

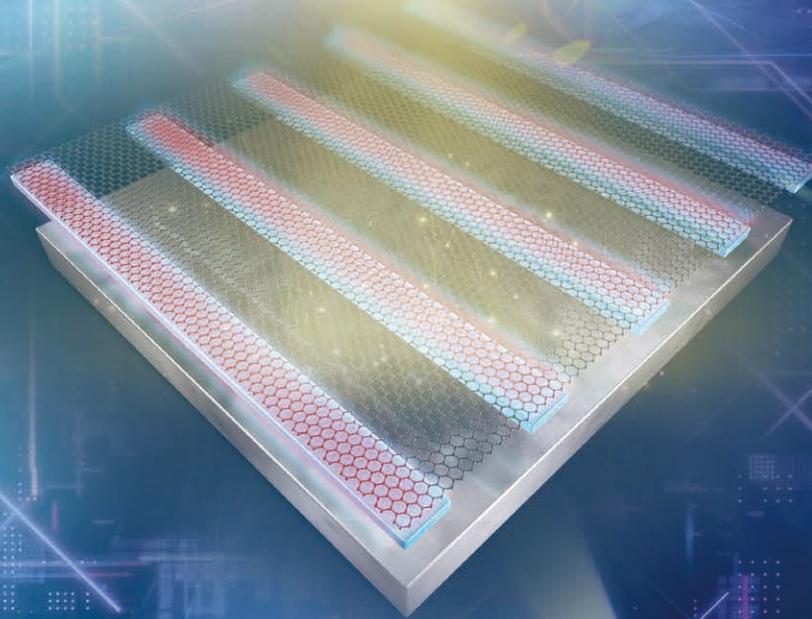
NTT

ISSN 0915-2318 平成2年3月5日第三種郵便物認可
令和5年3月1日発行 毎月1回1日発行 第35巻第3号(通巻408号)

技術ジャーナル

3

MARCH
2023
Vol.35 No.3



特集

2次元半導体を用いたプラズモン制御技術

トップインタビュー

森林 正彰

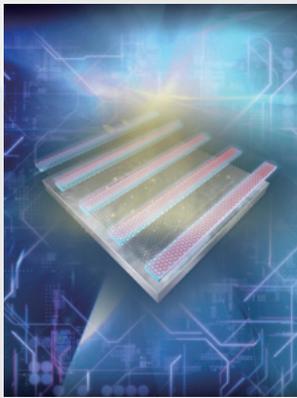
NTT西日本 代表取締役社長

グループ企業探訪

NTT PARAVITA

from NTT西日本

新体験,顧客価値の創出に向けたNTT西日本の研究開発における取り組み



NTT 技術ジャーナル

3

MARCH
2023
Vol. 35 No. 3

CONTENTS

4 トップインタビュー

歴史や経緯にこだわらず「いま」をみつめよう。
ICTで新たな挑戦. 西日本発グローバルへ

森林 正彰

NTT西日本 代表取締役社長



8 特別企画

NTT横須賀研究開発センタの50周年

12 特集

2次元半導体を用いた プラズモン制御技術

14 半導体2次元系におけるプラズモン研究の概要と展望

17 グラフェンを用いたテラヘルツプラズモンの動的空間制御

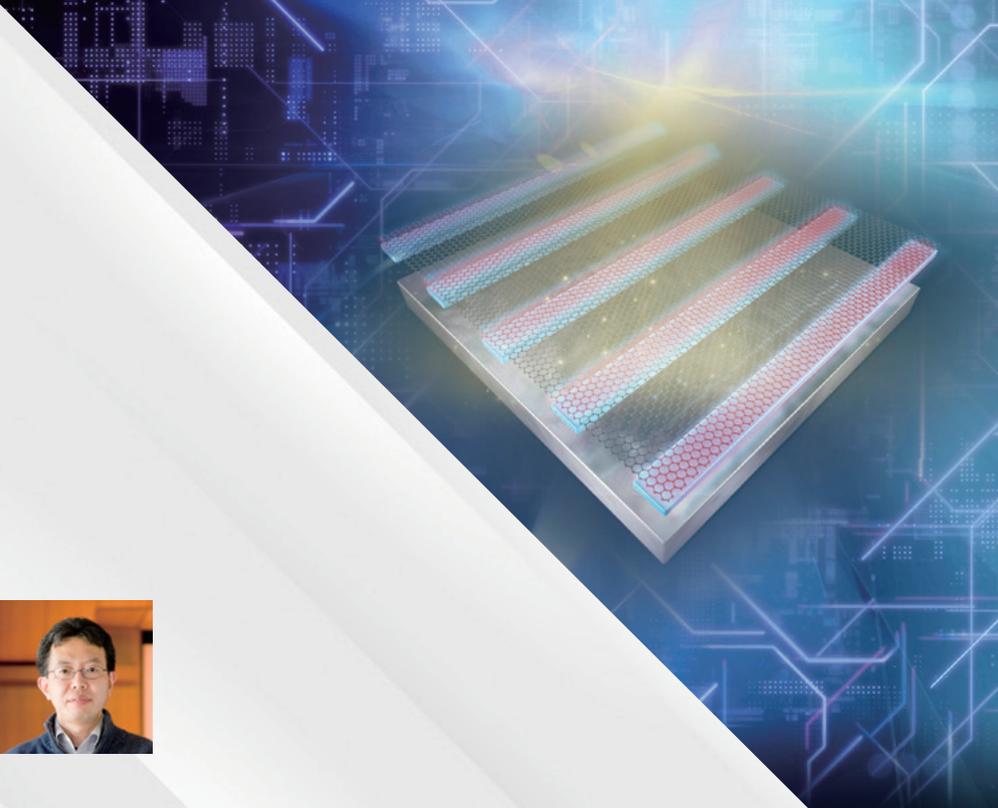
20 グラフェンにおける超高速光-電気変換プロセスの解明

24 エッジマグネットプラズモン結晶の理論提案

28 2次元電子・正孔系におけるプラズモン伝導の時間分解測定

32 主役登場 熊田 倫雄 NTT物性科学基礎研究所





33 挑戦する研究者たち

納富 雅也
NTT物性科学基礎研究所
ナノフォトニクスセンター センタ長
上席特別研究員
新しい知と技術を生み出すことが
研究者の責務。その責務を楽しもう



38 挑戦する研究開発者たち

芳 政信
NTT西日本 技術革新部 R&Dセンター
ネットワークサービス担当
世の中を便利にしていく技術や手法の
「目利き」として、お客さまの思考を
先取りしたネットワークアーキテクチャを追求する



42 明日のトップランナー

小川 泰文
NTTネットワークイノベーションセンター
特別研究員
ネットワークにイノベーションをもたらす
「仮想化基盤ネットワークソフトウェア技術」



46 グループ企業探訪

NTT PARAVITA株式会社
睡眠改善No.1企業をめざし、睡眠改善
により社会課題解決に取り組む



50 form NTT西日本

新体験、顧客価値の創出に向けた
NTT西日本の研究開発における取り組み

Webサイト オリジナル記事の紹介 54

4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2023

●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。

View from the Top

NTT西日本
代表取締役社長
社長執行役員

森林正彰

PROFILE :

1984年日本電信電話公社に入社。2009年NTT Europe Ltd. 代表取締役社長、2016年NTTコミュニケーションズ取締役 クラウドサービス部長、2018年同社代表取締役副社長、2019年7月NTT Ltd. 取締役副社長を経て、2022年6月より現職。



歴史や経緯にこだわらず

「いま」をみつめよう。

ICTで新たな挑戦。

西日本発グローバルへ

「地域のビタミン活動」を通じ、地域の社会課題解決に取り組むNTT西日本。社会課題解決のみならずICTを活用した新領域への挑戦、新たなイノベーション創出にも挑んでいます。ICTの力で社会課題を解決する先駆者として、Well-beingに満ちた、持続可能な社会の実現に向けて邁進する森林正彰代表取締役社長にNTT西日本のビジョンとトップの姿勢を伺いました。

2023年は勝負の年

2年ぶり、3度目のご登場ですね。前回はコロナ禍のロンドンでしたが、久しぶりの日本はいかがでしょう。

コロナ禍を経てリモートワークが社会に定着してきましたが、一方で、選択肢としてオフィスに出勤するようにもなり、お客さま等と直接対面でお会いする機会も徐々に増えてきており、コロナ禍以前とは違う社会になったという実感があります。

さて、2022年6月に日本に戻り、30年ぶりに西日本地域で仕事に就いています。NTTコミュニケーションズ（NTT Com）設立時の1999年から2019年までNTT Comに在籍していましたが、2016年から2018年までを除き、海外の会社への出向も含めて一貫してグローバル関連の仕事をしており、さらに2019年からはNTT Ltd. でロンドンに勤務し、NTT生活の半分以上が海外拠点を中心としたグローバルのビジネスをしてきました。このため、国内、しかもNTT西日本という地域の会社で、仕事の

ギャップにうまく馴染めたか等のご心配もいただきそうですが、違和感も抵抗感もなく仕事に従事しています。

もちろん、30年の時を経て西日本地域の仕事が大きく変化していることも実感していますし、お客さまも変化しています。しかし、グローバルな視点から見ると、日本もその1つの地域であり、さらにICTであれば、ネットワークやセキュリティ、クラウド、DX（デジタルトランスフォーメーション）等と、グローバルにおいてもNTT東日本、NTT西日本のよ



うなドメスティックな会社でも抱えている課題はほとんど同じですから、これまでの経験を活かすことができると思っています。

同時に、グローバルのパートナー企業とも、NTT Ltd. やNTT Com時代に築き上げた関係性をそのまま大切に維持していますから、これを活かして直接的な連携も可能です。

2022年、NTT西日本の新本社ビルNTT WEST i - CAMPUSの竣工に伴い、オープンイノベーション施設、QUINTBRIDGEを開設し、パートナー企業の皆様とともに社会課題の解決や未来社会の創造に臨んでいます。すでにオープン時から延べ5万人以上が集い、240回以上のイベントを開催しました。また、未来共創プログラム『Future-Build』をスタートさせ、健康、生活、経済、環境の4つの分野に、国内外のベンチャーから100件を超える提案が寄せられ、6件のビジネス化を検討しています。

QUINTBRIDGEのパートナー企業に対しては、私たち、NTT西日本グループはもちろん、国内外のNTTグループ、米国西海岸、イスラエルなどのベンチャー企業、大手IT企業などとのマッチングの機会を増やして、さまざまな連携、共創を進めていきたいと思っています。

世界を相手に獲得した知見や、盤石なネットワークはとても心強いですね。経営環境や2023年のビジョン等をお聞かせいただけますでしょうか。

足元では、半導体不足、エネルギー価格の高騰など、大きな社会情勢の変化が生じています。また、情報通信分野においても、新型コロナウイルス感染症を踏まえ社会生活が変容し、あらゆる事業・生活でデジタル化・オンライン化の流れが加速・定着する中で、ますます情報通信インフラの重要性が高まっています。

そのような事業環境の中、2022年6月の社長就任記者会見で「伝新人輪（でんしんじんわ）」という言葉掲げました。電信電話ともつながる語感で、一文字ずつに思いを込めました。「伝」はNTTの伝統と技術を守り磨き続ける。「新」はグローバルな視点を活かした新たな挑戦をする。そして、「人」は社員、お客さま、地域コミュニティ等あらゆる人とのつながり、そして人を大切にすること。最後の「輪」はパートナーとの共創の輪を広げるという思いを表現しています。

2023年度はNTT西日本にとって勝負の年で、これまでの電話と光、通信の会社というイメージからAI（人工知能）やIoT（Internet of Things）等をフルに活用して、先進的で、イ

ノベータティブで魅力的な会社へと大きな変革を遂げる年です。

私たちがめざしているのは、屋台骨となる情報通信インフラを、安定的かつ高品質につなぎ続けるとともに、DXの推進による効率化を通じて、通信インフラを磨き続けること。そして、社会課題解決の先駆者として、地域やパートナーとのつながりによって地域創生を実現することです。

そのためには、より一層、成長分野ビジネスの強化も図っていきます。私たちの強みである設備インフラのノウハウを活かしたインフラビジネス、電子書籍事業やコンタクトセンター事業といったグループ会社での事業強化も今後の成長に欠かせません。

具体的には、自治体が抱える産業活性化、雇用創出、高齢化対策などへの対応や、人手不足に陥りがちな地域企業が求める仕事の効率化などの実現をめざした「地域創生クラウド」展開、一斉・画一的な教育から、個人の主体的な学修や個別最適化された教育への転換や、学生生活を含めた利便性の向上を図り、特色ある学校づくりを支援するデジタルエデュケーション構想を実現するプラットフォーム「エルID」による、大学向けの教育DXの推進をはじめ、中堅、中小企業向けの複合型ソリューションパッケージ、カーボンニュートラルに関する取り組みとしてEV活用による新たな共創、自社データの分析や活用により高度化するキャリアインフラビジネスを主な成長分野ビジネスとして注力していきます。

ICTの力で社会課題解決とWell-beingを追究

成長分野のビジネスはどれも現代社会には不可欠で、重要なことばかりですね。日常生活においては、ICT活用がますます進んで便利になっていくのですね。

日常生活のデジタル化と同時に、Well-being志向も高まっています。こうした中で、私たちはエンタテインメントサービスの領域でもICTを活用したサービス展開に力を注いでいます。最近ではTV CMでも流れている「コミックシーモア」はご存じでしょ

うか。2022年にサービス開始から18周年を迎えた総合電子書籍サービスです。2022年3月にこのサービスを世界中のお客さまへお届けする第一歩として、海外向けのデジタルマンガストア「MangaPlaza（マンガプラザ）」のサービス提供を開始しました。エンタテインメントサービスは、情報端末の進化とともに、次々と新しいサービスが生まれるダイナミックな領域であり、多くのパートナーの皆様とともに新たな文化の創出にチャレンジしたいと考えています。

そして、疾病の予防と早期発見・健康増進はすべての人々にかかわる重要テーマです。これらは睡眠と深い関係があり、この大きな課題を解決すべく、医療・介護ベッドおよびマット型睡眠センサーで国内トップシェアを誇るパラマウントベッド社と合併会社「NTT PARAVITA（パラヴィータ）」を設立して取り組んでいます。睡眠という観点からICTを活用した未病早期発見の支援や健康増

進のための情報提供を目的として、高精度睡眠センサーを活用して睡眠情報を可視化し、専門家による睡眠改善アドバイスや調剤薬局における健康サポートサービスを提供しています。私たちが研究開発をしてきた睡眠データを分析するAIエンジンと睡眠のノウハウを掛け合わせて、顕在化していない未病段階で早期発見に取り組んでいきます。

変わる、変えることに違和感を持たない

トップとして、これまで大切にしていたことを教えていただけますでしょうか。

やはり「人」、そして「人とのつながり」です。リモートワークが定着してきましたが、リモートと対面、それぞれの利点も活かしつつハイブリッドで、人のつながりやコミュニケーションを大切にしていきたいと考えています。

それはお客さまやパートナーとのつながりだけではなく、社員とのつながりも同様です。日頃、役員や部門長と接する機会があっても、それ以外の社員と語り合う機会がなかなか持てませんので、西日本の30府県にある支店への訪問や社員とランチ会等を通じた対話の場を設けています。ただ、NTT西日本グループ全社員は約5万人ですから、すべての社員との対話というわけにはいきませんが、少しでも多くの社員とコミュニケーションを図りたいと思っています。

それから、トップとしては、意思決定において「外部からの視点」を大切にしています。例えば、新しく配属された先で、そこで粛々と行われている業務に対して何かしらの違和感を覚えることがありますよね。その違和感はたいていの場合、改善や変革すべき課題で、その認識は正しいことが多いのです。それに対して、私は「これ変じゃないか？」と問いかけるようにしています。もちろん、トップである私に、声に出して反論しづらいときもあるでしょうけれど、私は表情や会話のニュアンスを注意深く見て決定し、反論にも耳を傾けています。

また、反論の際に「今までの経緯があっただけでこうなっているのです」という理由をよく聞きます。「その経緯がなければどうか」と聞き返すと、「おっしゃるとおりです（変だと思えます）」という回答が返ってくることが結構あります。10年前に決めたことをそのまま引き継がなければならぬルールはありません。しがらみは捨てて、現時点の判断で正しい、最適だと思うことをやるのです。

最後に、パートナー、研究者、社員の皆様に一言お願いいたします。

まずは研究者の皆さん。NTTとして付加価値を付けられるもの、世の中のないものをぜひ生み出してください。IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想はNTTグループにとって大きなビジョンであり、世界をリードする技術です。私たちが2年後の大阪・関西万博でしっかりPRしていきます。非常に優秀な頭脳を持った研究者の皆さま





んにはグローバルを意識して研究に臨んでいただきたいと思います。

パートナーの皆さんとは引き続き新しいものを築いていきたいです。QUINTBRIDGEをはじめ、私たちは非常に広く門戸を開いています。1人でも、1社でも多くの皆さんと新しいものをつくり、サービスを提供していきたいと思っていますので、2023年度も引き続きよろしくお願いたします。

そして、社員の皆さん、私たちが社会課題の解決を図り、企業として

成長するための要は「人」です。人権尊重とダイバーシティ&インクルージョン、安全労働、健康経営を推進し、リモートワークを基本とする新たな経営スタイルへの変革を図り、社員の皆さんが自ら働く場所や時間を選択できるワークインライフを推進しています。繰り返しますが、私たちにとって2023年は勝負の年です。成長分野のビジネスを並行して伸ばしていくためにはすべきことがたくさんあります。過去のしがらみ、経緯にこだわらずに「いま」を見つ

めて、良かれと思ったことをぜひ提案してください。私自身のポジティブさはいつまでも変わりません。これからもどんどんポジティブにいきましょう。

(インタビュー：外川智恵/撮影：大野真也)

※インタビューは距離を取りながら、アクリル板越しに行いました。

インタビューを終えて

前回はロンドンと日本をインターネットでつないでインタビューさせていただきましたので、森林社長に直接お目にかかるのは、NTT Comの副社長時代以来の3年ぶりです。フランク、フラットなあり方であらという間にその場を和ませてくださる森林社長。いつも以上に和やかにお話が進み、つい図々しく森林社長の執務室にもお邪魔させていただきました。執務室の入り口にはなんと森林社長の似顔絵と昨年6月の就任記者会見で披露した「伝新人輪（でんしんじんわ）」の文字が飾られていました。これは、かつてお勤めであった北

九州支店の社員さんの作品だと言います。「書を書いてくれた社員の師匠は世界で活躍する書道家で、その方は私が北九州支店にいたときのご近所さんだったのですよ。人ってつながっていますよね」と優しく微笑まれました。現在はもうすぐ2歳を迎えられるお孫さんとままごと遊び等をして楽しんでいらっしや、将来はグランパと呼ばせたいとか。人の心と未来を拓く前向きな姿勢とつながりを大切にするあたたかさ、そして、森林社長を語るときに外せないキーワード、「ポジティブ」「グローバル」を実感するひと時でした。



NTT横須賀研究開発センタの50周年

NTT横須賀研究開発センタ（横須賀通研）は1972年11月に日本電信電話公社第3の研究所として発足し、2022年に50周年を迎えました。これを記念し、横須賀通研では2022年12月9日に記念イベントを実施しました。記念イベントでは横須賀市市長上地克明氏、衆議院議員小泉進次郎氏からご挨拶をいただき、また多くの横須賀市内を拠点とする企業、団体の幹部の皆様にご参加いただき、地域の絆を再確認しました。

おの	ともよし	からざわ	けい	はまだ	たかひろ
大野	友義 ⁺¹	/唐澤	圭 ⁺²	/濱田	貴広 ⁺²
あいはら	ひろゆき	おかの	やすし	ひらた	かずお
相原	裕之 ⁺²	/岡野	靖 ⁺²	/平田	和男 ⁺²
あべ	ひろふみ	いざわ	みなこ	すざわ	きょうこ
阿部	裕文 ⁺²	/井沢	味奈子 ⁺²	/須沢	恭子 ⁺²
ひぐち	こういちろう	きたはら	ちか		
樋口	功一郎 ⁺²	/北原	智加 ⁺²		

NTTサービスイノベーション総合研究所 所長⁺¹
NTTサービスイノベーション総合研究所⁺²

はじめに

天候にも恵まれ、NTT横須賀研究開発センタ50周年記念講演会が2022年12月9日に開催されました。当日は横須賀リサーチパーク（YRP）や横須賀市近隣の企業・団体と横須賀通研OBを中心に約100名のご来賓にご参列いただき、横須賀通研の過去、現在の事跡を紹介するとともに、改めて地域の絆を深め、地域連携して社会の発展に貢献

していくことを確認する場となりました（写真1、2）。

記念講演会

記念講演会では冒頭の大野友義NTTサービスイノベーション総合研究所所長の挨拶において横須賀通研の紹介と、記念映像の上映を行いました（写真3）。横須賀通研は1972年11月に開所し、当時の米澤滋電電公社総裁によって「データ通信のための情報処理方式、大容量伝

送方式、海洋通信方式、人工衛星通信の利用開発、移動通信の研究実用化の5テーマを掲げて研究を行う」と宣言されました。これらのテーマはDIPSという日本製汎用電子計算機の普及、光による基幹通信網の構築、日本初の国産通信衛星の打ち上げ、自動車電話からスマートフォンへとつながるモバイル通信の発展というかたちで世の中に広がっていきました。また横須賀通研で花開いた技術として、画像符号化技術があります。画像符号化技術は古くはFAXの研究開発に始まり、1980年のG3FAX国際規格制定へと結実し、これが2012年にIEEEマイルストーンを贈呈されました（写真4）。続く2014年には1975年に開発した高圧縮音声符号化技術（Line Spectrum Pair：LSP方式）がIEEEマイルストーンを贈呈されました（写真5）。これは



写真1 受付



写真2 50周年イベント運営幹部



写真3 NTTサービスイノベーション総合研究所 大野所長



写真4 IEEEマイルストーン (G3FAX)



写真5 IEEEマイルストーン (高圧縮音声符号化技術)

1991年に米国連邦政府音声符号化標準規格として採用され、1999年の第3世代携帯電話の3GPP、3GPP2にも組み込まれた実績が評価されたことにより、日本企業では過去41件がIEEEマイルストーンに認定されており（2022年12月時点）、東海道新幹線や鉄道の自動改札、太陽電池、VHSビデオ、自動車用カーナビなど、近代化の基盤となった技術や業績が認定されています。

また1990年代にはNTTが持つ画像映像符号化技術の積極的な標準化活動が

行われました。静止画符号方式JPEGは1994年にISOのWG議長として国際標準化、映像符号化は1990年にITU-TのWG議長としてH.261を国際標準化、デジタル放送のベースとなっているMPEG-2は、ISO/IEC JTC1/SC29議長として国際標準化をリードし、米国エミー賞技術開発部門を受賞しました（写真6）。

続く上地克明横須賀市市長からはアフターコロナ、ウィズコロナを見据え、サイバー空間とフィジカル空間の融合による解決のアプローチへの期待（写

真7）、小泉進次郎衆議院議員からはサイバー空間における差し迫った脅威であるサイバーセキュリティに対応する人材育成を横須賀を中心に担っていく構想についての講演がありました（写真8）。

続いて木下真吾NTT人間情報研究所所長からは、横須賀通研の現役代表として、東京2020オリンピックにNTT研究所が一丸となってチャレンジした成果の紹介（写真9）、また次の2025大阪・関西万博に向けた取り組みを若手5人が語りました（写真10～14）。若手によ



写真6 米国エミー賞
技術開発部門



写真7 横須賀市上地市長



写真8 小泉衆議院議員



写真9 NTT人間情報研究所
木下所長



写真10 NTT人間情報研究所
村岡社員



写真11 NTTコンピュータ&データ
サイエンス研究所
小塚社員



写真12 NTT社会情報研究所
佐野社員



写真13 NTT未来ねっと研究所
三浦社員



写真14 NTTアクセスサービス
システム研究所
永野研究員



写真15 NTT川添副社長



写真16 展示コーナー

る大阪・関西万博に向けた取り組み紹介は来賓の皆様の評判が良く、特に若手が元気よく研究に取り組んでいる姿に満足した様子でした。

最後に川添雄彦NTT代表取締役副社長から来賓の皆様への感謝の辞が述べられ、盛況のうちに講演会は終了しました(写真15)。

デモ展示

講演会の開始前、懇親会開催時間中などに、来賓の皆様に分かりやすい展示を各研究所2点程度ピックアップし、デモ展示を行いました。展示内容は表のとおりです。

NTT R&Dフォーラムには参加できなかった来賓の方々も多く、NTT R&Dの最新の研究内容に触れていただくいい機会となりました(写真16)。

懇親会

懇親会では岡敦子NTT常務執行役員研究企画部門長の乾杯のご挨拶の後、

表 デモ展示

	1F展示ホール (動態展示)	10F講堂前 (静態展示)
人間研	リモートワールド (ピアノのスケール演奏)	IOWN時代のメタバース
社会研	セキュア光トランスポートネットワーク技術	Social Well-being
CD研	パーソナライズドサウンドゾーン	MediaGnosis
未来研	超低遅延映像伝送技術	デジタルコヒーレント光伝送技術
AS研	エクストリームNaaS	6G/IOWN構想実現に向けた将来無線基盤技術



写真17 NTT岡部門長乾杯のご挨拶



写真18 懇親会会場の様子

OBの皆様をはじめとする来賓の皆様との昔話に花が咲きました(写真17, 18)。

おわりに

前回の40周年は東日本大震災の直後ということもあって自粛ムードの中での開催でしたが、今回は新型コロナウイルス感染症の流行が拡大を迎えつつある状況下、参加にあたっては事前に抗原検査をお願いするなど感染対策には細心の注意を払って実施しました。

このことは横須賀通研のYRP地区、ひいては横須賀市におけるプレゼンスの向上、結びつきの強化に大いに役立ち、将来連携して大きな成果を創出する礎にできたのではないかと確信しています。



- (上段左から) 大野 友義/ 唐澤 圭/
濱田 貴広/ 相原 裕之
(中段左から) 岡野 靖/ 平田 和男/
阿部 裕文/ 井沢 味奈子
(下段左から) 須沢 恭子/ 樋口 功一郎/
北原 智加

NTT横須賀研究開発センタは、今後も社会課題の解決と新たな価値創造を通じて人々の豊かで幸福な社会の実現に取り組んでいきます。

◆問い合わせ先

NTTサービスイノベーション総合研究所
企画部
TEL 046-859-5003
E-mail sv-jousen-koho-ml@hco.ntt.co.jp

特集

2次元半導体を用いた プラズモン制御技術

プラズモンとは電荷の疎密波であり、
その制御技術はプラズモニクスと呼ばれ
ナノフォトニクス、センサ等への応用が進んでいる。

2次元半導体におけるプラズモンは、電氣的に制御可能であるという特徴により注目を集めている。
本特集では、NTT物性科学基礎研究所における2次元半導体を用いた
プラズモン制御に関連した研究成果を紹介する。

プラズモニクス

グラフェン

光検出器

結晶状ネットワーク

トポロジカル量子計算

Plasmonics

半導体 2次元系におけるプラズモン研究の概要と展望 14

NTT物性科学基礎研究所で進めているプラズモン制御応用, およびプラズモンを利用した基礎物性解明をめざした研究の概要と展望について紹介する.

グラフェンを用いたテラヘルツプラズモンの動的空間制御 17

グラフェンプラズモンの閉じ込めや反射を電氣的に制御した結果について紹介する.

グラフェンにおける超高速光-電気変換プロセスの解明 20

NTT物性科学基礎研究所が開発した超高速グラフェン光検出器とその測定技術, およびその結果明らかになった動作原理について紹介する.

エッジマグネトプラズモン結晶の理論提案 24

結晶状のネットワークにおけるプラズモン伝播を理論的に調べた結果について紹介する.

2次元電子・正孔系におけるプラズモン伝導の時間分解測定 28

ゲート電圧によって電子と正孔を切り替えることで単一の試料において両極性のプラズモン伝導を時間領域で観測した実験について紹介する.

主役登場 熊田 倫雄 (NTT物性科学基礎研究所) 32

2次元系における高速電荷ダイナミクス研究

半導体 2次元系における プラズモン研究の概要と展望

プラズモンとは電荷の疎密波であり、センサ等に利用されています。近年では、光をプラズモンに変換し、光の回折限界より狭い領域を伝播させることが可能であることから、新たな情報担体としても注目されています。本特集では、NTT物性科学基礎研究所で進めているプラズモン制御応用およびプラズモンを利用した基礎物性解明をめざした研究の概要と展望を紹介します。

くまだ のりお
熊田 倫雄^{†1}

くまくら かずひで
熊倉 一英^{†2}

NTT物性科学基礎研究所^{†1}

NTT物性科学基礎研究所 所長^{†2}

プラズモンとは

気体の温度を上げていくと、原子核から電子が分離し、正イオンと陰イオンが生成されます。このような電離した状態をプラズマと呼び、自然界では雷やオーロラに見ることができます。高い熱や電圧を印加することで人工的にプラズマを生成することも可能であり、溶接や半導体加工、核融合等で利用されています。ここまで示した例はすべて気体中のプラズマですが、金属や半導体等の固体中でも自由電子に由来したプラズマが存在します。ただ、固体中では電荷密度が高く、一般的な

温度における熱エネルギーよりクーロンエネルギーが高いため、プラズマの振る舞いが気体中とは大きく異なってきます。固体中で電子密度に偏りが生じると、それを打ち消す方向に電場が発生します。この電場により電子は加速され、電荷密度が一様な状態に向かいますが、慣性によって行き過ぎてまた引き戻されるような、ばねの縦波に似た電荷振動が起きます(図1)。このプラズマ振動を量子として扱う場合に「プラズモン」と呼びます。

プラズモニクス

プラズモンの特徴の1つに、同じ周

波数の光より波長が短く、光の回折限界*¹より小さい領域に閉じ込めることが可能であるという点があります。この利点を活かすことで、ナノ領域でのプラズモンの制御・応用をめざした技術を「プラズモニクス」と呼びます(図2)。プラズモニクスの代表的な例として、バイオセンサが挙げられます。これは、金属ナノ粒子におけるプラズモンが金属表面の状態に敏感であることを利用しており、ターゲットとなる分子等が金属表面に付着した際に起こるプラズモン周波数変化や減衰を検出するものです。ほかにも、金属ナノ粒子や針の先端でプラズモン電場が増強されることを利用した表面増強ラマン分光(または先端増強ラマン分光)、高効率光電変換等に応用されています。さらに近年では、光をプラズモンに変換してナノ領域での伝播を制御するナノフォトニクスや、光の波長より小さい周期構造におけるプラズモン電

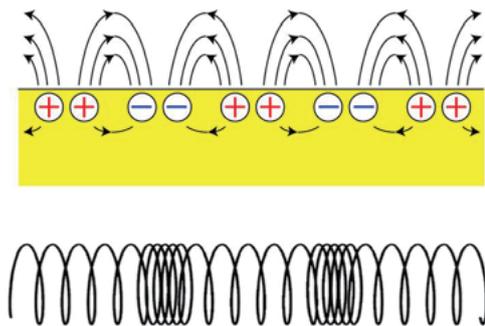


図1 プラズモン(上)とばねの縦波(下)

*1 回折限界: 光の回折による光学分解能の限界。波長に比例します。

場を用いて、物質の光学的な性質を人工的にデザインするメタマテリアルの分野でもプラズモニクスが注目を集めています。

半導体 2次元系におけるプラズモン

一般的にプラズモニクスの研究・応用は、金属表面に現れる表面プラズモンを用いて行われていますが、金属の表面プラズモンは、ロスが大きい、制御性が乏しいといった問題があり、応用範囲が限定されています。一方、私たちは半導体積層構造中に2次元的に閉じ込められた電子層や炭素の1原子層であるグラフェンにおけるプラズモンに注目して研究を行っています。これらの半導体2次元系では、外部電場を調整することによりプラズモンの特性を変調可能であり、これによってプラズモン素子の電氣的制御が可能となるという大きな利点があります。また、2次元面に垂直に磁場を印加すると、試料端に沿って1次元的に伝播するエッジマグネトプラズモンと呼ばれる特殊なプラズモンが現れることが知られています(図3)。さらに、半導体では金属と比べて電荷密度が低いことからクーロンエネルギーが相対的に小さく、力の弱いパネの波のように、プラズモンの速度は遅く波長は短くなります。波長が短いほど狭い領域に閉じ込めることが可能であり、金属表面プラズモンでは不可能な領域での応用が期待されています。

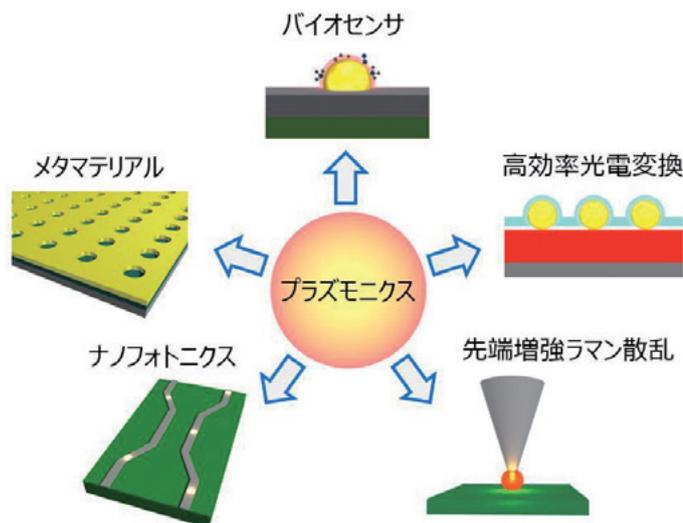


図2 プラズモニクスの応用例

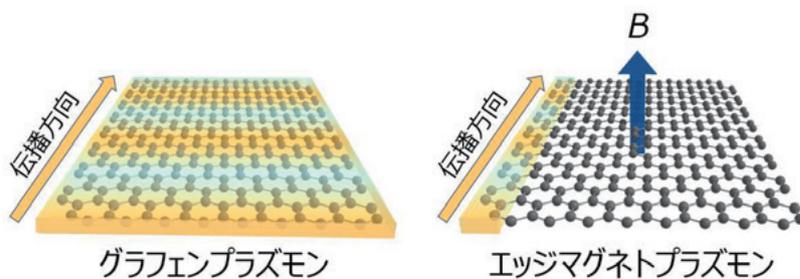


図3 グラフェンプラズモン, エッジマグネトプラズモンの概念図

NTT 物性科学基礎研究所での取り組み

NTT 物性科学基礎研究所では、半導体2次元系におけるプラズモンに関して、応用・基礎物性解明の両面から研究を進めています。本特集は、最近進展のあった4つのトピックスに関するものです。詳細は各記事を読んでいただくとして、ここでは、ごく簡単な概要を紹介します。

■グラフェンを用いたテラヘルツプラズモンの動的空間制御

グラフェンにおけるプラズモンは、テラヘルツ～中赤外領域でロスが小さい、一定周波数での波長が電荷密度によって変化する、という特性があります。1番目の記事では、電荷密度をゲート電圧によって空間的に変化させることにより、特定の場所に、特定の周波数のプラズモンを励起させることに成功した成果を紹介します^{(1), (2)}。この成果を発展させることで、グラフェン上に動的制御可能なプラズモン

回路を構築することをめざしています。

■グラフェンにおける超高速光—電気変換プロセスの解明

2番目の記事は、光熱電効果^{*2}を使ったグラフェン光検出器として世界最高動作速度220 GHzを実現し、グラフェンにおける光—電気変換プロセスを明らかにした成果に関するものです⁽³⁾、⁽⁴⁾。光検出器は情報通信、センサ等で利用されている光技術のキーデバイスですが、この成果は超広帯域高速光検出器としてのグラフェンの潜在能力の高さを示したものです。この成果を応用することで、オンチップでのプラズモン励起、検出も可能となります。1番目の記事で議論しているプラズモン回路と組み合わせることで、プラズモンの伝播を動的に制御可能となることが期待されます。

■エッジマグネットプラズモン結晶の理論提案

3番目の記事は、周期的に加工された2次元人工結晶構造におけるネットワークをエッジマグネットプラズモンが伝播する際の現象や機能性を理論的に解析した成果です⁽⁵⁾、⁽⁶⁾。エッジマグネットプラズモンの伝播を光に近い描像で理解し、得られた知見を光の操作性向上に利用することを模索しています。

■2次元電子・正孔系におけるプラズモン伝導の時間分解測定手法

4番目の記事は、プラズモンの伝播

特性を測定することで、系の状態を調べるという基礎研究に関する成果です。特殊な半導体積層構造中に形成された2次元電子系と2次元正孔系が共存した系において、エッジマグネットプラズモン伝導の時間分解測定を可能とした成果です⁽⁷⁾、⁽⁸⁾。これにより、この系における高周波伝播速度や減衰メカニズム等の物性が明らかになります。この研究を発展させることで、将来的には、トポロジカル量子計算への応用をめざしています。

今後の展望

2005年に初めてグラファイトから剥離するかたちでグラフェンが作製されて以来、さまざまな原子層2次元物質やそれらの積層により自然界には存在しない物質が作製可能となり、材料研究は飛躍的に進展しています。これらの新規材料では、新たなプラズモン機能の発見やプラズモンを利用した物性解明が期待されています。NTT物性科学基礎研究所では、基礎・応用両面から半導体2次元系におけるプラズモン研究を進めており、これらの研究に携わる研究者間のコラボレーションによる独創的な視点でインパクトの高い成果を継続的に創出することをめざします。

■参考文献

- (1) 熊田：“グラフェンを用いたテラヘルツプラズモンの動的空間制御,” NTT技術ジャーナル, Vol.35, No.3, pp.17-19, 2023.
- (2) N. H. Tu, K. Yoshioka, S. Sasaki, M. Takamura, K. Muraki, and N. Kumada: “Active spatial control of terahertz plasmons in graphene,” Communications Materials, Vol.1, No.7, 2020.
- (3) 吉岡・若村・熊田：“グラフェンにおける

超高速光—電気変換プロセスの解明,” NTT技術ジャーナル, Vol.35, No.3, pp.20-23, 2023.

- (4) K. Yoshioka, T. Wakamura, M. Hashisaka, K. Watanabe, T. Taniguchi, and N. Kumada: “Ultrafast intrinsic optical-to-electrical conversion dynamics in a graphene photodetector,” Nat. Photon., Vol.16, No.10, pp.718-723, 2022.
- (5) 佐々木：“エッジマグネットプラズモン結晶の理論提案,” NTT技術ジャーナル, Vol.35, No.3, pp.24-27, 2023.
- (6) K. Sasaki: “Band structures of edge magnetoplasmon crystals,” Phys. Rev. B, Vol.105, No.7, 075312, Feb. 2022.
- (7) 鎌田・入江・熊田・村木：“2次元電子・正孔系におけるプラズモン伝導の時間分解測定,” NTT技術ジャーナル, Vol.35, No.3, pp.28-31, 2023.
- (8) H. Kamata, H. Irie, N. Kumada, and K. Muraki: “Time-resolved measurement of ambipolar edge magnetoplasmon transport in InAs/InGaSb composite quantum wells,” Phys. Rev. Res., Vol.4, No.3, 033214, Sept. 2022.



(左から) 熊田 倫雄 / 熊倉 一英

近年、グラフェンをはじめとする2次元材料研究が著しく発展しており、それらの材料におけるプラズモン研究の重要性も増しています。今後も、基礎・応用両面から、独創的で国際的に高い水準の研究を推進します。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
量子固体物性研究グループ
TEL 046-240-3418
E-mail norio.kumada.rb@hco.ntt.co.jp

*2 光熱電効果：物質に吸収された光が熱に変換され、物質中に生じた熱勾配により電圧が発生する効果。これを利用することで、光信号を電気信号に変換できます。

グラフェンを用いた テラヘルツプラズモンの動的空間制御

グラフェンではプラズモンの特性を電氣的に制御可能です。この特性を利用し、電氣的に指定した場所に所望の周波数のプラズモンを励起できることを実証しました。この技術は、プラズモン導波路やスイッチなどの素子へ応用可能です。

くまの
熊田 倫雄

NTT 物性科学基礎研究所

グラフェンプラズモン

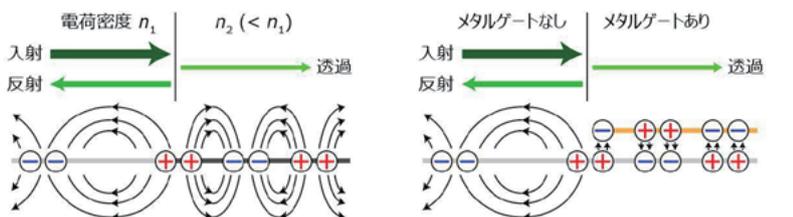
プラズモンとは電荷の疎密波であり、電磁波と比べて波長が短く回折限界以下の領域に閉じ込めることが可能という特徴があります。この特徴を活かし、プラズモン制御による応用をめざした技術をプラズモニクスと呼びます。本特集記事『半導体2次元系におけるプラズモン研究の概要と展望』⁽¹⁾で述べられているとおり、プラズモニクスはバイオセンサ等で実用化されています。これまでのプラズモニクスは金属表面に励起される表面プラズモンを利用して行われてきましたが、ロスが大きい、制御性が乏しいといった金属では避けることができない問題があり、それによって応用範囲が制限され

ています。特に、ナノ領域でプラズモンを使って情報を伝送するナノフォトニクスでは、これらの問題により実用化が進展していません。この状況において、金属に替わるプラズモニクス材料として現在注目を集めているのがグラフェンです。グラフェンプラズモンは、テラヘルツ～中赤外領域でロスが小さいことが知られています。また、金属表面プラズモンより波長が短く、より小さい領域に閉じ込めることができるという利点があります。具体的には、電磁波をグラフェンプラズモンに変換することにより、電磁波の波長の1000分の1の領域に閉じ込めることが可能です。さらに、グラフェンプラズモンの波長と周波数の関係は電荷密度によって変化するため、ゲートによ

て電氣的にプラズモンの伝播速度や波長を制御できるという金属にはない機能を有しています。これらの利点により、電氣的制御可能なナノフォトニクスの実現が期待されます。それ以外にも、特性変調可能なメタマテリアル^{*1}など、新たな応用の可能性が指摘されています。

グラフェンプラズモンの電氣的制御

グラフェンプラズモンの波長 λ と周波数 f の関係は $\lambda \propto \sqrt{n}/f^2$ であり、電荷密度 n に依存します。この式は、同じ周波数であっても、電荷密度が低くなると波長は短くなることを意味しています。したがって、電荷密度が急峻に変化する界面があった場合、屈折率の異なる媒質に光が入射するときと同様に、プラズモンの反射が起きます。電荷密度は、ゲート電極を用いて電氣的に変化させることが可能なため、原理的には電氣制御可能なプラズモン素子や回路を実現可能です（図1）



(a) 電荷密度境界でのプラズモン反射

電荷密度の差に応じて反射率が変化します

(b) メタルゲートの有無によるプラズモンの反射

電荷密度が一樣であっても、電氣的に制御できない反射が起きてしまいます

図1 グラフェンプラズモンの反射

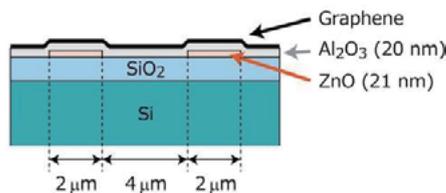
*1 メタマテリアル：光の波長より小さい周期的な構造におけるプラズモン電場を用いて物質の光学的な性質を人工的にデザインする技術。

(a). このような、グラフェンプラズモンのアクティブ制御に関する理論は2011年に発表されていますが、実験的にはこれまで実証されていませんでした。その主な原因は理論コンセプトを正しく実装するためのデバイス作製の難しさにあります。プラズモン波長より十分短い領域で電荷密度を急峻に変化させる必要がありますが、一般的に用いられている金属ゲートでは、遮蔽効果^{*2}によりゲートがある領域とならない領域でプラズモン電場の分布が大きく変化し、その境界でプラズモン反射が起きてしまいます(図1(b))。この反射は、グラフェンの電荷密度にかかわらず金属ゲートの有無によって引き起こされるもので、制御できません。

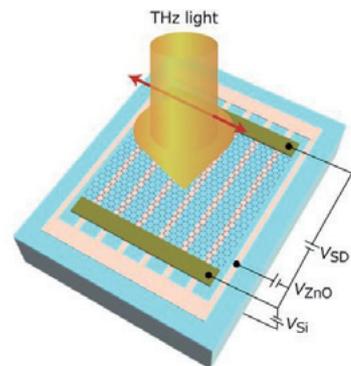
グラフェンプラズモン制御の実証

本稿で紹介する成果は、金属ではなく高抵抗の酸化亜鉛(ZnO)薄膜をゲート材料として用いることによって、金属ゲートでの制御不能な反射を回避し、グラフェンプラズモンの閉じ込めや反射を電氣的に制御した結果です⁽²⁾。

前述のとおり、通常の金属ゲートの問題は、遮蔽効果によりゲートの有無でプラズモンの電場分布が大きく変化してしまうことに由来します。一方、ゲート電極の抵抗が十分高い場合、ゲート電極中の電荷がプラズモン周波数で振動する電場に追従できず、遮蔽効果が抑制されます。そこで、私たちは作製温度を調整することで高抵抗化した厚さ20 nmのZnOをゲートとして用いました。実験で使用した試料は、幅2 μm 、間隔4 μm の短冊状に加工したZnOと低ドーブSi基板を2



(a) 試料構造



(b) テラヘルツ分光によるプラズモン測定

図2 試料構造と測定手法

層ゲートとして用いることにより、ZnOゲート上のグラフェンおよびSiゲート上のグラフェンの電荷密度(n_{ZnO} および n_{Si})を独立に制御できる構造となっています(図2(a))。この試料におけるプラズモン応答は、短冊とは垂直の電場を持ったテラヘルツ光を照射し、その透過・吸収を測定することで調べました(図2(b))。

図3は、この試料におけるテラヘルツ波のスペクトルです。グラフェンの電荷密度が一様なとき、グラフェンによるテラヘルツ光の吸収は、周波数の減少とともに単調に増加しています。これは加工していないグラフェンで観測される一般的な振る舞いで、確かにZnOゲートによる制御できないプラズモン反射が起きていないことを示しています。一方、ZnOゲートおよびSiゲートを調整し、どちらかの領域の電荷密度をゼロの点(電荷中性点: Charge Neutrality Point)とした場合、スペクトルにピークが現れています。電荷密度ゼロの領域ではプラズモンは励起されないため、このピークは電荷密度が有限な領域に形成

された共振器におけるプラズモン共鳴によるものだといえます。今回の実験では、この共鳴周波数もゲートにより変化させることに成功しています。この結果は、ゲート電圧を調整することにより、指定した場所に、所望の周波数でプラズモンを励起できることを示しています。このようなプラズモン励起のアクティブな空間制御は共振器だけでなく、導波路やスイッチに応用可能です。

さらに、 n_{ZnO} および n_{Si} の差を変化させていくことで、境界でのプラズモン反射率を連続的に変化させることも可能です。図4は n_{Si} を一定値に固定し、 n_{ZnO} を変化させたときのスペクトルです。電荷密度が一様な状態から、密度差を大きくしていくと、反射率の増大に伴い共鳴ピークが大きくなっていくことが分かります。実験的に得られた反射率の振る舞いは、光の反射でも用いられるフレネルの法則

*2 遮蔽効果: 外部から電場が加わると、金属中の自由電子が移動し金属内部の電場打ち消す現象。

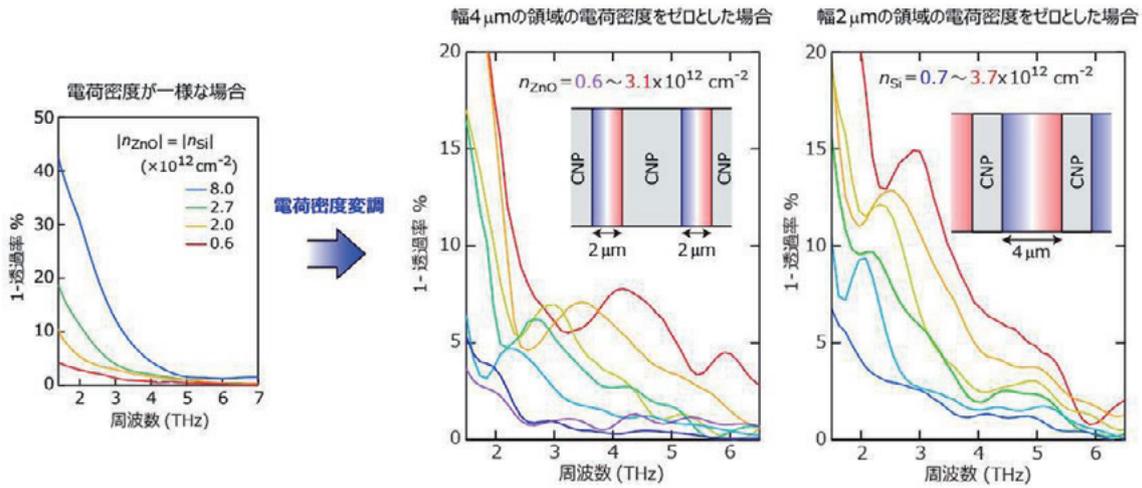
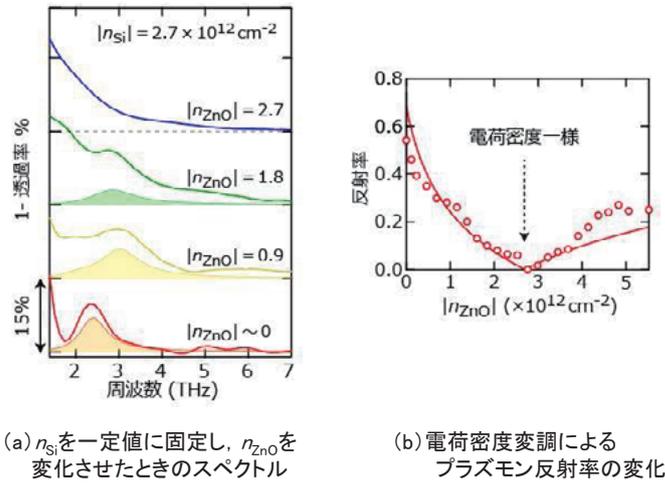


図3 電荷密度変調によるスペクトルの変化



(a) n_{Si} を一定値に固定し、 n_{ZnO} を変化させたときのスペクトル

(b) 電荷密度変調によるプラズモン反射率の変化

図4 プラズモン反射制御

$R = \left| \frac{\sqrt{n_{ZnO}} - \sqrt{n_{Si}}}{\sqrt{n_{ZnO}} + \sqrt{n_{Si}}} \right|$ とよく一致しました (図4 (b)の赤線)。このプラズモン反射率の連続的な制御はプラズモンモジュレータやスプリッタ等に应用可能です。

今後の展望

これらの成果から、理論的に提案されている電氣的制御可能なプラズモン回路の実装に向けたプラットフォームを準備できたといえます。今後、空間的にプラズモンを伝播させ、その方向・

速度・位相を制御するような実験へと発展させていきたいと考えています。

参考文献

- (1) 熊田・熊倉：“半導体2次元系におけるプラズモン研究の概要と展望,” NTT技術ジャーナル, Vol. 35, No. 3, pp. 14-16, 2023.
- (2) N. H. Tu, K. Yoshioka, S. Sasaki, M. Takamura, K. Muraki, and N. Kumada: “Active spatial control of terahertz plasmons in graphene,” Communications Materials, Vol. 1, No. 7, 2020.



熊田 倫雄

グラフェンプラズモン制御に関する研究は、まだまだ応用までは隔たりが大きい状況ですが、プラズモン伝播方向等の電氣的制御は、そのブレイクスルーとなると期待しています。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
量子固体物性研究グループ
TEL 046-240-3418
E-mail norio.kumada.rb@hco.ntt.co.jp

グラフェンにおける超高速光—電気変換プロセスの解明

グラフェン光検出器は広帯域の光に対して高感度かつ高速に電気応答すると期待されており、既存半導体デバイスを超える性能を発揮する可能性があるとして近年注目されています。しかし、これまでゼロバイアス下における実証動作速度はデバイス構造や測定機器の問題で大きく律速されており、グラフェン本来の性質が調べられおらず動作原理が解明されていませんでした。本稿では、NTT研究所が開発した超高速グラフェン光検出器とその測定技術、そしてその結果明らかになった動作原理を紹介します。

よしか
吉岡かつまさ
克将わかむら
若村たろう
太郎くまだ
熊田のりお
倫雄

NTT 物性科学基礎研究所

光—電気変換素子としてのグラフェン

光信号を電気信号に変換する光検出器は、情報通信、センサ等で利用されているあらゆる光技術のキーデバイスです。既存の半導体デバイスが動作しない広帯域の光に対して高速で動作する光検出器を実現することができれば、これまでに利用されていない波長帯を使った広帯域通信や、さまざまな波長領域の光センサを使った高度な情報処理といった新しい技術の発展が可能になります。グラフェンは、これらの要求を満たすと期待されている有望な材料です⁽¹⁾。これまでのグラフェン光検出器に関する研究により、テラヘルツ波から紫外光までの超広帯域^{*1}で動作すること、わずか原子一層で2.3%もの光を吸収するため高効率化が可能であることが示されています。さらに、光熱電効果^{*2}を用いることで、消費電力および信号雑音比の観点で応用に向けて必要とされるゼロバイアス動作^{*3}が実現されています。しかし、ゼロバイアス下の実証動作速度

はデバイス構造や測定機器の問題により約70 GHz⁽²⁾に制限されており、200 GHzを超えるという理論的期待に大きく及んでいない状況でした。また、これらの問題により、グラフェン本来の応答が調べられおらず動作メカニズムが不明瞭であるために、グラフェン光検出器の性能を最大限引き出すための設計指針が確立されていませんでした。したがって、200 GHzの動作速度を実証するとともに、グラフェンにおいてどのようなプロセスによって光信号が電気信号に変換されているのかといった本質的な物性を明らかにすることが、グラフェン光検出器のさらなる発展に向けて課題となっていました。

新規デバイス構造と測定手法による超高速光電流検出

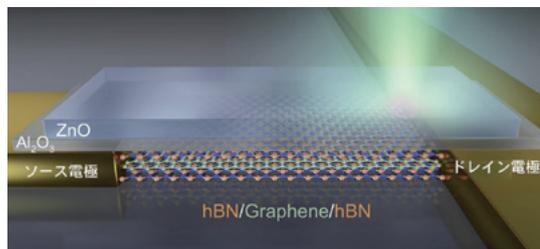
グラフェン光検出器における超高速光—電気変換の実現には、光照射のオン・オフに光電流が遅延なく追従できるデバイス構造と、その電流を高速で読み出す技術が必要となります。そのため、酸化亜鉛 (ZnO) 薄膜をゲート材料として用いることで静電結合に

由来する電流遅延を取り除き (図1 (a)), 電流読み出しにオンチップテラヘルツ分光技術⁽³⁾を適用しました (図1 (b))。光熱電効果を使ったグラフェン光検出器においては、電荷密度によって光—電気変換効率が大きく変わることが知られています。したがって、電荷密度を制御するためのゲート構造をデバイスにつくり込む必要があります。ゲート電極は良導体である必要があるため、一般的に金などの金属材料を使用しますが、これによってグラフェンとゲート電極間の静電結合に由来する電流遅延が生じてしまうために、グ

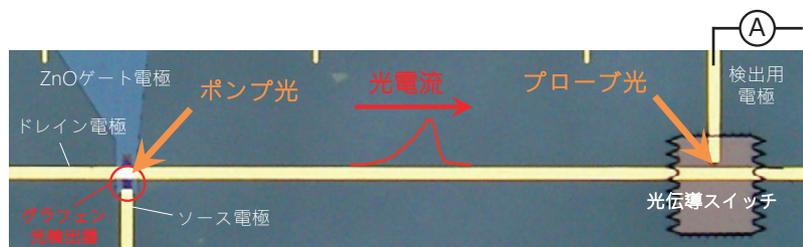
*1 超広帯域：一般的な半導体光検出器の場合、材料固有のバンドギャップ以下の光を吸収できないため、長波長（シリコンの場合は1 μm程度以上）の光に対して感度がありません。一方、グラフェンはゼロバンドギャップであるため、テラヘルツ波（波長：～1 mm）に対しても感度があります。

*2 光熱電効果：ゼーベック係数（温度差と電圧の関係を表す係数）の異なる物質の接点に温度差をつけた際に電圧が生じる現象が熱電効果です。特に、光照射によって温度を変化させる場合を光熱電効果と呼びます。

*3 ゼロバイアス動作：ソース・ドレイン電極間に電圧を印加しないで行う動作を指します。特に、グラフェンではソース・ドレイン電圧を印加すると大きな電流が流れてしまうため、ゼロバイアス動作が必須と考えられています。



(a) グラフェン光検出器の模式図。グラフェンを絶縁体である六方晶窒化ホウ素 (hBN) で挟んだものに、金属のソース、ドレイン電極を接続しています。表面をアルミナ (Al_2O_3) 絶縁膜で覆った後、酸化亜鉛 (ZnO) をゲートとして成膜しました。



(b) オンチップテラヘルツ分光回路の顕微鏡写真。グラフェン光検出器にポンプ光を照射することで生じた光電流はドレイン電極を伝搬し、光伝導スイッチにプローブ光を照射することで検出されます。

図1 超高速光-電気変換の測定系

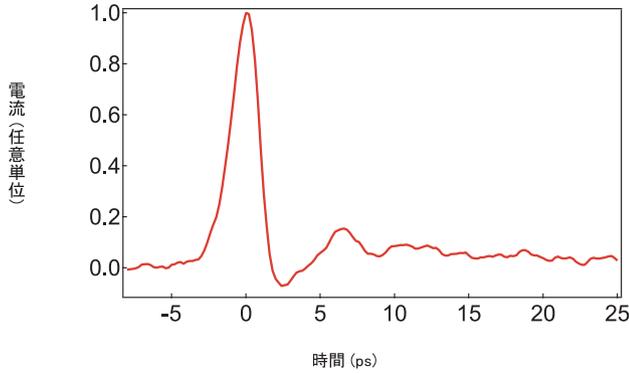
ラフェン光検出器の動作速度を律速してしまうことになります。そこで、本研究では成長条件によって高周波応答を制御することのできる ZnO 薄膜をゲート電極材料として用いることでこの問題を解決しました。一般的な金属材料では良導体であると同時にテラヘルツ領域の高周波信号を反射してしまうことが原因で電流遅延が生じます。これに対して ZnO 薄膜を使うと、直流信号に対して良導体でありながらテラヘルツ領域の高周波信号に対して透明となる特異な状況をつくり出すことができるため、グラフェンの電荷密度を制御しながらも、電流遅延を生じさせないという一石二鳥の状況をつくり出すことができます⁽⁴⁾。これにより、光照射のオン・オフに光電流が遅延なく追従できるデバイス構造を実現することができました。光電流の読み出しには、一般的には高速のオシロスコープ等が用いられますが、エレクトロニクスの帯域制限により 100 GHz を超える高速な応答を測るのは困難です。そこで、オンチップテラヘルツ分光技

術を用いることにより、前述のグラフェン光検出器が実現する非常に高速な応答の計測を可能にしました。この手法では、オンチップで光伝導スイッチをとおりて電流を検出することにより、 ~ 1 THz に迫る測定帯域を実現しています。図 1 (b) に示すとおり、グラフェン光検出器にポンプ光 (フェムト秒レーザーパルス) を照射することで生じた光電流は、ドレイン電極を伝搬し、光伝導スイッチに到達します。光伝導スイッチはプローブ光 (同じくフェムト秒レーザーパルス) が当たっている瞬間のみ良導体になるため、グラフェンから生じた光電流と、プローブ光のタイミングが重なっているときだけ電流計に信号が流れます。したがって、ポンプ光とプローブ光の時間差を時々刻々と変化させることで、連続的なストロボ撮影のように、光電流の波形を極めて高い時間分解能で計測することが可能になります。これらのとおり、デバイス構造および測定方法を工夫することで、グラフェンにおける超高速光-電気変換プロセスを調べるこ

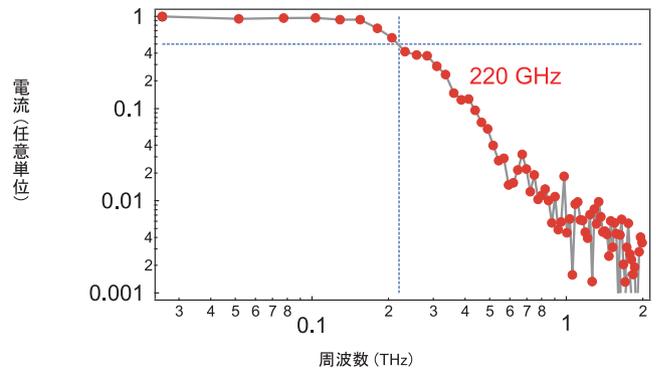
とが可能になりました。

グラフェンにおける光-電気変換プロセスの全貌

図 2 (a) は作成したデバイスの中でもっとも速い応答を示した光電流の実時間波形を示しています。これをフーリエ変換することにより、光電流の各周波数成分を調べたのが図 2 (b) ですが、これにより作成したグラフェン光検出器の 3 dB 帯域幅が 220 GHz に達することが分かりました。この値は、これまでに報告されている 70 GHz よりも 3 倍以上高速であり、200 GHz を超えるという理論的期待を達成していることから、デバイス構造や測定手法に律速されないグラフェン本来の応答を初めて引き出すことに成功したと結論付けることができます。そこで、得られた光電流の動的応答がどのような物理プロセスによって決まっているのかを調べるために、まず光電流の減衰時間に着目してグラフェンの移動度が異なる複数のデバイスを作成し、各デバイスの減衰時間とゼーベック係数を比較しました (図 3)。その結果、グラフェンの移動度が低いほど減衰時間が短くなるということが分かりました。これにより、グラフェンの光電流の減衰は、光照射によって高くなったグラフェン中の電子温度が、欠陥を介した音響フォノンとの衝突によって低下していくことによって起こることが分かりました。移動度が低く欠陥が多い試料のほうが、一度の衝突で失うエネルギーが大きいため減衰時間が短くなり、より高速な光検出器が作成できるという仕組みです。一方、光検出器の感度に対応するゼーベック係数は移動度が高いほど大きくなっていることから、グラフェン光検出器において応答速度と検出感度の間にはトレードオフの関係があることが分かりました。

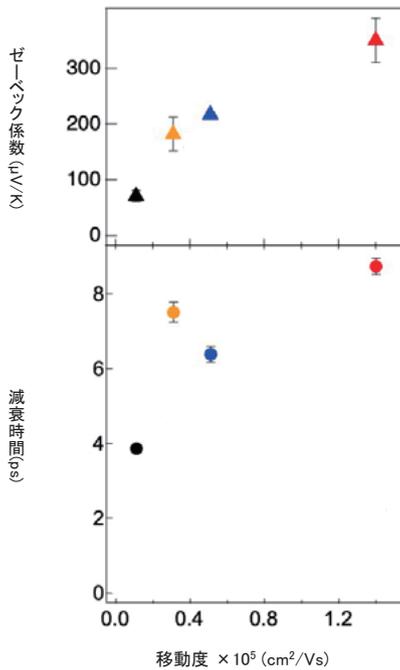


(a) 光パルス照射による電流の時間変化



(b) フーリエ変換によって得られた電流の各周波数成分の大きさ
電流の大きさが3 dB下がるところの動作速度が220 GHzを示しています。

図2 動作速度220 GHzの実証



(上)ゼーベック係数(感度の指標)。グラフェン中の電子散乱が小さく、移動度が高いときに感度が高くなります。
(下)減衰時間(動作速度の逆数)。移動度が高くなると、欠陥を介する散乱が減少し緩和時間が増加(速度が低下)します。

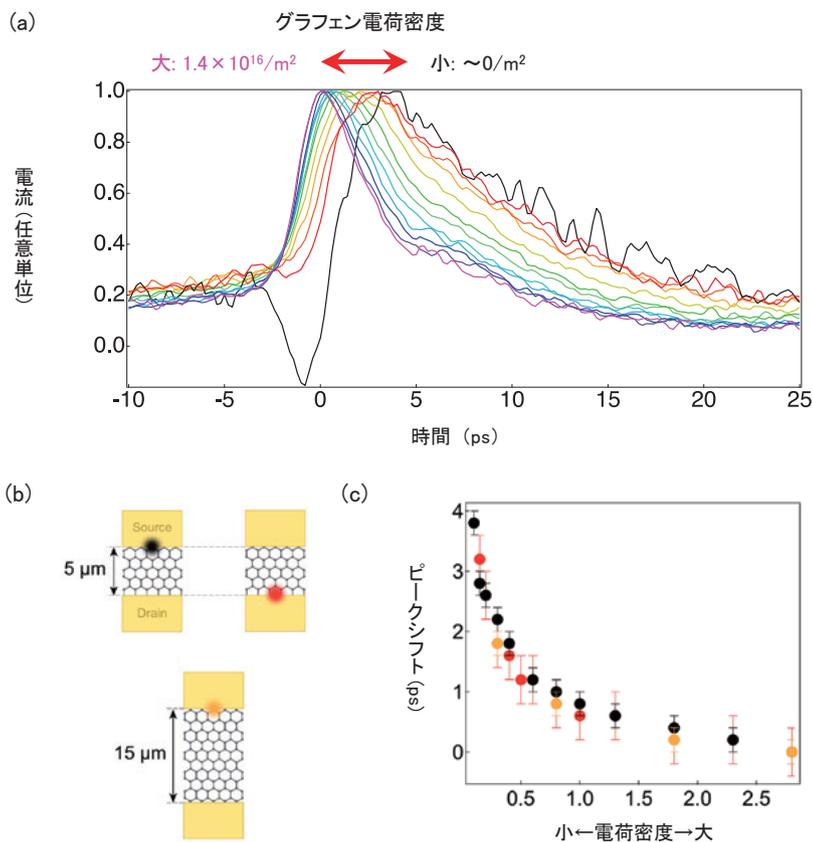
図3 検出感度と動作速度のトレードオフ

したがって、実際に光-電気変換素子として応用を考える場合には、応答速度が求められる場合には移動度の低いグラフェンを、検出感度が求められる場合には移動度の高いグラフェンを使うといった具合に、使用用途に合わせてグラフェンの移動度を最適化する必要がありますことがわかりました。

続いて、光電流の発生および伝搬の応答がどのようなメカニズムで決まっ

ているのかを調べるために、光電流の電荷密度依存性を調べました(図4(a))。その結果、電荷密度が減少するにつれてピークの位置が約4ピコ秒遅れることがわかりました。このような巨大なピークシフトは前例がなく、光-電気変換プロセスを解明するうえで重要な手掛かりになります。その原因の候補は2つあり、①グラフェン中を電流が伝搬している時間が変化してい

るか、②光照射後、光電流が発生するまでの時間が変化しているか、のどちらかであると考えられます。そこで、①の効果を確かめるために、図4(b)に示したとおり、デバイスの長さやポンプ光の照射位置を変えながらピークシフトを計測することで、電流の伝搬が原因であるかどうかを調べました。その結果、すべての結果が同一直線上に乗ることから(図4(c))、グラフェンにおける光電流の伝搬時間は観測できないほど短く、ピークシフトの原因は①ではなく②にあるということがわかりました。この早さの原因はグラフェンがギャップレスであることに起因します。この場合、発生した電流自身は伝搬せずとも、電極近傍に元々存在する電子を、光照射によってつくられた電場が光の速さで伝わって押し出すことで電流が生じるため、伝搬を待たずして瞬時に電流が流れることができます。さらに、光電流の発生時間が変化する理由は、光熱電効果が電子温度を電圧に変換する効果であるのを踏まえることで説明できます。すなわち、光照射直後の非平衡な電子状態が、バンド内電子-電子散乱を通じてフェルミ・ディラック分布^{*4}に落ち着くこと、そしてこの熱平衡化にかかる時間がグラフェンの電荷密度によって大き



(a) グラフェン中の電荷密度を下げると、光照射後に電流ピークとなる時間が4 ps遅くなります。
 (b) 測定配置の模式図。電流は下のドレイン電極から引き抜いています。
 (c) ピークシフトはグラフェンの長さやスポット位置に依存しません。

図4 光電流応答時間の電荷密度依存性

め、プラズモン回路の実現に向けて大きな一歩が踏み出せると期待しています。

■参考文献

- (1) M. Romagnoli, V. Soriano, M. Midrio, F. H. L. Koppens, C. Huyghebaert, D. Neumaier, P. Galli, W. Templ, A. D'Errico, and A. C. Ferrari: "Graphene-based integrated photonics for next-generation datacom and telecom," Nature Reviews Materials, Vol. 3, No. 10, pp. 392-414, Oct. 2018.
- (2) S. Marconi, M. A. Giambra, A. Montanaro, V. Mišević, S. Soresi, S. Tirelli, P. Galli, F. Buchali, W. Templ, C. Coletti, V. Soriano, and M. Romagnoli: "Photo thermal effect graphene detector featuring 105 Gbit s⁻¹ NRZ and 120 Gbit s⁻¹ PAM4 direct detection," Nature Communications, Vol. 12, No. 1, p. 806, Dec. 2021.
- (3) K. Yoshioka, N. Kumada, K. Muraki, and M. Hashisaka: "On-chip coherent frequency-domain THz spectroscopy for electrical transport," Applied Physics Letters, Vol. 117, No. 16, p. 161103, Oct. 2020.
- (4) N. H. Tu, K. Yoshioka, S. Sasaki, M. Takamura, K. Muraki, and N. Kumada: "Active spatial control of terahertz plasmons in graphene," Communications Materials, Vol. 1, No. 1, p. 7, Dec. 2020.
- (5) K. Yoshioka, T. Wakamura, M. Hashisaka, K. Watanabe, T. Taniguchi, and N. Kumada: "Ultrafast intrinsic optical-to-electrical conversion dynamics in a graphene photodetector," Nature Photonics, Vol. 16, No. 10, pp. 718-723, Oct. 2022.

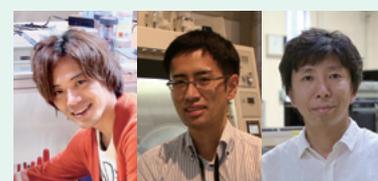
く変化することを明らかにしました。以上の結果により、グラフェンに光が照射されたとき、どのように光電流が発生し、グラフェン中を伝わり、減衰するのかという超高速光-電気変換プロセスの全貌を明らかにすることに成功しました⁽⁵⁾。

今後の展開

今回の成果により、広帯域高速光検出器としてのグラフェンの潜在能力の高さが示されました。しかし、今回実験に使用したグラフェンはグラファイトから手作業で剥離したものであり、量産化には不向きです。一般的に大面

積で成膜されたグラフェンの品質は剥離によって得られたものより劣りますが、成膜技術の発展により、その差は年々縮まっています。今後、量産化を可能にする大面積グラフェンを用いた光検出器の評価を行いたいと考えています。また、グラフェンをはじめとする2次元物質（単層または数層の原子層物質）を積層することで自然界に存在しない物質を創造する研究がさかに行われており、この技術を駆使することでさらなる高速動作を実現する物質の探索を行いたいと考えています。さらに、本研究を応用することで、テラヘルツ領域のグラフェンプラズモンの生成、伝搬制御、検出が可能になります。これにより、オンチップでプラズモン信号を扱うことが可能になるた

*4 フェルミ・ディラック分布：電子系が熱力学的平衡状態にあり、電子温度を定義できる状態であることを指しています。



(左から) 吉岡 克将 / 若村 太郎 / 熊田 倫雄

エレクトロニクスとフォトニクスの技術はそれぞれ高度に発展した技術体系ですが、本稿で紹介した光-電気変換のように、2つの技術の融合領域にはまだ見ぬ可能性が眠っていると考えています。引き続き新しい価値を創出すべく不断の努力を重ねていきます。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
 量子固体物性研究グループ
 TEL 046-240-3329
 E-mail katumasa.yoshioka.ch@hco.ntt.co.jp

エッジマグネトプラズモン結晶の理論提案

2次元電子系に静磁場を加えると伝播が一方向に限られるなど、特異な振舞をするプラズモンが試料の端（エッジ）に現れます。試料を複数のドメインに分割し結晶状のネットワークをつくった場合に、その中をどのようにプラズモンが伝播するかを調べた結果、発見以来さまざまな分野に発展を見せる整数・分数量子ホール効果の特徴を光物性として再現することを見出したので報告します。

ささき けんいち
佐々木 健一

NTT 物性科学基礎研究所

向きづけられた波の伝播

伝播する方向が一方向のみ許される場合、例えば時計の針のように反時計回りが無いという状況を光だけで作り出すのは難しいものです。光の場合、散乱体があると後方に反射して、その伝播方向が反転するからです。光の直進性を活用するためには、例えば光ファイバのように物質による全反射を利用します。すなわち光の操作性を高めるには、光と物質の相互作用をうまく活用する必要があります。他方、光を生み出す元となる物質中の電子に関しては、そのような向き付けられた伝播が2次元電子系*1に面直方向に強磁場をかけることで実現できます。

図1に示すように、磁場により個々の電子はサイクロトロン運動と呼ばれる円軌道を取り、磁場のベクトル方向に依存する向きを周回しますが、電子がたくさんあるような状況では、微視的

視点で容易に想像できるように隣り合う電子の円軌道は対向する伝播方向になるため、巨視的視点ではキャンセルし、たくさんの電子が協調的に作り出す実質的な電流は、試料の端（エッジ）にだけ残ります。これは、エッジ

状態と呼ばれ、端に沿った伝導チャンネルを形成します。エッジ状態の伝播方向は加える磁場の方向によって時計回り、または反時計回りどちらかになります。では、そのような向き付けられた電子の運動を強制的に励起するとど

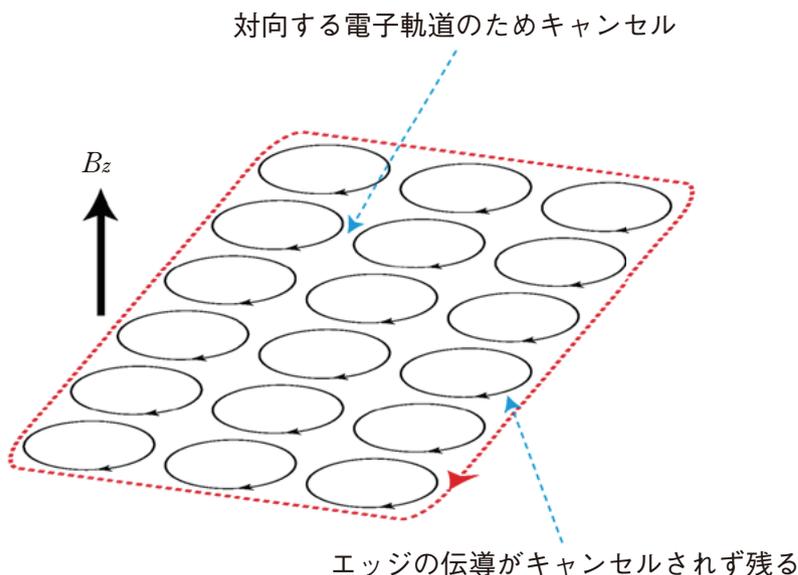


図1 2次元電子系の概念図
平面に垂直な磁場により電子の運動が円運動(サイクロトロン軌道)となります。隣り合う電子の円運動の方向は対向するため正味の電子の動きはキャンセルされ、試料のエッジに時計回りの電流(エッジ状態)が現れます。

*1 2次元電子系：炭素一原子の厚みしか持たない究極に薄い平面シートであるグラフェンは、その2次元平面内しか電子は存在しないため、2次元電子系の代表例です。

図1 2次元電子系の概念図

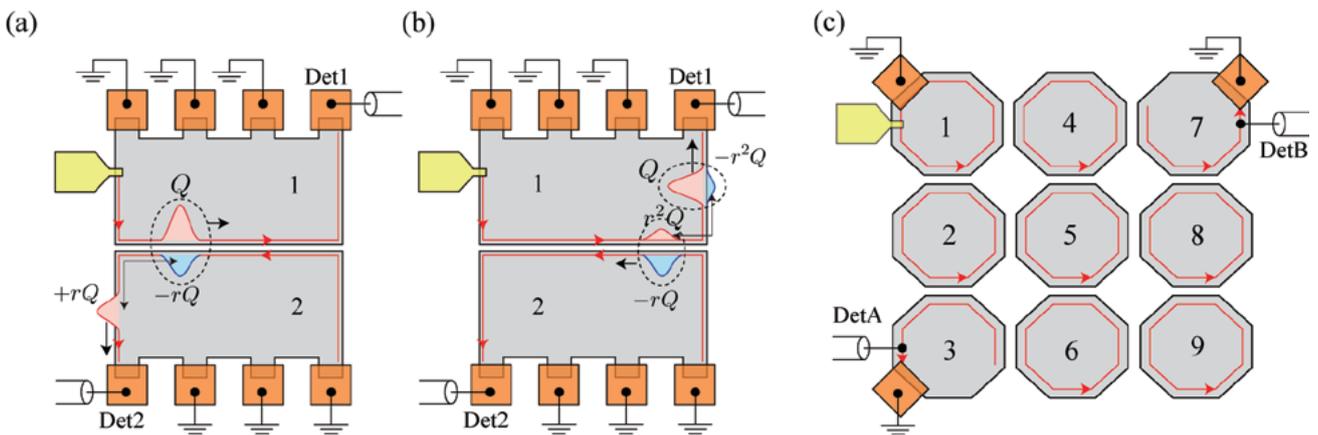
うなるか、これは1980年代から研究されているテーマですが、電子と電磁場のハイブリッドであるプラズモンが励起して、試料のエッジを一方方向に伝播します。今の場合の励起状態は、外部磁場によってつくられるエッジ状態のプラズモンなので、エッジマグネトプラズモンと呼ばれます。

電荷の細分化現象

そこで、2つの2次元電子系を用意する、もしくは、エッジマグネトプラズモンが周回する1つの2次元系を微細加工技術で2つに分割した場合、どのようなことが生じるかというのは興味のあるテーマです。図2に示したように試料を2つに分割し、上の試料を1、下の試料を2とします。試料1、2の端にはエッジマグネトプラズモンが励起可能で、反時計回りに伝播すると仮定します。したがって試料1と2の間の溝の部分では、(道路や電車路

線のような)対向するチャンネルがつけられ、溝の距離が十分に近いと相互作用が働きます。相互作用は電磁気学的(クーロンポテンシャル)なもので、図2(a)に示したように、試料1でエッジマグネトプラズモンを励起して、それが対向領域に達すると、何もなかった下の試料2に電荷密度の濃淡(プラス電荷とマイナス電荷の対)をつくり出します。領域1で励起されたエッジマグネトプラズモンが電荷 Q を持っているとすると、領域2の対向領域の入り口で対生成される電荷ペアは $\pm rQ$ と書けます。ここで r は結合定数と呼ばれる0から1の数で、領域1と2の相互作用の強さを表します。 rQ の電荷を持つエッジマグネトプラズモンは対向領域には入らずに領域2のエッジを反時計回りに進み測定器2で検出されます。一方、 $-rQ$ のほうは領域1を伝播する電荷 Q を持つエッジマグネトプラズモンに引きずられて、

領域2の正規の伝播方向とは逆に、対向領域の出口まで伝播します。その際、伝播の速度は、相互作用により、通常のエッジマグネトプラズモンの速度を $\frac{1-r}{1+r}$ 倍した低速度で与えられます。これは対向領域の“屈折率”が $\frac{1+r}{1-r}$ で与えられていることに相当します。この複合パルスが対向領域の出口に達すると、領域2の $-rQ$ はパートナーによる引力を失い、正規の伝播方向へと反転しますが、その際、図2(b)に示すように、領域1に電荷 $\pm r^2Q$ のペアを生成し、再度複合パルスがつけられて、伝播します。このようにパルスの時間発展を追うと、次第に電荷が細分されるので、電荷の細分化現象と呼ばれます。大変興味深い現象ですが、NTTの実験で検証されました⁽¹⁾。少々意外ですが、パルスではなく角周波数 ω で与えられる交流の入力に対しては、通常の薄膜を光励起する場合でお馴染みの反射率や透過率が計算されま



(a) 2次元電子系を微細加工で2つに分割した場合に、対向領域の入り口付近で観測されるエッジマグネトプラズモンの伝搬現象

(b) 対向領域出口付近での電荷細分化

(c) エッジマグネトプラズモン結晶の例

図2 電荷細分化現象

す。すなわちエッジマグネトプラズモンは確かに光の振舞を併せ持っている光と電子のハイブリッド状態なのです。

エッジマグネトプラズモン“結晶”

私に取り組んでいる研究は、前述の問題の延長です。1つの2次元半導体を微細加工技術で多数の要素に分割した場合、すなわち、半導体の“結晶”状ネットワーク（例えば図1(c)のようないくつかの“原子”からなる結晶）を考えた場合にどのような現象や機能が発現するか、という問題です。このような問題を取り上げたのは、研究発展の自然な方向性である（例えばナノカーボンの研究ではC60フラレンから筒構造のナノチューブ、平面系グラフェンと六角格子（ベンゼン環）のネットワーク周期性が上がっていった研究歴史があります）、というだけのモチベーションで行うのではありません。むしろもともとの強磁場におかれた2次元半導体の電子的性質を、より光に近い描像で理解し、新方面に活用しようという方向性もあります。例えば仮想的に分割の程度をマイクロトン円運動の直径程度にとれば、状況は量子ホール系のプラズモン光学的シミュレーションとも考えられます。ネットワークのエッジには、どのような条件（結合の強さや結晶の形）のもとでエッジマグネトプラズモンが現れるかは、興味のある問題の1つです。また、量子ホール効果には整数と分数の2種類がありますが、それらの違いをエッジマグネトプラズモンの観点で理解できると考えています。整数の起

源は単一電子描像で、不純物による散乱の効果として、また、分数の起源は電子間相互作用による多体効果であると考えられており、エッジマグネトプラズモン結晶の場合、散乱体はネットワーク中の欠陥、また結合定数 r が電子間相互作用の代替パラメータとなります。

まず、ドメイン結晶の中を伝わるエッジマグネトプラズモンの伝播特性を知るために、そのエネルギーバンド構造を計算しました⁽²⁾。計算の詳細は割愛しますが、エッジのない周期的なネットワークに対して転送行列法を用いました。バンド構造は、結晶の状態を理解するうえで便利なもので、波長に対して固有振動数をプロットしたものです。すべての波長に対して固有振動がない場合、エネルギーギャップがある、といいギャップの中の振動数では伝播する状態がありません。図3に示した“原子”の形が六角形で、ハニカムネットワークを持つ場合の計算結果では確かにギャップのあるバンド構造が得られました。2つの円錐の間のギャップの大きさは相互作用 r とともに大きくなる傾向があり、相互作用に起因したエネルギーギャップであることが分かります。もともとの試料を分割する前の試料で、エッジマグネトプラズモンが現れるのはマイクロトン軌道（図1）が量子化^{*2}されることによって生成されるエネルギーのギャップの中であり、このギャップは相互作用によってつくられたものではありません。したがって、エッジマグネトプラズモン結晶のギャップはもと

もとのエッジマグネトプラズモンとは起源が異なるものです。

エッジマグネトプラズモン結晶においてもエネルギーのギャップが現れることが分かりましたが、そのギャップの中ではネットワークのエッジを伝播するエッジモードが存在するかどうかは（周期的でエッジのない系を仮定して計算した結果得られた）バンド構造だけからは分かりません。より詳細な解析をすると、図3に示すようにエッジモードがあることが分かります。すなわち、エッジマグネトプラズモン結晶にも“エッジマグネトプラズモン”が存在するということが分かります。興味深い点としてバンドギャップのあたりの周波数に、通常のエッジの伝播方向とは逆向きに進むモードが現れることも分かります。実は、分数量子ホール効果ではエッジ状態の伝導が双方向になる場合もあることが知られています。“原子”間の相互作用というのを考えたことにより、多体効果によって生じる分数量子ホール効果も計算で取り入れられて、逆方向に伝播するモードが現れたためと解釈することができます。

まとめと今後の展望

2次元電子系の物性は、近年では数学のトポロジーと結びつくなど、基礎から応用へ幅広く発展している分野で、そこで得られた知見を光の操作性

*2 量子化：粒子の数のように1つ、2つと離散的な値をとること。半分の粒子というのは存在しません。同じ考えはエネルギーなどに適用されます。

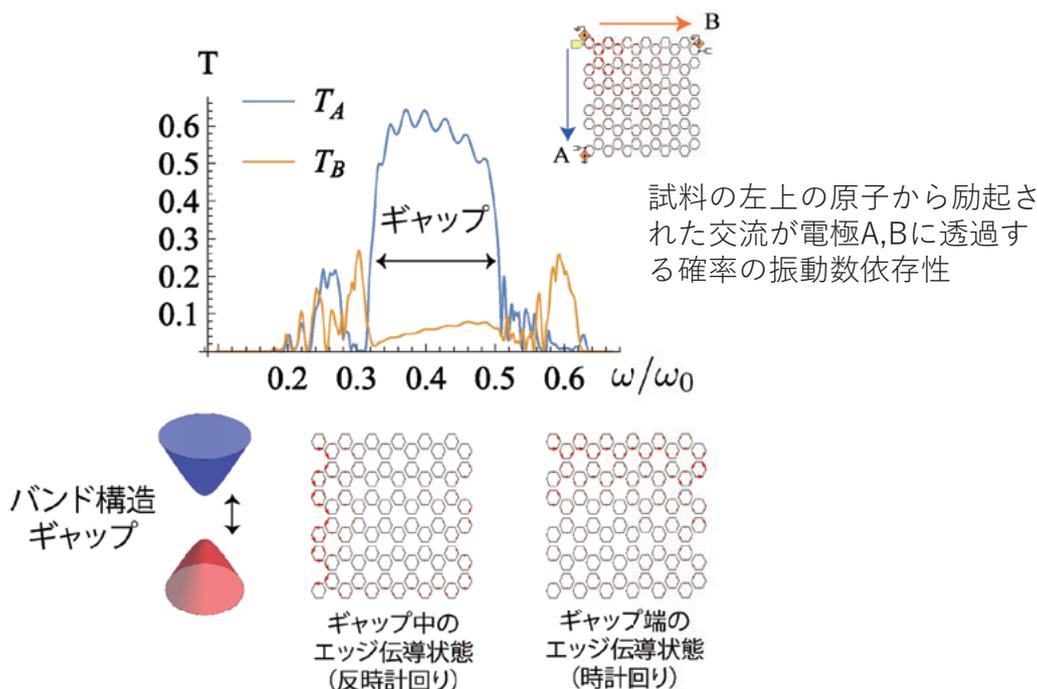


図3 エッジマグネトプラズモン結晶の伝播特性

向上に利用しない手はないのです。しかし、一般的に電子状態のエネルギースケールが光（例えば通信波長帯）のそれと大きくかけ離れているため、両者を直接的に結び付けることは難問で、新しいアイデアを必要とします。光と電子の振舞がどのようにすれば融合して、新しい機能性を出すのかは光電融合として多くの研究者の関心事ですが、私は電子と光のハイブリッド状態であるプラズモンをヒントに、そのようなアイデアを模索中です。今回提案しているエッジマグネトプラズモン結晶は1つのアイデア候補になるかもしれません。また、光の強度が小さい

場合、光の量子（フォトン）が示す量子力学的な振舞にも多くの関心が集まっていますが、エッジマグネトプラズモンの量子力学も古くから研究されているテーマで、今後の課題の1つとしてエッジマグネトプラズモン結晶の量子場の理論*3があります。

■参考文献

- (1) P. Brasseur, N. H. Tu, Y. Sekine, K. Muraki, M. Hashisaka, T. Fujisawa, and N. Kumada : “Charge fractionalization in artificial Tomonaga-Luttinger liquids with controlled interaction strength,” Phys. Rev. B, Vol. 96, No.8, 081101(R), August 2017.
- (2) K. Sasaki : “Band structures of edge magnetoplasmon crystals,” Phys. Rev. B, Vol.105, No.7, 075312, Feb. 2022.

*3 量子場の理論：時間・空間の中で、どのように粒子（光子、電子など）が生成・消滅・伝播されるかを予測する計算手法の総称です。



佐々木 健一

私自身は理論の研究者ですが、専門分野（グラフェンやグラファイト）に片足を置きつつ、所内のコラボレーションを通じて新鮮なアイデアやテーマに触れ、徐々に知見を増やしていく楽しみがあります。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
量子科学イノベーション研究部
TEL 046-240-3033
E-mail ke.sasaki@ntt.com

2次元電子・正孔系における プラズモン伝導の時間分解測定

電子と正孔を別の層に閉じ込める半導体複合量子井戸は、層構造の最適化により2次元トポロジカル絶縁体となるため、新しい原理を用いた量子コンピュータへの応用等から注目されています。本稿では、ゲート電圧によって電子と正孔を切り替えることで単一の試料において両極性のプラズモン伝導を時間領域で観測した実験について紹介します。本測定手法により、2次元トポロジカル絶縁体における電荷・スピンのダイナミクスの研究が進展すると期待されます。

かまた ひろし いりえ ひろし
鎌田 大 入江 宏
くまだ のりお むらき こうじ
熊田 倫雄 村木 康二

NTT 物性科学基礎研究所

トポロジカル量子計算技術

近年、組合せ最適化等、従来のコンピュータが苦手とする問題を、大規模かつ高速に処理することへの社会的ニーズとともに、それによるイノベーションへの期待から、新しい動作原理に基づく次世代型コンピュータの実現が切望されています。特に、量子力学の原理に基づき、複数の情報を同時に符号化することで超並列計算を実行する量子コンピュータが大きな注目を集めています。その実用化に向けて、超伝導体や単一の原子、光子、電子スピンなどを用いて量子ビットを構成し、量子もつれ等、基本的な量子操作を含

むさまざまな原理実証が行われています。このような研究の流れの中で、誤り耐性のある量子計算と量子回路の大規模化は、量子コンピュータを社会実装するうえでの主要課題と認識されています。

一方、別のアプローチとして、自然界の基本粒子*¹とは異なる特異な性質を持つ準粒子*²を用いて量子ビットを構成するトポロジカル量子計算が注目を集めています。トポロジカル量子計算は、従来の量子計算とは異なる

り、準粒子の交換によって系の量子状態が変化することを論理ゲートとして用いるもので、空間に配置された準粒子を順番に入れ替えることで計算が実行されます(図1)。計算結果は準粒子を交換する順序のみで決まり、準粒子がたどる軌跡の詳細には依存しないため、外部擾乱に対して耐性が高い量子ビットとして期待できます。2次元トポロジカル絶縁体は特異な性質を持つ準粒子を実現する舞台として期待されています。

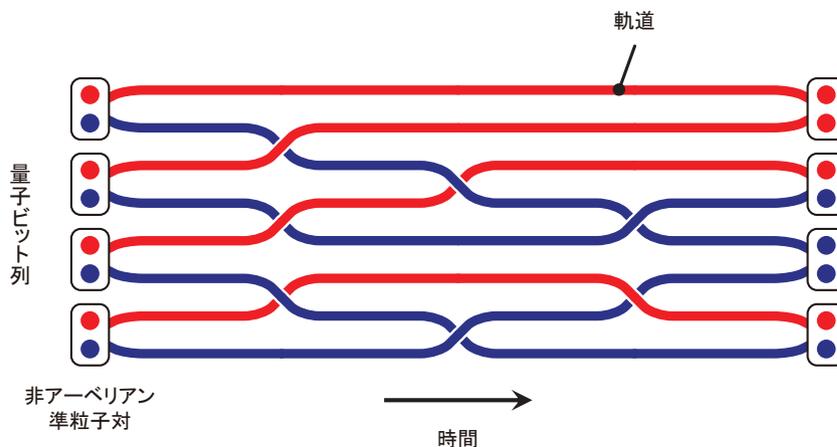


図1 トポロジカル量子計算の概念図

*1 基本粒子：自然界の物質を構成する最小単位の粒子であり、電子などのフェルミ粒子と光子などのボーズ粒子の2種類に分類されます。

*2 準粒子：半導体中の電子など、多粒子の集団的な振る舞いがあたかも1つの粒子のように振る舞うことがあり、これを準粒子といいます。2次元系では、フェルミ粒子ともボーズ粒子とも異なる量子統計に従い、入れ替えたときに元の状態とは異なる別の状態に変わる特異な性質を持つ準粒子の存在が許されます。

2次元トポロジカル絶縁体

2次元トポロジカル絶縁体では、試料内部が絶縁体であるのに対して、試料端には運動量とスピンのそれぞれ逆向きに1次元ヘリカル伝導チャンネル(ヘリカルエッジチャンネル)が形成されます(図2(a))。各試料端において逆方向に進行するエッジチャンネルは互いに逆向きのスピンを持つため、その間の非弾性散乱は時間反転対称性^{*3}によって禁止され、零磁場で磁性不純物が存在しない場合、原理的に後方散乱は抑制されます。このヘリカルエッジ状態に超伝導体を近接させた系では、トポロジカル量子計算に必要な準粒子(マヨラナ準粒子)が発現すると予想されています。一方、理論が予測するように後方散乱がない場合、ヘリカルエッジ状態の伝導率は量子化^{*4}するはずですが、実験では数 μm 程度の試料でしか量子化は観測されておらず、その散逸機構の詳細は明らかになっていません。

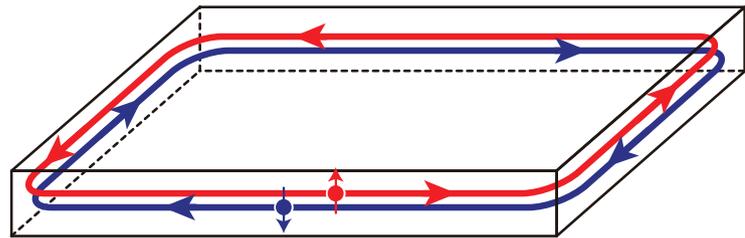
一方、2次元電子・正孔系に強磁場を印加すると、電子と正孔のサイクロトロン運動が量子化され、ランダウ準位と呼ばれる離散的なエネルギー準位が形成されます。このとき、フェルミ準位がちょうどランダウ準位の間にくるようにすると、試料内部は絶縁体となる一方、試料端には磁場の向きとキャリアタイプで決まる方向に周回する1次元の伝導チャンネル(カイラルエッジチャンネル)が形成されます。これは量子ホール効果状態と呼ばれ、時間反転対称性が破れた2次元トポロジカル絶縁体に分類されます。時間反転対称

性を持つ2次元トポロジカル絶縁体のヘリカルエッジ状態は、正確なスピンの向きを無視すれば、逆方向に進行する電子と正孔のカイラルエッジ状態を重ね合わせたものと近似的にみなすことができます(図2(b))。そこで、NTT物性科学基礎研究所では、半導体2次元トポロジカル絶縁体の母材となるInAs/InGaSb複合量子井戸において、電子と正孔のカイラルエッジチャンネルにおけるプラズモン(エッジマグネトプラズモン)伝導に着目しました。エッジマグネトプラズモンとは、2次元系の試料端における電荷の集団

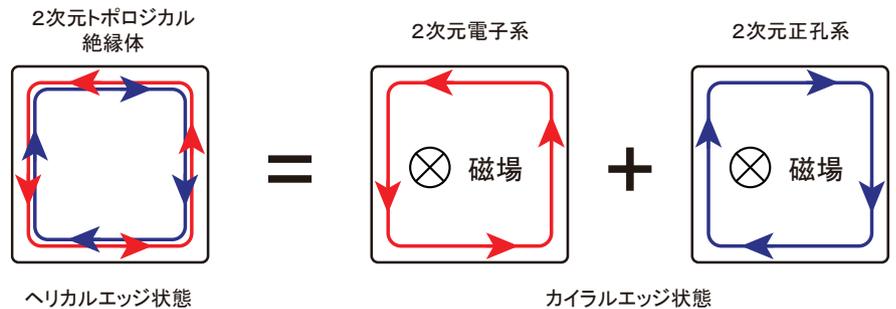
振動であり、その散逸や伝播特性を調べることで、エッジ状態に関する知見を得ることができます。

InAs/InGaSb複合量子井戸

ヒ化インジウム(InAs)とアンチモン化インジウムガリウム(InGaSb)をアンチモン化アルミニウムガリウム(AlGaSb)障壁層で挟んだ複合量子井戸は、図3に示すようなエネルギーバンド構造を持ち、電子はInAs量子井戸、正孔はInGaSb量子井戸に閉じ込められます。ここで、InAs伝導帯のサブバンド端がInGaSb価電子帯の



(a) ヘリカルエッジチャンネル



(b) ヘリカルエッジ状態とカイラルエッジ状態

図2 2次元トポロジカル絶縁体

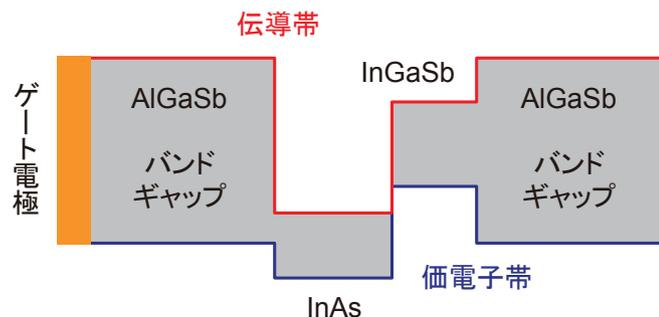


図3 エネルギーバンド構造

*3 時間反転対称性：時間の流れを逆向きにしたとしても状態が変化しないことであり、磁場によって時間反転対称性は破れます。

*4 量子化伝導：伝導率が e^2/h に量子化される無散逸な伝導。ここで、 e は素電荷 1.602×10^{-19} C、 h はプランク定数 6.626×10^{-34} J·s。

サブバンド端よりエネルギー的に下に位置（バンド反転）すると、電子と正孔の波動関数の混成によりエネルギーギャップが開き、2次元トポロジカル絶縁体となります⁽¹⁾。一方、InAs伝導帯のサブバンド端がInGaSb価電子帯のサブバンド端よりエネルギー的に上に位置（バンド非反転）するとき、通常のバンドギャップを有する半導体となりますが、表面ゲート電極でフェルミ準位を制御することにより、キャリアタイプを2次元電子系と2次元正孔系の間で切り替えることができます。本研究では、バンド非反転試料を用いて、2次元電子・正孔系それぞれにおけるエッジマグネトプラズモンに対するオンチップ時間分解電気伝導測定を行いました。

時間分解電気伝導測定法

従来、GHz帯域のプラズモンに対する電気伝導測定では、サンプリングオシロスコープやスペクトラムアナライザを用いて時間領域・周波数領域で測定する方法が主流でした。しかし、測定感度や測定系による高周波信号の歪みにより、試料内部における本来のプラズモン波形を観測・評価することが困難でした。本研究では、光学測定

におけるポンプ・プローブ分光法に類似の手法を用いることにより、試料内部におけるエッジマグネトプラズモンの波形を時間領域で観測することに成功しました。

図4(a)は実験に用いた試料の構造および測定系を模式的に示しています。試料には、3種類のゲート電極（エッジマグネトプラズモン励起のための入射ゲート、時間分解測定のための検出ゲート、電子・正孔のキャリア密度を変化させるためのグローバルゲート）があり、各ゲート電極間およびゲート電極と半導体基板はAl₂O₃絶縁膜によって絶縁されており、それぞれ独立に電圧を印加することができます。また、電流測定のためのオーミック電極に加え、高周波電圧に対して試料の電位を安定させるためのオーミック電極が複数あります。測定は強磁場を印加した量子ホール領域において、温度1.5 Kで行いました。

入射ゲートに電圧パルスを印加すると、パルスの立ち上がり・立ち下りのタイミングでそれぞれ電荷密度が粗・密のエッジマグネトプラズモンが励起されます。このエッジマグネトプラズモンは磁場の向きとキャリアタイプで決まるカイラリティで試料端に沿って

伝播します。これを時間分解測定するため、入射ゲートから30 μm離れたところにある検出ゲートに時間幅の短い電圧パルス（約80 ps）を印加し、狭窄部の局所的なキャリア密度を高速に変調します。図で反時計回りに伝播するエッジマグネトプラズモンが検出ゲートに到達するタイミングで検出ゲートに電圧パルスを印加するとエッジマグネトプラズモンは狭窄部で反射されるのに対し、それ以外のタイミングではエッジマグネトプラズモンは狭窄部を透過し、右下のオーミック電極で電流として測定されます。図4(b)で模式的に示すように、ここで印加する2つの電圧パルスの時間差 t_d を変えながら電流を測定すると、試料内部における局所的なエッジマグネトプラズモンの波形を計測することができます⁽²⁾。

エッジマグネトプラズモンの時間分解測定

図5(a)は、電子・正孔領域におけるエッジマグネトプラズモン波形の測定例です。時間軸の原点はエッジマグネトプラズモンを励起したタイミングを表し、正負のパルス状波形は入射ゲートに印加した電圧パルスの立ち上

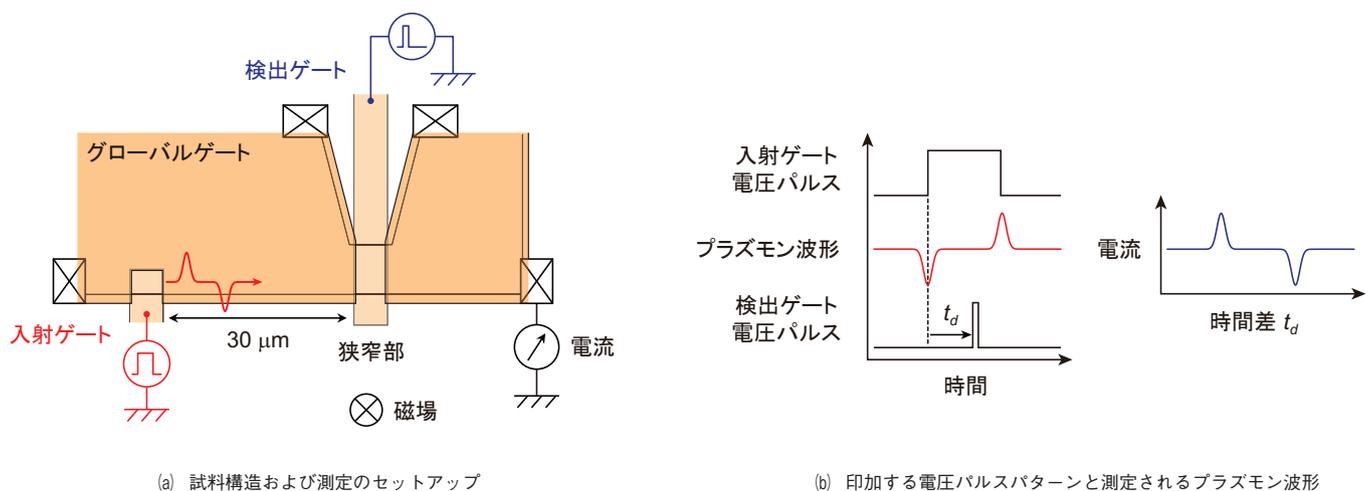
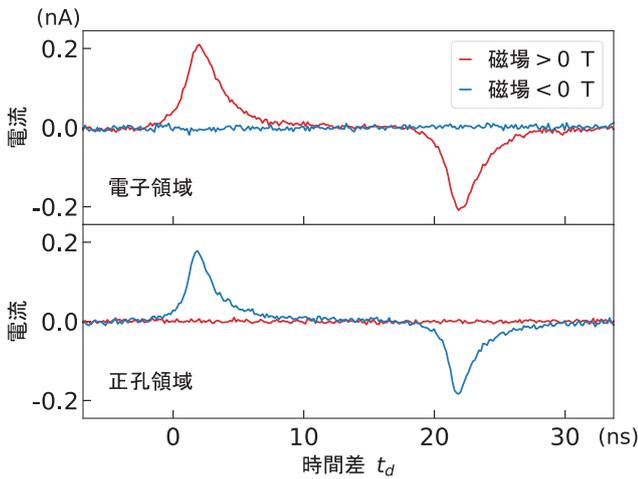
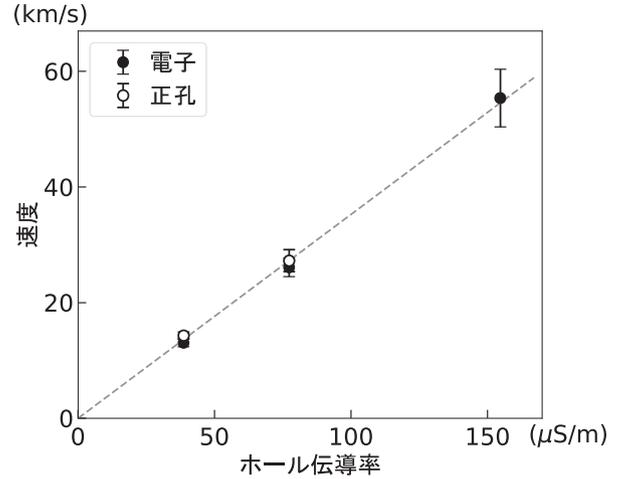


図4 時間分解電気伝導測定法



(a) エッジマグネトプラズモンの波形の測定例



(b) 伝播速度のホール伝導率依存性

図5 エッジマグネトプラズモンの時間分解測定

がりと立ち下りに、時間幅はパルス幅に対応しています。正負のパルス状波形は、電子・正孔領域それぞれに対し、一方向の磁場でのみ、かつ逆向きの磁場で観測されています。これは電子と正孔が同じ向きの磁場で逆向きのカイラリティを持つためです。ピークが2 ns程度遅れて現れているのはエッジマグネトプラズモンの伝播時間に対応しており、伝播距離(30 μm)から伝播速度が求まります。

試料表面がゲート電極で覆われている場合、エッジマグネトプラズモンの伝播速度はホール伝導率に比例することが理論的に示されています。図5(b)は電子・正孔領域それぞれに対して測定されたエッジマグネトプラズモンの伝播速度をホール伝導率に対してプロットしています。電子領域と正孔領域で測定された伝播速度はほぼ一致しており、ホール伝導率に比例しています。この結果は、電子・正孔領域ともにエッジマグネトプラズモンの伝播を時間領域で測定できていることを示すとともに、エッジチャンネルの特性をエッジマグネトプラズモンの伝播速度として測定できることを示しています。

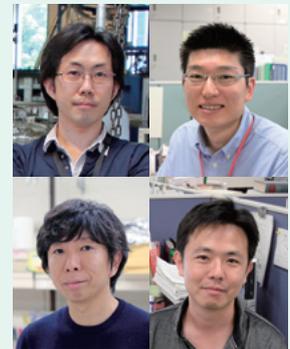
今後の展望

NTT物性科学基礎研究所では、2次元トポロジカル絶縁体の母材となるInAs/InGaSb複合量子井戸の電子・正孔領域において、エッジマグネトプラズモンの波形を時間領域で観測することに成功しました。測定されたエッジマグネトプラズモンの伝播速度はエッジチャンネルの特性を反映するため、2次元トポロジカル絶縁体をはじめとするさまざまなトポロジカル物質に対して本時間分解測定法を用いることにより、その緩和機構やダイナミクスが解明され、トポロジカル量子計算の実現につながる知見が得られるものと期待されます。また、本研究で示したように、エッジマグネトプラズモンの伝播速度やカイラリティをゲート電圧や磁場で制御できることは、プラズモンを情報担体として用いる「プラズモニクス」において有力なプラズモン伝播制御技術になると期待されます。

参考文献

- (1) 秋保：“量子計算実現に向けた新たな2次元トポロジカル絶縁体の創出,” NTT技術ジャーナル, Vol.29, No.5, pp.28-31, 2017.
- (2) H. Kamata, H. Irie, N. Kumada, and K. Muraki: “Time-resolved measurement of ambipolar edge magnetoplasmon transport in

InAs/InGaSb composite quantum wells,” Phys. Rev. Research, Vol.4, 033214, 2022.

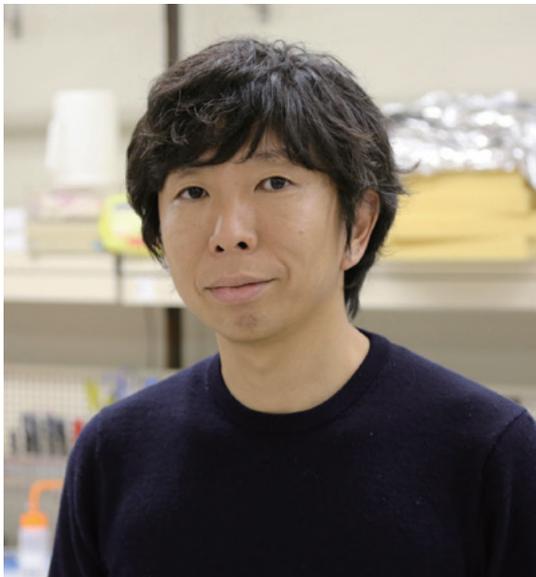


(上段左から) 鎌田 大/ 入江 宏
(下段左から) 熊田 倫雄/ 村木 康二

物質のトポロジカルな性質を量子情報処理技術に応用することをめざした研究が世界的に加速しています。NTT物性科学基礎研究所でも研究を進展させ、トポロジカル量子計算技術への発展の可能性を探索していきます。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
量子科学イノベーション研究部
TEL 046-240-3544
FAX 046-240-4727
E-mail hiroshi.kamata@ntt.com



主役登場

2次元系における 高速電荷ダイナミクス研究

熊田 倫雄

NTT 物性科学基礎研究所
グループリーダー（特別研究員）

私は大学で研究を始めて以来、2次元系における電子物性を主なテーマとして研究を行っています。2次元系は、比較的単純な0次元系（量子ドット）、1次元系（量子細線）より多彩な物性が現れ、3次元系より理解しやすいという側面があり、量子ホール効果（1985年）、分数量子ホール効果（1998年）、グラフェン（2010年）、トポロジカル相転移（2016年）と多数のノーベル賞対象となる現象が発見されています。私自身は、極低温において電子間の相互作用によって引き起こされる量子多体現象に興味を持って研究を進めてきましたが、発見した新規現象の応用の可能性を探索するためには外部から与えた刺激に対してどのように応答するかを調べる必要があるという視点に立ち、2010年ごろから電荷ダイナミクスの測定を開始しました。その過程で出てきた研究テーマが、本特集の対象である2次元系におけるプラズモンです。

プラズモンは電荷の疎密波であり、電圧パルスによって局所的な電荷密度に偏りが生じた際に電氣的に均一な状態に緩和するまでの過渡現象として現れます。プラズモンには量子多体状態に表れる電荷ダイナミクスとして基礎物性の観点から興味深だけでなく、本特集記事で述べられているとおり、プラズモニクスとしての応用が期待されてい

ます。一般的に、プラズモニクスの研究は金属の表面に励起されるプラズモンに対して光学測定技術を用いて行われていますが、金属表面プラズモンは散逸が大きいことや制御性のなさから応用範囲が限られています。

2次元系におけるプラズモンは特性が電氣的に制御であるという大きな利点があるものの、実験には光学測定技術とともに電子デバイス作製・測定技術が要求され、その両方の技術を単独で持っているグループがほとんどないということもあり研究が進んでいませんでした。

一方、私たちのグループでは、もともと、電子デバイス作製・測定技術に強みがあり、そこにマイクロ波技術を適用し、さらにテラヘルツ測定に発展させているというユニークなバックグラウンドを持っています。世界でも同様のアプローチをしているグループはほとんどなく、このバックグラウンドが私たちの強みとなっています。個人的な感覚として、何かもう一つブレークスルーがあれば、独創的であることにとどまらず、世界をリードするような研究に発展するのではないかと期待しています。近い将来、そのような状況になれるよう、引き続き研究を推進していきます。

挑戦する 研究者たち CHALLENGERS



納富雅也

NTT 物性科学基礎研究所
ナノフォトニクスセンタ センタ長
上席特別研究員



新しい知と技術を生み出すことが 研究者の責務。 その責務を楽しもう

NTTナノフォトニクスセンタでは光電融合技術を追究し、低遅延・低消費エネルギーの光コンピューティング技術の創生をめざしています。多様な光情報処理が可能になりつつある中、人工ナノ構造による物質の光学物性制御とデバイス応用を追究するNTT物性科学基礎研究所 納富雅也上席特別研究員に研究活動の進捗と研究者の姿勢を伺いました。



集積ナノフォトニクスによる新現象開拓と光処理デバイスを追究

前回のご登場は2020年でした。手掛けている研究の進捗をお聞かせいただけますでしょうか。

入社以来、集積ナノフォトニクスによる新現象開拓と光処理デバイスを追究しています。最先端の微細加工技術を駆使して新しいナノフォトニクス構造を実現し、そこに発現する新しい物理現象を開拓するとともに、超高速・超低消費エネルギーの光電融合情報処理チップの実現に向けた技術開発を行っています。

現代の光技術は、長距離の光ファイバ通信やデータセンタ内でのサーバ間通信をはじめとする大容量の情報伝送技術を牽引しています。一方、光の高速・大容量の特性を装置内の回路に適用する動きもあり、その究極形はコンピュータチップの中での光ネットワーク回路の構成、そして、光による直接的な情報処理の実現です。

「光コンピュータ」の実現は古くから光分野の研究者にとって大きな目標の1つでしたが、CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 電子回路技術が台頭する世にあって、実現の容易性およびコストの観点から光を演算処理に使う有意性を見出せなかった歴史があります。



しかし、CMOSの微細化と集積化の限界（ムーアの法則の終焉）が徐々に近づく中で、光の高速性を利用した演算処理に対して期待が高まっています。それを後押しするのが集積ナノフォトニクス技術と呼ばれるものです。ナノフォトニクス技術とは、高度に発展した半導体微細加工技術を駆逐することで、光の波長と同程度、またはそれ以下の微細構造をつくり、従来の光デバイスでは不可能な小型化や新しい光物性を生み出すことができる技術です。その一例としては、屈折率をサブミクロンスケールで周期的に変化させた人工構造であるフォトリック結晶というナノフォトニクス技術があり、私たちはこれを用いて、デバイスの超小型化、超低消費エネルギー化といった性能を実現してきました。

一概に光による演算処理といっても、光回路上だけで汎用性のあるさまざまな処理をすることは、現段階においては困難です。そこで、私たちは電子回路技術が持つ複雑なデジタル信号処理や大容量のメモリを組み合わせ、光が得意な処理は光回路へ任せることで特定の演算処理を加速させる、アクセラレータとしての機能化が重要になると考えました。また、デジタル信号処理に限らず、近年ニーズが高まっている機械学習ではアナログ信号処理が重要で、ここに光を利用する価値が見直されています。そこで私たちは、図1に示すようなCMOSエレクトロニクスとナノフォトニクスを連携させた光電融合アクセラレータを目標として定め、特にその中で①光の伝搬、特に光の干渉を利用して実行される光速演算、②演算レベルの光電融合による光

電変換、デジタル・アナログ変換の効率向上、③光トランジスタ技術による効果的な非線形特性の実現をねらいとしています。

学術的にも社会的にも期待値の高い研究を手掛けているんですね。

こうした状況を受けて、私たちの研究は低遅延・低消費エネルギーの演算アクセラレータチップの実現をめざして、「空間・時間・波長自由度を活用する光電融合演算基盤の開発」として、産業技術総合研究所（産総研）、名古屋大学、京都大学、九州大学とともに科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業（JST-CREST）（2021）に採択されました。

この研究では、光技術による伝送をCMOSに組み合わせ、光の特性を活かした高速信号処理を可能にする光電融合型の情報処理に取り組んでいます。IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想の商用化ターゲットである2030年ごろに実現される光電融合技術をベースとして、チップ内の一部の情報処理演算を光信号で担う計算機システムへの応用を考えています。

研究のポイントは2つあります。1番目はCMOS回路と光回路の融合に向けた課題解決です。光変調器のような電気-光変換（E-O変換）や、受光器のような光-電気変換（O-E変換）を小型化・低消費エネルギー化し、高密度な光-電子インタフェースを実現することがポイントとなります。私たちは、フォトリック結晶の技術を用いて、世界初のフェムトファラド（fF）容量の光電変換素子を実現し、静電容量を抑えることで、非常に小さなエネルギーで

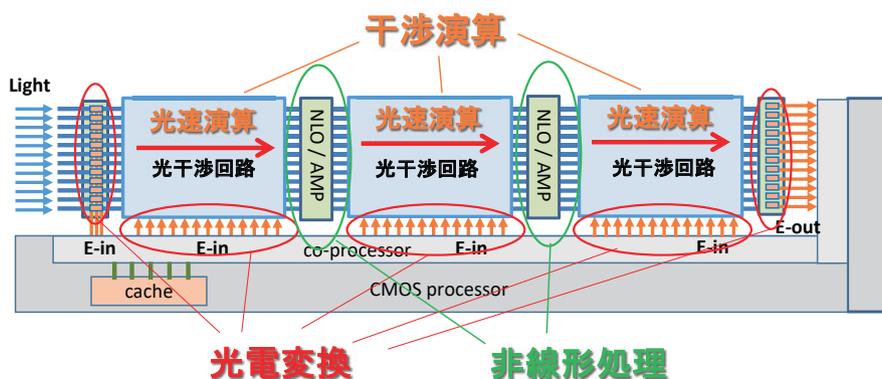


図1 光電融合アクセラレータの概念図

光電変換が可能なことを実証しています。この技術によって、光と電気がシームレスに融合した高い演算能力と低消費電力が両立する光電融合演算システムが初めて実現されると考えています。

この高効率光電変換技術のもう1つの重要性は、光電変換をとおして光に新しい機能を付加できることです。私たちは、集積ナノフォトニクス技術を用いた「ナノ受光器-ナノ変調器集積素子 (OEO変換デバイス)」で、O-E変換とE-O変換の両機能を $10 \times 15 \mu\text{m}^2$ という微小サイズに収めた光電融合デバイスを実現し、これを光トランジスタとして動作させることに成功しています。光トランジスタは従来光が苦手だった非線形演算を行うことができるので、図1中の非線形処理に利用し、光電融合ニューラルネットワーク処理などにおいて鍵となる働きをすると考えています。



超低遅延・低消費エネルギーの情報処理システムに向けた重要な一歩を担う

素晴らしい成果を上げていらっしゃるのですね。もう1つのポイントを教えてください。

もう1つのポイントは光の干渉を利用した演算です。干渉を利用することで光の伝搬速度で演算を実行することができます。二分決定グラフ (BDD: Binary Decision Diagram) 型のデジタル演算の応用形態として、光並列加算器を提案しました。この演算器は1回の光電変換と光伝搬によりデジタル加算が実行され、CMOS加算器に比べて1桁程度の低遅延化が期待できます。この提案を産総研グループの協力によって4ビット光加算器として試作し、加算動作の完全実証に成功しました。

BDD型デジタル演算に関しては、乗算器等では回路規模が指数関数的に増大してしまうという問題点が判明したためにこれを回避する手法を探索したところ、その中で前述の光トランジスタを要所で用いることで回路規模を縮約できることを見出しました。

また、光の干渉はアナログ演算そのものですので、光はアナログ演算においてもっともその優位性を発揮します。

光の伝搬速度で実行可能なアナログ演算の代表例が積和演算です。この積和演算は、現代のニューラルネットワーク (NN) を用いた深層学習やAI処理のもっとも基本的な演算で、処理のボトルネックになっています。そこで、私たちは、光の干渉を利用した積和演算を用いた光電融合NNアーキテクチャを検討しています。

私たちの計画では、積和演算を光の干渉を利用した光回路で実行し、NN処理において要所要所で必要となる活性化と呼ばれる非線形処理を光トランジスタで行うことを考えています。そして、この光による高速なアナログ演算回路を、高効率な光電変換技術でCMOSプロセッサと一体化するというシナリオです。このシナリオでは、電気のデジタル信号と光のアナログ信号の変換が重要となりますが、私たちは、上述の線形干渉演算ゲートの技術をベースにしてデジタル・アナログ変換を超低遅延で行えることを見出し、産総研グループにおいて回路動作実証に成功しています。

今のところ、このシナリオに向けて要素技術の開発を行っている段階で、NTTと産総研グループが高度なシリコンフォトニクス集積技術を用いて、光回路を試作し、原理検証を手掛けているところです。並行して、計算機アーキテクチャの専門家である九州大学グループでは、この光積和演算器とCMOS演算回路を連携した大規模演算にスケラビリティを持つ光電融合演算システムアーキテクチャの検討を進めていただいています。

私たちの研究は「光速演算」の特性を最大限に活かし、CMOSと協調動作可能な光電融合アクセラレータの実現をねらっており、ポストムーア時代において必要とされる超低遅延・低消費エネルギーの情報処理システムに向けた重要な一歩になると期待しています。

前回伺った「トポロジカルフォトニクス」も新しい成果を上げていらっしゃると聞きました。

前回お伝えしたとおり、私たちは新しい光の性質を追究する基礎研究を並行して行っており、特にトポロジカルフォトニクスと呼ばれる新しい分野に取り組んでいます。これは私たちが長年取り組んできたフォトニック結晶にトポロジという概念を導入して、新しい物性を創出するもので、



現在世界中で研究が活発に行われています。その中で私たちは、特に動的に再構成可能な光トポロジ系の実現をめざしています。トポロジカルフォトンクスでは次々と新しい性質が見つかっており、この性質を動的に制御できれば従来の光デバイスや光回路では不可能な動作が可能になることを期待しています。制御方法としては、ナノフォトンクス構造に機能ナノ材料を装荷修飾する方法と、屈折率虚部^{*1}を用いた非エルミート光学周期系の特異な性質を利用する2つの方法を用いて光トポロジカル相転移の実現と、動的な光トポロジ変化により実現する新たな光制御の提案をめざしています。

ナノ材料修飾によるナノフォトンクス構造の制御技術については、温度などで光学的性質が大きく変化する相変化材料をフォトンニック結晶の上に装荷する方法を研究しています。そのために優秀な相変化材料であるGST^{*2}をパターニングして図2(a)のようにフォトンニック結晶上に装荷することで、GSTの相変化により光トポロジカル相転移を起こすことが可能であることを、理論解析により見出しています。この現象の実現に向けて、成膜技術と高精度位置合わせ技術を用いた構造作製技術の開発を行い、サブミクロンスケールのGSTが装荷されたシリコントポロジカルフォトンニック結晶構造の実現に成功しています。現在、GSTの結晶アモルファス相転移によって引き起こされる

光トポロジカル相転移の実現をねらっています。

私たちは、これまでに超小型の電流注入型フォトンニック結晶ナノ共振器によるレーザを実現していますが、最近この構造を用いて、2つのナノレーザが集積した結合素子を世界で初めて実現し、これを用いて非エルミート光学系特有の例外点と呼ばれる特殊な光の状態を実現し、この例外点からの直接発光の観測に世界で初めて成功しました。また、フォトンニック結晶上に装荷したグラフェン^{*3}を図2(b)のようにサブミクロン周期でパターニングすることで、屈折率虚部が周期的に変調された非エルミートフォトンニック結晶という新しいタイプのフォトンニック結晶を実現する手法を提案し、この構造で上記の例外点を実現できることを明らかにしました。

現在は、初期的な観測まで行った光トポロジカル相転移の実現とトポロジカル特異点の形成に関する実験を進めて、定量的なデータの取得をめざしています。また、非エルミートフォトンニック結晶に関しては、グラフェンの選択装荷技術を用いて屈折率虚部の制御を行う素子作製を行い、例外点やトポロジカル特異点の制御に関する研究を進めています。

*1 屈折率虚部：複素数で表される屈折率の虚部。これを光学周期系に用いたものが非エルミートフォトンニック結晶となります。
 *2 GST: $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 。ゲルマニウム、アンチモン、テルルからなる化合物。
 *3 グラフェン：炭素の単原子層で構成される結晶。

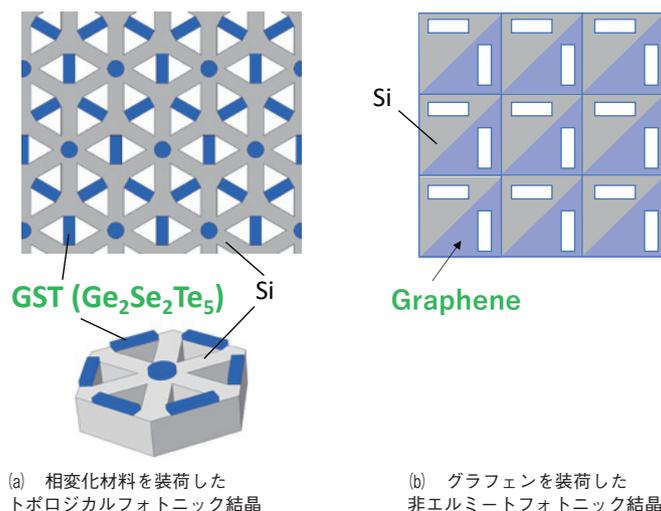


図2 フォトンニック結晶の構造図

トポロジカルフォトンクスや非エルミート光学の研究は、まだまだ探索的な基礎研究段階で応用先が見えているわけではありませんが、従来の物質とは異なる未知の性質がいろいろと見つかっており、エキサイティングな研究開発を現在進行形で行っているところです。この世界では例外点やトポロジカル特異点といったさまざまな奇妙な性質を持つ特異点が登場しており、これらの性質を使いこなす新しい光制御が見つかるのではないかと期待しながら研究を進めています。



「光」に演算させたい

光トランジスタの研究がIOWN構想のきっかけとなったと伺いました。

私たちが手掛けてきたナノフォトンクスによる光電変換や光トランジスタの研究が、通信ネットワークのあらゆるところに光を導入することをめざしたIOWN構想の1つの契機として取りあげていただいたことは大変うれしく思います。とはいえ、それは偶然の朗報です。元来私の研究では、通信だけでなく「光に演算そのものをさせること」にかなりこだわっていて、光はもっといろいろなことができると考えています。話が少し飛躍して聞こえるかもしれませんが、脳では、信号が脳内の神経ネットワークを伝搬した結果として演算がなされています。この仕組みにふさわしいのは電気よりも光であると私は考えました。光のネットワークを使った演算ならスピードが格段に上がり、これまで想像もつかなかったようなことができるのです。言い換えると、「光に演算させること」を追究していくことで、IOWNの将来を担う技術要素につながっていければと思っています。

この「光に演算させること」という発想を光の集積回路として実現することが、フォニック結晶の研究を進めていくプロセスにおいて内部での議論の俎上に載りましたが、当初は私たちには難しいターゲットでした。実際に具体的に検討できるようになったきっかけはJST-CRESTにおける計算機科学の専門家とのコラボレーションです。それまで漠然としていた概念が、全く異なる分野の専門家と組むようになり、研究テーマとして具体的なものとなりました。

た。この経験をとおして他分野や他の世界に目を向けることは重要であると、さらに強く実感しました。

社会にとって研究者とはどんな存在だとお考えでしょうか。また、後進の研究者の皆さんにも一言お願いいたします。

新しい知と技術を生み出すことが私たち研究者の責務であり、そのうえでその責務を楽しめる存在だと思います。もし、研究者がいなくなってしまうと、今ある技術は使えなくなる、もしくは技術そのものが存在しませんよね。そんな意味でも研究者は社会にとって必要で、社会が前に進むためには必要な存在であると思います。

責務を楽しむために、私自身はゆとりのある時間をつくるように心掛けています。雑務は定常的に発生しますが、時間をうまく配分して、半日、もしくは丸一日と、雑務に追われることなく、集中して自由に考えられる時間を設けることを大切にしています。こうしたゆとりのある時間がとれていないことで、研究者としての自分が今苦しい状況に置かれていることを自覚しています。こうした自分のコンディションに気付いたら、無理をしてもゆとりのある時間を持つように心掛けています。

最後に、研究者の皆さん、学生時代に最初に研究室に入ったときのことを思い出してください。最初に実験や研究をしていたあの頃の気持ちです。研究も実験も面白かったのではないのでしょうか。今の研究者は本当に忙しい日々を送っており、あの頃の自分を忘れてしまいがちだと思いますが、追究する面白さを忘れることなく、面白さを自らの力で作り上げていきましょう。ワクワクする研究には準備が必要です。その思いを継続できるような仕事の仕方をしていただきたいと思います。

そして、研究者をめざす学生の皆さん、今の日本は博士課程に進む学生数が少なすぎると感じています。欧米では研究者に限らず技術者も、博士の学位が1つのステータスとして認知されています。したがって世界で活躍できる研究者・技術者をめざすのであれば博士は取得しておくべきだと考えます。そして、自分の将来を決めるときには社会を近視眼的にみるのではなく、長期的な視野で世界を見極めていきましょう。

挑戦する 研究開発者たち CHALLENGERS



芳 政信

NTT西日本
技術革新部 R&Dセンター
ネットワークサービス担当

世の中を便利にしていく技術や 手法の「目利き」として、お客 さまの思考を先取りしたネットワー クアーキテクチャを追求する

質の高いサービスをタイムリーにお客さまに提供するため、事業に密着したトライアルなどの応用的研究開発に挑むNTT西日本。NTT研究所が手掛ける基盤的研究開発の成果、グループ会社や他企業の技術も活用し、効率的な実用化開発や応用的研究の推進に取り組んでいます。NTT西日本 芳政信氏に現在の研究開発の進捗と研究開発者としての姿勢を伺いました。



柔軟かつ即時、容易に変更できるよ うな可変的なサービスを提供したい

現在、手掛けていらっしゃる研究開発について教えてください。

ネットワーク、インフラ全般の仮想化や自動化に取り組んでいます。ご存じのとおり、コロナ禍によって私たちの生活様式は一変しました。状況やニーズによってリアルとリモートを使い分けるリモートワールドが現実のものとなり、お客さまの行動や思考、価値観はこれまでの社会と大きく変容を遂げています。

それに合わせてテクノロジーも、より革新的なスピードで

進化して、国や企業、コミュニティ、個人等の多様なスタンスで開発されています。私たちは、このような社会の変化はネットワークへの要求条件の変容につながっていると考えています。例えば、「リモートでの講演や重要な商談のある日は高品質で、接続断が起きないようにネットワーク環境を強化しておきたい」「バーチャル空間で大切な人と過ごしたい」「この時間だけはネットワークがスムーズに動くように、低遅延の環境でネットワークを利用したい」等、利用シーンに応じてその要求条件も異なります。これらはほんの一例ですが、多様化したお客さまのネットワークに対するニーズにこたえるため、近い将来には、従来ど

の計画的、画一的なトラフィックをベースとしつつも、その都度、柔軟かつ即時、容易に変更できる可変的なサービスが必要とされると考えます。

私たちNTT西日本は、インフラを提供するキャリアとして、少し先の将来を見据えて開発、提供すべき技術は何か、どのようなアーキテクチャでありたいかを検討しています。

数年後の社会を見据えて研究開発に臨まれているのですね。

少し先のユースケース〔例えば、VR (Virtual Reality)/AR (Augmented Reality) /XR (Extended Reality) が生活様式に組み込まれた社会、ロボットと共生する社会、分散型の社会活動等〕を、サービス、新規ビジネスを開拓する部門、社外のスタートアップと共創していくことで、ユーザニーズの具現化をめざしていきたいと考えています。

現在、R&Dセンタ全体としてフレックスサービスにかかわる商用開発、維持管理を行っています。そこでの課題を踏まえて次世代ネットワークのあり方を検討しており、その一要素としてネットワークのソフトウェア化に関する技術蓄積に取り組んでいます。そして、世の中のネットワークに対するニーズをネットワークサービスとして実現するために、トライ&エラーを繰り返しながら蓄積された技術を実装していきたいと思っています。この結果として具体化されたアーキテクチャをNail (Network Automation Integrated Lab) と呼んでいます (図1)。Nailは

ソフトウェア・設定・フレームワークの組合せの体系の中で、これらに対するコントローラーアーキテクチャ全般の総称です。

お客様のユースケースやアプリケーションにより、帯域、遅延、パケットロス等、ネットワークに求められる要求条件が異なるにもかかわらず、現在は、ユースケース等に合うネットワークサービスを選ぶ、もしくはネットワークに合わせてユースケース等の機能等が制限されています。

Nailは、これをユースケースやアプリケーションからの要求条件に合うように、ネットワークの機能、性能、品質等をエンド・ツー・エンドで仮想的に設定・構成して、提供するためのプラットフォーム構築をめざしています。これを実現するためにはネットワークの仮想化、装置のソフトウェア化、インテリジェント化等が必要になります。これらをどのようにコントロールして、常に最適なりソース割り当て等を自動で行うのか、というアーキテクチャ全般がNailなのです。

Nailにより、ネットワーク、およびクラウドやエッジのコンピュータリソースなどを個別にコントロールする部品をエンド・ツー・エンドでつなぎ合わせるとともに、その制御をユーザの曖昧で直感的な要求に対して、即時に実行できるように実装しています。ユーザは、ネットワークに関する知識を必要とせず、「できるだけ安く」「今だけしっかり」等の曖昧なご要望を直感的なUI (User Interface) により選ぶことで、さまざまなニーズにこたえたネットワークサービスを利用することができるように設計して

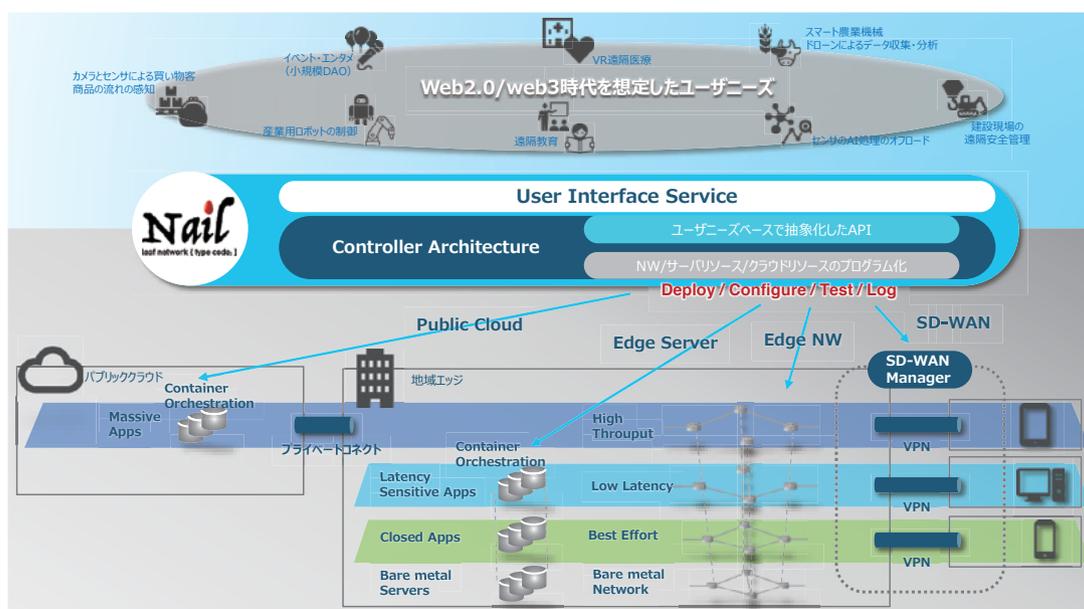


図1 Nailアーキテクチャ



います。

これを実現するために、ネットワーク、サーバ、クラウドなどの異なる技術レイヤ、設定情報をYANGというモデル言語を用いて共通の・ソフトウェア的に制御ができるようにすることで、一元的な装置コントロールを可能としました。さらに、ネットワーク制御をするためのソフトウェアを応用して活用することで早期実装を可能とした統一化されたAPI (Application Programming Interface) を提供しています (図2)。



IOWN構想のコグニティブ・ファウンデーションの実装例

Nailの社会実装はいつ頃になりそうですか。

2025年の大阪・関西万博の頃を目標としており、それに向けて、主にコントロール領域の拡大とユーザニーズの具体化の2点に取り組んでいます。

これまでクラウド、オンプレミスへのインフラ基盤構築、ネットワーク設定等は、それぞれ異なるアーキテクチャで実行していましたが、Nailでは、各機能をモジュール化・プログラマブル化したシンプルで共通的なアーキテクチャ

とすることで、開発・運用コスト削減・拡張性の向上を狙います。

そしてコントロール領域の拡大に関しては、従来のネットワークに加え、選択肢を増やすための、より高品質ネットワーク (広帯域、低遅延、柔軟な経路制御など) の研究開発、そして、ネットワークに付帯するリソースのセット提供が可能なアーキテクチャの検討、ネットワークリソースの可変的な提供、他のサービスとの連携を可能とするオーケストレーション技術、それに必要とされる設備リソースの分散配置に関する研究開発に取り組んでいます。

IOWN構想の発表と同時期頃となるでしょうか。

私たちは、NailはNTTグループが展開するIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想のうち、コグニティブ・ファウンデーションの構成要素の1つの実装例になるのではないかと考えています。

IOWNのコグニティブ・ファウンデーションは「マルチオーケストレータが、クラウドやエッジをはじめ、ネットワーク、端末まで含めてさまざまなICTリソースを最適に制御することで、ニーズにこたえるオーバーレイソリューションの迅速な提供をめざすもの」です。例えば、台風の勢力や進路といった気象情報、イベント開催情報など、ネットワーク機器を監視するだけでは把握できない情報など、新たに収集した多様な情報を基にシステムが自ら考え最適化していくことで、災害発生前に対策立案し実行するといった未来予測を用い、システム自体が進化していく仕組みで、一言でいえば、自己進化型のサービスライフサイクルマネ

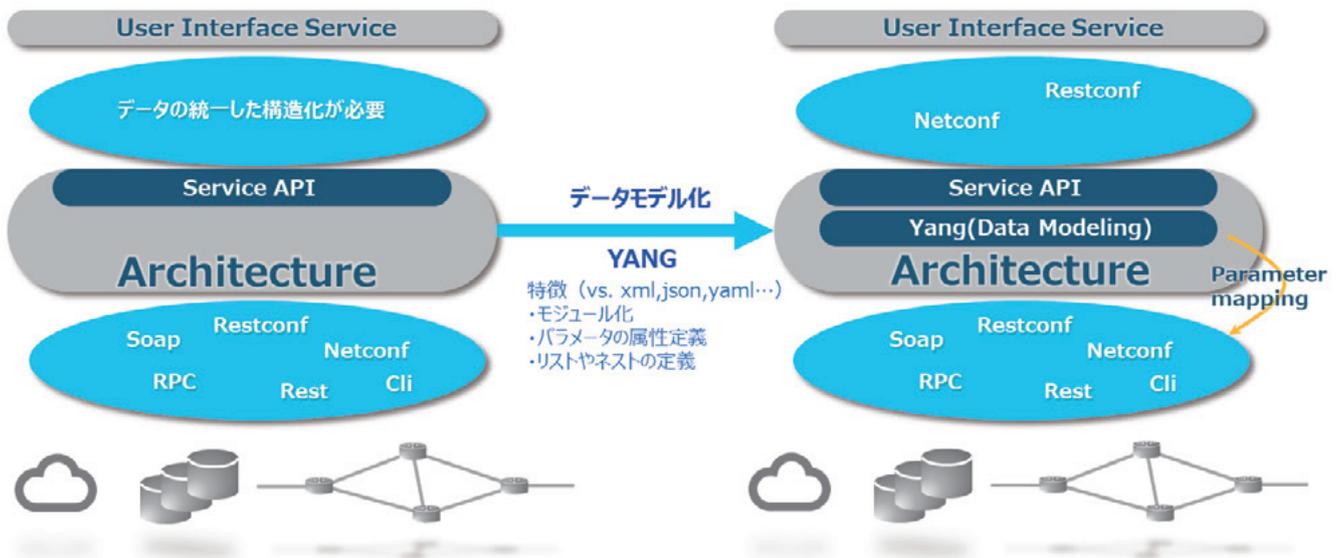


図2 YANGデータモデルによるパラメータの統一と抽象化

ジメントです。

この定義を踏まえてNailを眺めると、NailはWeb3.0時代の多様化したニーズにこたえるため、ユースケースやアプリケーションからの要求条件を情報源として、自ら考えネットワークを最適化していくことですから、IOWNのコグニティブ・ファウンデーションの実装例の1つといえるでしょう。

つまり、事業会社としてIOWNの技術を想定し、積極的にそれを取り入れつつ実フィールドで適用することで顧客のニーズ・体験を詳細化した結果でもあります。このように私たちは、研究所での研究活動と並行して、別の角度からIOWN構想に臨み、その成果を積み上げています。



技術を理解して実装できるからこそ、そこから生まれるアイデアがある

研究開発において大切にされてきたことを聞かせてください。

幸いなことに、私は過去の職場であるネットワーク運用の現場で通用する存在になるための勉強と、自分の好きなことが一致していたのです。私は現場作業が大好きなのですが、現場にはさまざまな装置やシステムが導入されており、これら全般にわたって技術を知らないと通用しません。このような環境下で、コアスキルであるネットワークスキルを維持、向上させながら、グローバルな視点でのトレンド、新しい技術をチェックして試すことを心掛けてきました。

加えて、自らのスキルを可視化することも大切だと考えていて、そのためにCiscoの最上級資格であるCCIEを取得しました。また、昨年はCiscoのグローバルなアワードであるDEVNET CREATORS AWARDを受賞することができ、客観的な指標で自らのスキルを提示することもできました。ネットワークを手掛けるNTT西日本で今まで以上に役立つ存在になるためにも、ネットワークに関するスキルはこれからもどんどん伸ばしていきたいですし、周辺の技術をしっかりと勉強して業務に反映していきたいと常に考えています。

私は現在、技術者、研究開発者、そしてプロジェクトマネージャ等、複合的な立場からNail等の研究開発をしています。技術を理解して実装できるからこそ、そこから生まれるアイデアがあるのです。よりの確で現実に即した研究開発をするうえでは、こうした日々の積み重ねは必須であると自負しています。

ここで強調したいのは、こうした私の姿勢は技術が好きであることが大前提で、勉強も仕事も決して苦ではないば

かりか、好きなことを続けられる環境に恵まれていることです。そのうえで私がどんな仕事をしているか見て、認めてくれる、協力してくれる上司や仲間の存在にはとても感謝しています。

こうした関係性を築くときに、私は日頃から立場に優劣をつけずに対等に上司や仲間と接することを心掛けています。立場を気遣うことは大切ですが、プロジェクトを進める際に本当に大切なことをはじめ、言いたいことを言える関係性を築くことに努めています。

研究開発者とはどのような存在だとお考えですか。また、後進の研究開発者の皆さんに一言お願いいたします。

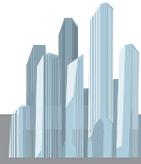
研究開発者は、世の中を便利にしていく技術や手法の「目利き」だと考えます。社会課題の本質を理解し、会社員として企業の利益や立場も併せて検討できる、こういった「目利き」ができれば、それが理想だと思います。NTT西日本の社員は常に時代を意識して、社会的責任や将来を見据えて仕事をしています。このような姿勢を携えた仲間とともに、社会課題の解決に向けて、NTT西日本の発展をも含めて、技術やサービスの重要性をとらえ、研究開発に従事しているという手ごたえがあります。

一方で、専門分野のトレンドや情報収集をして、新しい技術の組合せを日々考えているものの、実際には時折、社会課題と利益の追求のどちらかに偏ってしまうこともあります。そんなときに、社会課題解決と企業の社会的責任、利益の追求のバランス感覚を改めて見つめ直し、互いにサポートできる仲間がいることがありがたいですね。

最後に、後進の研究開発者の皆さん、誰にも負けない自分だけの尖ったスキルを身に付けてください。広く浅く何でもできる人材は、ネットワーク運用等の現場では確かに重宝されると思います。しかし、広く浅い知識だけでは社会的なイノベーションを起こすことは難しいのです。また、尖ったスキルは自分が仕事をしていて行き詰ったと感じるときにも突破口を見出す助けになります。

研究開発の仕事は、決して時間的にゆとりのある仕事とは言いがたいですが、好きなことであれば自然とそれに向き合い、仕事をしながらスキルを磨き、自らの専門分野を追究していくことができるのではないのでしょうか。

明日のトップランナー



NTTネットワークイノベーションセンタ

小川泰文 特別研究員

ネットワークにイノベーションをもたらす 「仮想化基盤ネットワークソフトウェア技術」

近年のネットワークサービスは多様化が進み、データ通信トラフィックの増大やトラフィック変動の予測・対応が困難になるといった問題が顕在化しています。しかしソフトウェアを仮想化する「仮想化基盤ネットワークソフトウェア技術」をネットワークサービスに適用することで、これらの課題を解決しようとする取り組みが多く通信事業者で検討されています。今回は「仮想化基盤ネットワークソフトウェア技術」について、小川泰文特別研究員にお話を聞きました。

◆PROFILE：2003年大阪大学大学院工学研究科卒業。同年、日本電信電話株式会社に入社。2021年よりNTTネットワークイノベーションセンタに所属。2022年よりNTTネットワークイノベーションセンタ特別研究員。仮想化基盤ネットワークソフトウェア技術の研究開発に従事。OpenInfra Summit 2020, DPDK Summit 2019などの国際会議に多数登壇。OpenStackコミュニティでのプロジェクトリーダーを務める。



ネットワークソフトウェアを仮想化し、 低コストで高性能ネットワークを実現

◆はじめに「仮想化基盤ネットワークソフトウェア技術」とはどのようなものなのでしょうか。

「仮想化基盤ネットワークソフトウェア技術」についてお話しする前に、まずは「仮想化基盤」とはどのようなものであるかを説明します。そもそも「仮想化基盤」とは、仮想化技術を活用することでさまざまな要件に応じて適切なコンピュータリソースを柔軟に割り当てることを可能とするインフラシステム・技術を指します。例えば最近流行りのAI（人工知能）やディープラーニングを動かすには高性能のマシンが必要になり、これを試す場合、個人であればマシンを構成するさまざまなパーツをそろえて自分で組み立てる必要がありますが、仮想マシンを使うことでそのプロセスを簡略化することができます。つまりデータセンタの巨大マシンの一部を自分のためにチューンして占有し、高い性能のマシンを自由に使うことができるということです。このときに求められるセキュリティの機能強化やネットワークの性能強化といったさまざまな要件に対しても、マウスをクリックしメニューを選ぶ程度の簡単な操作で即座に要件を満たすマシンが仮想的にでき上がってしまう、これが「仮想化基盤」の技術概要です。

「仮想化基盤ネットワークソフトウェア技術」はこれをより

ネットワーク機能にフォーカスしたもので、一般的にNFV（Network Function Virtualization）と呼ばれます。大規模なネットワークの中核機能は品質・性能ともに大変要件が厳しいため、従来の技術では非常に高価な専用装置を用いることで実現していました。しかし「仮想化基盤ネットワークソフトウェア技術」では、高価な専用装置を汎用的なサーバとソフトウェアに置き換えることによって、簡単かつ廉価に大規模ネットワークを実現することができます。具体的には既設の汎用サーバ内に専用装置の機能などを実現するソフトウェアを構築することで、物理的な工事不要で専用装置と同等のものを構築できます。これにより、ネットワーク事業者にとって喫緊の課題であったネットワークの開発コストや開発期間を削減し、非常に大きなメリットをもたらすことができます。

◆「仮想化基盤ネットワークソフトウェア技術」を実現するために、どのような取り組みをされているのでしょうか。

仮想マシン自体の設計手法や仮想ネットワークの考え方などの要素技術はすでに確立されているのですが、ソフトウェアの取り組みとして現状は開発途上のものが多く、オープンソースコミュニティなどで積極的に実装が進められているものの、品質や可用性といった実用的なネットワークに求められる要件に関してはまだ十分ではありません。そのため、欧州を中心とした世界各国の通信事業者が参画する標準化団体ETSI（European Telecommunications Standards Institute：欧州電気通信

標準化機構)が規定するNFV標準仕様を、OpenStack Tackerと呼ばれるソフトウェアに実装・提供することで新たな価値を創造するという取り組みを行っています(図1)。

TackerはOpenStackの仮想化基盤ソフトウェアでNFVを実現することを目的とした中核プロジェクトの1つです。私たちはこれをETSI NFV標準仕様に置き換えることにより、世界に先駆けて実用的かつ高品質なネットワーク基盤システムを構築することをめざしています。私が研究を始めたときにはすでにNFVの標準化は行われていたのですが、年々変わる業界や要件に対応するように標準仕様自体も変革を続けています。ETSIのNFVには具体的な標準仕様アップデートのプランがあり、現在はフェーズ1から始まったものがフェーズ4まで来ているという状況です。

具体的な取り組みとしては、私は現在OpenStack TackerプロジェクトにおいてPTL(Project Team Leader)と呼ばれるチームリーダーの役割を担っており、自分自身が書いたソースコードを提供する以外にもプロジェクトの開発方針を決めるための取りまとめや、Tackerのプロモーションに携わる業務を行っています。ほかにもTackerの目標であるETSI NFV仕様への準拠だけではなく、開発の中で見つかった課題をフィードバックするなどの取り組みも行っています。また開発者としての貢献にとどまらず、国内外の通信事業者やベンダなどさまざまな立ち位置のプレイヤーを巻き込むことで、実用化開発の立場からネットワーク仮想化技術自体の進展へ貢献しています。

◆「仮想化基盤ネットワークソフトウェア技術」の研究ではどのような点に苦勞されていますか。

OpenStackでは各プロジェクトが独立して開発を進めていて、PTLはその中でも開発方針決定・ルール策定・コアメンバー推薦などの裁量権を持ち、またプロジェクトの代表としてOpenStack全体の運営にもかかわっているため、その分多くの苦勞があります。例えば私はETSIメンバーにインプットするための要件抽出やフィードバック改善要望の取りまとめなどを行っていますが、NTTが要件として盛り込みたい機能が合った場合にメンバーを納得させ稟議を通さなければいけません。そのための具体的な取り組みとして、コアメンバーと呼ばれる会議において大きな発言権を持つメンバーをNTTや意見交換等を密にしている企業のパートナーから輩出しています。そのほかにもソースコードのパッチ提供、開発者からのパッチ品質向上のためのレビュー貢献、OpenInfra Summitなど国際会議での発表による知見共有や、Project Team Gatheringと呼ばれるOpenStack開発者会議における取りまとめなどを行うことで、さまざまな技術を世に出していきたいと考えています。

また、技術実装や相互接続等の段階において何かトラブルがあった場合には、早急な対応が求められます。OpenStackのような大規模なソフトウェアの開発を行う際には、製品自体の動作を保証するための品質管理として、CI/CD(Continuous Integration/Continuous Delivery: 継続的インテグレーション/

Tackerの概要

1. ETSI NFV標準のVNFパッケージとRestful APIを用いた仮想リソースのライフサイクル管理機能
2. GenericなVNFM(G-VNFM)として、多様なVNFとVIMに接続するための拡張性

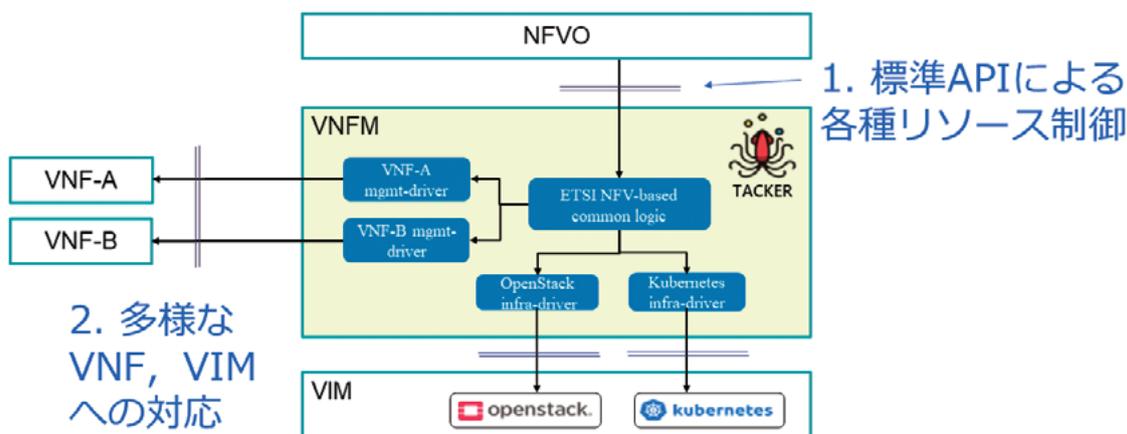


図1 OpenStack Tackerの概要

継続的デリバリー)と呼ばれる手法が用いられ、ソースコードの検証からテストによる動作確認まで多くが自動化されています。しかし実際の開発では、テスト自体の設計不良や長年の開発によるライブラリの互換性崩壊などのトラブルが9割以上の確率で発生します。確かにこれらのトラブルへの対応は一見地味な課題なのですが、この正常性を維持するためには既存のコードで用いられるソフトウェア設計に関する幅広い知見を持ち理解している必要があります。また問題事象が発生した場合にいち早く原因を解析し修正することが必要なため、高度なソフトウェア開発スキルを持つように日々努力しています。OpenStackでは現在も新たな実装が次々と取り込まれていて、膨大なコードベースに対してそれらに追従しつつ品質を保証することが求められるため、とても骨の折れる取り組みですが、その反面非常にチャレンジングな課題でやりがいを感じます。

ねらうはネットワーク事業者にとって希望となるサービスの提供

◆「仮想化基盤ネットワークソフトウェア技術」によりどのような世界が実現されるのでしょうか。

近年のネットワークサービスは多様化が進み、通信ネットワーク事業者においてはデータ通信トラフィックの増大やトラフィック変動の予測・対応が困難といった問題が顕著化してきていま

す。そのため大規模災害発生時等における通信の確保といったような、社会インフラとしての信頼性確保が難しい状況になっています。特にモバイルネットワークにおいては、スマートフォンが日常生活の必須アイテムとなったことで、これらの課題に対して早急な対応が求められています。同様にこれまで電話サービス等を支えてきたいわゆる固定網と呼ばれるネットワークでは、高いコストをかけて開発した専用装置を長期間利用して収益を上げていくことが従来の基本的な考え方でした。しかし現在では、開発期間の短縮化や提供までのスピード化・サービスのライフサイクル短縮が起き、このようなモデルが成り立たなくなってきています。そこで「仮想化基盤ネットワーク技術」をこれらのネットワークサービスに適用し、導入コストやメンテナンスコストを抑えてスピーディかつ柔軟なサービス提供を可能にすることで、諸課題を抜本的に解決し、多くのネットワーク事業者にとって大きな手助けとなると考えています。

またETSI NFV標準仕様に準拠した仮想化基盤システムを提供することで、さまざまな製品との相互運用性が確保されるといったメリットがあります。現在の大規模システムでは、ベンダ特有の接続性を持つ製品が乱立しているという状況があり、そのためVNF検証コストや期間の肥大化が問題となっています。そこで仮想化基盤技術へTackerの標準化実装を行い、相互運用性を保証してベンダの独自性を排除することによって、数十億円規模の検証コスト削減をねらっています(図2)。

OpenStack Tackerのねらい

- VNFMは標準化が不十分な領域であるため、ベンダ特有の接続性があるベンダ製品が乱立しており、調達後のVNF検証コスト肥大化が課題
- キャリア主導でOSS(OpenStack Tacker)を開発し、リファレンス実装としての活用(標準化およびデファクト実装)

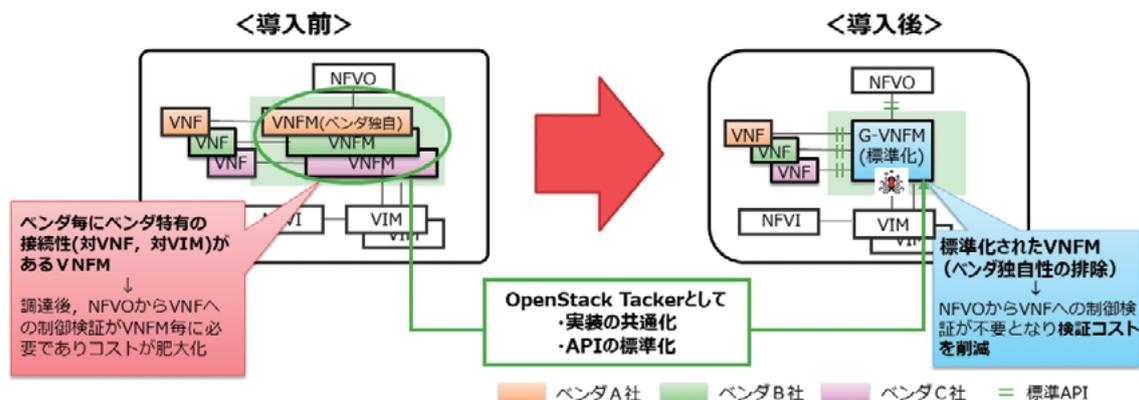


図2 OpenStack Tackerの活用計画と目標

そしてIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想では、ディスアグリゲータッドコンピューティング基盤として多種多様なデバイスを組み合わせることで、サービスの要求を満たしつつ省電力性も両立させる新しいサーバインフラ技術の取り組みがあります。このような低レイヤ領域のソフトウェア技術において、制御される側としてのコンピューティングリソース、特にソフトウェアとして実装される仮想リソースの制御に対してTackerを活用することを考えています。私たちは「仮想化基盤ネットワークソフトウェア技術」を基盤技術として、低レイヤのソフトウェアに位置する技術上にIOWNを特徴付けるセキュリティやデータセントリック基盤などが配置されサービスとして提供される世界を実現しようと日々研究に取り組んでいます。

◆研究開発を進めるうえで大切にされている考え方を教えてください。

私は研究者として常に自分のこだわりや納得感を大事にするように心掛けています。私が取り組むソフトウェア開発は、チームとして各開発にそれぞれ期日が決まっています。そのような環境の中で求められる要件を1つでも多く満たしつつ品質を高めるためには、プロジェクトリーダーという立場としてときに取捨選択が迫られます。私は研究所では一貫してソフトウェア開発に携わっており、ソフトウェアは「苦悩」と「妥協」の産物だと思っていますが、簡単に「妥協」の道を選択するのではなく、どうか実現できる方法がないかを探す「苦悩」の部分を中心に、自分たちの成果をより役に立つものになりたいと考えています。そうすることで多くの方に喜んでいただけるサービスを提供でき、私だけではなくチームメンバーが研究開発で達成感を味わうことができると信じています。

また「次の世代に引き継ぐことができる仕事をする」ということを大事にしています。例えば私が取り組んでいる仕事は、今後私以外の誰かに引き継がれていく可能性もあるため、日々の研

究開発の中で「プログラムのソースコードを整然ときれいに書きつつ、ソフトウェアの設計を継続的に見直し改善する」ということを意識しなければいけません。そうすることで、単に機能として動くようなものをつくるのではなく、誰が見ても理解できて容易に引き継ぐことができるものを積み重ね、現在だけではなく将来の研究開発へバトンをつないでいきたいと考えています。

◆最後に、研究者・学生・ビジネスパートナーの方々へメッセージをお願いします。

私が所属しているNTTネットワークイノベーションセンタは、IOWN構想のもと新たに設立された組織です。その源流には数十年におよぶ数多くのNTTの通信技術研究の歴史の積み重ねがあり、それらの成果をより大きな目標に集約させるための組織だと私は考えています。研究分野としてはコアネットワークからアクセスネットワークまでさまざまな領域を幅広くカバーし、特に実用化フェーズにおけるプロフェッショナルが数多く在籍していると感じます。例えば私の専門であるネットワークサーバソフトウェア分野では、事業会社で利用されているさまざまなアプリケーションの開発に加え、標準化団体やオープンソフトウェアコミュニティなどさまざまな業務に取り組んでいます。各分野のプロフェッショナルが多く、グループ会社を含めてさまざまなコネク션을活用し、意見交換できる環境であることがNTTにおいて研究開発を行う強みであると感じます。またグループ内にとどまらず、国内外の他社やコミュニティにおいてもNTTの影響力は大きく、こちらの提案を積極的に聞いて味方になってくれる人たちも多くいて、グローバルに活躍したい研究者にとって魅力的な場所なのではないかと思います。

私たちのオープンソフトウェアを活用したネットワーク基盤技術開発の取り組みは、実用化開発フェーズの研究開発の中でも非常に実践的なものです。そして将来のネットワーク技術のあり方に関して日々議論し、さまざまな企業や団体を巻き込んでいくため、世の中に大きな影響力のある非常にやりがいのあるものです。ほかにもOpenInfra Summitなどの国際会議では、世界中から著名な開発者が集まる場で活躍するチャンスがありますし、また標準化団体やその他のオープンコミュニティにおいては数多くの企業が協力し、世の中に大きな影響を及ぼすような標準仕様や、デファクト製品を生み出す活動を進めることも可能です。このようにグローバルなコミュニティにおいてソフトウェア開発者として活躍したい方や、さらに将来のネットワークの基盤をつくり出していくようなスケールの大きなテーマに興味のある方は、ぜひ私たちの活動に参加していただけるようお願いしています。



(今回はリモートにてインタビューを実施しました)



睡眠改善No.1企業をめざし、 睡眠改善により社会課題解決に 取り組む

NTT PARAVITAは、センサーからの「睡眠データ」を解析し、睡眠改善により健康で充実した生活の維持をサポートすることをおして、医療費削減や健康経営といった社会課題の解決に取り組む会社だ。ヘルスケアに世の中の注目が集まる中、「睡眠改善」という切り口でこの分野の市場拡大をめざす思いを中野康司社長に伺った。



NTT PARAVITA 中野康司社長

「睡眠データ」の解析・可視化のみならず 具体的アクションにつなげて効果を発揮

◆設立の背景と会社の概要について教えてください。

NTT PARAVITA (PARAVITA) は、ICTを用いた、未病状態の発見に資するデータ提供を行うことにより利用者の健康で充実した生活の維持をサポートする事業の展開を図ることで、社会保障費の削減および地域住民の健康増進といった地域の社会課題の解決への貢献を目的として、2021年7月に、NTT西日本とパラマウントベッド株式会社の合併により設立されました。“そばに”という意味の“PARA”と、“生命、人生、生活”を示すラテン語の“VITA”を社名に掲げ、人に寄り添い、「自分らしく彩りのある人生を」支えていくことをビジョンにする企業です。

NTT西日本のICTを活用した地域の抱える社会課題の解決への取り組みと、医療・介護ベッドおよびマット型睡眠センサーで国内トップシェアを誇るパラマウントベッドの製品・知見との連携により、ICTを活用した未病・早期発見の支援や健康促進のための情報提供を目的としたヘルスケア事業を展開しています。

◆具体的にどのようなサービスを提供しているのでしょうか。

自治体向けサービス、医療・介護事業者向けサービス、健康経営支援サービスの3つのドメインでサービスを提供しています。

自治体向けサービスとしては、自治体からの委託に基づき、最終的なサービス利用者となる地域住民の方に専用の睡眠センサーを配布し睡眠データを取得し、地域住民に自

身の睡眠状況を客観的に把握していただきつつ、得られたデータに基づいて、専門家による睡眠改善に資する生活習慣の改善指導を行う、「ねむりの見守り」サービスを提供しています。

医療・介護事業者向けサービスとしては、訪問介護などの介護事業者や調剤薬局、フィットネス事業者に向けて睡眠センサーと可視化された解析レポートを提供し、エンドユーザへの健康アドバイスや服薬アドバイス等による健康促進を支援する「ねむりの窓口」サービスを提供しています。

健康経営支援サービスとしては、一般企業、福利厚生代行企業等向けに、睡眠センサーと専用のアプリを使い、毎日の睡眠時間と睡眠の質を上げるための日中の活動量（徒歩数）を記録して、生活習慣病予防につなげる参加型のモデル実施ダイエットプログラム「ねむりのジム」サービス、そして、従業員に睡眠センサーを配布し、計測・取得された睡眠データを基に睡眠のパーソナルトレーナーから具体的なアドバイスを行うことで睡眠改善をサポートし、従業員の生産性を高めるとともに、疾病リスクの低下にもつながる健康経営施策「ねむりのあれこれ」サービスを提供しています。

これらのサービスは、収集データやその解析結果といった情報提供にとどまらず、個人の行動変容までサポートするために専門家による指導やそれに関連するアクションにつなげるといったハイブリッドなアプローチで、効果を出しているところが大きな特長です。

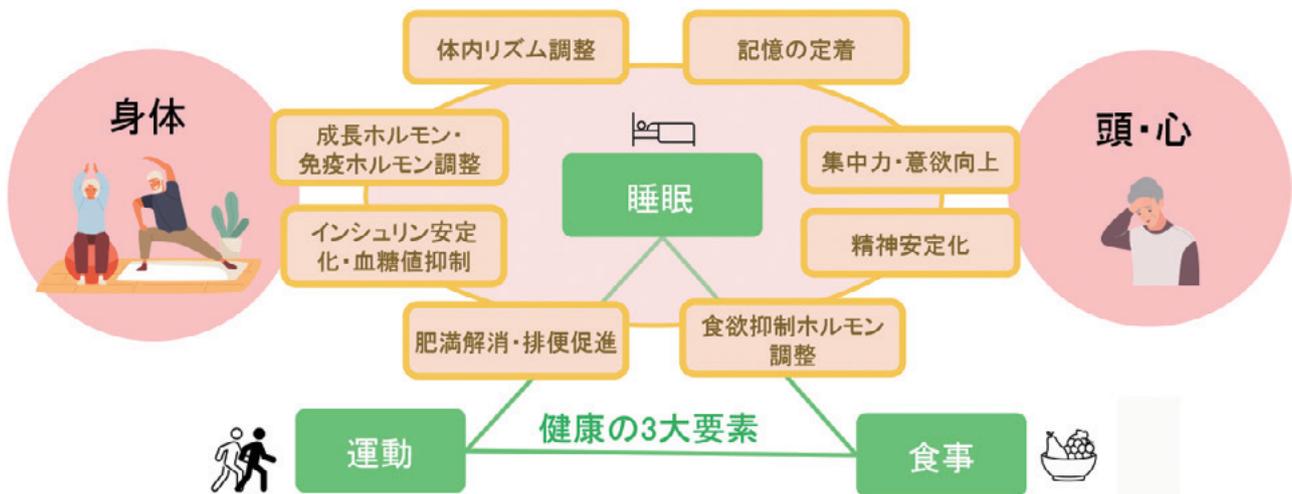


図 健康の3大要素 (NTT PARAVITA提供)

「睡眠データ」活用を出発点に新たな領域への展開をめざして社会課題解決を推進

◆事業を取り巻く環境はどのような状況でしょうか。

昨今の研究成果として、睡眠と健康には密接な関係があることが分かってきました。睡眠に問題があると、①集中力、創造性、論理的思考力、感情制御機能等脳の機能の低下、②肥満リスク上昇やそれと関連する高血圧、Ⅱ型糖尿病、心疾患発症のリスク上昇、③癌、抑うつ症状、認知症のリスク上昇、④免疫力低下といった健康への影響や生産性への影響が出てきます。こうした中、2019年の経済協力開発機構 (OECD) の発表では、日本の睡眠時間は、加盟33カ国平均の8時間27分に対して7時間22分と大差で最下位になっています。これらの結果として日本は医療費削減や生産性向上といった社会課題に直面しています。

一方で、従業員等の健康保持・増進の取り組みが、将来的に収益性等を高める投資であるとの考えの下、健康管理を経営的視点から考え、戦略的に実践する「健康経営」が注目を集めつつありますが、健康の3大要素といわれる「食事」「運動」「睡眠」のうち、「食事」と「運動」がその活動の中心となる傾向が強いのが現状です。また、仮に睡眠に関するデータを収集していてもそれをどのように活用するかというレベルには至っていません。

したがって、睡眠をとおした健康ビジネスや健康の3大要素すべてにわたった健康経営に関する市場が育っていない状況にあります。「睡眠」については、高精度なセンサーも出てきており、簡単で質の良いデータを継続的に収集できるような環境が整っているため、PARAVITAは「睡眠改善」に向けて睡眠の専門家の知識を活用し、新たなビジネスとして市場拡大を図ってまいりたいと考えています (図)。「睡眠」を基軸とした同様な取り組みをしている会社もいくつかありますが、「睡眠」の認知拡大と市場拡大に向けてお互いに協力し合っている、というのが現状です。

◆今後の展望についてお聞かせください。

PARAVITAは、睡眠データを活用したデータ分析を強みとして、それにより気付きを発見し、未病に対する予兆を検知して、予防や受診といったアクションにつなげるということを事業のコアとしています。それをまず、睡眠データの活用というアプローチの中で行っていき、医療費削減、生産性向上と健康経営といった社会課題解決につなげていきたいと考えています。

そのために、「睡眠と健康」に関する認知度向上と市場拡大をめざして邁進するとともに、その過程においては質の良い莫大な量のデータも収集されており、これを解析・活用することで新たな領域への展開も図っていくことを考えています。

「ねむりの窓口」「ねむりのあれこれ」を中心に、お客さまとともにブラッシュアップしてバリューを提供

マーケティング部
新田 一樹 さん



◆担当されている業務について教えてください。

マーケティング部で、サービス開発の責任者として、2021年9月にリリースした「ねむりの窓口」をはじめ、最近では2022年9月にリリースした「ねむりのあれこれ」まで、PARAVITAの提供するほとんどすべてのサービスを開発しています。ビジネスアイデアの段階から、睡眠データ活用に関してお客さまへのヒアリングを行う中で、感触の良かった部分を仮のサービスとして具現化し、お客さまにお使いいただく中でブラッシュアップすることで、サービスとしてリリースしました。当社は小さな会社なので、このブラッシュアップをスピーディかつ柔軟に対応できました。

さて、睡眠と健康の関係は、世の中で少しずつ認知されてきており、マクロ的視点では良い睡眠のための環境を整えていくことに対する理解もできてきています。一方で、健康経営の視点では、先行している「食事」「運動」よりも「睡眠」の優先度を上げる、もしくは新たに「睡眠」を加えるということは、「睡眠」が健康経営のための必須要素ではないこともあり、まだまだ訴求が足りていないと思います。そこで、NTT西日本に採用していただき、多くの社員のデータ活用の効用に関する実績を積み上げ、これを他の企業にアピールしていくことでお客さま拡大を図っています。

◆今後の展望について教えてください。

「睡眠」に関して世の中の認知度をさらに向上させていくような啓蒙活動を行っていく中で、サービス開発の立場からは、プロダクトとしてはまだまだ未完成であると考えており、お客さまへのバリューを最大化する取り組みをしっかりと継続していきます。そのために、お客さまの声を聞いてそれをプロダクトに反映することでブラッシュアップ

していくことに注力していきます。そして、お客さまに対するバリューを訴求していくことで、より多くのお客さまを獲得していくことに貢献できるよう取り組んでいきたいと思っています。

データの収集・蓄積・解析方法を洗練化することでエビデンスとしてのバリューを高める

事業開発部
曾我部 一樹 さん



◆担当されている業務について教えてください。

データ解析のためのAI（人工知能）等、サービスを実現するシステム、お客さまに提供した睡眠センサーのオペレーションやセンサーの在庫管理のためのシステムといったシステム開発と運用を担当しています。サービス開発のカウンターパートとして、サービスを実現するシステム開発・運用を行う立場です。

システム開発・運用を行っていくうえで、意識しているところが3つあります。まず、お客さまの意見・ニーズにフレキシブルに対応していくことです。このために、アジャイル開発を取り入れています。その特長を最大限活用できる体制の構築に取り組んでいます。次に、蓄積された睡眠データはPARAVITAの財産だということです。この財産を中長期的にどのように活用するのかを視野に入れて、それにふさわしいデータの収集・蓄積の方法を検討・実践しています。そして、解析されたデータを可視化し、エビデンスとしてビジネスに活用することです。今後さらに多くのデータが蓄積され、私たちとしてもAIをさらにうまく活用していくことで、このエビデンスのバリューを向上させることができると思います。その先にはデータアナリスト、データサイエンティストの存在も意識していきたいと思っています。

◆今後の展望について教えてください。

まずはお客さまにきちんとバリューを提供できる、それもスピーディにかつコストミニマムにやっていくことをめ

致します。サービス立ち上げ時から、お客さまの意見・ニーズを伺いながらそれをシステムにフィードバックすることで対応してきました。基本的なところはすべてのお客さまに共通なのですが、いわゆる個別最適な部分もあります。今後お客さまが増えてくるに従い、全体最適なシステムにしていくことで、スピーディかつコストミニマムを実現し

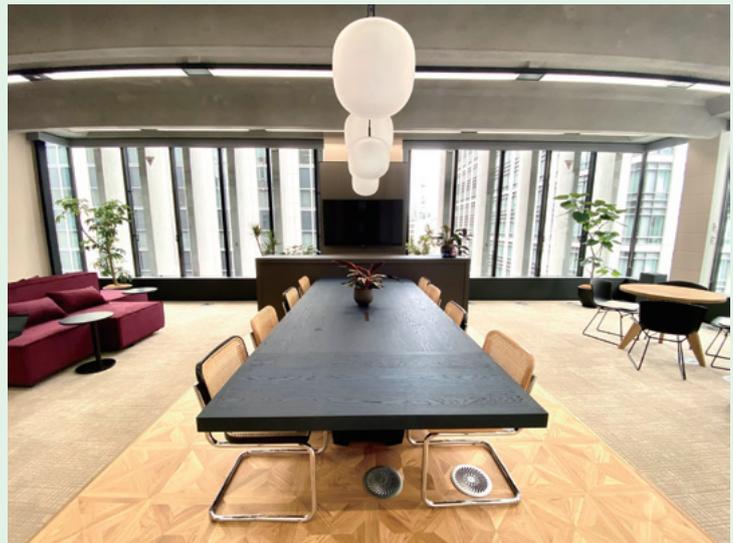
ていきます。

それとともに、データ活用ビジネスとしてさらなる発展をめざしていきたいです。現在は睡眠データがほとんどですが、他のヘルスケアデータを組み合わせたビジネスも考えられます。こういった部分を視野に入れてデータの収集・蓄積方法を検討していきたいと思っています。

NTT PARAVITA ア・ラ・カルト

■「ラウンジ」がオフィス

リモート勤務が標準の会社だそうです。そのため、社員も意外と会社（本社・大阪）からは遠隔地に住んでいるようで、中には名古屋や東京に住んでいる人もいます。オフィスは、会議室やホワイトボード等、最低限のオフィスとしての機能はありますが、あくまでもコミュニケーションを取る場、休憩所というコンセプトでできており、名称も「ラウンジ」で、まさにその名のとおりの雰囲気です（写真）。入社した人は、コミュニケーションや食事の場として、コンセプトどおりに活用しています。リモート勤務標準の会社であるにもかかわらず、最近、リアルで人と会いたいという意向もあり入社する人が多く、ゆったりとくつろげるはずのラウンジが手狭になってきたようですが、「ラウンジ」というコンセプトもあり、最先端のワークスタイルになっています。



写真

■「お散歩しながら会議」で健康増進

健康をテーマとした会社で、行動指針にも「健康第一、生き生きと」というのが掲げられています。その効用もあってか、この会社で働き始めてダイエットを成功させた、前のところで働いたときと別人みたいになった、という人も多くいるそうです。

さらに、ロケーションフリーの勤務であることと、健康を組み合わせ、「お散歩しながら会議」という健康増進施策も行っています。スマートフォンやタブレットを手に、耳にはイヤホンといった姿で川沿い等を散歩しながら会議に参加します。散歩しながらなので、電波状態のよくないところでは反応が遅れてしまうこともあるそうです。川沿いの歩道とはいえ、くれぐれも交通事故には気を付けてください。

新体験，顧客価値の創出に向けたNTT西日本の研究開発における取り組み

NTT西日本は、「『つなぐ』その先に『ひらく』あたらしい世界のトビラを」をパーパスとして掲げており、社会を取り巻く環境変化がもたらすさまざまな課題に対し、技術と知恵をみがき、新たな価値共創によって地域社会のさらなる発展に貢献することをめざしています。ここではNTT西日本の研究開発としてNTTグループ全体で推進しているIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想の早期サービス化や新たな価値創出をめざした取り組みを紹介するとともに、将来サービスの具現化に向けた構想やアーキテクチャ検討の取り組みについても紹介します。

はじめに

NTT西日本は、刻々と変化する社会環境の中で地域が抱える課題に対し、ICTで新たな価値を創造・共創していくことで社会課題の解決、地域活性化に貢献することをめざしています。

しかし、近年の社会課題やお客さまの課題は多様化しており、画一的なサービスや技術だけでは課題を解決することは困難となっています。そのため、それぞれの課題に応じたサービスのカスタマイズが必要であり、さまざまな情報からお客さまの課題を正確に把握し、解決に向けてサービスを最適化することが求められると考えています。

このような変化の中で、日本がめざすこれからの社会の姿として、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムによる経済発展と社

会課題の解決を両立する人間中心の社会としてSociety 5.0が提唱されています。Society 5.0の世界では、ICTやさまざまなデータの活用による新たなサービスの登場や、AI（人工知能）/IoT（Internet of Things）技術がさまざまな生活シーンに取り入れられ、人々のライフスタイルが従来のものから大きく変革し個々にパーソナライズされたサービスによって豊かさを実現していくことと予想されます。このような世界を実現し支えていく技術基盤として、NTTグループではIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想を進めています。IOWN構想は光を中心とした革新的技術を活用した高速大容量通信、膨大な計算リソース等を提供可能な、端末を含むネットワーク・情報処理基盤の構想であり、次の3つの主要技術にて構成されます（図1）。

1番目が、ネットワークから端末まですべてにフォトニ

オールフォトリクス・ネットワーク、コグニティブ・ファウンデーション、デジタルツインコンピューティングの3つの要素と光を中心とした革新的技術によりスマートな社会（Smart World）を実現していく

① オールフォトリクス・ネットワーク（APN）

- ・ネットワークから端末まで光化
- ・圧倒的な低消費電力、大容量・高品質、低遅延を実現（電力効率100倍、伝送容量125倍、エンドエンド遅延1/200）

② デジタルツインコンピューティング（DTC）

- ・モノとヒトのデジタルツインをさまざまに合成することで新たな価値創出
- ・人間の能力限界を超えた膨大なヒト・モノ情報の融合により、未来設計・能力拡張・意思決定を実現し、革新的サービス創出をもたらす

③ コグニティブ・ファウンデーション（CF）

- ・社会システムを下支えするさまざまなICTリソースの配備や構成を最適化し、究極に省力化・自動化するマルチオーケストレーション

図1 IOWNの3つの主要技術

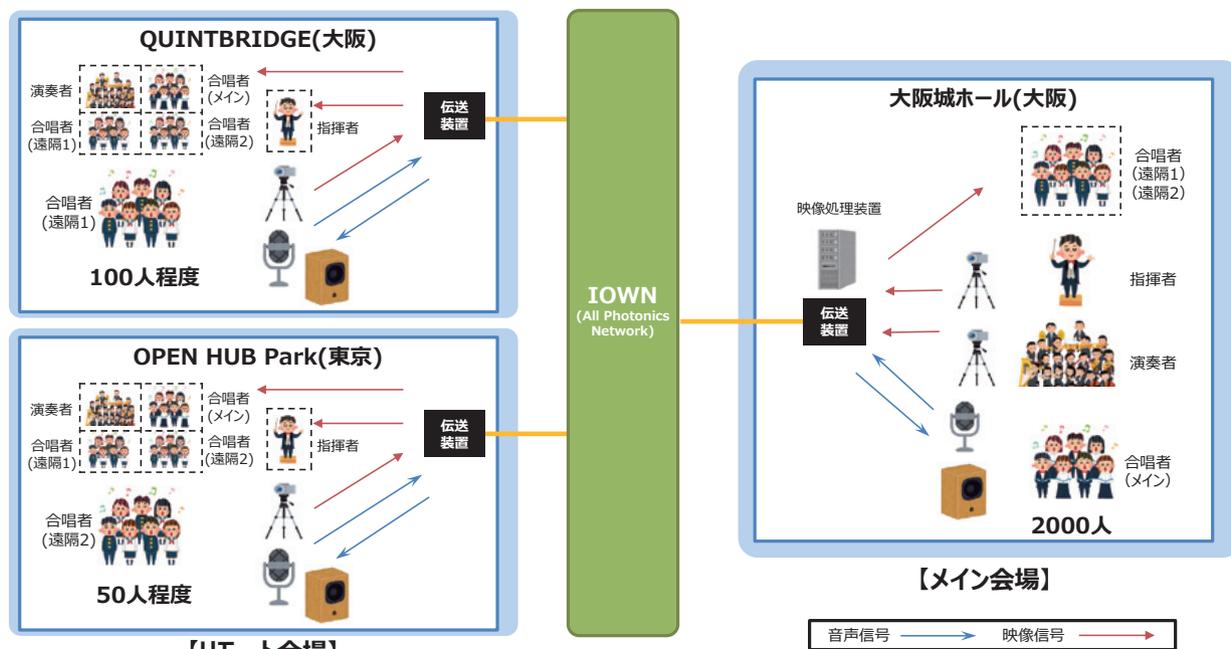


図2 APN関連技術を活用したリアルタイム遠隔合唱実証実験

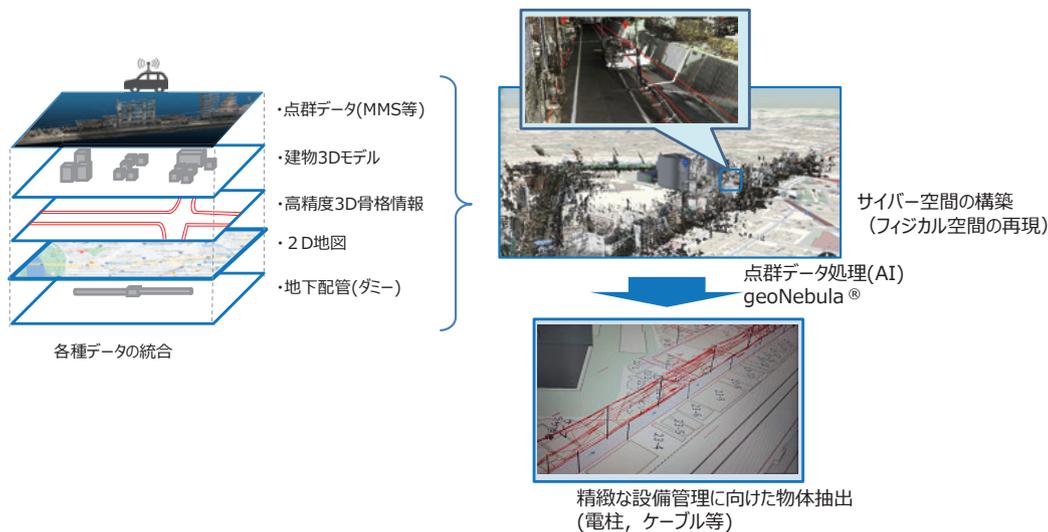
クス（光）ベースの技術を導入し、圧倒的な低消費電力、高品質・大容量、低遅延の伝送の実現をめざすオールフォトニクス・ネットワーク（APN: All-Photonics Network）、2番目が、サイバー空間とフィジカル空間の掛け合わせによる未来予測等の実現をめざすデジタルツインコンピューティング（DTC: Digital Twin Computing）、3番目が、クラウドやエッジをはじめ、ネットワーク、端末等を含めてさまざまなICTリソースをニーズに応じて最適に制御し、オーバレイソリューションの迅速な提供をめざすコグニティブ・ファウンデーション（CF: Cognitive Foundation[®]）です。

NTT西日本では、これらのIOWN技術から早期に具現化された技術（プレIOWN技術）を活用し、サービス化に向けた取り組みを進めています。以降では、現在プレIOWNとして活用可能なAPNの低遅延性を活かし、複数の会場をAPNにて接続し同時に合唱を行う「遠隔合唱」実証の取り組みとDTCの一部である4Dデジタル基盤[®]を活用したインフラ設備の管理等への活用に向けた取り組みについて紹介させていただきます。またこれらに加えて、将来のIOWN技術を見据えたNTT西日本としての将来サービス像の検討の取り組みについて紹介させていただきます。

APN関連技術を活用したリアルタイム遠隔合唱実証実験

ライブ・エンタテインメント分野において、無観客ライブやバーチャルフェスなど、リアルとオンラインの融合を取り入れた新たなイベントのあり方が模索されています。NTTグループは、IOWN APNの関連技術開発により、ユースケースの1つである複数の拠点を接続し1つの空間として体感することができる技術として、ライブ・エンタテインメント分野を含めたさまざまな分野における事例創出をめざしています。

NTT西日本では、大阪城ホールにて、株式会社毎日放送主催、1983年から毎年開催されている合唱コンサート「サントリー1万人の第九」の第40回記念公演において、東京-大阪間をAPN関連技術でつないだリアルタイム遠隔合唱の実証実験を実施しました（図2）。本実証実験では、大阪城ホール、QUINTBRIDGE（大阪・京橋）、さらに光ファイバ長として約700 km離れたOPEN HUB Park（東京）の計3拠点をつなぎ、リアルタイム遠隔合唱を実施しました。指揮者、演奏者（オーケストラ）、合唱者が離れた会場においても、APN関連技術を用いることで、違和感なく合唱ができる遅延量20 ms（7 m程度離れた所からの音声の伝搬遅延量）を目標遅延量として設定し、実現に成功



データ統合によるサイバー空間の構築と、物体の自動抽出

図3 DTCを活用した高精度な設備劣化予測や設備設計のシミュレーション

しました。

今後は、本実証実験により蓄積した知見を基にAPN関連技術の社会実装に向けた研究開発を進めるとともに、新たなユースケースの探索によりIOWN APNの利用シーンの開拓を行っていく予定です。

DTCを活用した高精度な設備劣化予測や設備設計のシミュレーション

4Dデジタル基盤®は、DTCを支え、ヒト・モノ・コトのさまざまなセンシングデータをリアルタイムに収集し、「緯度・経度・高度・時刻」の4次元の情報を高い精度で一致・統合させ、多様な産業基盤とのデータ融合や未来予測を可能とする基盤となっています。

昨今、インフラ分野は急速な高齢化と生産労働力人口の減少が社会課題となっており、省力・効率的なインフラ設備の維持管理の仕組みが必要となっています。NTT西日本ではインフラ分野での適用検討をファーストケースに、4Dデジタル基盤®の要素技術活用に向けた取り組みを行っています。

具体的には2D地図上へ、高精度3D骨格情報*1、建物

3Dモデル、実フィールドをとおして取得した点群データ等を統合させることでリアル空間をデジタル空間に再現、および3次元座標値(X, Y, Z)を持つ点群データの特徴を活かし、精緻な設備管理のためのAI*2による設備自動抽出等に取り組んでいます(図3)。

将来的には、デジタル空間で精緻に管理された設備に対し、サビやヒビなど表面劣化を検知する画像データ、傾きやへこみ等の構造を理解する点群データ、センシングデータ、これら時系列データを組み合わせることにより、高精度な設備劣化予測や設備設計のシミュレーションへの活用を想定しています。

またこの4Dデジタル基盤®については、プレIOWN技術として一部実現可能な技術のため、具体的なユースケースでの活用検討を進めていますが、データ収集におけるコストや大量のデータを組み合わせるための高性能なデータ処理能力が求められることが課題としてみえてきています。サービス化をめざして、これらの課題解決に向けても取り組んでいく予定です。

必要なときに柔軟かつ容易にリソース提供可能なネットワークアーキテクチャの追求

お客さまのネットワークインフラを支えるNTT西日本としては、IOWNの構想や技術を見据えつつ、将来のお客さまニーズについて仮説からバックキャストし、求められ

*1 高精度3D骨格情報：NTTインフラネット社が整備を進める高精度位置を持つ道路縁・マンホール位置基準情報。
 *2 設備管理のためのAI：NTT研究所の点群データ処理技術 (geoNebula®)。

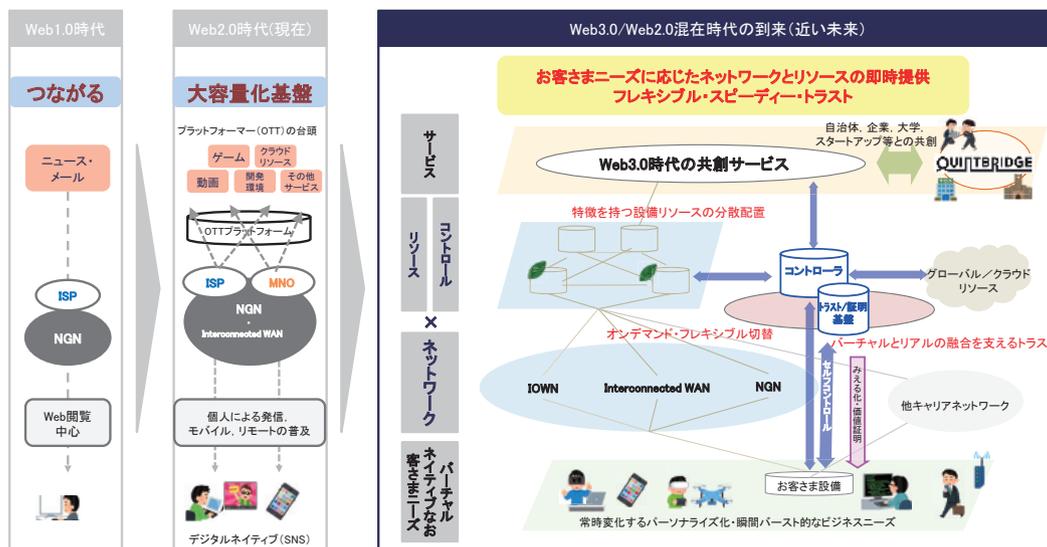


図4 必要となるときに柔軟かつ容易にリソース提供可能なネットワークアーキテクチャの追求

るサービスの検討と実現に向けて必要となる技術やアーキテクチャの検討にも取り組んでいます。この取り組みはIOWNの主要技術であるCF技術の実現・活用につながると考えています。

NTT西日本のネットワークは、インターネットの主流がWeb1.0（ブログや検索サイトにつながる）からWeb2.0（プラットフォームの台頭とモバイル端末の普及による大規模トラフィック化）に変遷するに従い、インターネットをお客さまがより快適につながれるかたちとして接続回線の大容量化へと進化してきています。しかし、今後主流とされるWeb3.0においては、いつ、どこからどこへ、どのぐらいのトラフィックが流れるかは、お客さまのニーズによって決まる時代になると想定しており、計画的、画一的なトラフィックをベースとしながらも、必要となるときに柔軟かつ容易にリソースを提供できるような可変的なモデルが必要とではないかと仮定しています。現時点では、下記に関する研究開発を行っています。

① 選択の自由度が高い（品質の自由度、リソース選択対象の自由度等）サービスをお客さまの希望するタイミングに合わせて提供できる機能

② 多様な端末との接続ニーズにこたえることができるネットワークアーキテクチャや機能

今後さらに、サイバーとフィジカルの融合において求められると考えるトラスト機能（本人性の証明などの信頼情報提供）に関する検討を進めていく予定です（図4）。

これらの機能の多くは、CFにて実現可能と考えていま

すが、早期サービス化をめざすにあたり、IOWN技術を待つのではなく、現在の技術にて実現可能な部分から具現化に向けて取り組んでいく予定です。IOWN技術が確立された際には、さらなる高度なサービスへと進化し、お客さまへの新たな体験の提供と新価値の創造につなげていく予定です。

おわりに

ここではNTT西日本の新価値創造および顧客体験の創出に向けた研究開発の取り組みについて紹介しました。IOWN構想の実現に向けては、2023年3月よりIOWNサービスの第一弾として超低遅延・大容量化を実現するAPNサービスの開始が予定されています。前述した世界の実現にはさらなる大量かつ多様なデータの通信と蓄積・分析・活用等の取り組みが必要であり、それに伴う消費電力の増加が予想されます。今後は多様な人々のWell-being実現に貢献してだけでなく、IOWNのもう1つの大きな特徴である低消費電力技術を活かした革新的なネットワークサービスの実現に向けた研究開発にも取り組んでいきたいと思ひます。

◆問い合わせ先

NTT西日本
技術革新部 技術戦略部門 技術企画担当
TEL 06-6490-0206
E-mail tech-strategy@west.ntt.co.jp