります。また、コア層形成時の位置合わせにSi基板上のステッパー用マーカを使用するため、Si導波路とメンブレン光デバイスのコア層をステッパーの位置合わせ精度で集積可能、という特長を持ちます。

作製したデバイスの特性を図4に示します。レーザ活性層および位相変調器のコア層の長さは500ミクロンとしました。Siフォトリソで用いられるSi位相変調器では数mmの長さを持つこと、また、レーザ集積できていることから大幅な小型化が実現されました。図4(a)はMZ光変調器をオフ状態に設定したときの出力光強度の電流依存性を示しています。測定温度25℃と80℃においてレンズ付きファイバで受光した場合の結果を示しています。ファイバを直接結合させて受光することも可能ですが、今回は実験の簡略化のためにレンズ付きファイバを用いました。この場合、素子端面で反射が起こるため、図に示されるようにモードホッピングが生じています。しきい

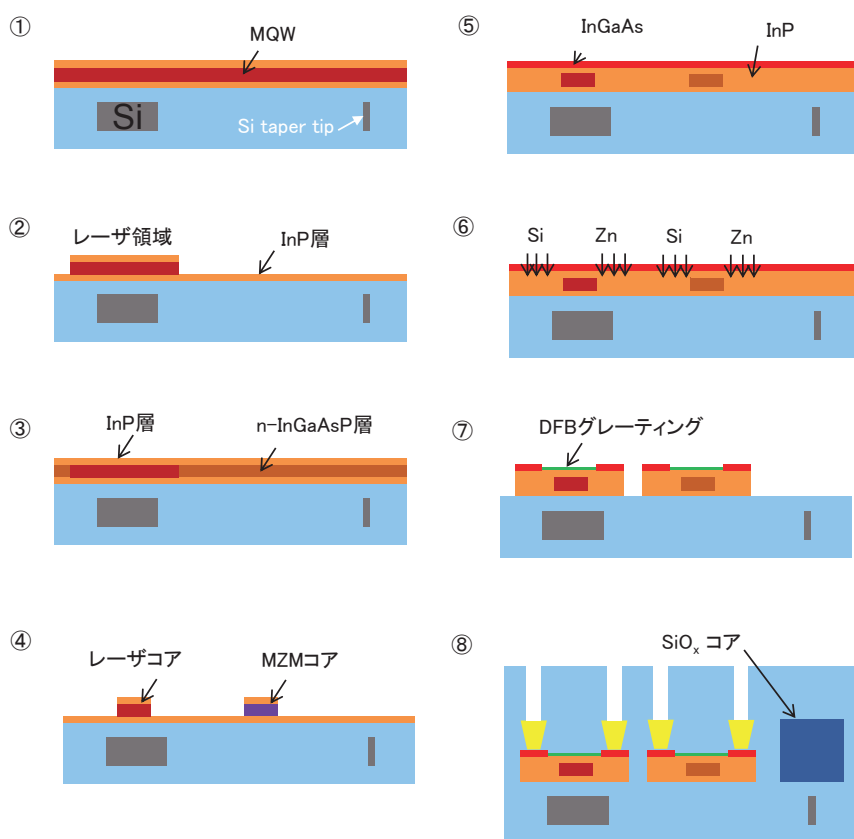


図3 シリコンフォトニクス回路上異種材料集積デバイスの作製工程

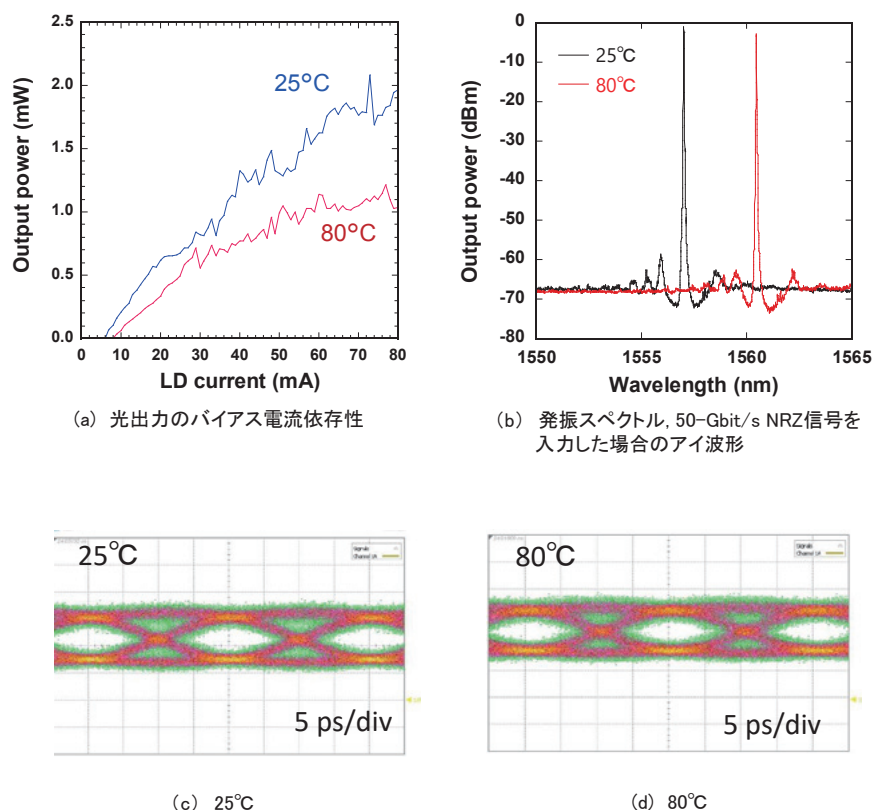


図4 作製したレーザ集積MZ変調器の特性

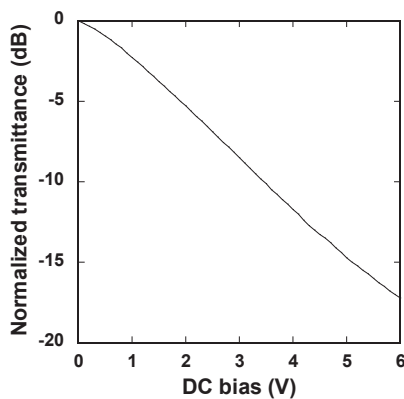
値電流は25°Cで約6 mA、80°Cで約8 mAでした。25°Cではレンズ付きファイバで最大2 mW、80°Cでは1 mWの出力を得ました。なお、ファイバ結合損失は3 dBでした。図4(b)は25°Cと80°Cで、それぞれバイアス電流76.0 mA、50.6 mAでの発振スペクトルを示しています。シングルモード発振が得られており、80°Cのときの横モード抑圧比は59 dBと良好な値を得ました。図4(c)、(d)は50-Gbit/s NRZ (Non Return to Zero) 信号で変調した場合のMZ変調器の動特性を動作温度25°Cと80°Cの場合で示しています。片側の位相変調器にピーク電圧2.5 Vの電気信号を入力し、50オーム終端しています。消光比は3 dB程度と低いもののどちらの温度でも明瞭なアイ開口を確認しました。消光比に関しては、差動動作させ、もう片方の位相変調器にも反転した信号を印加すること

などで改善することが可能です。また、位相変調器の電極は集中定数電極を用いコア層は500ミクロンと比較的長いのですが、メンブレン構造の低容量のおかげで50-Gbit/s NRZ信号でも動作しています。

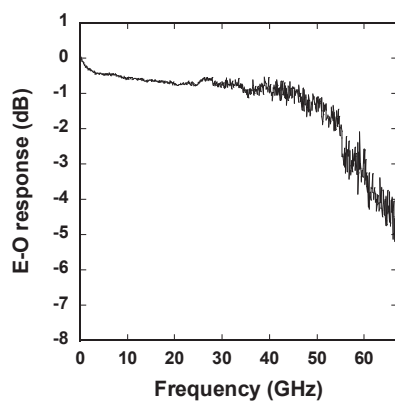
次に、InP系半導体を用いた強度変調器について述べます⁽⁷⁾。強度変調器としては電界吸収型変調器 (EAM) が用いられますが、これは動作波長付近にバンドギャップを持つ半導体に電界を印加することにより、バンドギャップが長波長側にシフトして吸収係数が変化する現象を用いています。吸収量を直接変化させるためMZ変調器のように干渉計を用いる必要がなく非常にシンプルな構成となります。そのため、InP基板上のEAMは通常100~300ミクロン程度のコア層の長さでレーザと集積されデータセンタ内で広く用いられています。しかし、InP基板上

EAMは素子容量により動作速度が制限されており、高速化のためには50オーム終端を用いることや、さらには進行波型電極の適用が必要となりますが、アレイ化してコンパクトな光集積回路の作製や低消費電力化には課題が残ります。そこで、低容量なメンブレン構造を用いたEAMが注目されています。構造は位相変調器と同様にコア層への光閉じ込め係数を大きくすることが重要であることから、EAMコア層の直下にはSi導波路は置かない構造で素子を作製しました。コア層にはフォトルミネッセンスピークが1230 nmの9層MQWを用いました。動作波長を1280 nmとした場合の透過率の電圧依存性を図5(a)に示します。コア層長が200ミクロンの素子の場合、バイアス電圧が0から3 Vまで変化させることにより8.5 dBの消光比が得られることが分かります。ファイバ結合損を除いたEAMの挿入損失はSi導波路との比較から3 dBと見積もられます。図5(b)は小信号応答特性を示しています。動作波長は1280 nm、バイアス電圧を2 Vと設定しました。この実験では50オーム終端を用いていません。図より3 dB帯域は59 GHzとなります。

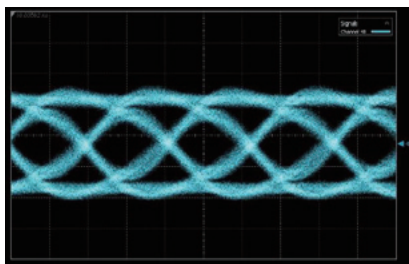
次に100-Gbit/s NRZ信号でのアイ波形を測定しました。図5(c)、(d)はそれぞれ入力電気信号、光出力信号です。EAMのバイアス電圧は1.2 Vとしました。パルスパターン発生器からのピーク電圧0.12 Vの電気信号を電気線形アンプ22 dBで増幅し50オーム終端していないEAMに印加しました。入力電気波形と比較して遜色ないアイ波形が得られており、消光比としては4.6 dBが得られました。MZ変調器と同様の作製工程でレーザ集積も可能なため、ボード内などのより短い距離の光インターコネクションへの適用が期待



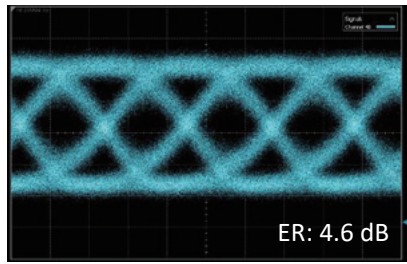
(a) 消光特性



(b) 小信号応答特性, 100-Gbit/s NRZ信号を入力した場合のアイ波形



(c) 入力電気信号



(d) 出力光信号

図5 作製した電界吸収型光変調器の特性

- (5) K. Takeda, T. Sato, A. Shinya, K. Nozaki, W. Kobayashi, H. Taniyama, M. Notomi, K. Hasebe, T. Kakitsuka, and S. Matsuo: "Few-fJ/bit data transmissions using directly modulated lambda-scale embedded active region photonic-crystal lasers," Nature Photonics, Vol. 7, pp. 569 – 575, 2013.
- (6) T. Hiraki, T. Aihara, T. Fujii, K. Takeda, Y. Maeda, T. Kakitsuka, T. Tsuchizawa, and S. Matsuo: "Integration of a high-efficiency Mach-Zehnder modulator with a DFB laser using membrane InP-based devices on a Si photonics platform," Optics Express, Vol. 29, pp. 2431-2441, 2021.
- (7) T. Aihara, T. Hiraki, Y. Maeda, T. Fujii, T. Tsuchizawa, K. Takahata, T. Kakitsuka, and S. Matsuo: "60-GHz-bandwidth O-band Membrane InGaAlAs Electro-Absorption Modulator on Si Platform," GFP 2021, Malaga, Spain, Dec. 2021.
DOI: 10.1109/GFP51802.2021.9674001.

されます。

今後の展開

メンブレン光変調器は、高い光閉じ込め係数と低容量化という2つの特長から高速で低消費電力な変調器の作製に適していることを述べました。これらに加え、SSCが集積されていることからファイバレイ等との結合も容易になります。また、Si回路上に集積できていることから、波長多重技術を適用するときSi導波路で作製した合波回路との集積も可能です。したがって、高密度に光デバイスを集積化し、単位長さ当りのスループットを最大化させることが重要な距離の短い光インターコネクションのキーデバイスとして期待されます。

参考文献

- (1) 武田・藤井・岸・鹿間・脇田・西・佐藤・土澤・瀬川・佐藤・松尾: "高密度・低消費電力な短距離光インターコネクションに向けたデバイス技術," NTT技術ジャーナル, Vol. 32, No. 8, pp. 15-22, 2020.
- (2) T. Fujii, K. Takeda, N-P. Diamantopoulos, E. Kanno, K. Hasebe, H. Nishi, R. Nakao, T. Kakitsuka, and S. Matsuo: "Heterogeneously Integrated Membrane Lasers on Si Substrate for Low Operating Energy Optical Links," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 24, No.1, 1500408, 2016.
- (3) H. Nishi, T. Fujii, N-P. Diamantopoulos, K. Takeda, E. Kanno, T. Kakitsuka, T. Tsuchizawa, H. Fukuda, and S. Matsuo: "Monolithic Integration of an 8-channel Directly Modulated Membrane-laser Array and a SiN AWG Filter on Si," ECOC 2018, Paper Th3B.2, Roma, Italy, Sept. 2018.
- (4) T. Kishi, H. Wakita, K. Shikama, M. Nagatasni, S. Kanazawa, T. Fujii, H. Nishi, H. Ishikawa, Y. Kawajiri, A. Aratake, H. Nosaka, H. Fukuda, and S. Matsuo: "A 25-Gbps x 4ch, Low-Power Compact Wire-Bond-Free 3D-Stacked Transmitter Module with 1.3- μ m LD-Array-on-Si for On-Board Optics," OFC 2019, Paper Tu21.1, San Diego, U.S.A., March 2019.



(左から) 相原 卓磨/ 開 達郎/
藤井 拓郎/ 松尾 慎治/
武田 浩司/ 瀬川 徹

IOWNの実現に向け今後ともメンブレン光デバイスの研究開発を続けていきます。

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所

企画担当

E-mail sende-kensui-p@hco.ntt.co.jp

電流注入結合フォトニック結晶レーザーを用いた例外点縮退の観測

結合共振器や結合導波路に増幅利得や吸収損失の差を導入した系は非エルミート光学系と呼ばれ、実用性が期待される数々の新奇現象を示すことが報告されてきました。私たちは、非エルミートナノフォトン技術の確立へ向け、利得および損失の精緻な制御が可能な電流注入フォトニック結晶レーザーの結合系を実現しました。本稿では、同素子による、例外点と呼ばれる非エルミート系特有のモード縮退と、それによる特異な発光増強の実証について紹介します。

非エルミートフォトン

光信号を生成し制御するためには、レーザー、変調器、光検出器といった素子が必要です。これらは、光波を誘導放出により増幅したり、信号線から放出したり、あるいは半導体に吸収させたりして、光強度を変化させます。電磁気学におけるマクスウェル方程式では、媒質における増幅利得や吸収損失は、その屈折率の虚部として表されます。有限の屈折率虚部を持つ媒質により構成された共振器や導波路では、存在可能な光波の状態（固有モード）の周波数や伝搬定数（固有値）も一般に複素数になります。そして固有値の虚部は、共振器での光閉じ込め時間ないし、導波路での光伝搬距離に応じた光学利得または損失のレートに対応します。

注目する物理量（この場合は光波）に関してエネルギーが保存する過程に基づく系をエルミート系と呼ぶのに対

し、このような、エネルギーの保存しない過程に基づく系のことを、非エルミート系と呼びます。非エルミート光学系のモード固有値は上記のとおり複素数となるため、光波はキャリアの応答が飽和するまで増幅または吸収され続ける、あるいは系から放出され続けるといったことが起こります。加えて、エルミート系とは異なり、非エルミート系では固有モードどうしが一般に直交しません。エネルギー散逸のない、完全に閉じた系の測定はそもそも不可能であることを考えれば、私たちが観測する状態はすべて、程度の差はあれ非エルミート系のものだということになります。しかし、これらは実は完全には独立ではなく、多かれ少なかれ、他の状態と混ざっているというわけです。多くの場合で近似的に用いられるエルミート系の枠組みと比べると、このような非エルミート系の応答は、はるかに多様でとらえづらいものよう

に思われます。また、従来フォトニクスの分野では、利得や損失は文字どおり光波の強度を制御するためのものという見方が強く、それ以外の用途へ向けた原理現象の模索は限られていました。

■PT対称性

これらの情勢の転機となったのが、セントラルフロリダ大学のChristodoulides教授のグループによる、PT対称性 (Parity-Time symmetry) の概念のフォトンへの導入⁽¹⁾です。PT対称性のPは空間反転を意味します。これは、空間内に中心軸ないし対称面（両面鏡）を設定し、それに対して系を反転させる（鏡の中の世界に移る）ことに対応します。Tは時間反転を表し、ここでは利得を損失に、損失を利得に逆転させることを意味します。ある系にこれらの操作を両方行ったときに、元に戻ることをPT対称であるといいます。元々PT対称性は量子力学において注目を集めていた概念ですが、

たかた 高田	けんた ^{†1, 2} 健太	のぞき 野崎	けんご ^{†1, 2} 謙悟
くらもち 倉持	えいいち ^{†1, 2} 栄一	まつお 松尾	しんじ ^{†1, 3} 慎治
ただた 武田	こうじ ^{†1, 3} 浩司	ふじい 藤井	たくろう ^{†1, 3} 拓郎
きた 北	しょうた ^{†1, 2} 翔太	しんや 新家	あきひこ ^{†1, 2} 昭彦
のうとみ 納富	まさや ^{†1, 2} 雅也		

NTTナノフォトンセンタ^{†1}

NTT物性科学基礎研究所^{†2}

NTT先端集積デバイス研究所^{†3}

Makrisらは、光学系の屈折率分布において、上記の意味でのPT対称性（のアナロジー）が成立することを示しました。そして、そのような系では、例外点（Exceptional point）と呼ばれる特異なモード縮退が現れることを明らかにしました。

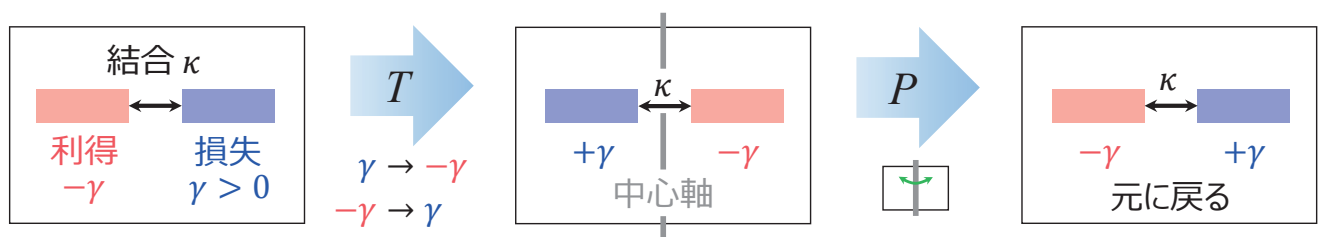
PT対称な光学系の特性を、図1(a)のような結合二共振器系を例にとって説明します。それぞれの共振器は、単独では全く等しい共鳴周波数の固有モードを持つとします。それらが波長オーダの間隔で並べられたとき、一方の共振器モードのうち、わずかな場がエバネッセント波^{*1}により他方に染み出すことで、互いに結合します。2つの共振器が等しいレートの損失 γ と利得 $-\gamma$ を持つとき、系はPT対称となります。

■例外点相転移

共振器間結合レートを κ と置き、釣り合った共振器利得・損失レートの絶対値 γ を変化させたとき、系の応答がどう変わるかを図1(b)に示します。左右のプロットは、それぞれ単一共振器モード周波数 ω_0 を基準にした結合系固有モード周波数（複素固有周波数実部）、およびそれらの正味損失レート（同虚部、負値は利得）を表します。 $\gamma=0$ の場合はエルミート系に対応し、2つの固有モード周波数は結合により 2κ だけ分裂します。また、固有モード分布は対称モード、反対称モードと呼ばれる2つの直交した状態になります。 γ を増加させると、周波数分裂は小さくなっていき、 $\gamma=\kappa$ にかけて急速にゼロへと変化します。このとき、二共振器に同じだけの強度の光が

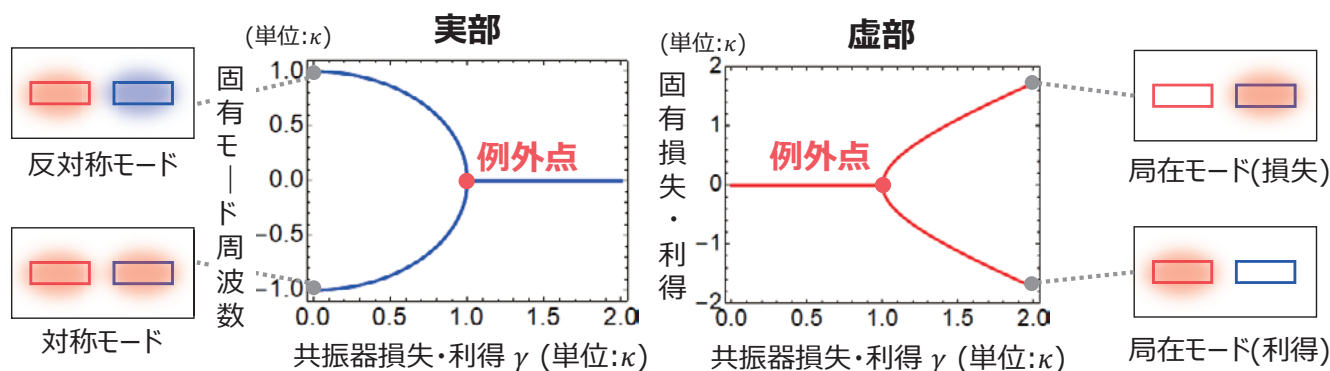
分布するため、固有モードの利得・損失は丁度釣り合い、そのレートはゼロとなります。 $\gamma>\kappa$ になると、2つの固有モード周波数は等しいままで、今度は固有損失・利得レートが正負の二値へ急峻な分裂を示します。ここでは結合系にもかかわらず、 γ の増加により固有モードは局在していき、利得を持つ共振器に局在するものは利得、他方は損失を受けます。各共振器の利得・損失と結合のレートが等しくなり（ $\gamma=\kappa$ ）、2つの固有モード周波数が一致する瞬間では、固有損失・利得レートも分岐する直前で、等しくゼロ

*1 エバネッセント波：フォトニック結晶やミラーなど、ある波長域において伝搬モードがないような媒質で光が反射されるときに、指数的な空間減衰を伴って媒質内に浸入する微弱な光波のことを指します。



(a) 結合二共振器系のPT対称性。κ：結合レート。γ：単一共振器モードの損失レート（負値は利得を表す）。

$$\text{結合系複素固有周波数：}\omega - \omega_0 = \pm\sqrt{\kappa^2 - \gamma^2}$$



(b) 結合系複素固有周波数および固有モードの例外点相転移。モード図の赤円・青円は互いに逆位相の場を表す。 ω_0 ：単一共振器の共鳴モード周波数。

図1 結合二共振器のPT対称性および例外点相転移

になっています。このとき、2つの異なる状態がたまたま同じ複素周波数を持つのではなく、固有モード分布も全く同じになるため、実は状態は1つになっています。この意味での縮退が、例外点と呼ばれる非エルミート系特有の現象です。例外点は、系全体に広がったモードから、一方の種類の共振器に局在したモードへの相転移点であるともいえます。

これまでに、主に例外点の周りの上記の状態変化に基づく、数々の新奇現象が報告されています。詳細については参考文献(2)に譲りますが、非相反伝搬^{*2}や単一モード発振、周波数振動効果の増強など、応用への展開が期待されるものも多いため、近年注目を

集めています。例えば非相反伝搬は、反射などによる戻り光からレーザーを保護する光アイソレータの実現に必要な条件です。光アイソレータの集積は技術的に困難とされていますが、チップ内で完結した光情報処理を行ううえで重要な要素です。例外点近傍の非相反特性は利得飽和に基づき、入力光強度依存性を有するため実用化には壁がありますが、研究の進展が期待されています。

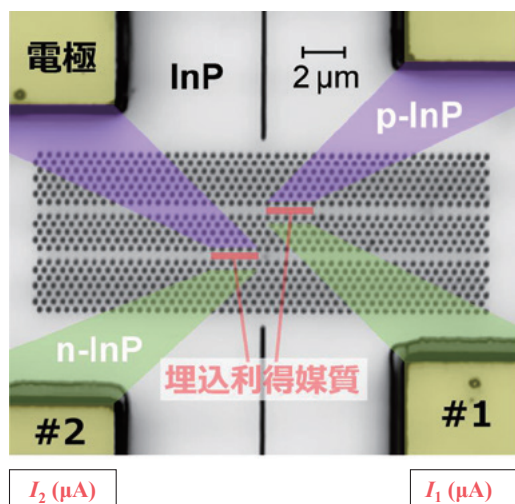
結合フォトニック結晶レーザによる例外点縮退の観測

一方で、いくつかの技術的課題から、フォトニクスにおける例外点縮退そのものの観測例は非常に少ないのが実情です。その1つは、利得や損失の精緻な制御が必要になる点です。例外点は、文字どおり利得・損失パラメータ空間における一点であり、その周りで

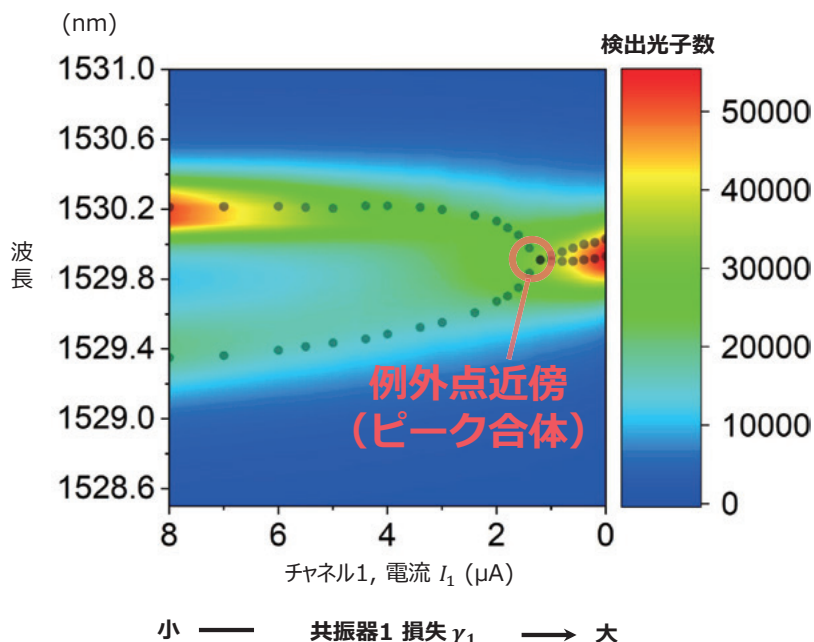
は複素固有周波数が大きく変化します。そのため、例外点縮退を観測するには、個々の共振器の利得・損失を独立かつ連続的に制御する必要があります。もう1つは、利得・損失の制御に伴う個々の共振器周波数の変化です。前述の制御性を備えた結合共振器の候補としては、複数のオンチップ半導体レーザの集積系が第一に考えられます。しかし、これらの駆動には熱や自由キャリアの発生が伴うため、利得・損失差の導入時に各共振器媒質の屈折率実部も変化し、個々の共振器モード周波数がずれてしまいます。この周波数離調により例外点は消失してしまうことが知られているため、可能な限り励起効率の高いレーザを用い、この影響を小さく抑える必要があります。

■電流注入結合フォトニック結晶レーザ

そこで私たちは、図2(a)のような



(a) 素子顕微鏡像（グレースケール）および構成図（色付き）



(b) $I_2 = 100 \mu\text{A}$ における素子発光スペクトルの I_1 依存性。
黒点：解析により推定された理論固有波長。

図2 電流注入結合フォトニック結晶レーザにおける例外点相転移

電流注入フォトニック結晶レーザの結合系を作製しました⁽³⁾。この系は、空中に保持されたインジウムリン薄膜に直径200 nm程度の空気穴の配列を開けた二次元フォトニック結晶と、穴のない線欠陥部分に埋め込まれた、量子井戸を含む波長スケールの利得媒質^{*3}からなるナノ共振器2つ(図中赤色に着色)を持ちます。また、図のように四隅の電極部分(黄色)から埋込媒質へ、斜め方向にpドープ層(紫色)およびnドープ層(緑色)が形成されており、これらが面内の電流注入チャンネルを構成しています。この構造により、チャンネル間の漏れ電流が抑制されるため、各共振器の利得・損失の独立制御が可能です。さらに、このような埋込媒質型フォトニック結晶レーザは、世界最小の発振しきい値電流を実現しているデバイス技術です⁽⁴⁾。そのため、系の低電流駆動により、熱やキャリアによる共振器周波数離調の影響を最小限に抑えられます。

図2(a)の右、左の共振器および電流チャンネルの番号を1, 2、各チャンネルの電極間電流値をそれぞれ I_1 , I_2 とし、 I_1 , I_2 を制御しながら系の発光スペクトルを調べました。その結果、 $I_2=100\text{ }\mu\text{A}$ に固定し、 I_1 を減少させていくと、明瞭な例外点相転移を観測することが分かりました。図2(b)に、このときの各 I_1 に対する発光スペクトルの遷移をカラープロットにしたものを示します。ここでの I_2 の値は、共振器2が元々持つ吸収や放射による損失 γ_2 が、電流注入により補償される条件です($\gamma_2\sim 0$)。対して、共振器1では有限の損失 γ_1 が残っているため、系全体はレーザ発振せず、微弱な自然放光が観測されます。 I_1 が小さくなるにつれ、2つの結合モード発光ピークが互いに近づき、合体するの

見られます。これは、 I_1 の減少により γ_1 が増加し、二共振器の損失の差が大きくなることで、図1(b)と同様の固有モード周波数変化が起こるためです。ここで、理論モデルを用いたスペクトルのフィッティングにより、各共振器モードの周波数や共振器間結合 κ 、および損失 γ_1 を見積ることができます。その結果、 $I_1=1.4\text{ }\mu\text{A}$ 近傍の条件が非常に例外点に近く、またこのとき、弊害となる二共振器の周波数離調も非常に小さくなっていることが分かりました。これは、フィッティング結果から算出した理論固有波長(図2(b)黒点)が、当該の領域で一点に合わさることからも見て取れます。 I_1 をさらに小さくすると、損失が大きくなるにもかかわらず、ピーク光子数が増大することが分かります。これは、固有モードのうちの1つが注入電流の大きい共振器2に局在化することで、共振器1の損失の影響を受けにくくなるためであると考えられます。このことも、図1(b)で説明した例外点相転移を強く示唆しています。

■例外点における自然放出スペクトル

加えて、観測された例外点ごく近傍の発光スペクトルが、特異な発光増強を示唆することも明らかにしました。実験のように、片方の共振器の損失が補償され、もう一方が損失を持つ場合でも、結合が大きい場合の自然放出スペクトルは分裂した2つのローレンツ関数^{*4}として表されます(図3(a)青色)。これに対し、例外点では発光スペクトルがローレンツ関数の「二乗」の形状になります⁽⁵⁾(図3(a)赤色)。系がエルミート系に近似できるようなときには2つのモードはほぼ独立ですので、仮にそれらのピークが偶然重なることがあっても、発光スペクトルはそ

れらの和、つまりピーク強度が2倍のローレンツ関数にしかありません。これに対し、例外点では2つのモードが全く同じ状態に縮退しますので、ピークが合体する際に強め合いの干渉を起こします。もし、系のエネルギーを常に保存する結合 κ のみを変え、それ以外の要素を一定に保ちながら状態を例外点へと変化させることができるならば、純粋な例外点縮退によるスペクトル変化が得られます。この場合、干渉による強度変化が最大限得られ、例外点スペクトルのピーク強度は、分裂した個々のローレンツ関数と比べて $(1+1)^2=4$ 倍になります。エネルギー保存のため、図3(a)の2つのスペクトルの総積分パワーは同じであり、かつ固有モード損失も等しいのですが、例外点では干渉によりピーク強度が増強した分、スペクトル形状がローレンツ関数二乗型に変化し、線幅がローレンツ関数のピークより細くなるのです。

今回の素子で制御できるのはレーザ間の結合ではなく各レーザの利得・損失です。測定結果には、損失 γ_1 の増加によりピーク強度が減少する効果が重畳していますので、直接観測された例外点縮退によるピーク強度増強の割合は30%程度です。しかし、図3(b)のように、例外点に一番近い $I_1=1.4\text{ }\mu\text{A}$ における素子発光スペクトルが、

*3 利得媒質：短波長光の照射や電流注入の下で電気キャリアの反転分布を形成し、それに基づく誘導放出により、自然放出波長域の光を増幅できる媒質を指します。本実験では、電流注入のない、または小さい利得媒質が、光吸収体として働くことを用いています。

*4 ローレンツ関数：指数的なエネルギー減衰を示す、一般の共振器による応答(今の場合、自然放出に基づく発光)のパワースペクトル形状を表す関数の名前です。ノイズの影響が大きい場合、この形状はガウス関数型になってしまいます。本実験におけるスペクトル解析は、デバイスの低ノイズ電流駆動、および長時間積算による低ノイズ測定により成り立っています。

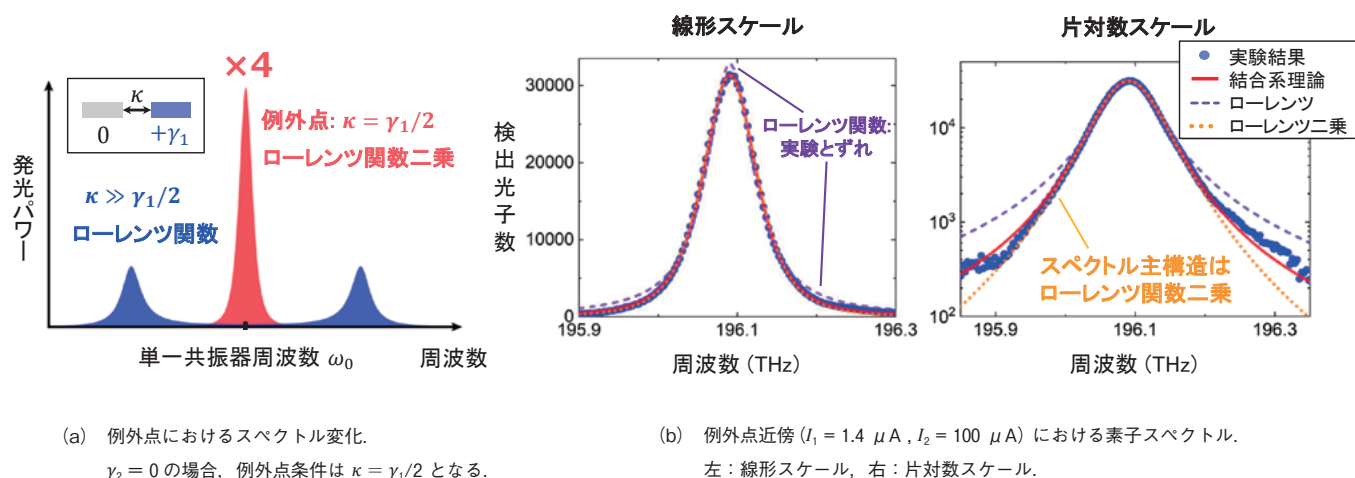


図3 例外点縮退による自然放出増強の実験実証

ローレンツ関数の二乗型となっていることも観測できました。この結果は、系がほぼ完全な例外点縮退下にあることを示唆します。またこのことは、発光モードの線幅に対して複素周波数分裂が十分小さい条件まで系が例外点に近づけば、例外点縮退の効果が明瞭に観測できることを意味しています。

今後の展望

本稿では、電流注入結合フォトニック結晶レーザを用いた例外点縮退の観測について紹介しました。私たちは、結合レーザアレイの例外点を用いた光の群速度制御⁽⁶⁾や、利得・損失による光トポロジの制御⁽⁷⁾等の理論提案も行っています。より大規模な系を用いたこれらの実証や、さらなる新原理・現象の発見へ向け、日々研究を行っています。

参考文献

- (1) K. G. Makris, R. El-Ganainy, D. N. Christodoulides, and Z. H. Musslimani: "Beam Dynamics in PT Symmetric Optical Lattices," Phys. Rev. Lett., Vol. 100, No.10, 103904, 2008.
- (2) Ş. K. Özdemir, S. Rotter, F. Nori, and L. Yang: "Parity-time symmetry and exceptional points in photonics," Nat. Mater., Vol. 18, No. 8, pp. 783-798, 2019.
- (3) K. Takata, K. Nozaki, E. Kuramochi, S. Matsuo, K. Takeda, T. Fujii, S. Kita, A.

Shinya, and M. Notomi: "Observing exceptional point degeneracy of radiation with electrically pumped photonic crystal coupled-nanocavity lasers," Optica, Vol. 8, No. 2, pp. 184-192, 2021.

- (4) K. Takeda, T. Sato, A. Shinya, K. Nozaki, W. Kobayashi, H. Taniyama, M. Notomi, K. Hasebe, T. Kakitsuka, and S. Matsuo: "Few-fJ/bit data transmissions using directly modulated lambda-scale embedded active region photonic-crystal lasers," Nat. Photon., Vol. 7, No. 7, pp. 569-575, 2013.
- (5) A. Pick, B. Zhen, O. D. Miller, C. W. Hsu, F. Hernandez, A. W. Rodriguez, M. Soljačić, and S. G. Johnson: "General theory of spontaneous emission near exceptional points," Opt. Express, Vol. 25, No. 11, pp. 12325-12348, 2017.
- (6) K. Takata and M. Notomi: "PT-Symmetric coupled-resonator waveguide based on buried heterostructure nanocavities," Phys. Rev. Appl., Vol.7, No.5, 054023, 2017.
- (7) K. Takata and M. Notomi: "Photonic topological insulating phase induced solely by gain and loss," Phys. Rev. Lett., Vol. 121, No. 21, 213902, 2018.



(上段左から) 高田 健太/ 野崎 謙悟/
倉持 栄一
(中段左から) 松尾 慎治/ 武田 浩司/
藤井 拓郎
(下段左から) 北 翔太/ 新家 昭彦/
納富 雅也

前稿の上梓からおおよそ4年が経ちました。本研究はたくさんの方々の協力の下で行われましたが、それでも、測定系の構築や装置の購入に始まり、実験、解析、論文執筆とその出版に至るまで、長い時間を要したことを実感しています。

◆問い合わせ先

NTTナノフォトニクスセンター
 TEL 046-240-4308
 FAX 046-240-4305
 E-mail kenta.takata.ke @ hco.ntt.co.jp

主役登場

未来のネットワークを支える
半導体レーザ

進藤 隆彦

NTTデバイスイノベーションセンタ
主任研究員

私が入社以来携わってきた光通信用の半導体レーザは、今や現代の情報通信インフラを支える基幹技術の1つといえます。一見地味な研究テーマにもみえますが、昨今のスマートフォンに代表されるモバイル端末の普及、SNSや動画配信といったサービスの多様化に伴い、光ファイバ網を伝達される情報量は飛躍的に増大しており、これらを担う半導体レーザなどの光部品の高性能化が非常に重要になっています。特に、私の研究グループが開発を進める半導体レーザは、一般家庭やオフィスなどをつなぐアクセス系や、クラウドサービスを担うデータセンタなど比較的短距離な領域で使用されるデバイスです。より多くの人に通信サービスを提供するためには、その性能だけではなく消費電力や設備面のコストが重要な領域といえます。光ファイバ網では無数に設置された半導体レーザが光の明滅による光信号を送信しており、これらには先人の研究者が世に送り出した技術が使われています。今後も、ますます多様なサービスやコンテンツが登場しデータ通信量の増大が予想されています。この要望に対応し、誰でもどこでも使えるネットワークの実現に向けて研究開発を行っています。

そこで私たちのグループでは、より効率良く光を発し伝送距離を延ばすことができる高出力な半導体レーザをめざし、レーザと同じチップ内に半導体光増幅器 (SOA) を集積した半導体レーザ (通称 AXEL) の開発を進めています。この AXEL は一辺が 1mm に満たない半導体チッ

プ内にレーザや変調器、光増幅器が一体集積されています。従来のレーザチップと同じコストで製造が可能であり、従来に比べて光信号出力を約 2 倍に増大させることが可能となります。AXEL の基本構成は光増幅器を追加するだけの比較的シンプルなアイデアであり、これはさまざまな用途へ適用可能です。当初、AXEL は 10 Gbit/s (1 秒間に 100 億ビットの信号伝送) 級光通信網に向けたデバイスの研究開発からスタートし、将来の大容量伝送の需要に対応すべく、より高速なアプリケーションへの適用に向けて開発を進めてきました。AXEL は光増幅器を集積したことにより、光の信号品質が劣化しやすいという課題があり、それぞれの用途に合わせて、光信号品質と高出力特性を両立させるレーザ設計の改良を続けています。2019 年には 25 Gbit/s 動作対応の AXEL を、そして 2021 年には 100 Gbit/s の光信号に対応する AXEL を開発しました。単体の光送信器においては、光の明滅による 100 Gbit/s 信号を、もっとも遠くまで伝送できるデバイスが実現されています。

また、AXEL は低消費電力性やさまざまなアプリケーションへの応用が可能である点が特徴です。これは NTT が提唱する IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想への基本理念にも合致するものであり、将来的に IOWN で実現されるネットワークの基幹技術となるべく、これからも研究開発を進めていきます。

特集

光を用いた次世代 コンピューティングを実現する デバイス技術

光・量子を用いた情報処理技術により、今まで解けなかった問題を解くことで、
大規模な社会課題の解決や新たな価値の提供が期待されている。

本特集では、次世代コンピューティング技術として注目されている光を用いた計算技術に焦点をあて、
それらに利用されるデバイス技術について紹介する。

次世代コンピューティング

光デバイス

スウィーズド光源

平面光波回路

機械学習

Next Generation Computing

光による次世代コンピューティングと光デバイス技術 ————— 28

「光を用いて計算する」次世代コンピュータの可能性, および本特集で紹介するデバイス技術について概説する.

高速光量子コンピュータ実現に向けた連続波・広帯域スキューズド光源 ————— 32

高速・大規模・汎用量子コンピュータの実現に向けて, PPLN (Periodically Poled Lithium Niobate) 導波路からなる光パラメトリック増幅器を用いた連続波・広帯域スキューズド光生成について紹介する.

光を用いて計算する次世代コンピューティングに向けた光回路技術 ————— 35

光量子コンピューティング向けの光回路を中心に「光で計算」する光回路技術について紹介する.

光デバイスによるリザーバコンピューティングの物理実装 ————— 39

リザーバコンピューティングと呼ばれるニューラルネットワークモデルの光デバイス実装の概説, およびその性能と応用に向けての取り組みについて紹介する.

主役登場 中島 光雅 (NTT先端集積デバイス研究所) ————— 43

光で計算機を再考する

光による次世代コンピューティングと光デバイス技術

デジタル社会基盤を支え、ムーアの法則に沿って発展してきた従来の計算機の性能は限界に近づきつつあるといわれています。多くの社会課題を解決し、安心・安全で豊かな社会を実現するには、量子コンピュータのような従来の計算機を遥かに超える能力を持った次世代のコンピュータの登場が期待されています。本稿では、「光を用いて計算する」次世代コンピュータの可能性と本特集で紹介するデバイス技術を概観します。

おかだ
岡田

あきら
顕^{†1}

はしもと
橋本

としかず
俊和^{†2}

NTT先端集積デバイス研究所 所長^{†1}

NTT先端集積デバイス研究所^{†2}

はじめに

スマートフォンや家庭電化製品、自動車、インターネットをはじめ、公共インフラの情報システムや金融、商取引など、あらゆる場面に使われるデジタル技術は社会を支える基盤技術となっています。さらに、通信技術により、分散したデジタル情報を連携することが容易となり、AI（人工知能）やブロックチェーンなどの新たなデジタル技術が大きなインパクトを社会にもたらしています。エネルギー問題をはじめとする多くの社会課題を解決し、安心・安全で豊かな社会を実現していくには、社会基盤となっているデジタル技術の持続的な発展が欠かせません。デジタル技術は、コンピューティングを行う半導体集積回路の集積度を上げることで高性能化と低消費電力化を両立させ、持続的に発展してきました。半導体集積回路のトランジスタ数が「2年ごとに倍になる」というムーアの法則はその象徴として広く知られています。しかし、近年、半導体集積

回路の微細化は物理的な限界に近づきつつあるといわれており、半世紀にわたり維持されてきたムーアの法則の限界が指摘されています。さらに、爆発的な発展が続くAIでは、1兆を超えるパラメータを使った機械学習が行われるなど、ムーアの法則を超える計算能力の伸びが求められています⁽¹⁾。消費電力についても、例えば、OpenAIが発表したGPT-3と呼ばれる高性能なAIの言語モデルでは、最大規模のモデルで学習した場合の消費電力量は、一般的な家庭の約300年分の消費電力に相当する1287 MWhに達しています⁽²⁾。

これらの課題を乗り越えていくためには、半導体集積回路技術の発展のみならず、それ以外の方法を用いた、従来の計算機を遥かに超える性能を有し、かつ、それを低消費電力で実行できる次世代のコンピュータの登場が強く求められています。

本特集では、次世代コンピューティング技術として注目されている光を用いた計算技術に焦点をあて、それらに

利用されるデバイス技術を紹介します。光を用いたコンピューティングでは、情報を光の状態でどのように表し、光で表した情報を用いてどのようにコンピューティングを行うか、を考える必要があります。以降では、次世代コンピューティングに向けた光による情報処理として、情報を光の状態として表し光の状態で計算を行うメリットと、光を用いたコンピューティングに必要とされるデバイス技術を概観していきます。

次世代コンピューティングに向けた光による情報処理

情報処理と似た言葉に信号処理という言葉があります。工場でのものづくりで例えると、情報が部品で、信号がそれをまとめた荷物、信号処理はその振り分けや積み替えなど運送にかかわる処理で、情報処理は荷物の中身を使って新たなものをつくる製造工程に対応します。ものの流れの上限を把握することで工場の生産能力の上限が分かるように、まず、光が信号やその中

身である情報についてどれくらいの量を扱うことが可能であるかを信号処理の観点も含めてみていきます。次に、製造工程とものの搬送が一体化したライン生産方式で製造技術が大きく発展したのと同様に、これまで信号処理で使われてきた光を取り入れることで情報処理がどのように発展するかについて考えてみます。

光に情報を重畳させる典型例として光ファイバ通信があります。光ファイバ通信では、情報を送り届けるために、情報を光の強度・周波数・位相に変換する信号処理が行われます。光の通信回線を構成するために光信号を光スプリッタで分配したり、波長多重信号を光合波フィルタで分離したり束ねたり、あるいは光周波数フィルタを用いて光信号の周波数に応じて処理した

り、これらは光機能デバイスによる一種の信号処理とみなすことができます。光に重畳させる信号はデジタル信号で、光から取り出した信号はデジタルフィルタで処理することにより、位相や周波数、振幅値に含まれるノイズを除去して、情報を取り出しています。そのため、信号処理や情報処理は電子回路の処理速度に律速されることになります。光ファイバ通信では、変調周波数として100 Gbaud級の信号が使われようとしています。これに対して、光にはさらに多くの情報を重畳させることが可能です。例えば、波長 $1.5\mu\text{m}$ の光は、周波数が約200 THzの電磁波であり、強度1 mWの光は、毎秒 7.55×10^{15} 個程度の光子（光子）の流れと考えることができ、莫大な自由度が残されています。しか

し、電子回路の処理速度を超えて情報処理を行うには、電子回路の処理速度を超えて光の波や光子を操作する必要があります。図1に光で処理する情報の粒度に対する信号処理と情報処理の関係を示します。デジタル信号列やデジタル信号の1つのシンボルを操作する場合は、光は主に光に重畳している信号処理を行うための要素であるフィルタとして用いられます。それに対して、光による情報処理を行う領域では、光をアナログ信号の波として扱い、あるいは、光の量子状態を使って、それらに情報を重畳させて、その光の状態を操作することで情報処理を行います。光による信号処理では光回路は要素技術として用いられますが、光による情報処理では光回路の中で閉じた

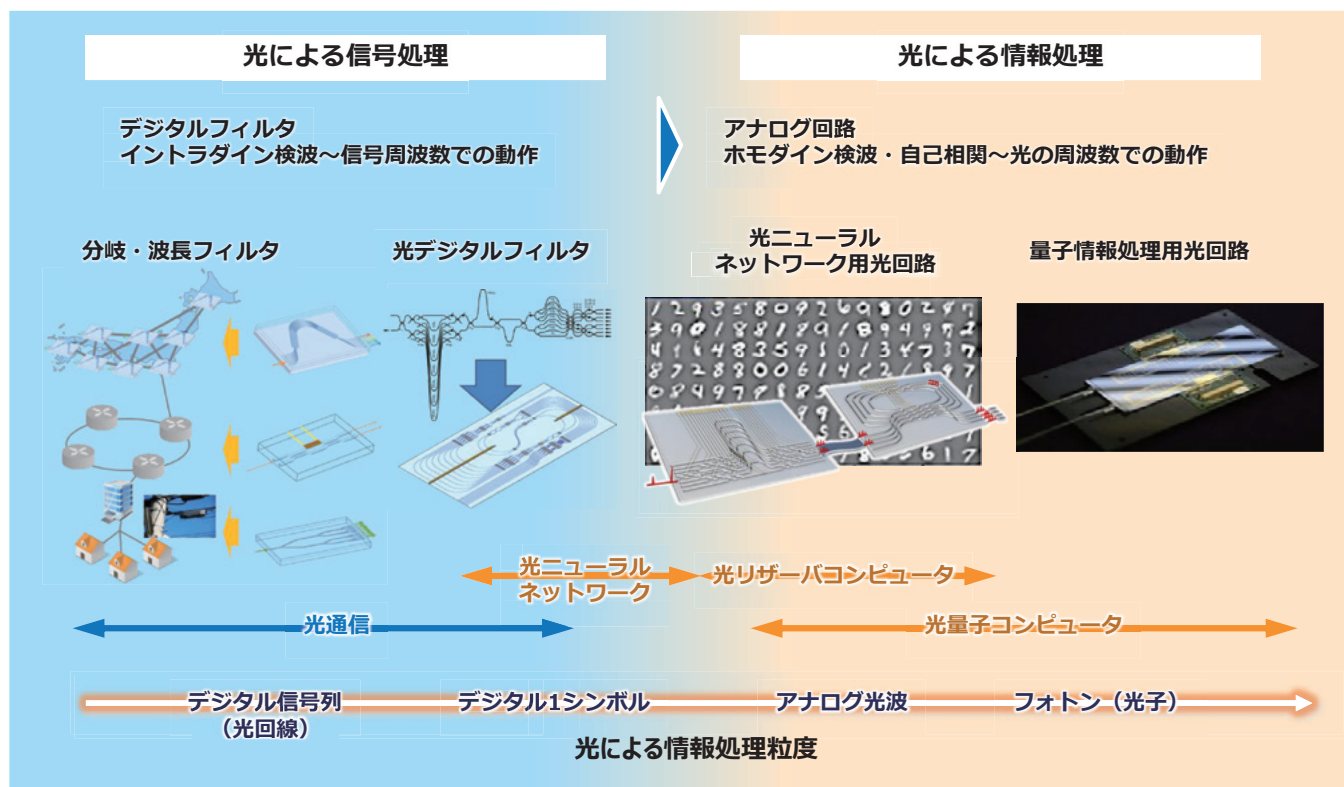


図1 光技術の進化——信号処理技術から情報処理技術へ

かたちで光による演算を行います。光の干渉等を高精度に制御し、振幅と位相の情報を取り出せるホモダイン検波や自己相関をとり、さらにそれらを組み合わせることで光による演算が行われます。本特集の記事でも取り上げているように、光によるニューラルネットワーク⁽⁴⁾や光量子情報処理^{(5)、(6)}について、実際の光回路で基本的な動作が実証され始めています。光による情報処理は次世代コンピューティング技術の有望な候補と考えられています。

コンピューティングへの光技術の応用と光デバイス技術

光は光の状態として膨大な自由度を持っていて、そこに情報を重畳させることで、従来の計算機的能力を超える光による計算技術の可能性があると前

述しました。ここでは、光により表された情報でどのようなコンピューティングが可能となり、そのためにはどのようなデバイスが必要となるかをみていきます。

デジタル技術では主にプログラムを基にデータに対して逐次論理演算を行っていくノイマン型のコンピューティングが用いられてきました。コンピュータや周辺装置との間の情報転送を含めて、論理演算を高速に行うことが技術を発展させるうえで重要です。一方、非ノイマン型のコンピューティングでは、従来の逐次論理演算とは異なる方法で計算を行います。光を用いる場合は、前述したように、莫大な光の状態を利用して、逐次論理演算を行うノイマン型でなく、非ノイマン型の演算を行うことで、電子回路の処理速

度に律速されずに大規模で高速なコンピューティングの実現が可能となります。図2にノイマン型と非ノイマン型のコンピューティングと光デバイス技術の対応を示します。光デバイスとして、コンピューティングで論理演算を高速化するためには高速・広帯域動作が、光による計算を可能とするためには光の波や光量子の活用（使いこなせること）がめざす方向になります。高速・広帯域動作をめざす方向には、光ファイバ伝送等に用いられる大容量伝送技術に対応して、光インターコネクションも含めて現在のコンピューティングシステム自体の性能向上に寄与する光電融合技術⁽³⁾があります。また、広域のネットワークも含めて考えた場合、従来の光デバイスである線形光回路等もこの領域を支える技術となりま

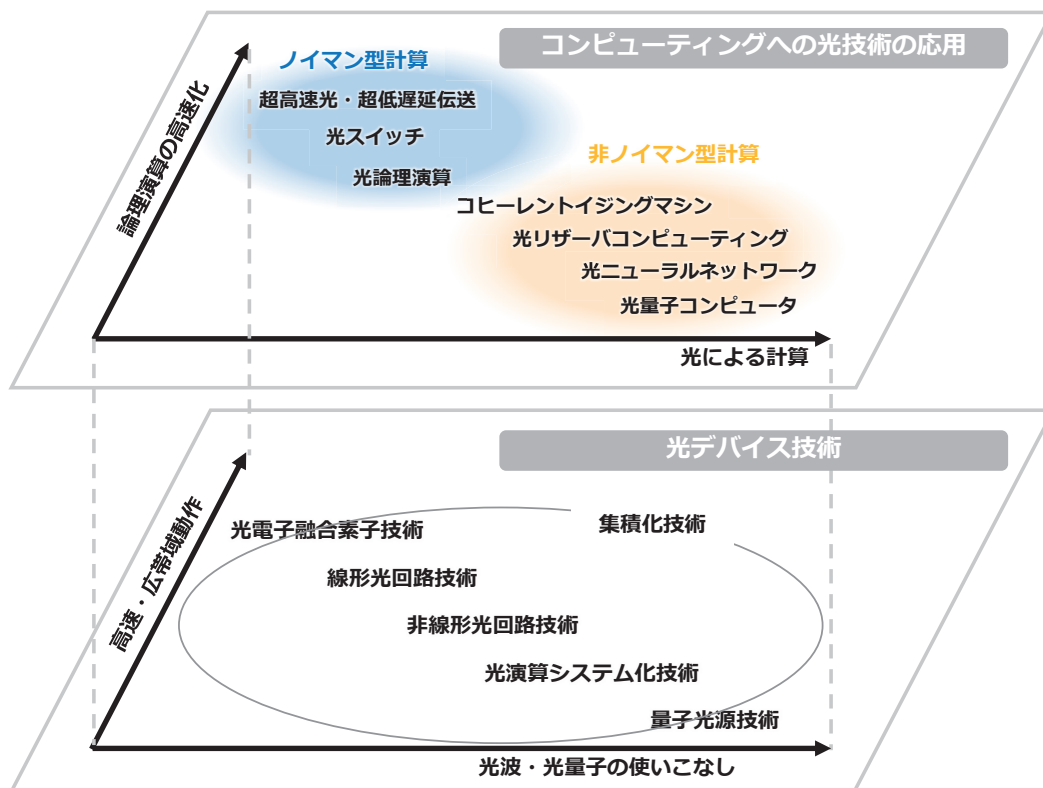


図2 光によるコンピューティングの可能性と光デバイス技術

す。一方、光波・光量子の使いこなしという観点では、情報を重畳させた光の波の相関を生成するための非線形光学素子や複雑な相関をつくり出し、光による演算をシステムとして動作させるための光回路技術、さらに電子制御を含めたシステム化技術が重要となります。また、光量子を用いる場合には、光の量子状態を生成するために、光通信におけるレーザ光源に相当する量子光源が必要となります。これらのデバイスを用いることで、非ノイマン型の計算機である、コヒーレントイジングマシン⁽⁷⁾や光ニューラルネットワーク・光リザーバコンピュータ⁽⁵⁾などの従来と異なるコンピューティングが実現されています。さらに、量子光源や光量子情報処理向けの光回路は光量子コンピュータを実現するうえでは欠かせないデバイスと考えられており、光量子情報処理に向けた基本的な動作が実証されています^{(5), (6), (8)}。ノイマン型の計算技術と非ノイマン型計算技術は相反するものではなく、計算対象や計算目的に応じて互いに組み合わせ相補的に用いられるものであり、実用的なシステムを実現していくうえでは、ハードウェアとしてそれらを統合するデバイス集積技術も極めて重要な技術となります⁽⁹⁾。

本特集では、次世代のコンピューティングのうち、「光による計算」と呼ぶにふさわしい、光量子コンピュータ、および光ニューラルネットワーク・光リザーバコンピュータ向けのデバイス技術を次の3本の記事で紹介します。1番目の記事『高速光量子コンピュータ実現に向けた連続波・広帯域スクィーズド光源』⁽¹⁰⁾では、光非線形デバイスである周期分極反転ニオブ酸リチウム（PPLN：Periodically

Poled Lithium Niobate）導波路技術とその応用である量子光源技術を紹介し、次の『光を用いて計算する次世代コンピューティングに向けた光回路技術』⁽¹¹⁾では、線形光回路と光量子コンピューティングに向けた応用を中心に紹介します。さらに、『光デバイスによるリザーバコンピューティングの物理実装』⁽¹²⁾では、光デバイス技術を組み合わせるシステム化し、大規模な積和演算を実現した光のニューラルネットワーク技術として光リザーバコンピューティング技術を紹介し、

光による計算により次世代のコンピュータを実現するためには関連するハードウェアおよびソフトウェア技術を結集していく必要があります。本特集で紹介する技術は、最先端の研究を推進していく中核技術としてさまざまな技術を引き寄せ、光による計算を大きく発展させていくものと期待されます。

■参考文献

- (1) N. C. Thompson, K. Greenewald, K. Lee, and G. F. Manos : "The computational limits of deep learning," arXiv preprint, arXiv:2007.05558, 2020.
- (2) D. Patterson, J. Gonzalez, Q. Le, C. Liang, L. M. Munguia, D. Rothchild, D. So, M. Texier, and J. Dean : "Carbon emissions and large neural network training," arXiv preprint, arXiv:2104.10350, 2021.
- (3) T. Sogawa, M. Tomizawa, A. Kado, and H. Gotoh : "All-Photonics Network and Photonics-electronics Convergence Technologies as a Vision of the Future," NTT Technical Review, Vol. 18, No. 10, pp.12-15, 2020.
- (4) M. Nakajima, K. Tanaka, and T. Hashimoto : "Scalable reservoir computing on coherent linear photonic processor," Communications Physics 4, No. 20, 2021.
- (5) G. Masada, K. Miyata, A. Politi, T. Hashimoto, J. L. O'Brien, and A. Furusawa : "Continuous-variable entanglement on a chip," Nature Photonics, Vol.9, No.5, pp. 316-319, 2015.
- (6) J. Carolan, C. Harrold, S. Enrique, M. López-Nicholas, J. Russell, J. Shadbolt, N. Silverstone, P. Matsuda, M. Oguma, M. Itoh, G. D. Marshall, Mark, G. Thompson, J. C. F. Matthews, T. Hashimoto, J. L. O'Brien, and A. Laing : "Universal linear optics," Science, Vol. 349, No. 6249, pp. 711-716, 2015.
- (7) J. Arai, S. Yagi, H. Uchiyama, K. Tomita, K. Miyahara, T. Tomoe, and K. Horikawa : "LASOLVTM Computing System: Hybrid Platform for Efficient Combinatorial Optimization," NTT Technical Review, Vol. 18, No. 1, pp.35-40, 2020.
- (8) T. Kashiwazaki, T. Yamashita, N. Takanashi, A. Inoue, T. Umeki, and A. Furusawa : "Fabrication of low-loss quasi-single-mode PPLN waveguide and its application to a modularized broadband high-level squeezer," Appl. Phys. Lett., Vol. 119, 251104, 2021.
- (9) T. Haga, A. Okada, and S. Matsuo : "On Si Platform Opens a New World in AI-IoT Service Era," NTT Technical Review, Vol. 15, No. 1, pp.1-5, 2017.
- (10) 柏崎・井上・梅木 : "高速光量子コンピュータ実現に向けた連続波・広帯域スクィーズド光源," NTT技術ジャーナル, Vol.34, No.6, pp.32-34, 2022.
- (11) 橋本・阪本・小仁所 : "光を用いて計算する次世代コンピューティングに向けた光回路技術," NTT技術ジャーナル, Vol.34, No.6, pp.35-38, 2022.
- (12) 中島・鶴谷・田仲・橋本 : "光デバイスによるリザーバコンピューティングの物理実装," NTT技術ジャーナル, Vol.34, No.6, pp.39-42, 2022.



(左から) 岡田 顕/ 橋本 俊和

光技術と電子技術や情報科学・量子技術とが結びつくことで、光の優れた部分が活かされた新たな計算技術が創出されることに期待しています。

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所
企画部研究推進担当
TEL 046-240-2022
FAX 046-240-4328
E-mail sende-kensui-p@hco.ntt.co.jp

高速光量子コンピュータ実現に向けた 連続波・広帯域スクィーズド光源

近年、世界各国で汎用量子コンピュータの研究開発が加速しており、さまざまな手法が提案されています。NTTでは現在の光通信技術と同じように、伝搬する光の振幅・位相に情報を重畳させる光量子コンピュータの研究開発を進めています。この光量子コンピュータにおいてもっとも重要となるのが、量子性の源となるスクィーズド光源です。本稿では高速・大規模・汎用量子コンピュータ実現に向けた量子光源の研究開発について紹介します。

かしわざき たかひろ
柏崎 貴大
うめき たけし
梅木 毅伺

いのうえ あすか
井上 飛鳥

NTT先端集積デバイス研究所

スクィーズド光を用いた時間領域 多重大規模量子もつれ状態の生成

スクィーズド状態は不確定性関係にある非可換物理量（運動量と位置、エネルギーと時間など）のうち片方の量子雑音が圧搾された非古典的な状態です。その中でも直交位相スクィーズド光は、図1(a)に示すように、波動像でみたときには正弦成分もしくは余弦成分の量子雑音が圧搾された光で、粒子像でみたときには偶数光子数状態の光となっています。

この光は、重力波検出や光振幅位相を用いる光技術（連続量光量子技術）のさまざまな場面で利用されています。例えば、2つの真空スクィーズド光を半透過鏡で干渉させることで、決定論的に（100%の確率で）量子もつれ状態を生成することが可能です。これを応用することで図1(b)に示すように時間軸上に連なった（時間領域多重化された）大規模な量子もつれ状態が生成されます⁽¹⁾。NTTは東京大学、理化学研究所と共同で、この大規模量

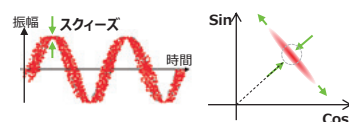
子もつれ状態を計算リソースとして用いる光量子コンピュータの実現に取り組んでいます。

ここで、高速・大規模・汎用量子コンピュータ実現には、連続波・広帯域・高レベルなスクィーズド光が求められます。任意の量子計算に必要とされる2次元クラスタ状態の生成には、

高いスクィージングレベルが求められます。また、連続波かつ広帯域であることで、時間リソースを最大限に発揮することができ、他の方式では困難である高速性、大規模計算性を実現できるからです。

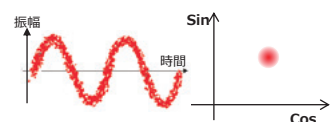
スクィーズド光

不確定性原理に基づく非可換物理量の揺らぎ対のバランスが崩れた状態

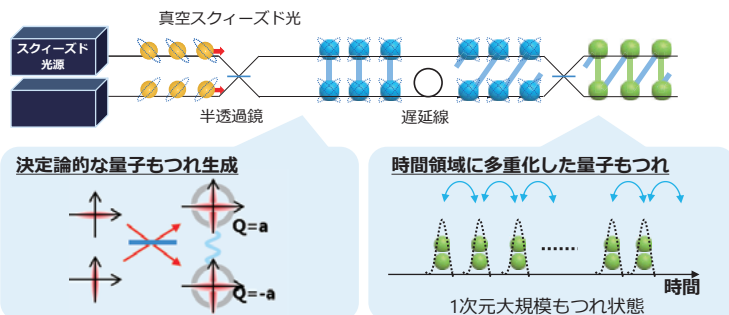


コヒーレント光

sin, cos成分に均等に量子ノイズが存在



(a) スクィーズド光の量子ノイズのイメージ



(b) 真空スクィーズド光を用いて時間領域に多重化された大規模量子もつれ状態を生成する手法

図1 スクィーズド光と時間領域多重化された量子もつれ状態

直接接合型の周期分極反転 ニオブ酸リチウム導波路

スキーズド光は非線形光学現象の1つである光パラメトリック増幅により生成することができます。1985年にNa（ナトリウム）原子の三次非線形性を用いて世界で初めてスキーズド光が生成されました⁽²⁾。以来、さまざまな方法でスキーズド光は生成されており、近年では固体の二次もしくは三次の非線形光学効果を用いる方法が主流となっています。その中でも二次非線形光学結晶による導波路型の光パラメトリック増幅器は原理的に広帯域な特性を発揮できると期待されてきました。しかし、一般的に非線形光学デバイスの加工は難しく、十分に量子雑音が圧縮された品質の良い量子光を生成することは困難とされてきました。高レベルなスキーズド光の生成には、低損失な光導波路であること、高い非線形光学特性を発揮すること、また、そのために強い励起光に対する耐性を有することが求められます。低損失性

が必要となるのは、エネルギーの分割に伴う真空場の混入により量子力学的な光は容易に劣化するからです。

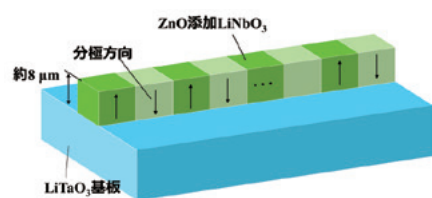
NTTでは、光通信分野への応用として図2(a)に示すような、直接接合型の周期分極反転ニオブ酸リチウム（PPLN：Periodically Poled Lithium Niobate）導波路の研究開発を行ってきました。ニオブ酸リチウムは透過帯域が広く高い二次非線形光学係数を有する強誘電体として知られます。また、光伝搬方向に周期的に自発分極の方向を反転させることで、内部を通過する光の非線形相互作用を高めることが可能です。さらに私たちは、接着剤などを用いずに基板に導波路を直接貼り合わせることで、ワット級の強度を有する励起光に対しても動作するデバイスを実現しています。これまで培ってきた作製技術により、近年では高い励起光耐性を有し、低損失で高利得な光パラメトリック増幅器が実現されています⁽³⁾。

また、私たちのグループでは、光ファイバ光学部品と結合が容易なモジュール

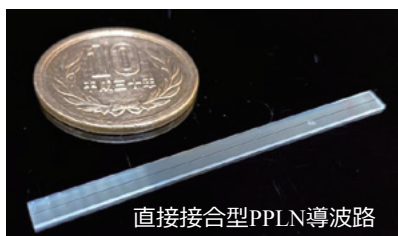
型の光パラメトリック増幅器を開発しています。これは、実用化を見越してメンテナンスフリーな光学系を構築できるようにするためです。これまで量子光学実験はたくさんのミラーやレンズが高精度に並べられた光学定盤上でその原理検証実験がなされてきました。これらの光学系は実験のたびに精密な調整が必要であり実用化において解決すべき問題となっていました。私たちの作製するモジュールは図2(b)に示すように、モジュール内部で励起光とスキーズド光が分離される構造になっており、それぞれ光ファイバに効率良く結合します。このピグテールモジュールの実現によって、これまで光通信分野で培われてきたような高信頼・高性能な光部品を組み合わせた多彩な操作も期待でき、実機開発を大きく前進させます。

テラヘルツ級広帯域 スキージングの評価

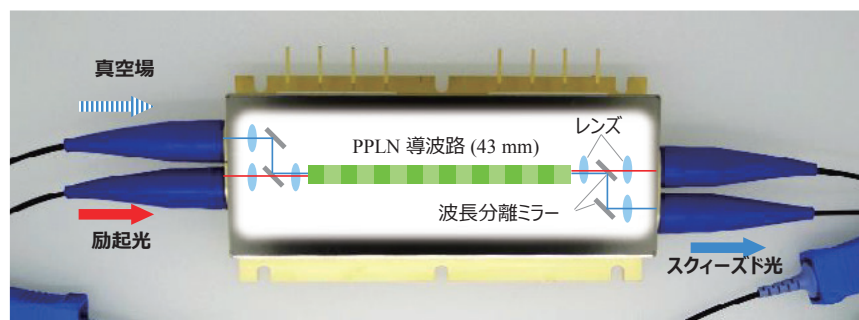
スキーズド光の量子ノイズの圧縮率（スキージングレベル）は従来バランス型ホモダイン検波という手法により測定されてきました。この手法では、スキーズド光の中心周波数と同じ周波数を有する参照光とを半透過鏡で干渉させ、その2つの経路の出力強度の差を電気信号として取り出します。その後、電気スペクトラムアナライザによりノイズレベルが測定されます。そのため、この手法で測定されるスキーズド光の帯域は、電気回路の帯域に律速され、高々数ギガヘルツまでの成分の測定しかできません。そこで、スキーズド光をさらに光パラメトリック増幅することでテラヘルツ級の広帯域な成分までの量子ノイズ強度測定手法を考案しました。これは、これまでの手法では量子情報を電気信号に変換していたのに対し、強度の高い



(a) PPLN導波路の模式図と外観写真（導波路コアが直接下基板に接合されている）

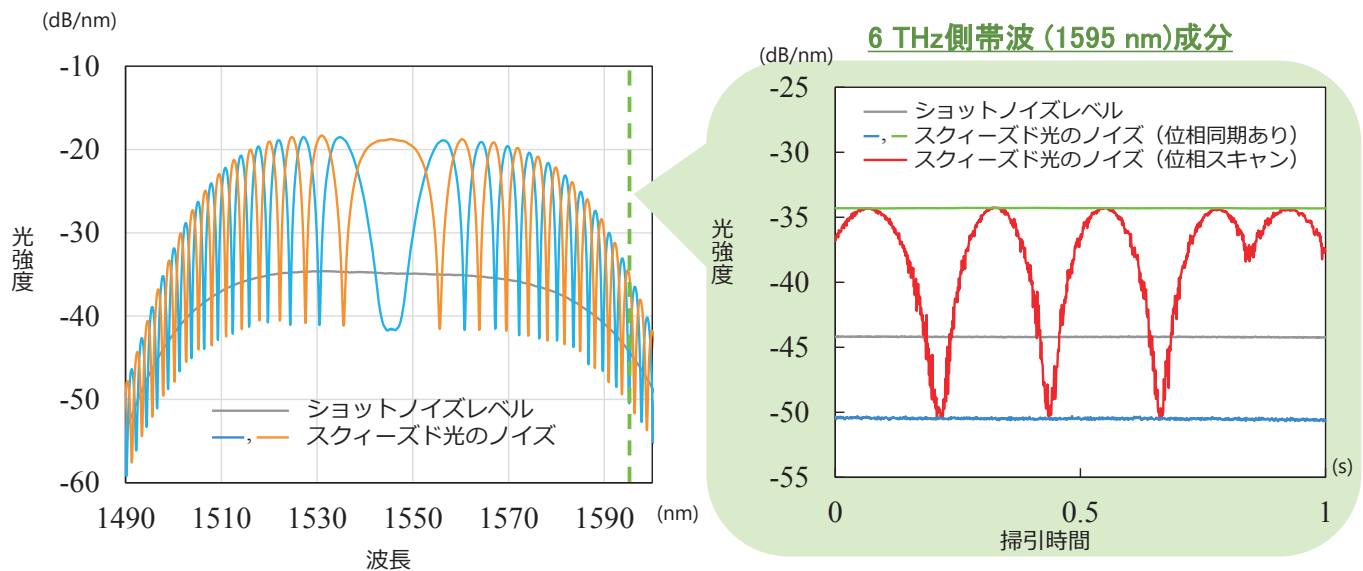


直接接合型PPLN導波路



(b) NTTで開発しているファイバ結合型の光パラメトリック増幅器
（励起光波長帯とスキーズド光の波長帯の光が分離されるように内部に波長分離ミラーを設置）

図2 導波路型光パラメトリック増幅デバイス



ショットノイズレベルに比べて6 dB以上低いノイズレベルが測定されている。また、6 THz以上の広帯域成分にわたってそのスクィージングレベルが維持されている。

図3 スクィーズド光の量子ノイズ強度測定結果

光信号に直接変換することを意味します。図3に各側帯波成分でのノイズ強度レベル測定結果を示します。実験結果よりテラヘルツオーダの側帯波成分に関してもショットノイズレベルに比べて6 dB以上スクィーズド光のノイズが抑制されていることが観測されました⁽⁴⁾。これは二次元的な量子もつれ構造を持つ大規模量子もつれを生成するのに必要な4.5 dBを超える値であり、導波路型光パラメトリック増幅器を用いたスクィージングの世界最高水準の値となっています。

まとめと今後の方針

高速・大規模・汎用量子コンピュータの実現に向けて、PPLN導波路からなる光パラメトリック増幅器を用いた連続波・広帯域スクィーズド光生成に関して報告しました。NTTで培ってきた非線形光学デバイス作製技術により、6 THzという広帯域で、かつ6 dB以上のスクィージングに成功しました。また、ファイバ接続型のモ

ジュールとして実装することで、光通信部品との互換性を高め、今後の量子コンピュータ開発を見越したデバイス作製に取り組んでいます。今後は、素子作製技術の高度化や最適設計を行うことで、さらなる高性能化をめざします。

参考文献

- (1) W. Asavanant, Y. Shiozawa, S. Yokoyama, B. Charoensombutamon, H. Emura, R. N. Alexander, S. Takeda, J. Yoshikawa, N. C. Menicucci, H. Yonezawa, and A. Furusawa: "Generation of time-domain-multiplexed two-dimensional cluster state," *Science*, Vol.366, No. 64463, pp.373-376, 2019.
- (2) R. E. Slusher, L. W. Hollberg, B. Yurke, J. C. Mertz, and J. F. Valley: "Observation of Squeezed States Generated by Four-Wave Mixing in an Optical Cavity," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 55, No. 22, pp.2409-2412, Nov. 1985.
- (3) T. Kazama, T. Umeki, S. Shimizu, T. Kashiwazaki, K. Enbutsu, R. Kasahara, Y. Miyamoto, and K. Watanabe: "Over-30-dB gain and 1-dB noise figure phase-sensitive amplification using a pump-combiner-integrated fiber I/O PPLN module," *Opt. Exp.*, Vol. 29, No. 18, pp. 28824-28834, 2021.
- (4) T. Kashiwazaki, T. Yamashima, N. Takanashi, A. Inoue, T. Umeki, and A. Furusawa: "Fabrication of low-loss quasi-single-mode PPLN waveguide and its

application to a modularized broadband high-level squeezer," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.119, 251104, 2021.



(左から) 梅木 毅伺/ 柏崎 貴大/
井上 飛鳥

光通信をはじめとするさまざまな光技術は、使いやすい“レーザ”の実現により爆発的に発展しました。私たちは、高性能で使いやすい“スクィーザ”の実現により、社会に還元される光量子技術の発展をめざしています。

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所
機能材料研究部 異種材料融合デバイス研究グループ
TEL 046-240-2022
FAX 046-240-4328
E-mail sende-kensui-p @ hco.ntt.co.jp

光を用いて計算する 次世代コンピューティングに向けた 光回路技術

スマートフォンやクラウドサービスなどさまざまな場面にデジタル技術が浸透した社会を持続的に発展させていくためには、従来の性能を大きく上回るコンピューティング技術が重要になってきています。NTTでは光導波路による通信向けデバイス技術を適用した光による計算技術の研究開発を進めています。本稿では、光量子コンピューティング向けの光回路を中心に「光で計算」する光回路技術を紹介します。

はしもと
橋本

としかず
俊和

さかもと
阪本

じゅんじ
隼志

こにしよ
小仁所

しおり
志栞

NTT 先端集積デバイス研究所

光を用いて計算する光回路技術

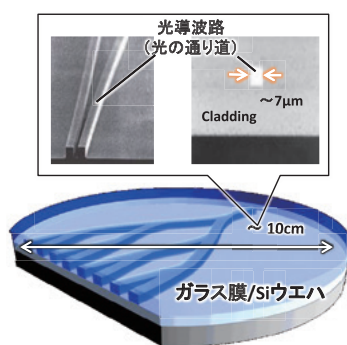
光ファイバと半導体の製造技術と組み合わせる光導波路を形成する平面光波回路 (PLC: Planar Lightwave Circuit) * 技術 (図 1 (a)) を用いて光ファイバ通信向けにさまざまな光デバイスが実現されてきました⁽¹⁾。PLC 技術は線形光学素子を集積可能な光回路技術として、光を用いて計算する有望なデバイス技術の 1 つと考えられています。

電子デバイスには、トランジスタや 3 極真空管、3 端子レギュレータなどの 3 端子素子という分類があります。いずれも、入力と出力があって、入力の状態に対して制御端子からの制御信号を反映して所望の出力を得るというものです。電子計算機は 3 端子素子であるトランジスタを多数組み合わせることで実現されています。3 端子素子の動作

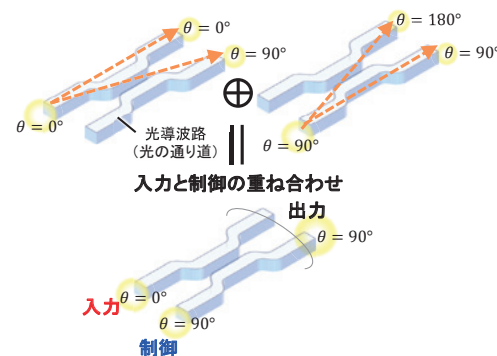
は、例えば真空管では、電圧をかけたプレートに向かってカソードから飛び出す電子の量をグリッドと呼ばれる中間端子に掛ける電圧で制御します (図 2 (a))。光デバイスの場合も、電子デバイスから制御端子を駆動する光スイッチや光変調器などがありますが、光を用いて計算するという観点からは制御端子の入力も光となっているものが求められます。

そのような 3 端子素子と見立てることができるものとしては光の干渉計があります。光干渉計は複数の光入力に

対して、それらの干渉光を出力するもので、光入力の一部を制御用の光のポートとすれば 3 端子素子とみなすこともできます。図 1 (b) に PLC 技術でよく使われる干渉計の一種の方向性結合器の基本動作を示します。2 本の光導波路 (光の通り道) を近づけると一方の光導波路からもう一方の光導波路に光が乗り移ります。途中まで乗り移ったところで光導波路を離すと位相差のついた 2 つの光に分けることができます。もう一方の光導波路側からの入力した場合も同様に位相差のついた



(a) 平面光波回路 (PLC) の基本構造



(b) 方向性結合器の基本動作

図 1 PLC と方向性結合器の基本動作

* 平面光波回路 (PLC): 光ファイバ技術と半導体の製造技術によりシリコンウエハ上に微細構造技術により光の通り道をつくり、光回路を実現しています。

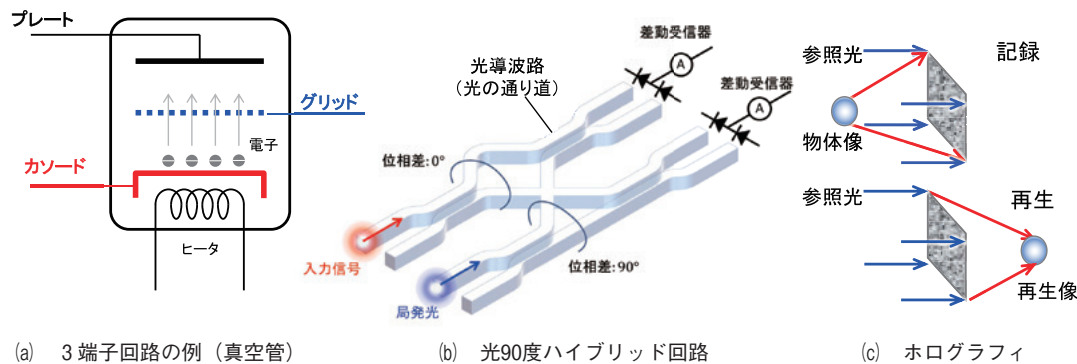


図2 3端子回路の電子回路と光回路の例

2つの光に分けられます。それらを一度に入力して重ね合わせて、一方を入力ポート、もう一方を制御ポートと考えて、出力側の2本の導波路からの出力を1つの出力状態とみなせば、入力ポートと制御ポートの光の位相差で光を制御する3端子の光回路となります。

この干渉計を用いたデバイスの例としては、コヒーレント伝送等で用いられる局発光に対して、入力信号の位相差と振幅の両方を測定できる光90度ハイブリッド回路と呼ばれる光回路があります⁽¹⁾（図2(b)）。コヒーレント伝送では周波数が一定の局発光を使用しますが、この後に紹介する光量子情報処理では、局発光の部分を制御信号として量子もつれ状態と組み合わせることで、所望の出力を得る量子テレポーテーションを実現しています。その他にも、例えば、ホログラフィの記録工程は像の光を入力として、参照光を制御光と見立てれば、Fourier変換像を得るための3端子素子とみなすことができます（図2(c)）。

以上のように電子回路の3端子素子に複数の入力相互に干渉する光回路を対応させることができると、真空管やトランジスタにより電子計算機が実現されているように、光による新たな情報処理が可能になると期待されます。以降では、具体的な例として光回路を用いた量子情報処理を紹介してい

きます。

光回路による量子情報処理

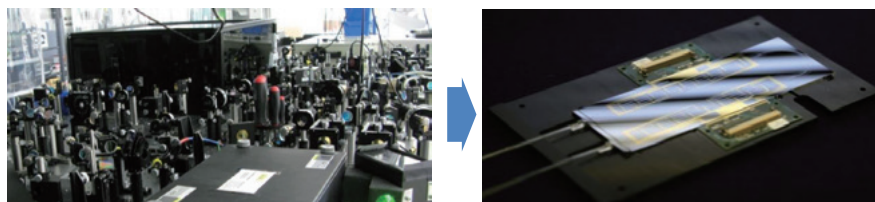
量子コンピュータは量子状態の重ね合わせと相互にもつれた状態を使って、これまで事実上計算できなかった問題を解くことを可能にする計算機として期待を集めています。量子コンピュータに用いる物理的な量子状態としては、超伝導回路やイオントラップなど、さまざまなものが提案されています。光子（フォトン）を用いた光量子コンピュータは常温動作や高速動作が可能であることなど、量子コンピュータの実現方式として有望な候補の1つとなっています。光回路を用いた光量子情報処理としては、主にモード型（あるいは経路量子ビット）と連続量型の2つがあり、以下でそれぞれを紹介します。

■モード型の光量子情報処理

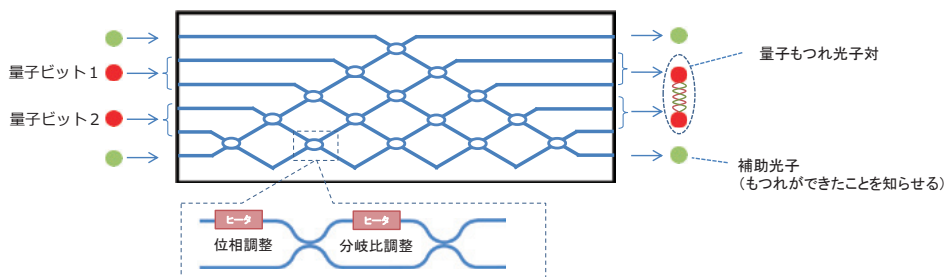
モード型の光量子情報処理は光導波路中の光子状態を用います。このとき、1本の光導波路に光子がある状態とない状態の重ね合わせで量子ビットを表現する方法（シングルレール表現）と、2本の光導波路を使ってどちらかの導波路に光子がある状態の重ね合わせで量子ビットを表現する方法（デュアルレール表現）があります。量子情報処理に必要な非線形操作を線形回路で実現するには測定と組み合わせて確

率的に実現する必要があります。シングルレール表現だと損失等で光子がなくなったのか、量子状態の変化によるものなのか、区別しにくいのに対して、デュアルレール表現は必ず光子がある状態を操作するので、補助的な光子と組み合わせて量子操作が成功したかを検出しやすくなります。それを使って、成功した量子状態のみを選択してスケールさせて大規模化をめざす研究が行われています。NTTでは世界に先駆けて、 6×6 の任意のユニタリ操作が可能な万能量子光回路を、PLCを用いて作製しました（図3(a)）。従来、光学定盤上で構成した場合、光学系が非常に大きくなり安定性を確保することが困難でしたが、チップ化することで、小型で安定な光回路を実現しています。光回路の構成を図3(b)に示します。

光導波路が交差しているように見える部分には熱光学効果により屈折率を局所的に変化させるヒータがつけられ、位相と分岐比を可変に調整できるようになっています。複雑な回路に見えますが、方向性結合器で光子を干渉させる基本操作を組み合わせたもので、可変で任意の線形操作を行うことができます。これを用いてBristol大学と連携して、さまざまな量子情報処理を高精度に実現できることを確認しています⁽²⁾。図3(b)はデュアルレール

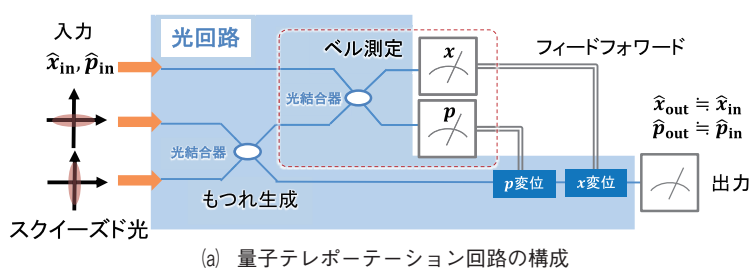


(a) ミラー等で構成した回路と PLC で実現した回路

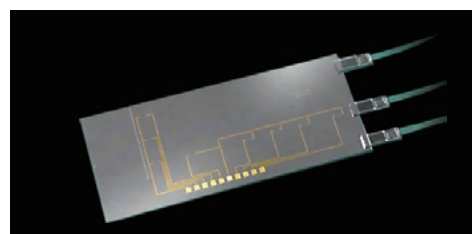


(b) 光導波路回路と実験（量子もつれ生成）の構成

図3 モード型量子情報処理回路



(a) 量子テレポーテーション回路の構成



(b) 作製した量子テレポーテーション回路

図4 連続量型量子情報処理向け光回路技術

表現の2つの量子ビットから、もつれた状態を生成する光回路の構成を示しています。実用的な量子コンピュータを実現するには、さらに大規模化を行う必要がありますが、導波路の数を多くするだけでなく、補助光子の状態を反映して成功した量子状態のみを選択して後段に伝えるなど、より高度な回路構成を実現していく必要があります、今後の課題となっています。

■連続量型の光量子情報処理

連続量量子を使った量子コンピュータも提案されています。連続量を用いる場合は、無線や光ファイバ通信と同じように波（この場合は光の波）の位相と振幅に情報を載せて、参照光との干渉状態を計測することで量子状態を確定させます。このとき、参照光の状

態と、さらに観測される側の状態との干渉のさせ方を変えることで、計測する状態の基底を指定することができることから、射影測定と呼ばれています。入力側に量子もつれ状態の一方を入力して、さらに参照光とのもつれた状態を基底（Bell基底）とする射影測定（Bell測定）を行い、その情報を基に、入力の量子もつれ状態のもう一方を位相シフトさせることで量子テレポーテーションが実現できます（図4(a)）。出力状態に作用させたい任意のユニタリ操作を参照光に与えておけば、その操作を出力に与えることができるため、測定結果を古典経路でフィードフォワードして量子情報処理を行う測定型の量子計算の基本的な操作として極めて重要な回路となってい

ます。本研究においては東京大学と協力して図4(b)に示す850 nm帯で動作するPLC回路を作製し、基本的な検討として回路から出力されるスクイーズド光の評価を行い、非古典的な動作を実行可能な3.2 dB程度のスクイージングが実現されていること確認しました^{(3), (4)}。量子テレポーテーションを実行するのに十分な値を達成するために、現在も通信向けのデバイス技術を幅広く適用できる1.5 μm帯に移行するなどして、抜本的な特性改善を精力的に進めています。

光による計算に向けた 光回路技術の今後の展開

ここまで見てきたように、電子回路の3端子素子に対応するものとして、

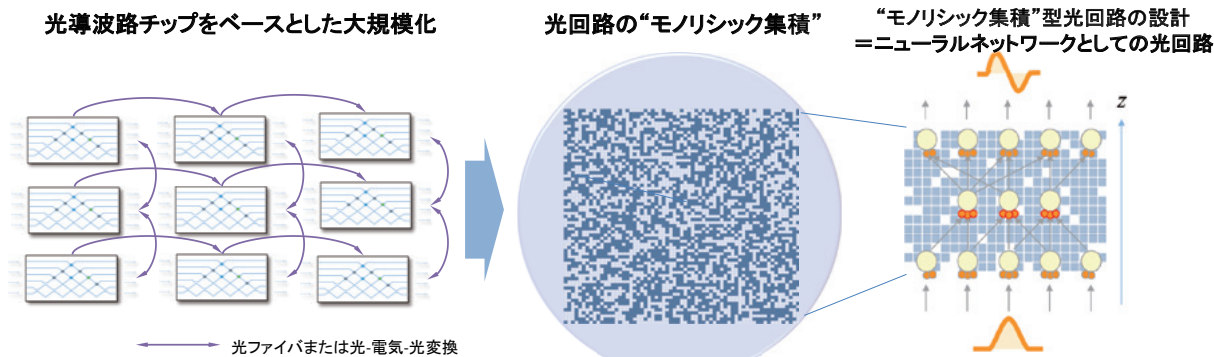


図5 光による計算を実現するための光回路のスケラビリティと“モノリシック集積”

複数の入力相互に干渉することで光による新たな情報処理が可能となってきました。本稿で紹介した以外にも、光回路を用いたニューラルネットワーク等の研究も活発です。一方で、今後コンピューティング技術として実際に用いていくには、光を用いた計算回路をどのようにスケールさせるかが大きな課題です。電子デバイスと同様に光チップをつないで大規模化した場合、データ伝送をデジタルデータに変換すると光の干渉性が失われたり、遅延が生じます。光ファイバで光のチップを接続しても損失や位相ずれが問題となります（図5左）。

そこで電子回路のように要素を組み合わせて大規模化するのとは異なるアプローチが必要となります。その1つが時間領域を用いて、光のパルス間のもつれや相関をとり光で計算を行う方法です。本稿の連続量型の光量子情報処理で多連のパルスを用いたものや本特集記事『光デバイスによるリザーバコンピューティングの物理実装』で紹介されている光リザーバコンピューティングなどがその例となります。それ以外の方法としては、空間的に集積度を上げる方法が考えられます。一般に光の干渉を用いる限りは光回路を構成する要素のサイズはおおむね光の波長程度のサイズが限界となります。それに対して、例えば、モード型の光量子情

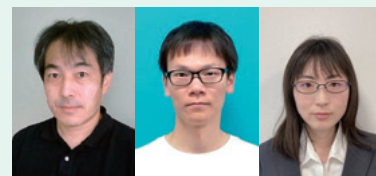
報処理では、2値（量子ビット）ではなく複数の導波路で多値（量子ディット）の状態を用いる方法が提案されています。その考えを推し進めてモードの数を増やしていった極限として、モードではなく波面を使って波面に情報を載せて干渉により計算をさせる、光回路の“モノリシック集積”というアプローチも考えられるのではないかと思います。すでに、光回路の屈折率分布全体を使った光回路の設計手法として波面整合法という手法が提案され、屈折率分布全体を光回路と考えた場合に光の回路そのものがニューラルネットワークとも対応していることが示されています⁽⁵⁾（図5右）。また、それを発展させたSchrödingerネットワーク⁽⁶⁾という発展方程式に基づくニューラルネットワークも提案されています。光量子コンピュータやニューラルネットワーク等の新たな技術の展開と関係しながら、次世代のコンピューティング技術に向けて、光による計算を実現する光回路技術は今後も発展していくものと期待されます。

参考文献

- (1) Special Feature: “Silica-based Planar Lightwave Circuits for Photonic Networks,” NTT Technical Review, Vol. 3, No. 7, pp. 13-41, 2005.
- (2) J. Carolan, C. Harrold, C. Sparrow, E. M. López, N. J. Russell, J. W. Silverstone, P. J. Shadbolt, N. Matsuda, M. Oguma, M. Itoh, G. D. Marshall, M. G. Thompson, J. C. F. Matthews, T. Hashimoto, J. L.

O’Brien, and A. Laing: “Universal linear optics,” Science, Vol. 349, No. 6249, pp. 711-716, 2015.

- (3) G. Masada, K. Miyata, A. Politi, T. Hashimoto, J. L. O’Brien, and A. Furusawa: “Continuous-variable entanglement on a chip,” Nature Photonics, Vol. 9, No. 5, pp. 316-319, 2015.
- (4) 高梨・芹川・猪ノ口・坂巻・阪本・笠原・橋本・古澤: “導波路素子上での量子エンタングルメントスワッピング,” 日本物理学会第73回年次大会, 25aK203-7, 2018.
- (5) T. Hashimoto: “Wavefront matching method as a deep neural network and mutual use of their techniques,” Optics Communications, Vol. 498, 127216, 2021.
- (6) M. Nakajima, K. Tanaka, and T. Hashimoto: “Neural Schrödinger Equation: Physical Law as Deep Neural Network,” IEEE TNNLS, pp. 1-15, 2021.



（左から）橋本 俊和/ 阪本 隼志/
小仁所 志菜

平面光波回路（PLC）はある意味単純な線形な光回路ですが、光量子コンピューティングなどと結び付いて思いもよらない機能を発揮しようとしています。さらに研究を進めて世の中へ“思いもよらない”の貢献ができればと思います。

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所
企画部研究推進担当
TEL 046-240-2022
FAX 046-240-4328
E-mail sende-kensui-p@hco.ntt.co.jp

光デバイスによる リザーバコンピューティングの物理実装

NTTでは、AI（人工知能）処理の抜本的な高速化・低電力化に向けて、光によるニューラルネットワーク演算技術を検討しています。本稿では、特にリザーバコンピューティング（RC）と呼ばれるニューラルネットワークモデルの光デバイス実装について説明し、その性能と応用に向けての取り組みについて紹介します。

なかじま

中島

みつまさ

光雅

つるがや

鶴谷

たくま

拓磨

たなか

田仲

けんじ

顕至

はしもと

橋本

としかず

俊和

NTT 先端集積デバイス研究所

光技術とAI時代の コンピューティング

現在の情報処理技術は、長距離の光ファイバ通信をはじめとする大容量な光伝送技術の進展によってもたらされてきました。このような技術開発の過程で、光・電子技術間の障壁は低くなり、集積回路上に光回路・電子回路の混載する光電融合という技術が現実味を帯びる時代となりました⁽¹⁾。光電融合技術は、光による効率的な情報伝送をより微小なスケールで実現する方向

で進展していますが、さらなる発展形として、情報処理や演算まで光回路上で実行する「光コンピューティング」という技術分野が近年注目を集めています^{(2), (3)}。この背景には、先述したような光通信の進展による技術進化のほかに、AI（人工知能）分野の爆発的な進化が関係しています。

AIにおける情報処理には、人工ニューラルネットワーク（ANN）と呼ばれる脳の処理にインスパイアされた計算アルゴリズムが活用されています。この計算の中身は、膨大な量の行

列演算と非線形処理によって構成されており、近年のICT社会の進展に伴って、ますます計算需要が増大しています。このような背景で、AI計算の高速化や低電力化に向けたANN処理専用の計算回路の研究開発が活発化してきています。光演算では、従来の電子回路上のデジタル演算とは異なり、光信号の強度や位相のようなアナログ的な値を情報とみなし、その伝搬や干渉を利用して計算します。例えば図1(a)のように光干渉系に光信号を入力すると、互いに干渉し合った光信号が出力

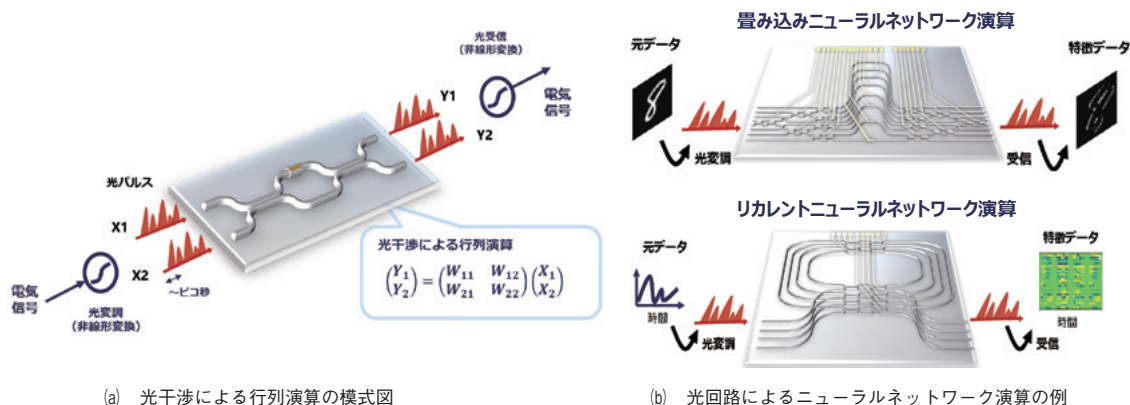


図1 AI情報処理のための光演算

されますが、このときの出力信号は入力信号に対してある行列積を演算した結果としてとらえることができます。

この演算は光の伝搬と干渉のみで実行され、原理的に高速かつ低電力に演算可能です。さらに時間、波長、空間といった光特有の多重化技術を利用して、大規模な並列演算を実現することもできます。図1(b)のように、光干渉系の構成を適切に設計することで種々のANN向けの演算を実行することができます。光演算はデジタル回路のようにさまざまな計算に柔軟に対処することは困難ですが、行列積のような特定の演算を効率的に実行できます。一般的なコンピューティング用途としては、光演算は電子回路による演算に優位性を見出せず、研究が停滞した時期もありましたが、AI処理の専用回路の台頭によって、再び実用化に向けた取り組みが世界的に始まっています。

NTTでは、光演算を上記のような特定の演算処理に適用することで、将来的なAI計算の抜本的な低電力化・高速化をめざしています。本稿では、特にリザーバコンピューティング(RC)と呼ばれるニューラルネットワークの光デバイス実装について紹介します。

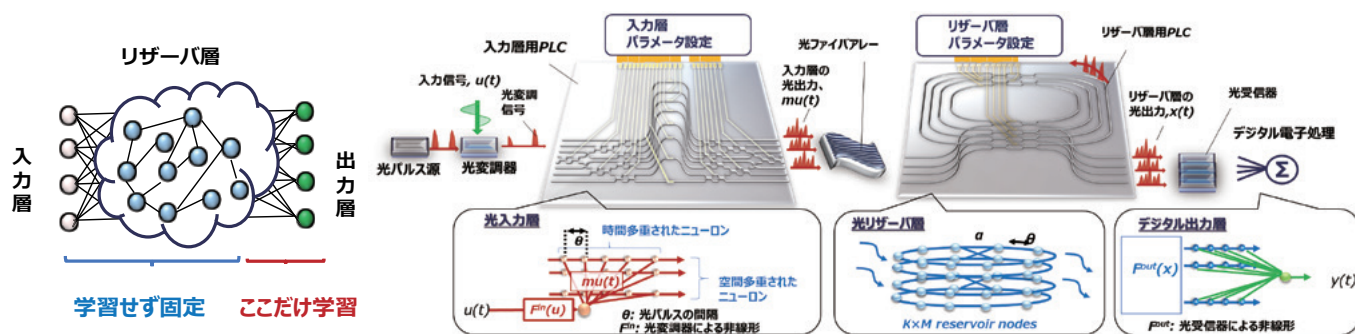
光デバイスによるリザーバコンピューティングの物理実装

RCは図2(a)のような、回帰的な接続を持つリカレントニューラルネットワークの一種です。最大の特徴は、入力層とリザーバ層と呼ばれるネットワークの重みをランダムに設定し、学習しないという点です。出力層のみを最小二乗法等の線形回帰で学習しますが、この処理は通常のANNモデルで利用される学習法(誤差逆伝搬法)に比較し非常に簡便です。このように単純化した構成にかかわらず、良好な性能が得られることが報告されています。RCは、人間の小脳のような情報処理をしているといわれており、高速な学習に適しています。光実装するうえでも、大半の処理をパッシブな光回路で表現できますので、光実装と相性が良いといえます。

図2(b)に光実装したRCの模式図を示します⁽⁴⁾。入力層用の光回路では、光信号が時間・空間方向に重み付けされます。リザーバ層用の回路では、リング状の光回路アレーが回帰的な結合を表現します。この出力信号を、光受信機(PD)を介して電気信号へ変換し、デジタル回路上で出力層に相当する重み付けをすることでRCの基本動作を模倣します。ここで、一般的な

ANNモデルでは、光回路で表現される重み(例えば、光干渉系の位相)を学習とともに動的に更新していく必要があります。一方、RCでは光回路部に相当する結合をランダムに固定したまままでいいので、この処理ボトルネックを解消できます。出力層の重み付け処理はデジタル回路で実行する必要がありますが、この操作はコヒーレント光通信における信号歪の補償と同様な操作であるため、従来の通信技術を流用した高速な処理が原理的に可能です。

前述の光デバイスを、光通信で培った平面光波回路(PLC: Planar Light-wave Circuit)と呼ばれる技術を用いて、実装しました。回路内で表現可能なニューロンの数が性能に大きな影響を持ちますが、構成の工夫とPLC技術によって、512ニューロンが実装されています。これは、従来の光チップ実装と比較し、30倍以上の値になります。このデバイスを用いてMNISTと呼ばれる画像認識のベンチマークタスクを解かせたところ、最大で91.3%という分類精度が得られました。これは、光チップ実装としては最高精度となります。また光回路内では、1画像当たり約17.1 nsという高速な処理が可能であることを実験的に確認しました。光回路での、1秒間当りの計算回



(a) リザーバコンピューティングの模式図

(b) リザーバコンピューティングの光回路による物理実装

図2 光回路によるリザーバコンピューティング

数は20兆回と見積もられ、これは最新のCPU等の計算性能を凌駕する値です。さらに波長多重などの光の自由度を利用することで、同一チップ中で複数の演算を並列的に実施することも可能であり、原理的には、1秒当たり1京回に相当する計算を行うことも可能です。

光リザーバコンピューティングの応用に向けて

前述のように光演算は高速な処理が可能ですので、高速処理を必要とする応用に特に適しています。そのような応用例として、図3(a)のような光通信の信号処理があります。現在の光通信では、デジタル信号処理装置(DSP)を用いて受信波形の歪を補償していますが、通信の大容量化に伴ってDSPの処理の負荷が課題となっています。そこで、信号処理の一部を、RCをはじめとした光ANNへ担わせる方式について検討が進められています⁽⁵⁾。NTTでは、このようなDSP処理負荷のオフロードだけでなく、従来のコヒーレント受信器の光フロントエ

ンドの構成を抜本的に小型簡素化可能な手法についても検討を進めています⁽⁶⁾。

さらに、より一般的な機械学習のタスクへと適用することも検討しています。その実現に向けては、ハードウェアを意識せずに、ソフトウェア上で定義したタスクを通常のコンピュータと同じように駆動できることが望ましいといえます。そこで、図3(b)のようなFPGAと光RCが連携したテストプラットフォームを構築しました。ユーザは一般的に機械学習に用いられる言語である、Python/Pytorchから光RC系を駆動することが可能です。また、RCの物理実装の中でもっとも高い性能を達成できることを実験にて確認しています⁽⁷⁾。現状では、まだまだCPU/GPU等を用いたデジタル演算には劣る点も多いですが、光の特徴を活かした応用展開に向けて検討を進めています。

光演算性能向上に向けて

さらなる演算性能の向上に向けては、光デバイス性能の向上が欠かせません。例えば、従来の光通信では信号

歪の要因となるためにむしろ抑制されてきた非線形な光学効果も、光学的なニューロン実装として積極的に活用する必要があります。石英で構成されるPLC単体ではこのような非線形機能の発現は困難なため、前述の物理実装では非線形性に関しては光電変換による電子的な処理に頼っていました。一方、光非線形素子として機能するIII-V族半導体光デバイスをSi(シリコン)上に集積することで、光回路上でもニューロンの非線形活性化を光学的に表現することが可能です。そこで、図4(a)のような半導体光増幅器(SOA)がSi上に集積された素子を活用し、非線形なりザーバ層を光学的に実装してベンチマークタスクによる性能評価を行いました。実験結果から、光学的な非線形処理を用いた場合も光電的な処理にそん色ない良好な性能が得られることが分かりました⁽⁸⁾。この成果を基に、さらなる演算機能の光回路への集積に向けて検討を進めています。

また、先端的な機械学習モデルへの適応に向けては大規模な光集積も必須

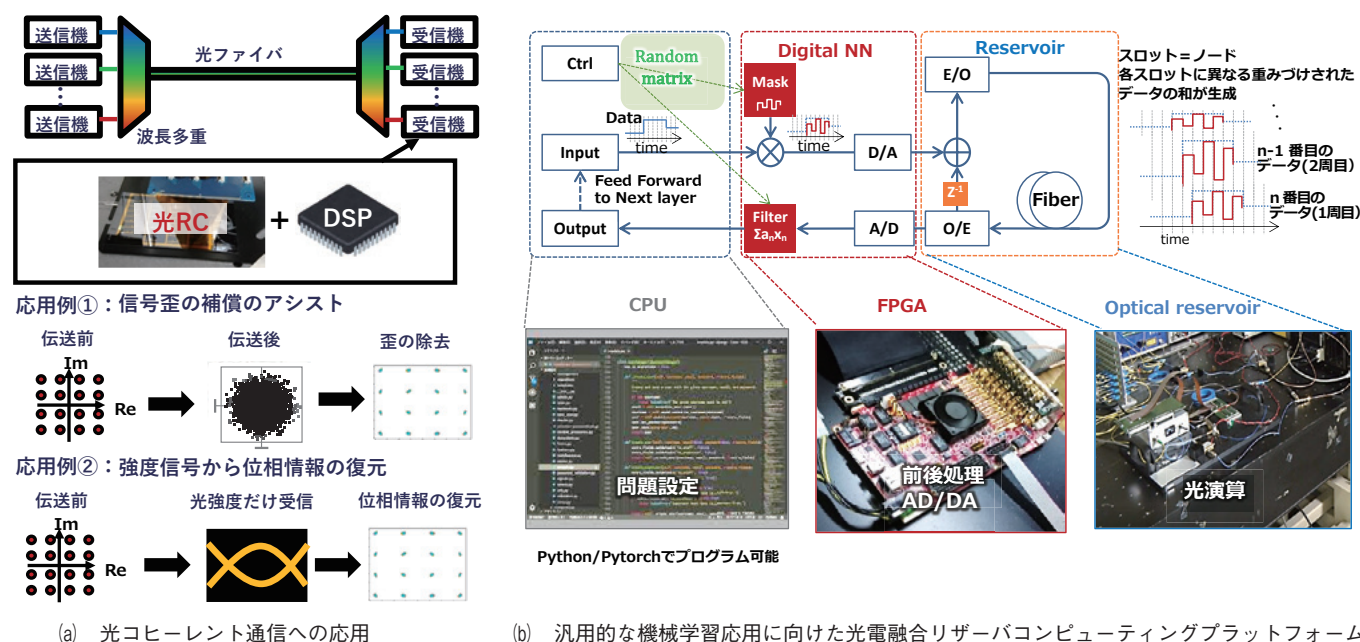
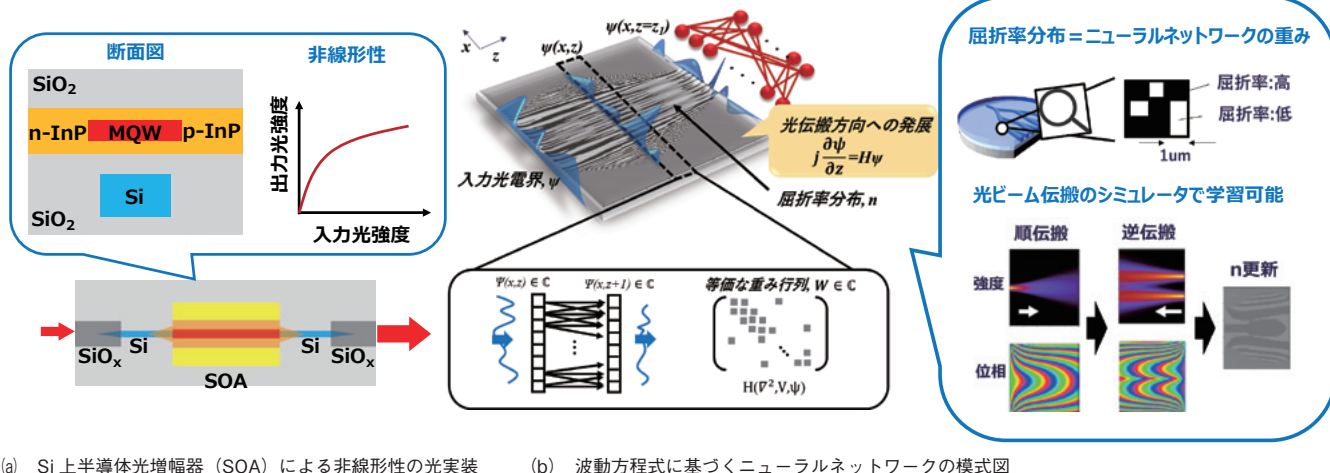


図3 光リザーバコンピューティングの応用例



(a) Si 上半導体光増幅器 (SOA) による非線形性の光実装

(b) 波動方程式に基づくニューラルネットワークの模式図

図 4 光演算性能の向上に向けた取り組み

です。最先端なANNモデルでは、およそ100億ものパラメータが存在しますが、図1(a)のような光干渉系はおよそ100 μm 角と大きいため、現実的なサイズでの実現は困難です。そこで、発想を転換し、図4(b)のように、光の波動伝搬自体をニューラルネットワークとしてみなす枠組みを提案しました。また、この枠組みでは、光回路中の屈折率の分布自体がニューラルネットワークの重みと等価であることを見出しました⁽⁹⁾。屈折率分布はおよそ1 μm 角のオーダーで変化させることが可能であるため、面積比で従来方式の100万倍程度の大規模実装が可能となります。また、シミュレーション解析では、先端的なネットワークモデルとそ色のない性能が得られることを確認しています。このような新規な処理方式等も取り入れつつ、光演算全体の性能向上に向けて取り組みを進めています。

おわりに

光コンピューティングによるAI演算の高速化・低電力化に関する取り組みについて述べました。光の特徴を利用することで、高速・低電力な並列演算が可能となり、将来的なAI処理応用への期待が高まっています。一方

で、すでに成熟した従来型のコンピューティングに対する優位性を確立していく道りは決して簡単なものではありません。本稿でも紹介したように、光デバイス単体の研究を超えて、アルゴリズムや具体的な応用例を合わせて考えていくことが、将来の光電融合型のコンピュータの実現に向けて肝要であると考え、今後も検討を進めていきます。

参考文献

- (1) 坂本・瀬川・佐藤：“ディスアグリゲータッドコンピューティングのための光電融合技術,” NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 5, pp.45-49, 2021.
- (2) 野崎・新家・納富：“ナノフォトニクス技術による光電融合アクセラレータへの研究展開,” NTT技術ジャーナル, Vol. 32, No. 8, pp.23-28, 2021.
- (3) B. J. Shastri, A. N. Tait, T. Ferreira de Lima, W. H. P. Pernice, H. Bhaskaran, C. D. Wright, and P. R. Prucnal: “Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing,” Nature Photonics, Vol. 15, pp.102-114, 2021.
- (4) M. Nakajima, K. Tanaka, and T. Hashimoto: “Scalable reservoir computing on coherent linear photonic processor,” Communications Physics, Vol. 4, pp.1-12, 2021.
- (5) A. Argyris: “Photonic neuromorphic technologies in optical communications,” Nanophotonics, Vol.1, pp. 897-916, 2022.
- (6) M. Nakajima and T. Hashimoto: “Phase-Retrieval Coherent Detection with On-Chip Photonic Linear Processing,” Frontiers in Optics, FW5E.2, 2021.
- (7) M. Nakajima: “Physical Deep Learning with Biologically Plausible Training,” arxiv-2204.13991, 2022.
- (8) T. Tsurugaya, T. Hiraki, M. Nakajima, T.

Aihara, N. P. Diamantopoulos, T. Fujii, T. Segawa, and S. Matsuo: “Reservoir Computing with Low-Power-Consumption All-Optical Nonlinear Activation Using Membrane SOA on Si,” CLEO: Science and Innovations, AW2E.5, 2021.

- (9) M. Nakajima, K. Tanaka, and T. Hashimoto: “Neural Schrödinger Equation: Physical Law as Deep Neural Network,” IEEE TNNLS, pp.1-15, 2021.
DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3120472



(上段左から) 中島 光雅/ 田仲 顕至
(下段左から) 鶴谷 拓磨/ 橋本 俊和

光コンピューティングは、デバイス単体レベルからシステム、アルゴリズムまで多岐にわたる学際的な分野です。NTTの多様な研究領域を活かし、革新的な成果創出に向けてチャレンジしていきます。

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所

光電子融合部

TEL 046-240-2022

FAX 046-240-4328

E-mail sende-kensui-p@hco.ntt.co.jp

主役登場

光で計算機を再考する

中島 光雅

NTT先端集積デバイス研究所
主任研究員



中国のSF小説『三体』を読んだことのある方はいらっしゃるでしょうか。三体文明と呼ばれる異種文明との邂逅、対立を描くヒューゴー賞も受賞した名著ですが、その中に三体文明における最初のコンピュータを描く描写があります。彼らのコンピュータは何と人力です。ゲート操作と呼ばれる演算ユニットを個人が担い、マスゲームよろしく次々と人から人へと情報を展開していき演算するわけです。ただし、三体星人のコミュニケーションは私たちのように音声言語でなく、光通信で行われるため、私たちの思った以上に高速に計算できるとされています。

ここで興味深い点は、私たちが電子トランジスタや電子配線で作るのが当たり前と考えているコンピュータのゲート操作や情報転送は、実はいろいろな選択肢があるだろうという点です。極端な話、三体星人のように人力でもいいわけです。しかし、実用上では、計算効率や速度、サイズ、量産性などといった指標があり、20世紀の技術発展の中で選択、淘汰され電子回路によるコンピュータが生き残ってきました。

では、21世紀もそのトレンドは続くのかというと、必ずしもそうではないと私たちは考えています。例えば、IBMでは将来のコンピュータの単位として、bits/neurons/qbitsが重要になるだろうと位置付けています。bitsは従来のノイマン型コンピュータの単位、neuronsは人工知能のためのニューラルネット演算の単位、qbitsは量子コンピュータの単位です。bitsの取り扱いには、現状では

デジタル電子回路が適していたことが歴史によって証明されていますが、他の単位はどの回路がもっとも適しているかは分かりません。また、bitsの操作に関しても、すべてを同一回路（つまり電子ならすべて電子回路）でやろうというのが従来の考え方でしたが、ゲート操作には電子回路を、情報伝達には光回路を利用する等のように異なる技術を使ってもいいわけです。

このように、従来の計算機で当たり前であるとされていた枠組みを外したときに、本特集で記述した光コンピューティングというのは魅力的な候補となります。neuronsに対しては、光の波長・空間・時間に対する並列性を利用した高速・低電力な人工知能向けのコンピューティングを、qbitsに対しては光子の性質を利用した常温での高速量子演算を提供可能です。とはいえ、光を計算に利用しようというのは現時点ではやはり突飛な発想に思えるかもしれません。しかし、研究者目線では、これだけ光技術が成熟し、また電子回路と光回路が融合しつつある現代では、自然な発想かとも考えています。電子計算機の技術が成熟した今、私たちが現在製造可能な光コンピュータは、三体文明のコンピュータのような滑稽さがどこかにあるかもしれません。しかし、5年、10年と時を経るにつれて、私たちのめざした方向が間違いではなかったと考えていただけるよう、これからも日々研究に邁進していきたいと思っています。

挑 戦 す る 研 究 者 た ち CHALLENGERS



秋山満昭

NTT 社会情報研究所
上席特別研究員



あらゆる技術者が セキュリティの素養を 持つことが当たり前の 世界になったらいい

世界最先端の暗号技術やサイバーセキュリティ対策技術等の情報科学分野の研究開発を長きにわたり積み重ねてきたNTT研究所。社会価値、人々の幸せ、法制度、社会受容性等の社会科学分野の研究開発を融合し、社会の変革と発展をめざす秋山満昭上席特別研究員に研究の進捗と研究者としてのあり方を伺いました。



「技術」「人間」「社会」の関係・相互作用に立脚した
社会技術システム (Socio-technical system) の
観点からのアプローチ

2019年にご登場いただいてから3年が経ちましたが、その後の研究活動はいかがでしたか。

前回から継続して、サイバー攻撃に対応して、ユーザの安心・安全を守るためのサイバーセキュリティについて、①サイバー攻撃の特徴を分析、情報を蓄積し（サイバー攻撃対策用インテリジェンス）、それを活用して将来発生し得る類似の攻撃を防ぐことをテーマとした研究、②攻撃者

の視点に立ってシステムやサービスのバグ等の潜在的なセキュリティ・プライバシー脅威欠陥を発見し、対処することで攻撃を未然に食い止めるオフェンシブセキュリティの研究、③セキュリティ・プライバシー脅威発見のための実験方法や発見した脅威の公開方法など、先進的研究成果を正しく社会に還元するためのサイバーセキュリティ研究倫理に関する活動、④システム・サービス等に対するユーザのセキュリティ・プライバシー意識や行動の把握に基づいたセキュリティ脅威の定量化を行うことで、セキュリティ脅威への対処の優先度付けやユーザの認識を助け、より安全な行動の判断ができるシステム設計等をめざす、ユーザブルセキュ

リティの研究を行っています。

2021年7月に研究所の組織再編が行われ、NTT社会情報研究所（社会研）が設立されました。社会研は、さまざまな領域の研究開発を複合的に進める必要があると考え、人々の幸福の実現をめざしたWell-being研究、ICTと人文社会科学を融合させた社会システムの変容を促す技術、サイバー攻撃等の脅威を排除する新たな技術の確立、社会情報の分析・予測によるセキュアな社会システムの実現のための先進的変容のコンセプトを具現化する技術の確立、高付加価値な社会システムの実現に向けて安全性と利便性を両立した情報流通・利活用を促進する技術の確立、暗号理論に加え物理的な性質を活用した新しいデータ保護技術の確立、世界を牽引する次世代暗号の基礎理論の創出などに取り組んでいます。

これまで「セキュリティはコスト」としてとらえられることが多かったのですが、社会研ではこうした観念から脱却し「セキュリティ・プライバシーが保たれているからこそ人や社会を動かし、発展させられる“原動機”となる技術」として研究開発に臨んでいます。そこで私は、社会研において研究活動を進めるというチャンスを活かして、以前と比べて人間の行動や社会的な側面等の学際的部分のウェイトを高くしてきています。現在、新しい技術に関するセキュリティやプライバシーについて十分に明らかでないまま、それを利用せざるを得ない状況であり、セキュリティ・プライバシーに関する新しい脅威が顕在化しています。こうした状況にあって、私は改めてサイバーセキュリティの科学的基礎の確立、および学際的な観点から問題を解決するアプローチが必要であると考えています。

まず、産業界ではサイバーセキュリティ技術は日々発生するサイバー攻撃に対して対症療法的で、経験則的なセキュリティ対策および運用が主流でした。このような事後対策のセキュリティでは、膨大な対処がモグラたたき状態で必要になるため、人的コスト増、対応の迅速性の欠如、セキュリティ疲れが発生し、高度化するサイバー攻撃に対して信頼できるICTシステムを維持することが困難です。問題の本質をとらえた根本的な解決のためには、理論的に正しい数理科学的手法、包括的な理論、原理的なシステム設計手

法、複雑かつ動的なシステムに対するさまざまなレイヤ・スケールにおけるモデル化、セキュリティ技術の効果を評価するための指標づくり等を通して、透明性・再現性・検証可能性のあるサイバーセキュリティ技術をつくり出すことが重要であると考えています。

また、学際的アプローチの観点から、「技術」「人間」「社会」の関係・相互作用に立脚した社会技術システム（Socio-technical system）を追究しています。技術がセキュアであっても、人間が誤った利用方法をすればセキュアではなくなることもあり、また、社会に普及しなければその恩恵を十分に受けられません。

実際に、これまで多くのセキュリティ技術が考案されているにもかかわらず、十分に活用されなかったものは数多くあります。エンドユーザがフィッシング詐欺に騙されること、開発プロジェクトにおいてセキュリティ・バイ・デザインを実践する難しさ等の理由が解き明かされていないために、技術が正しく活用されなかった事例も多々あります。

こうしたことから、私は根本的な原因を人間や社会の観点から明らかにして、ICTシステムの設計から見直そうと考え、コンピュータサイエンスに加え、社会科学や社会心理学等を含めた学際的なアプローチも取り入れています。特に、ユーザブルセキュリティにおいては、システムに着目するだけでは解決できない人間の認識・判断に依存するセキュリティ・プライバシー問題を解決することをめざしています。具体的には、セキュリティ・プライバシーの観点から人間の行動・メンタルモデル・意思決定プロセスを観測・分析し、得られた知見をシステムの設計・実装・運用にフィードバックすることで、人々がセキュリティ・プライバシーに関して正しい認識に基づいた適切な判断を可能にすることです。

これを実現するには人間の行動や認識をいかに適切に観測・分析するかが重要になると考え、新たに誤情報拡散対策に臨んでいます。誤情報拡散とは、意図せず誤った情報が拡散される misinformation、害を与える意図を持って誤った情報が拡散される disinformation の総称です。例えば、ソーシャルメディアにおける誤情報拡散は人間の正しい認知や判断を脅かす次世代のサイバー攻撃ですし、誤



情報拡散はフィッシングの被害に遭う・デマに騙されるなどの個人の問題にとどまらず、2016年の米国大統領選のように民主主義に大きな影響を及ぼすこともあります。



数々の世界トップ会議で採択。社会的課題を浮き彫りに

これらの研究活動において、大きな学術的成果を上げられたそうですね。

オフenseセキュリティについては、サイバーセキュリティのトップ会議の1つであるNDSS2020に採択され、Distinguished paper awardを受賞しました⁽¹⁾。Webコンテンツを別のWebサイトに再ホストして利用するサービスをWebリホスティングサービスと命名し、これらWebリホスティングサービスに対して複数の脅威モデルを考え、検証によって実際にそれらが顕在化する条件を明らかにしたことが評価されました(図1)。具体的には、Webリホスティングサービスにおいて、元々は異なるオリジン(URLのプロトコル・ホスト・ポートの組によって定義される属性)のWebコンテンツが同一のオリジンに統合される際に、Webセキュリティの根幹となる仕組みが作用しなくなるという、重大な現象を初めて発見しました。これはWebリホスティングサービスにおいてさまざまな攻撃が可能であること、そしてそれら攻撃を回避するためのWebサービスにおける設計指針を示すものです。

この研究により、脅威が顕在化する前に私たちが発見し、設計段階で対策ができたことで、事業者のサービスそのものの設計見直しの回避につながりました。先ほどもお話ししましたが「単に脆弱性を発見する」のではなく、このようなセキュリティ・プライバシー上の脅威を発見するための汎用的な検証方法や理論的基礎の確立をめざし、現在さまざまな通信が集約されているWebの分野を対象として、多くの脅威とその検証方法を確立してきました。Webにおいては5年程度でこれまでの知見をまとめ、汎用性のある検証方法や理論的基礎の確立につなげたいと考えています。

ユーザブルセキュリティにおいては、開発者や開発プロジェクトに着目したセキュアなソフトウェア開発を実現するための研究が、サイバーセキュリティの難関会議ACSAC2021で採択されました⁽²⁾。これは、日米のプロのソフトウェア開発者に対して大規模オンラインアンケートを実施して、組織的な要因を明らかにしたもので、意思決定権限の有無や意思決定の困難さなどの問題等を明らかにしました(図2)。

さらに、人間が騙される原理を解明し適切なサポート技術をつくる研究は、サイバーセキュリティの難関会議SOUPS2021にて採択されました⁽³⁾。これまでは暗黙的に母国語のフィッシングメールに直面したときのユーザの認識や行動の調査・対策が研究されていましたが、私たちは世界の過半数を占める英語ノンネイティブに着目して、言

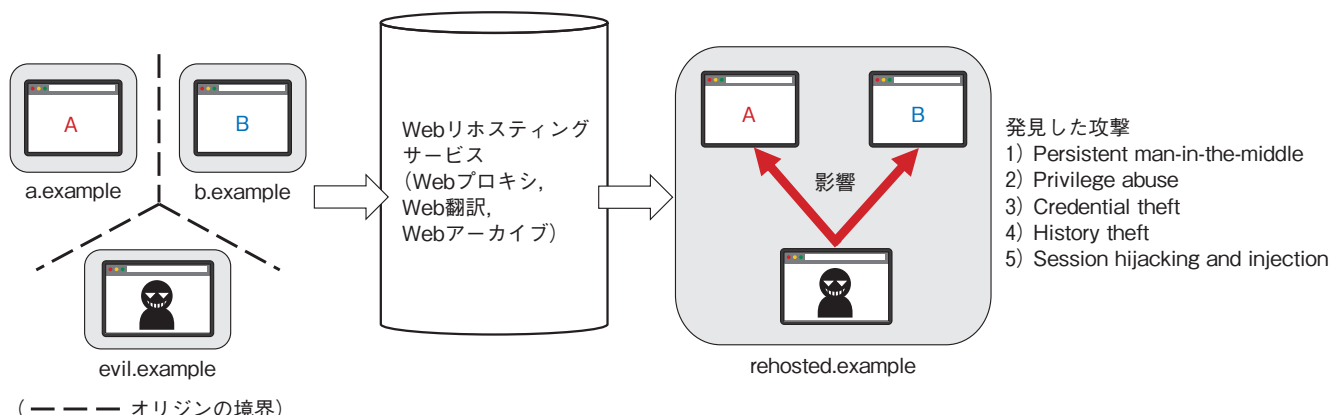


図1 Webリホスティングサービスの潜在的な脅威

語とフィッシングメールへの対処の関係を大規模調査で初めて明らかにし、英語ノンネイティブ特有のサポート技術を提案しました。

そして、サイバーセキュリティの難関会議EuroUSEC2021では、ユーザスタディの正しい方法論の研究で、フィッシングに関して人間がなぜ騙されるのかに関するユーザ調査手法の問題点を明らかにした研究が採択され、Best paper awardを受賞しました⁽⁴⁾。具体的には、ユーザスタディにおいて利用されている実験参加者のスクリーニング手法では、もっともデータが必要となるはずの“フィッシングに騙されやすい不注意な実験参加者”を除外してしまうという、大きな矛盾があることを初めて明らかにしたものです。

ほかにも、ソーシャルメディアにおける誤情報拡散対策に関する研究は、国際会議NetSci-X2022にて採択される等の成果が出ており⁽⁵⁾、その中のいくつかはNTT R&Dフォーラムにおいても出展・報告しました。



好きこそものの上手なれ

課題やテーマを探すときに心掛け、意識して実行していることを教えてください。

まず、新しい技術やサービスに興味を持ち、常に自分の知識をアップデートすることです。技術単体で考えるのではなく、技術がどのように活用されるのかを、それにかか

わる人々や組織、社会、法律や倫理などの観点から総合的に考えています。

加えて、異なる分野の専門家と議論することです。何かを実現しようとする、自分の専門分野を越えることはよくあることです。学際的アプローチのために他分野の研究者との連携は必須といえます。その意味では、NTT研究所は改めて人材の宝庫だと感じています。

私は「好きこそものの上手なれ」という言葉は研究者としての大切な姿勢であると感じています。私自身は人より優れた特別な研究の才能を持っているとは思っていませんが、サイバーセキュリティの諸問題について「面白いと思う気持ち」は人一倍持っていると思います。

これまで、技術的な能力がとても高いにもかかわらず研究をやめてしまった人、「研究をやっていく自信がない」といって研究職に就けなかった人を多く見てきました。しかし、研究はすぐに成果が出ないもので、1つの成果を出すのに数年、場合によっては10年、20年かかるものもあります。そのような状況において、「自分には才能がない」と思ってやめてしまうこともあるかもしれませんが、もし、自分が好きなことであれば、たとえ成果が出ようが出まいが誰に命令されるわけでもなく、高いモチベーション・興味を持って継続することができるのではないのでしょうか。継続して取り組むことができれば、結果的に成果が出る可能性は確実に上がります。

こうしたことから、私は、まず自分の取り組もうと思った研究について、自分自身が本当に好きかどうかを考えま

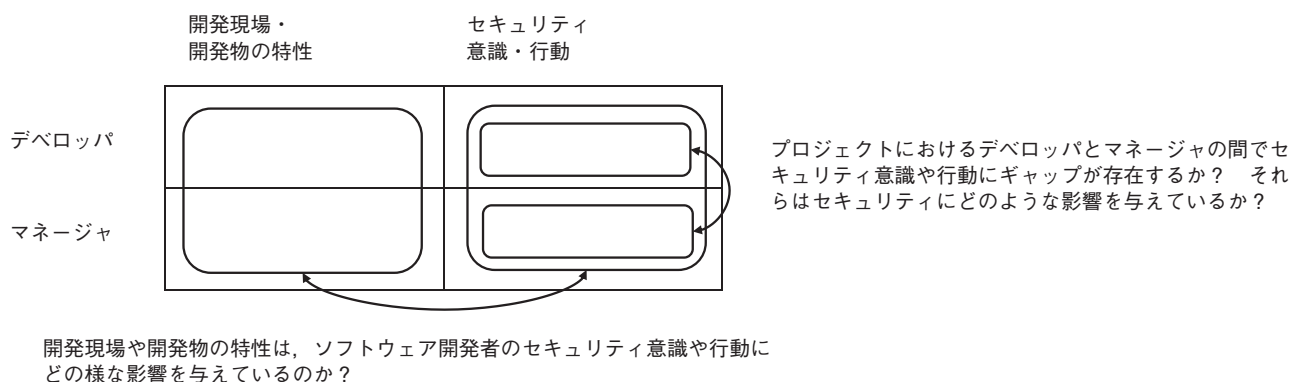


図2 セキュアなソフトウェア開発を阻害する要因の分析



写真 国内シンポジウムでのパネルディスカッションの様子

す。本当に好きならば、研究の成功・失敗はあくまでも結果として受け止めるだけなのでそれに左右されることなく、私にとって好きだという思いが揺らぐことはありません。

今後はどのように研究活動を展開されるのですか。

これまでセキュリティに関する研究開発が、個別の脅威に対して単体かつ後追いで考えられてきたことが多く、根本的な課題の解決に結びつきにくかったという現状があります。私はこれにかんがみ、セキュリティの専門家だけでなく、あらゆる技術者がセキュリティの素養を持って、セキュリティを考慮したもののづくりをすることが当たり前の世界になったらいいと思っています。つまり、技術者全員がセキュリティ技術者の側面も持ってくれることを望んでいるのです。誰でも利用できるセキュリティ技術をつくり出す手伝いをするのが私の仕事だと思っています。そうすると、セキュリティ技術者という言葉も意味が変わってきます。

それから、私は研究倫理にも取り組んでいます。国内のセキュリティ研究コミュニティにおいては、2016年ごろから継続してサイバーセキュリティ研究倫理の啓発をしていますが、その考え方が一定のレベルまで広まっています。実は、米国の学会であるIEEE S&Pでこういった対策がなされるよりも前の2018年から、日本では国内最大級のセキュリティシンポジウムCSSにおいて、相談窓口が設置

されています。また、研究倫理チェックリストも各種研究会で活用できるかたちでCSEC（コンピュータセキュリティ）研究会から公開されるまでになりました。

2021年は、OSS（オープンソースソフトウェア）コミュニティにおけるコードレビュープロセスを評価するため、Linuxカーネルに脆弱性入りパッチをコミットする実験を行った論文が世の中で問題になったことを踏まえて、日本のサイバーセキュリティコミュニティにおいてもパネルディスカッションを実施、セキュリティ研究者と開発コミュニティとの関係について議論しました（写真）。このディスカッションにおいて私は、人間やその集まりであるコミュニティ・組織を対象にした実験は、それらに与える影響を十分に考慮したうえで設計・実施されなければならないし、開発コミュニティと研究者コミュニティとの分断があってはならない、研究者も開発者コミュニティの一員として一緒に取り組むことが重要、と主張しました。

今後も、このようにセキュリティ研究者がソフトウェア開発者をリスペクトし、より良い技術開発について協力していくことが重要であり、その普及啓発活動にも注力していきたいと考えています。

参考文献

- (1) T. Watanabe, E. Shioji, M. Akiyama, and T. Mori : “Melting Pot of Origins: Compromising the Intermediary Web Services that Rehost Websites,” NDSS 2020, San Diego, U.S.A., Feb. 2020.
- (2) F. Kanei, A. A. Hasegawa, E. Shioji, and M. Akiyama : “A Cross-role and Bi-national Analysis on Security Efforts and Constraints of Software Development Projects,” ACSAC 2021, Austin, U.S.A., Dec. 2021.
- (3) A. A. Hasegawa, N. Yamashita, M. Akiyama, and T. Mori : “Why They Ignore English Emails: The Challenges of Non-Native Speakers in Identifying Phishing Emails,” SOUPS 2021, Online, Aug. 2021.
- (4) T. Matsuura, A. A. Hasegawa, M. Akiyama, and T. Mori : “Careless Participants Are Essential for Our Phishing Study: Understanding the Impact of Screening Methods,” EuroUSEC 2021, Online, Oct. 2021.
- (5) S. Furutani, T. Shibahara, M. Akiyama, and M. Aida : “Competitive Information Spreading on Modular Networks,” NetSci-X 2022, Porto, Portugal, Feb. 2022.

挑 戦 可 る 研 究 開 発 者 た ち CHALLENGERS



池田大造

NTTドコモ
サービスイノベーション部
担当部長

信念とパッションを胸に 妄想しよう！ 心の声に耳を傾けて ワクワクする未来を描く

NTTドコモは、「新しいコミュニケーション文化の世界の創造」に向けて、よりパーソナルなコミュニケーションを確立し、“Wellbeing Society”の実現をめざしています。その取り組みの1つである、「ライフスタイル共創ラボ」の一環として、「バーチャル銀座」を開発し、周遊体験やゲーミフィケーションを通じて地域活性化をめざす、NTTドコモ サービスイノベーション部（現：NTT新ビジネス推進室）池田大造担当部長に事業に寄せる思いと研究開発者の醍醐味を伺いました。



メタバースの可能性を示す 一大プロジェクト

これまで手掛けてこられた研究開発を教えてください。

これまで、私はビッグデータ、AI（人工知能）の領域で、モバイル空間統計や画像認識を中心に研究開発を手掛けてきました。

「モバイル空間統計」はドコモの携帯電話ネットワークの仕組みを活用して生成される人口統計です（図1）。日本全国の人口を24時間365日把握でき、「分布統計」と「動

態統計」を提供するサービスです。携帯電話の着信のために基地局で把握している位置データ・属性データを活用し、個人情報・プライバシーを保護したうえで大規模データを集計処理することで、信頼性が高い統計情報を生成する技術を開発しました。モバイル空間統計は、調査期間を1日単位や年平均、平休日別の集計など、柔軟に設計することができ、空間解像度は500 mメッシュなどの単位で人口を推計することができます。日本全国における人口分布の時間変動に加え、その属性（性別・年代）や、どこからどれだけの人が来ているか、あるエリアに住む人がどこに分布しているかが分かります⁽¹⁾。

モバイル空間統計は、エリア毎の携帯電話端末数から生成された“いつ” “どんな人が” “どこから” “どこに” 動いたかが分かる新たな人口統計



図1 モバイル空間統計

画像認識は画像に何（例えば人や車）が写っているかをAIにより認識・識別する技術です。「ドコモ画像認識プラットフォーム」は、さまざまな業務の効率化やサービス性向上に貢献するソリューションのコアとなる画像認識エンジンをAPI（Application Programming Interface）として提供するクラウドサービスです（図2）。画像認識に関連する7つのAIエンジンを自在に組み合わせて利用することが大きな特長です⁽²⁾。また、ユーザはアノテーションされた（メタデータが付与された）画像などのデータセットを用意することで、画像認識エンジンの学習モデルを自身で作成・カスタマイズすることができます。

これらのテクノロジーから生まれたイノベーションの代表例を聞かせていただけますか。

VR（Virtual Reality）等により交流できる仮想空間、メタバースとして「バーチャル銀座」を開発しました⁽³⁾（図3）。国土交通省Plateauプロジェクトの3D都市モデルと独自に作成した建物CGモデルにより広大な銀座周辺のフィールドを再現しています。5G（第5世代移動通信システム）SA（Stand Alone）とクラウドダイレクトを用いたクラウドレンダリング型のマルチプレイ、アプリなしのWebブラウザ経由でのリアルタイムコミュニケーション、およびモバイル空間統計による人流データの3D空間表現や画像認識AIを活用した非言語コミュニケーションを実現しました。パートナー会社と連携し、バーチャル空間上に再現した銀座で、周遊やゲーム感覚で買い物をするにより地域の魅力度向上や経済活動の活性化につなげることをめざしています。

ドコモ画像認識プラットフォームは、簡易な操作で画像認識AIを開発・利用するための機能を提供

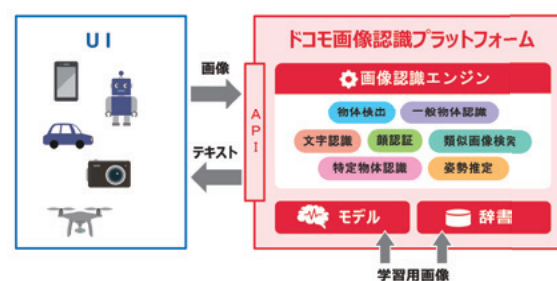


図2 ドコモ画像認識プラットフォーム

コロナ禍により対面による直接的なコミュニケーションが難しくなり、外出にも制限がかかる社会状況において、これを打開し貢献できることはないかという思いがきっかけで、日本を代表する国際都市である銀座を舞台に、これまで手掛けてきたモバイル空間統計や画像認識AIを活用できるのではないかと考えました。

銀座周辺のフィールドを構築するのに、3D都市モデルを活用しながら周遊スポットとなる建物は1つずつ作り上げていくところからのスタートでした。銀座らしさを表現するために、モバイル空間統計の人流データを用いて、銀座の人波を3Dアバターの群衆として再現しました。バーチャル空間だからこそそのワクワクする体験とは何かを突き詰め、街を舞台にしたeスポーツの要素を取り入れたゲーミフィケーションを導入し、画像認識AIを駆使して3Dアバターの表現を豊かにしたり、ジェスチャーができるようにしたり、3D空間で複数人での音声コミュニケーションを可能にするなど、さまざまな「しかけ」を組み込んで、テクノロジーをエンタテインメントに転換しました。



歌舞伎座や数寄屋橋のほか、ポーラ ギンザ、NISSAN CROSSING（ニッサンクロッシング）を バーチャル銀座上に再現した実証実験では、3D アバターを通じて、街を周遊しながら銀座の街並みの魅力に触れ、ゲーム感覚で街の歴史や文化を知り、デジタル広告を通じて新たなブランドに出会い、バーチャル店舗に訪れてデジタルアイテムの購入体験をしてもらいました。

この取り組みでは、バーチャル空間で街をつくることの意義を示すことができたかと自負しています。テクノロジーの使い方を示せただけでなく、これによりパートナーが集まり、街の活性化を促すことができる可能性を示しました。メタバースは初期投資が必要であるという事業課題はありますが、2008年に1枚の企画案から立ち上げたモバイル空間統計を5年余りの歳月をかけてサービスとして世の中に送り出し、現在ではさまざまな業界においてビジネスとしての価値を認められている経験を大きな糧に、メタバースは必ず到来する未来と確信していますから、長い道のりを覚悟して進めていきます。



テクノロジーとビジネスは一体で検討する

これまで手掛けてきた研究開発は高く評価されていますね。

モバイル空間統計の取り組みでは、2つの大きな賞をい

ただきました。1つは、携帯電話基地局データから生成される人口流動統計の振興の功績により、令和2年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞（科学技術振興部門）を受賞しました。これは携帯電話ネットワークの運用データを基に「人口流動統計」を開発し、24時間365日全国の交通総量と移動経路・手段別の交通量推計を可能とし、まちづくり、交通計画、防災計画、地方創生やマーケティングなど幅広い分野で活用されたことが認められたものです。大規模データを処理して生成された人口流動統計は、従来のアンケートベースの調査と整合する信頼性の高いビッグデータとして、パーソントリップ調査という公的統計でも活用されました。

そして、2022年には携帯電話基地局データから生成される人口流動統計の功績により、日本オープンイノベーション大賞（総務大臣賞）を受賞しました⁽⁴⁾。オープンイノベーションのロールモデルとして期待される先導性や独創性の高い取り組みとの評価をいただきました。これら2つの表彰を受けた人口流動統計は、国土交通省、東京大学・法政大学と産官学それぞれの強みを活かして共同開発したものです。ビッグデータが世の中に普及する前からその有用性を土木学会や地方公共団体に発信し続け、まちづくりや交通計画などで活用すべきだという機運や、活用事例の公開など社会が受容するために必要な土壌を創り上げたことが高く評価されました。

研究開発における価値創造で大切なことは何でしょうか。

私はテクノロジーとビジネスは一体で検討するべきだと考えています。例えば、私の専門分野の1つである画像認識

3Dアバターによる縦横無尽に駆け巡る「周遊体験」と、バディとの「競争ゲーム体験」を通じて、銀座の歴史・文化スポットに触れ合い、地域活性化へ

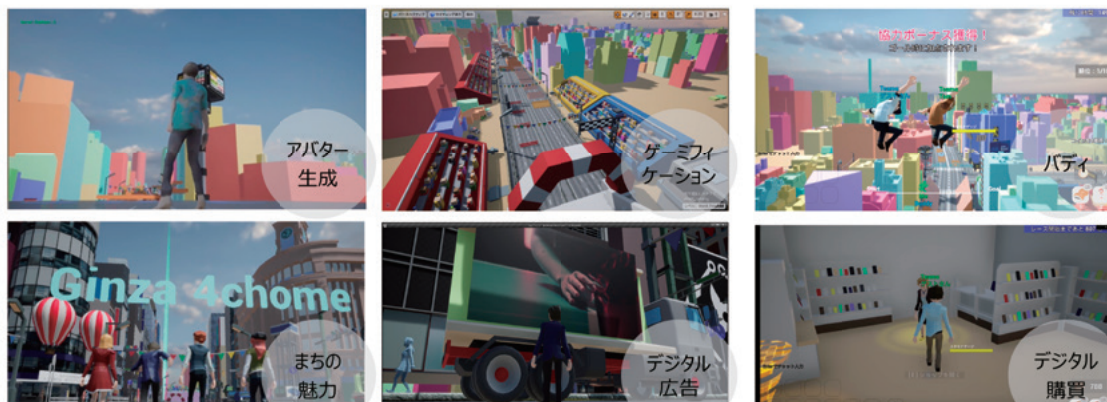


図3 バーチャル銀座

AIの研究開発において、橋梁と橋梁上を走行する車両を動画撮影し、橋梁の複数点のたわみ（変位）から橋梁が劣化しているかどうかをAIで推定する技術を開発しました。

このようなAIを活用した取り組みはほかにも数多くありますが、日常的に継続して使っていただくことの難しさから現時点ではビジネスにつながっていない技術も多くあります。素晴らしい技術開発をしても実証実験の段階で終結してしまうと、社会に貢献できるチャンスを逸してしまいます。もちろんマーケットに投入するタイミングが適切かという側面もありますが、こうした現状を打開するには、AI単体のプロダクトアウトではなく、人によるオペレーションとAIをセットで考えるビジネス、例えば運営事業やBPO（ビジネスプロセスアウトソーシング）としてとらえることが大切だと思っています。一例として、インフラグループとワンチームで道路運営事業のDX（デジタルトランスフォーメーション）化に向けた実証実験に取り組んでいます。技術者も現場に駆け付け、企画から開発・運用フェーズまで一体となって、画像認識AIによる道路のひび割れ検知と道路修繕計画策定の自動化、書類のデジタル化や、音声認識AIによる問い合わせ対応業務の効率化をめざしています⁽⁵⁾。

また、AIによって新しい価値をつくり出すことにも挑戦しています。その事例として、ゴルフスイング診断にAIを活用した「GOLFAI」があります⁽⁶⁾。AIでゴルフスイングを解析し、プロコーチから上達支援のアドバイスを受けることができます。AIの1つである物体認識エンジンではゴルフヘッドの軌道、姿勢推定エンジンでは関節の位置を推定します。このサービスの出発点は、ゴルフスイングの診断はAIエンジンの組合せでできるかもしれないが、人によって見たいポイントは違う、ゴルフスイングの上達ポイントも当然違うと考えたことです。さらに、理想とするスイングも人それぞれです。こうした多様性に対応すれば良いサービスを生み出せることは分かっているのに、AIのみで対応できる範囲は限られています。しかし、こうした多様性にこたえるため、ビッグデータやAIのみに任せずに、あえて人の手を加えて、求められるものが手に入るようにしました。具体的には、AIで解析できるポイントをプロコーチとの対話から見出し、画像から認識したクラブヘッドの軌跡と関節をつないだフォームから、良いスイングかどうかを判定できるようにしました。また、上達支援につながるレッスン動画を用意することでAIだけでは難しい価値を加えました。これからもAIを活用して、スポーツ上達支援、新しい体験や観戦スタイル、コミュニティ形

成につながるイノベーションを創造していきたいと考えています。

このようなテクノロジーとビジネスは一体で検討するという視点は、モバイル空間統計の研究開発を担っていたときに獲得しました。ビッグデータという言葉が普及していない時代に、直感的に位置データから生成されるビッグデータが通信以外の業界にも役立てられる未来が見えたのです。人口統計を生成するテクノロジーの新規開発も必要でしたが、モバイル空間統計をビジネスとして成立させるには、どのような形にすれば他の業界のお役に立てるのか、そのためには技術課題だけでなく、ビジネスモデル、法的側面や社会の受容性などクリアすべきさまざまな課題があり、いわゆるエンジニアという立場を越えてそれぞれ真正面から腰をすえて取り組みました。普段かかわりがなかった社内に関連部署や他の業界の方々と多くの対話を重ねる中、私の直感を胸にビッグデータを主軸とした新規事業会社の設立という企画に仕立てました。この企画はこれまでにないイノベーションとして、「テクノロジーの専門家によるビジネスプランは説得力がある」と社内外の関係者やパートナーから信頼を勝ち取り、着想から5年以上上の歳月が必要となりましたが、信念とともにさまざまな困難を乗り越え世の中に送り出すことができました。



ビジョナリがテクノロジーの出番をつくる

研究開発者にはビジネスの視点も必要なのです。

ビジョナリの存在がテクノロジーの出番をつくると考えています。テクノロジーはある程度未来予測ができますが、ビジネスは信念のある人、実行力のある人がいないと生まれないからです。

私は1996年にNTTドコモに入社して以来、25年にわたり研究開発をしてきました。入社当時は多くの業界でテクノロジーが成熟していなかったこともあり、どの企業も研究開発投資の意欲が旺盛でした。しかし、2000年あたりにテクノロジーが成熟し始め、モバイルやインターネットなどのインフラが急速に整備され、ユーザは新しい体験やこれまでにない価値を求めるようになりました。2005年ごろでしょうか、これらのインフラを活用したビジネス関連のアイデア勝負へと潮目が大きく変わり、GAFA時代が到来しました。昨今では論理的な思考、これが最善、最適であるという価値観が終焉を迎えつつあり、今後は個人の時代が到来すると私は考えています。誰もがテクノロジーを活用できる、個人が活躍できる舞台が整ったのです。



こうした時代の研究開発者には「感性」が求められているのではないのでしょうか。私は日ごろから後輩の研究開発者にも「これからは感性を磨くことが重要であるから直感を信じて感性を磨こう」と話しています。これを実践するために、私は20年来「感性日記」と称して、出来事とそのときの感情をセットにしてノートに残しています。カフェなどで気付いたことをメモしているのですが、ここはアナログなノートのほうが感性をその場で記録できます。20年来のメモは時折見返すと、最初は小さなアイデアだったものがどんどん膨らんで、徐々に実現しているように感じます。ある意味で私のアイデア集ですね。

研究開発者として大切にしてきたことを教えてください。

私は研究開発者として信念、パッションを大切にしてきました。信念とはどうしてもやってみたいと思ったことを貫くことです。私は、これからの時代に求められるものを探索し、発信し続け、形にすることが研究開発者の使命であると考えています。情熱を傾けると徐々に周囲にもその熱、パッションが伝わり、社内外にファンができるものです。例えばバーチャル銀座の開発もスタートは私1人でした。それでも、1年余りで約50人規模のチームとなって実証実験が実現しました。また、面白いと思ったらそれを実感してもらう機会をつくることも大切です。そのためには、何よりもプロトタイプを構築して体験してもらうことです。実際に良さを体験してもらうと物事は早く進みます。例えば、バーチャル銀座は数カ月でプロトタイプをつくったからこそ、社内の協力者やパートナーの共感を得て短期間でプレスリリースの配信、実証実験開始に至りました。パッションがファンをつくり、信頼できるパートナーと共通の志を育む中で具体的な計画ができ、船出を迎え、やがて世の中を変えていきます。

そして、後輩にも日頃から「妄想しよう」「妄想を消してはいけない」と話しています。置き換えてみれば「妄想」は「理想」なのです。現実には抱いた疑問や課題をどうしたら解決できるかといった視点が検討のスタートではないのでしょうか。ちなみに「妄想」は雑談の中で膨らませていきます。例えば、バーチャル銀座でいえば、「コロナ禍でみん

な銀座に行けないけれど、どうしているのかな」「こんな面白くない？」という雑談がサービスにつながりました。

現代の研究開発者には、どういう社会で生きたいかを考え、課題を自ら発見することが求められているのではないのでしょうか。他者に課題を聞いても出てこない経験は誰しもがしたことがあると思います。課題は理想と現実のギャップです。自分の心の声に耳を傾けること、つまり、妄想して理想を描かない限り、課題は見つけようがありません。私が心掛けていることに、お客さまのところへ直接伺って話を聞くだけではなく、現場で仕事をしている様子を見せていただいて妄想することがあります。すると、お客さま自身が感じて言語化している課題とは別のところに課題があることを発見することができます。研究開発者がお客さまのところへ行く機会は少ない、あるいはないと言わず、営業担当に頼むなどして自らが率先して機会をつくる行動力も求められます。

概念的に表現すれば、新しい未来を創り、現状を全く異なる方向へ変えることができるのは研究開発者です。あるいは0から1をつくることができるのが研究開発者だと思います。1から10、10から100に仕上げていく段階では周りの人たちと協力していくことになりますが、そこまでの道のりを含めてそのスタートを切ることができ、アイデアをテクノロジーにのせて実社会に貢献できることが、研究開発者にとっての最大の魅力であると考えます。

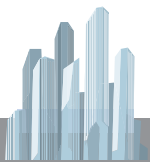
先ほど、ビジョナリがいればテクノロジーの出番がつけると話しましたが、私はこれからNTTの新しいポジションでビジョナリとして働きます。10年、20年後を見据えたNTTグループで取り組む未来サービスの妄想が私の仕事になります。私の感覚では私自身がこういうものが求められる時代がくると感じたことが5年、10年遅れで到来している気がします。技術が成熟するまでの期間や社会が受容するまでの期間は必要になりますが、そのスピードはだんだん速まっているように感じます。新たなポジションは私の妄想力を活かせる大きなチャンスと考えていますので、これから待ち受ける未来が楽しみです。

参考文献

- (1) <https://mobaku.jp/>
- (2) <https://www.docomo.ne.jp/biz/service/dirp/>
- (3) https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/info/news_release/topics_210831_01.pdf
- (4) https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol30_1/vol30_1_010jp.pdf
- (5) https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/info/news_release/topics_220418_00.pdf
- (6) <https://golfai.jp/>

明日のトップランナー

NTT先端集積デバイス研究所



山崎裕史 特別研究員

信号を「折りたたんで」送信.

帯域幅のボトルネックを解消する「帯域ダブラ技術」

デジタル回路を利用した信号処理を伴う通信システムでは、デジタルとアナログのインタフェース部分における帯域幅が通信速度向上へのボトルネックとなっています。今回は、このボトルネックを解消する「帯域ダブラ技術」について、同技術の原理を考案した山崎裕史特別研究員に解説していただきました。

◆PROFILE：2005年日本電信電話株式会社入社、NTTフォトニクス研究所に配属。集積光デバイスの研究開発に従事。現在、NTT先端集積デバイス研究所・NTT未来ねっと研究所兼務。特別研究員。工学博士。Deputy Editor of Journal of Lightwave Technology



光通信の速度を2倍に向上する
「帯域ダブラ技術」

◆光通信における速度向上の手段について教えてください。

通信における情報伝達速度は、「帯域利用効率」と「帯域幅」との積により決まります。

「帯域利用効率」は単位周波数・単位時間当りに伝送できる情報量を指します。例えば光が消灯しているときを「0」、点灯しているときを「1」として2値を表現するシステムと比較すると、光の状態を4段階にして「00」「01」「10」「11」の4値を表現するシステムでは2倍の効率で情報を送信することができます。光通信における帯域利用効率は、DSP（Digital Signal Processor）の性能向上とアルゴリズムの進化により、近年飛躍的に向上しています。

一方、「帯域幅」は利用できる周波数の範囲を示しますが、帯域幅拡大のペースは比較的緩やかです。特に課題となっているのが、DSPの入出力部においてデジタル信号とアナログ信号との変換を担うデジタル-アナログ変換器（DAC：Digital to Analog Converter）およびアナログ-デジタル変換器（ADC：Analog to Digital Converter）のアナログ帯域幅です。DAC、ADCはCMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor：相補型金属酸化物半導体）の技術を用いてDSPと一体集積により形成されます。ところが、CMOSは大規模なデジタル回路を構成する際のほぼ唯一無二の技術であるものの、アナログ帯域幅の観点からみれば必ずしもベストな技術とはいえないのです。このため、CMOS技術により形成された

DAC、ADCの帯域幅の制限が通信システム全体の帯域においてボトルネックとなりつつあります。

「帯域ダブラ技術」は、この帯域幅に関するボトルネックを解消することで、送受信機1個当りの伝送容量の拡大をめざす技術ということができます。

◆「帯域ダブラ技術」の原理について教えてください。

図は帯域ダブラ技術の原理を示したものです。2つのDACを並列に並べ、それらの出力をAMUX（Analog Multiplexer）で束ねることにより2倍の帯域幅の信号を送信できます。現在は主にDAC側（送信側）に注力していますので、そちらを中心に説明します。

図の中央、2つの「sub-DAC」と書いてある黄色い部分がボトルネックになっている部分です。その右と左に水色とピンク色のグラフがたくさん出てきますが、グラフの横軸の「f」は周波数を指し、「帯域が広い」は横軸上に広がる幅が広いこと、「帯域が狭い」は横軸上に広がる幅が狭いことに相当します。

図の一番左側にある「ターゲット信号」が出力したい信号で、 f_c の幅があります。しかし、sub-DACに通せる幅はその半分の $f_c/2$ までです。つまりそのままの状態では信号全体を通すことはできませんし、信号を削ってもいけません。そこで、なんとかしてターゲット信号全体をsub-DACを通したうえで送信する方法を考える必要があります。

帯域ダブラ技術では、まずDSPで「前置デジタル信号処理」としてターゲット信号の帯域を $f_c/2$ を境として低域、高域に分離します。その後、高域成分を強調します。ピンク色の部分ですね。その後、高域成分をプラスに折りたたむ信号とマイナスに折りたたむ信号の2つの信号を用意します。これらの信号は $f_c/2$ の幅し



かないので、sub-DACを通すことができます。

その後、信号はAMUXに入ります。AMUXは2つの入力信号を、波形を崩さずに一定のタイミングで高速に切り替えながら出力につなげるというシンプルな電子回路です。一定のタイミングで切り替えるということは、周波数軸上では切り替え周波数 f_c の周りに入力信号のコピー(イメージと呼ばれます)を発生させることに相当します。これにより信号の帯域が広がります。さらに、前述の2つの信号を折りたたむ際のプラスとマイナスの関係と、イメージのプラスとマイナスの関係との兼ね合いにより、水色の低域成分とピンクの高域成分が本来あるべき周波数領域において強め合い、それ以外の周波数領域において打ち消し合います。これにより、最終的にターゲット信号を送信することができるという仕組みです。

なお、図で示した方式は初期のもので、現在はクロック周波数を半分で済ませることのできる方式なども実証済みです。

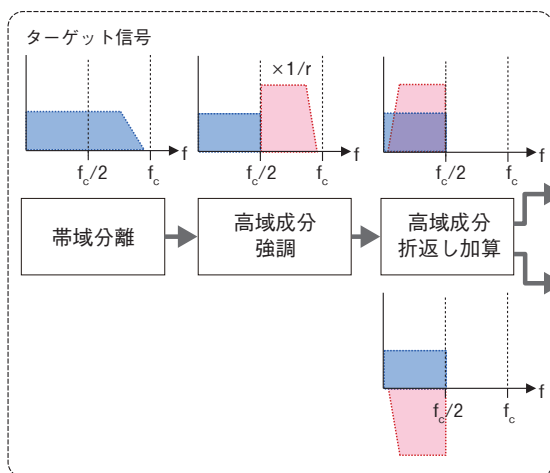
◆現在までの研究の進捗について教えてください。

帯域ダブラ技術はまず比較的シンプルな短距離の強度変調・

直接検波(IMDD: Intensity Modulation-Direct Detection)伝送システムに適用し、1波長当り250 Gbit/sという当時(2016年)のIMDD光伝送容量の世界記録を更新しました。その後、デバイスの広帯域化や折りたたみの方式の改良を重ね、1波長当り400 Gbit/sまで容量を伸ばしています。また、中～長距離向けのデジタルコヒーレント伝送システムに適用した実験も進めており、1波長当り1 Tbit/sを超える大容量信号の長距離伝送も達成しています。これらの成果は、光通信分野で最も権威ある学会であるOFC (Optical Fiber Communication Conference) やECOC (European Conference on Optical Communication) でトップスコア論文やポストデッドライン論文(特にインパクトの大きな成果に限定して通常の締め切りの後に募集される論文)として採択され、注目を集めてきました。

大容量化の試みについては、他社、他機関を含めさまざまなアプローチが提案されています。私たちもトップ集団の一角として、一進一退の競争を繰り返している渦中にあります。

前置デジタル信号処理



AMUX

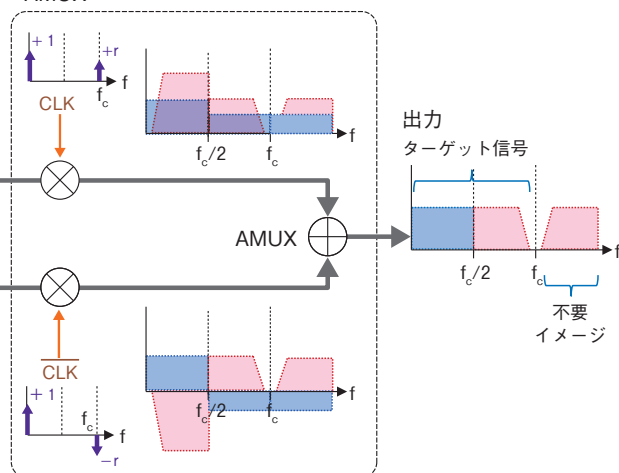


図 帯域ダブラ技術の原理

デバイス技術と信号処理との 両面から改善を検討

◆今後の展開について教えてください。

帯域ダブラ技術は、基本的には光通信システムへの応用を念頭に置いたものです。今後も光ファイバ通信システムを構成する各機器、特に光送受信機に対する大容量化の要求は続くと思われれますから、その要求にこたえるアプローチの1つとして帯域拡張技術に取り組んでいきたいと思います。世の中をリードするような、学術的、学会的にもトップを走れるような技術を発表して先進性をアピールするということも私たちのミッションの1つですから、今後も研究は続けていくつもりです。

技術面からみると帯域ダブラにはまだまだ改善の余地がありますので、デバイス技術と信号処理の両面から検討を進めています。例えばAMUXと光変調器をコンパクトに集積する実装技術なども重要課題の1つです。さらに帯域拡張のアイデア自体は特定のデバイス構成に縛られるものではないため、AMUXと同等



(今回はリモートでインタビューを実施しました)

の機能を光回路で実現する技術の開発などもめざします。

◆どのような経緯で帯域ダブラの原理に思い至ったのでしょうか。

帯域ダブラの原理を思いつくまでにはいろいろな伏線がありました。私は2015年くらいまではもっぱら光デバイスに関する研究を行っていました。光デバイスはすべてアナログの世界で、通信容量を上げていくところではいろいろと苦労も多かったように思います。並行してデジタルを含めた技術についてもずっと学んでいたのですが、アナログの世界での通信容量向上がそろそろ行き詰まるかな、と思っていたタイミングでちょうど高速のAMUXの技術が立ち上がり、アナログ、デジタルが協調して帯域を広げる帯域ダブラの着想に行きついたように思います。

当時の私にとって、デジタルの部分は専門外でしたが、それでも比較的簡単にいろいろと試せる環境が整ってきたおかげともいえます。

◆学生、若手研究者、および将来のビジネスパートナー様に向けてメッセージをお願いいたします。

学会などで他社や他機関の研究者の方と話していると、デバイスは制作したものの、なかなかシステム実験につなげられないとか、システム実験に使用したいデバイスはあるが入手が難しい、といったお悩みを聞きます。

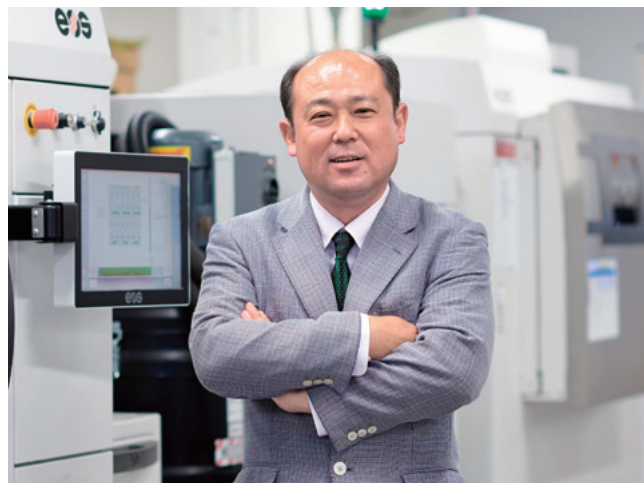
NTTではデバイスからシステムまで幅広い分野をカバーする研究所がそろっており、さまざまなかたちで連携しています。これは大きな強みだと思います。私自身、NTT先端集積デバイス研究所とNTT未来ねっと研究所を兼務していますが、両研究所やNTTデバイスイノベーションセンタとの連携の中から、上記の帯域ダブラ技術を含めさまざまな成果が生まれています。

学生の方や若い研究者の方に対しては、「人と違う引き出しの組合せを持つことが武器になる」ということを申し上げたいと思います。私自身、デバイス研究者としては専門外にあたるデジタル信号処理を学んだことが帯域ダブラ技術の考案につながりました。専門外だから、素人だから、と遠慮せず、必要とあらば隣分野の知識や技術にも果敢に踏み込んでみてほしいと思います。



AM (Additive Manufacturing) 市場を牽引する AMソリューション専業会社

NTTデータ ザムテクノロジーズは、産業用3Dプリンタの販売、保守、ならびに材料の開発、販売、3Dプリンタに適した設計支援・コンサルティングから製造受託まで提供する、AM (Additive Manufacturing) ソリューション専業の会社だ。AM関連分野は新しい市場で今後の伸びが期待される中、業界のリーディングカンパニーとして今後の市場拡大を牽引するための適用領域拡大、設計等データ流通プラットフォーム、新たなサプライチェーンのコンセプト等を展開していく思いを水沼憲一社長に伺った。



NTTデータ ザムテクノロジーズ 水沼憲一社長

ものづくりのデジタル化を体現する AM技術のソリューション

◆設立の背景と目的、事業概要について教えてください。

NTTデータ ザムテクノロジーズ (XAM: ザム) は、1977年に設立された日立造船情報システム株式会社の事業を2006年に引継いだNTTデータエンジニアリングシステムズから、AM (Additive Manufacturing) に関する事業を分離独立して2020年5月18日に設立されました。

昨今、ものづくりの技術はコンピュータ数値計算により3次元設計技術が高度化し、製品性能の発揮に最適な機能形状を設計することが可能になりました。一方、あまりに複雑な形状は、従来の工法では製造が困難であることが大きな課題となってきました。こうした中、AM技術の進歩により、非常に複雑な形状を適切な品質基準を満たしたうえで造形する3Dプリンタが登場してきました。XAMは、グローバル市場における3DプリンタによるAM技術の進展と関連マーケットの拡大を背景に、AMというマーケットに対して、当社の持つAM技術とNTTデータグループのIT/AI (人工知能) 技術を融合させることで、飛躍的な事業発展につなげることを目的に、AMソリューション専業の事業会社として設立され、2020年7月1日より事業を開始しました。

XAMは、インダストリアル3DプリンタのグローバルトップシェアのドイツEOS社の販売代理店として、3Dプリンタの販売、保守などのトータルソリューションを行うだけでなく、自らが3Dプリンタを所有して部品製造を行う

製造受託を行っています。

この製造受託では、受託により部品を製造するだけではなく、自らが培った製造ノウハウをコンサルティングサービスとして提供することにより、これまでのEOSの販売代理店の枠組みにとどまらず、AM技術の活用促進に向けた活動に注力しています。国内AM市場を活性化させ、お客さまとともにAMの成功を導き出すことで、AMの事業拡大を図っています。

◆AM技術とはどのような技術でしょうか。

AM技術は積層造形技術とも呼ばれ、積層的に材料を積みあげながら3次元形状を作成する技術の総称です。AMにはいくつかの方式がありますが、その中でももっともシェアが高く、当社でも取り扱っているLPBF方式では、土台となる平板の上に材料となる金属や樹脂の微小な粉末を均一に敷き詰め、そこにレーザー光を照射することで粉末を溶解し、固めます。レーザー光は製造する造形物を薄く輪切りにした形状を数値化した設計データに基づいて照射されま

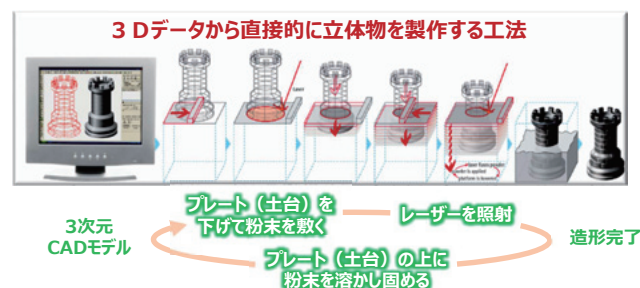


図1 AM技術

す。これを何層にもわたって繰り返していくことで、最終的な造形物が出来上がります（図1）。

これまで、エンジンの部品等の複雑な形状をしたものは、複数の部品を組み合わせてつくり上げる、もしくは複数の鋳造部品を溶接等によりつなぎ合わせることでつくり上げられます。AM技術により、これらの造形物は一体成型によりつくることが可能になり、接合なく一体でつくることにより堅牢になり耐久性が向上するばかりではなく、部品数の削減、金型が不要であることからリードタイムの短縮が可能といった特長があります。

完成品の品質は、3Dプリンタの機能・性能および動作に依存し、3Dプリンタの動作は設計データに依存するため、設計データの精度・品質が重要なファクタとなります。XAMには、部品の形を決める際に体積、質量、剛性、振動特性といった要件を考慮しながらもっとも適した形状を策定する「トポロジー最適化」の技術と、人手による設計では不可能な複雑で高機能・高性能な形状をコンピュータの支援で設計する「コンピューショナルデザイン」の技術、そしてこれらの活用ノウハウが蓄積されており、ビジネス上の大きなアドバンテージとなっています。

AM技術・品質の認知度向上と 適合領域拡大で市場拡大をめざす

◆AM技術による造形はまだ新しいビジネス分野のようですが、どのような事例があるのでしょうか。また、市場はどのような状況にあるのでしょうか。

実は「AMは20年以上歴史のある技術」であり、過去にはメーカーが出版されるなどのブームもありましたが、まだまだ製造業の一部に限定されており、そういった意味では、まだ新しいビジネス分野といえるかもしれません。

AM技術はその特長から、少量多品種の製造に向いています。その代表的な事例として、三菱重工業株式会社様と連携した、宇宙航空研究開発機構（JAXA）様向けのH3ロケット用LE-9エンジン部品の提供があります（図2）。ロケットのエンジンには非常に複雑な形をした部品や、複雑な形に曲がった配管が多数使われています。こうした部品を3Dプリンタで製造することで、インジェクタという部品の場合、一体成型によりリードタイムが大きく短縮され、堅牢化、部品数削減に寄与できます。例えば従来であれば約500点の部品が必要なところ、1つの部品として製造することができました。また、配管についても従来の曲げ加工による成型と比較して、曲げ部の金属の肉厚のバラつきを少なくすることが可能となりました。

AMの市場は、グローバル市場が先行しており、年間成長率が15～20%で、2022年には1兆6000億円を超えと言われています。このうち、金属AMと樹脂AMはおおよそ1対2の比率ですが金属AMの比率が増えています。これと比べて日本の製造業では厳格な品質管理基準があり、AMのような新しい工法に対して、まだ品質管理手法が確

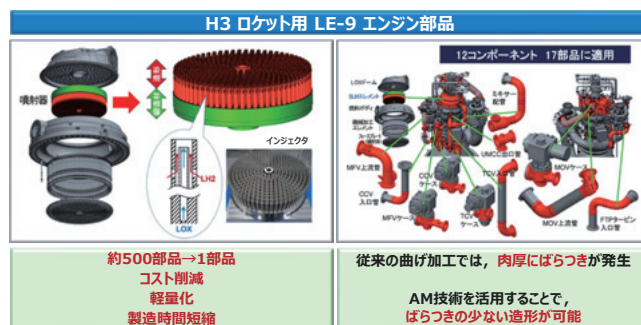


図2 事例紹介（ロケット部品）

立されていないため日本国内のAM市場はまだ立ち上がっていない状況です。金属AMの市場においては、2022年の予測値として日本の市場規模はグローバルの20%にも届いていない状況ですが、当社は、その品質管理手法をロケット開発の中で磨き上げ、スタンダード化することにより、市場の拡大が期待されます。その中で現在XAMは約30%のシェアを担っています。

AM技術は複雑形状、オーダメイド、試作等の少量生産などの領域において積極的に活用が進んでいます。現段階では、効率、コストの面ですべての部品製造に適しているとはいえない状況です。今後技術革新が進むことで、このような課題は減少していくと想定していますが、こういった背景からAM技術により製造される製品は、主に航空、宇宙、医療（主として歯科のインプラント）の業界で利用されています。グローバルにおいてはこれらの業界がAM技術の市場を牽引していますが、日本においてはこれらの業界そのものの規模が小さく、製品が浸透しづらい環境にあります。また、国内の製造業は高い技術力のベースがあり、AM技術に整合性がある製品でも既存技術である程度対応できてしまい、新市場へのシフトが進まないといった点等が、日本市場の出遅れの原因になっていると考えます。

◆今後の展望についてお聞かせください。

AMは進化を続ける技術で、IT/AI活用の強化によるQCDの向上や、いち早く先進技術を取り入れるための海外企業アライアンスなどを活用していきます。これらの取り組みと当社が持っているAM技術のコラボレーションにより事業規模を現在の20～30億円から2025年には100億円をめざします。

AM技術により、在庫、リードタイム、物流といったサプライチェーンの概念が全く変わってきます。①一体成型による部品数削減、②オンデマンド生産による在庫レス、③3Dプリンタによりあらゆるものの製造が可能になることによる最適化生産が可能となりますが、私たちXAMでは、今後、設計データや製造ノウハウなどを蓄積・プラットフォーム化し、日本のものづくりの緻密なノウハウをAM技術におけるデジタルQMSとしてプロセス確立（ソフトウェアによるアセット化）を進め、日本独自の付加価値を競争優位の源泉としてグローバル市場におけるサプライチェーンに取り組んでいきます。

困難な製品内部状態の品質管理にデジタルでチャレンジ

技術開発統括部 統括部長
酒井 仁史 CTO



◆担当されている業務について教えてください。

製造装置である3Dプリンタを含めてAM技術は依然コストが高いため、コストに見合う付加価値を生み出すことができる活用領域を見つけ、それに合った製品の開発、量産から品質保証までのプロセス構築を行っています。通常、お客さまがAM技術による製造装置を購入して利用する場合、お客さまのつくりたい製品が必ずしもAM技術に適したものではありません。そこで、技術的リスク、経済的リスクを評価し、3Dプリンタの導入から、製造設計、量産、運用、品質保証までの一連のプロセスを構築しお客さまをサポートしています。こういったかたちでエンジニアリングを行っている会社は、日本にはあまり存在していないので、そこが私たちの出番です。

最近取り組んでいる事例としては、熱交換器（ヒートシンク）に関するもので、現在注目されている領域の一つです。熱交換器にはいろいろな仕組みのものがありますが、伝熱面積（表面積）を多くとって、熱交換性能を上げるというのが基本原理です。ただ、そこに着目しすぎると、構造が複雑になり、製造が困難になると同時に、圧力損失が大きくなり（冷却のための空気等の流れが悪くなり）、逆に熱がこもってしまいます。私たちはこの熱交換性能と圧力損失の二律相反する関係の最適解を見つけつつ設計をしています。

通常の製造工程では、鋳造等による部品を組み合わせるため、製造工程、成型における限界も考慮して設計する必要があります。必ずしも最適解を持った製品ができるわけではありません。一方で、AM技術による製造では、基本的には複雑な構造を持った製品でも自由につくることができ、使用する設計データはすべてデジタル化されたものなので、コンピュータ上でシミュレーションを行いながら、結果を設計データにフィードバックしていくことで、最適解の熱交換器に関する設計から製造まで一貫したプロセス

が出来上がります。鋳型をつくる必要もないので、必要に応じて試作して実験することも可能になります。

◆課題を伺えますか。

コストと品質が大きな課題だと考えています。

自由度が高いとはいえ、AM技術は結局ものづくり、部品の技術です。したがって経済合理性が確立しない限り普及は困難です。現在のAM技術関連コストは高く、このままでは普及にブレーキがかかってしまいます。将来的な技術革新でコストが下がることは期待できますが、少なくとも現段階においては、航空事業、医療、モータースポーツのように、高品質が要求されて、かつ少量生産で高付加価値なものづくりの領域では経済合理性が確立されているので、この領域のビジネスに注力しています。

品質については、AM技術は粉末をレーザー照射により溶解し固めるという原理であり、これはまさにバーナー等で金属を溶かして固めることで接着する溶接と同じ技術です。一般的に溶接面は外から確認できないため、品質検査においてはCTスキャンやX線等による非破壊検査が行われるのですが、コストがかかることもあり、品質検査・保証が難しいといわれています。AM技術も溶接の一種である以上、同様な問題が内在しています。しかし、AM技術による製造過程で、センサを設置することで、レーザー照射付近の酸素濃度、レーザーの出力、照射角度、粉末の材質、溶解した粉末の形状、固まるプロセス等のデータを収集し、蓄積することが可能です。こうしたデジタルデータと非破壊検査等で得られた結果を対比させ、解析することで、製造過程において品質検査が可能になります。逆に、製造装置の各種設定値を、高品質の状態のデータに合わせることで、常に安定した品質の製品を製造することも可能になります。現在、こうしたデータを収集・蓄積しているところであり、より多くのデータを収集・蓄積することで検査の精度を上げていくつもりです。

◆今後の展望について教えてください。

技術の責任者として、前述のような課題解決を進めていくことで、AM技術をより洗練されたものとしていくとともに、導入、設計から製造、品質管理までのプロセスに関する知見を蓄積して、広くお客さまに展開していくことをめざしています。

また、レーザーの利用といった既存の技術にとらわれずに、新しい技術、プロセスを積極的に取り入れていくことで、AM技術の適用領域をさらに広げていきたいと考えています。

NTTデータ ザムテクノロジーズ ア・ラ・カルト

■XAMの工場

デジタル制御された3Dプリンタというと、オフィス内に設置されたプリンタを想像してしまうのですが、XAMには3Dプリンタが設置された工場が2つあります。縦・横・高さが最大40 cmのものを造る装置は、なんと縦・横・高さが4.2 m×1.6 m×2.4 m、重さが4.8 tもあり、とてもオフィスに入るようなものではありません（写真1）。元々はラボとして出発した工場なのですが、お客さまのニーズが高まるにつれて装置の数も増えて、現在では合計で13台の装置が設置されているそうです。



写真 1

■新工場、Digital Manufacturing Center (DMC) オープン

2022年7月オープンに向けて新工場をつくっています。建物はすでに完成し、今は装置やオフィス家具の搬入設置等を行いつつオープンを待つ状況です（写真2～4）。ニーズの高まりを視野に入れて、手狭になった既存工場の2倍くらいの数の装置が入る広さに、縦・横・高さが各1 mの製品製造に対応できる装置や、センサからのデータによる品質管理システムと生産管理システム、製造実行制御システムとが連携した環境を整え、残存している人手による工程も自動化していくそうです。こうした新しい取り組みにチャレンジしているところを、ショールームとして展示し、可視化された各プロセスをベースに、お客さまとディスカッションすることで共創していく場としたいとのことです。



写真 2



写真 3



写真 4