

NTT

ISSN 0915-2318 平成2年3月5日第三種郵便物認可
令和7年3月1日発行 毎月1回1日発行 第37巻第3号(通巻432号)

技術ジャーナル

3 MARCH
2025
Vol.37 No.3

特集

超高速光物理研究の最前線

トップインタビュー

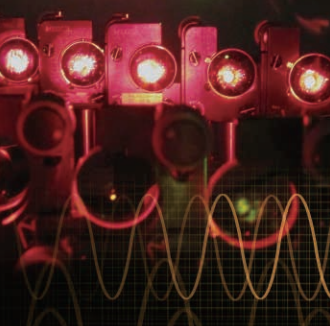
佐々木 裕
NTTデータグループ 代表取締役社長

For the Future

観光地経営の現在地と観光DX—後編—

グループ企業探訪

NTTデータ先端技術



4 トップインタビュー

Trusted by People・Trust in People
相互の信頼関係でチームは機能する

佐々木 裕

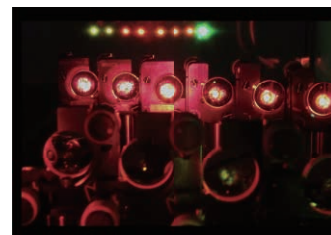
NTTデータグループ 代表取締役社長



8 特集

超高速光物理研究の最前線

- 10 超高速光物理研究の最前線への期待と展望
——ペタヘルツ波をエンジニアリングする
- 14 高輝度アト秒分光に向けた1.7サイクル高強度光パルスのMHz繰返し発生
- 17 固体からのトポロジカル高次高調波発生
- 21 アト秒パルスを用いた固体電子系超高速ダイナミクス計測
- 26 高強度光パルス——固体電子系の実時間量子ダイナミクスシュミレーション
- 30 主役登場 篠原 康 NTT物性科学基礎研究所



31 For the Future

観光地経営の現在地と観光DX ——後編——

38 挑戦する研究者たち

澤田 宏

NTTコミュニケーション科学基礎研究所 上席特別研究員

「相関」と「複素数」を駆使したアルゴリズムで、「音源分離」と「ハードウェア向けのニューラルネットワークの訓練方法」の異なる分野の研究に挑む



特集

42 挑戦する研究開発者たち

西塚 要

NTTコミュニケーションズ エバンジェリスト

DDoS対策のための国際標準「DOTSプロトコル」



For the Future

特別企画

46 明日のトップランナー

佐々木 悠

NTT社会情報研究所 特別研究員

IoT向け軽量共通鍵暗号の標準化と実装保護技術の研究



挑戦する研究者たち

50 グループ企業探訪

株式会社NTTデータ先端技術

人と技術で、まだ見ぬ未来へ—ITの最新技術を駆使し、お客さまの事業革新を実現する



挑戦する研究開発者たち

54 Webサイト オリジナル記事の紹介

4月号予定
編集後記

明日のトップランナー

グループ企業探訪

本誌掲載内容についてのご意見、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/>

NTT技術ジャーナルは
Webで閲覧できます。
<https://journal.ntt.co.jp/>





NTTデータグループ
代表取締役社長

佐々木 裕 Yutaka Sasaki

PROFILE

1990年NTTデータ通信に入社。2016年NTTデータ 執行役員。ビジネスソリューション事業本部長、製造ITイノベーション事業本部長を歴任。2020年常務執行役員。2021年コーポレート統括本部長、2023年NTTデータグループ代表取締役副社長兼、NTTデータ代表取締役社長を経て、2024年6月より現職。



Trusted by People・Trust in People 相互の信頼関係でチームは機能する

豊かで調和のとれた社会づくりをめざし、世界50以上の国と地域でITサービスを提供するNTT DATAは、デジタル技術を活用したビジネス変革、社会課題の解決に向けてさまざまなサービスを提供しています。お客さまとともに未来を見つめる佐々木裕NTTデータグループ 代表取締役社長に、新体制となったNTT DATAのビジネス戦略や新年度を迎えるにあたり抱負を伺いました。

情報技術で、新しい「仕組み」や「価値」を創造し、より豊かで調和のとれた社会の実現に貢献する

NTTデータグループは新しい体制となりましたね。

2023年7月、NTT DATAは戦略的な観点から国内事業会社、海外事業会社、それらを統括する持株会社の3社体制に移行しました。また、2022年10月にNTT Ltd.をNTT DATA Inc.傘下とした事業統合は私たちの歴史において非常に重要なマイルストーン、転換期となり、私たちはスケールの拡大を果たし、グローバルでの競争力を一層強化しました。このような背景の中で、統合後の初めての通期決算である2023年度の決算を2024年5月に発表した後、2024年6月に私はNTTデータグループの社長に就任しました。

私たちはこれまで、グローバルTOP 5をめざして活動していましたが、事業統合により6位となり、アクセンチュア、デロ

イト、PwC、TCSなどの競争相手とともに、ITサービスプロバイダのグローバル市場で競り合う立場に立ち、グローバルTOP 5に手が届くところまできました。これは本当にシンボリックな出来事で、さらに実績あるコンサルティングファームやインド系の企業といったグローバル競争に対してどのように戦うのかが問われると考えています。

現在、私たちはグローバル戦略の策定、グローバルシナジーの創出、ガバナンスの強化を推進し、国内および海外事業会社は、これまで以上に機動的な事業展開を進めています。

また、事業統合により、海外事業の売上が全体の60%を超えるまでに成長し、これにより国内の安定した事業基盤をベースとしながら、より海外でのプレゼンスを高めていきます。そして、日本国内においては継続的な成長を実現し、コンサルティング力とデジタル競争力の強化に確実に取り組むことで、さらなる成長の加速をめざしています。そして、革新的なソリューション

に注力し、お客さまビジネスの成功を共に実現したいと考えています。

さらに、海外においては、これまで以上に幅広く、充実したサービスポートフォリオをそろえることができました。こうした組織能力の拡大とグローバルカバレッジの展開により受注機会も大きく増加しています。今後も、グローバル市場における持続的かつ戦略的な事業拡大に注力したいと考えています。

企業文化をはじめ、国家の成り立ちや言語も違う多様なグループをまとめるのですね。

私たちは、現在、日本国内とグローバルの良質なビジネスの経験に基づく価値観を融合することで、統合されたダイナミックな企業カルチャーを築いています。このユニークなカルチャーは私たちの成功に欠かせないものであり、それを育むことにより、持続的な成長を実現したいと考えています。

これを成し遂げるために、トップとしてはグループの方向性やビジョンが極めて重

要になると考えています。現在、NTTデータグループはグローバルを含め約20万人の社員を擁し、世界50以上の国と地域で事業を展開しています。特にグローバルにおいては、M&Aを通じて多様なバックグラウンドを持ったチームを形成していますから、グループ全体の共通の価値観の醸成が必要だと感じています。特に、NTT Ltd.が提供していた、データセンタやCisco製品のリセール事業などの新たな事業領域が加わりましたから、これまで以上に多様化した事業ポートフォリオを持つことになりました。だからこそ、NTTデータグループを1つにまとめ、全員が同じ方向に向かって進んでいくために、ミッション、ビジョン、バリューを見直す必要があると再認識しています。現在、私たちは2025年度に向けて、グローバル・リーダーたちとディスカッションしながら、英語版を先行して用語の使い方もこだわりを持って、ミッション、ビジョン、バリューを「Our Way」として見直しを進めているところで、5月には日本語版を含めて新たな「Our Way」を発表する予定です。例えば、「Our Way」英語版のミッションにおいては、「Accelerate our clients' success and positively impact society with responsible innovation」という言葉に大きな意味を込めました。具体的には3つ、お客さまの成功を加速させ、社会に対して積極的にインパクトを与え、責任ある技術イノベーションを通じてその成果を実現するという思いを込めています。この中で、“with responsible”という部分は非常に重要で、特にAI（人工知能）技術の進化において、光と影の側面を意識しながら、お客さまだけでなく社会的な責任を持って進んでいく必要があると考えています。

Who・What・Howのフレームワークでビジネスの本質をとらえる

ところで、**全社コンサルティング強化施策を展開している**と伺いました。

私たちは現在、「提言・実装・成果」を軸に成長率と収益性を両立する「質の伴った成長（Quality Growth）」をめざし、コンサルティング力の強化を進めています。提言力を強化するためには社会・顧客課題



からビジネステーマを特定して、コンサルティングやテクノロジーを組み合わせた型紙（課題解決の型）を整備し、顧客へ価値提供するためのケイパビリティ獲得と仕組みの実装が必要です。現在、グループとしてこれを現実のものとしていくために中長期的な視野に立ち、世界最強レベルのシステム構築力・質と量を兼ねそろえるための人材の育成やアセット開発の投資を進め、組織力を養っているところです。

さて、価値提供のためには、コンサルティングによる提言力だけでなく、実現するための実装力の強化も重要です。そのためにはエンジニアリング力の強化も求められます。提案したテクノロジーを顧客の課題に適合するかたちで「パッケージ」し、実際にサービスとして提供できなければ価値をなさないからです。

最近、私が社内でも話していることは、私たちは単に技術を提供する会社ではないということです。NTT DATAの事業戦略において重要なのは、お客さまの課題に応じた解決策を提供することです。これに向けて、私たちはWho・What・Howというフレームワークを使っています。Whoというのはターゲットとなるお客さまやインダストリー、Whatは経営課題、特にCEOやCFOが抱えている経営課題にリーチすることです。ビジネスはややもするとHowから入りがちなのですが、やはりビジネスはWhatから入るべきだと私は考えています。

このフレームワークを社内に浸透させた

いのです。課題を明確にするWhatから入り、How、つまり、その課題に対して最適なソリューションを提供することをめざす。例えば、営業力の強化やサプライチェーンの強靱化といった経営課題に対して、どのテクノロジーを使うかを選ぶのではなく、まずその課題に対してどのようにアプローチするかを考え、最適な解決策を提案するので、このように臨まないとお客さまに提供できる価値は大きくならないし、ひいては私たちの利益にもつながらないのです。そして、Howにはたくさんの引き出しが必要で、どんなパートナーと組むか、どんなテクノロジーを使うかという、技術の目利きも非常に重要となります。

具体的な技術戦略、注目している技術についてお聞かせいただけますか。

私たちがお客さまに価値提供をしてきた歩みを振り返ると、10年前はお客さまの業務の効率化にITを使う時代でした。それが今では経営課題解決にITが使われるようになり、まさにデジタル化からDX（デジタルトランスフォーメーション）への変革が起きています。そのため、お客さまも私たちも、より攻めの姿勢で「仕掛けることができる」時代になりました。本当に面白い時代になりました。この時代の変化によって私たちからさらなるプロアクティブな提案が可能となり、その意味で私たちはより多種多様な人材が必要であると感じています。

こうした中、私たちはグローバルでの技

術戦略を強化するために、EGM (Emerging, Growth, Mainstream) というフレームワークによる技術ポートフォリオを整備し、将来的に重要となる技術に対して準備をしています(図)。量子コンピュータなど、Emergingの分野は、今後10年くらいの間実用化が進むと予測される技術分野です。Growthの分野は3~5年先に普及が進むと予測される分野です。生成AIのようにEmergingからGrowthへ移行してきたものもあります。これらの技術をいかに現場で活用し、お客さまに提供するのかということが、今後の競争力を決定づける重要な要素となります。このため、Early Adopterと呼ばれる先進的なお客さまとともに先進的な技術にチャレンジしています。現在、私たちはグローバルに11のイノベーションセンタを設置して、約200人強のエンジニアがお客さまとともに技術の実証実験や新しいテクノロジーの導入等、次世代の技術を研究開発しています。例えば、ヨーロッパのスカイメディアとの共同研究では、四足歩行のロボットなど先端的な技術の検証をしています。

その中でも、特に着目している技術とし



て生成AIがあります。最近は多くの注目を集め、社会全体に対して大きなインパクトを与えていますね。現在、広く使われているChatGPTのようなパブリックなAIは、個人の生産性向上に役立っていますが、今後は企業の内部でも活用されるケースが増えていくでしょうし、プライベートAIも重要視されるようになって考えています。その点でtsuzumiは、軽量のLLM (Large Language Models) を活用したセキュアなAIです。企業が自社のデータを安全に活用できるように、ごく少数のGPU (Graphics Processing Unit) などを利用してプライベートAIを構築することができますから、企業はパブリックなAIのリスクを避けつつ、独自のAIを活用して競争力を高めることができると考えています。

リーダーはついてきてくれる人がいて初めてリーダーになる

トップのあり方について、これまでの歩みとともにお聞かせいただけますか。

私が入社した1990年は、NTTデータ(当時)が設立されて(1988年)間もないころで、NTT DATAが今日のようなグローバルな会社になるとは想像もつきませんでした。私たちがグローバルビジネスを始めたのは2005年ごろですが、会社設立17年目にして海外での収益が6割、そして海外の従業員が全体の75%となり、一気にグローバルに変容してきました。

この時代の流れにおいて、私はシステム開発のプロジェクトマネージャ等を経験してきましたが、プロジェクトが大きくなればなるほど、プロジェクト全体の状況を共有し、メンバが同じ方向に向かうことの大

切さを実感しました。プロジェクトのメンバが100人であろうと20万人であろうと、その大切さに変わりはありません。何のためにという目的、ゴール、価値観を共有することがポイントとなります。

また、チームのリーダーは後ろについてきてくれる人、フォロワーがいて初めてリーダーになるのです。フォロワーがいなければ組織は機能しません。だからこそ、部下から信頼されることも大切です。自分自身が部下を信頼することもとても重要です。Trusted by People と Trust in People の相互の信頼関係でチームは機能するのだと考えています。

こうした中、NTT DATAのトップとなってもなく1年が経ちますが、これだけ多種多様なカルチャー(文化)を包含する企業において、その多様性をいかに総合力につなげていくかという難しさを、正直なところ感じています。しかし、それは楽しさでもあり、私はそれを非常に楽しいものにとらえています。例えば、毎月、現地に赴いてグローバルのビジネスリーダーたちと直接対話をして、私たちの戦略を正しく理解しているか、自分事としてとらえられているかを確認する時間を設けています。それは、社員にいかにポジティブに仕事をしてもらおうかということが非常に大事だからです。人は人についていくものです。だからこそ、私は直接的なコミュニケーションをととても大切にします。

2025年度に向けて抱負をお聞かせください。また、NTT DATA、およびNTTグループ社員の皆様へメッセージをお願いします。

2025年度もさまざまな仕掛けを考えています。例えばデータセンタに付加価値をつ

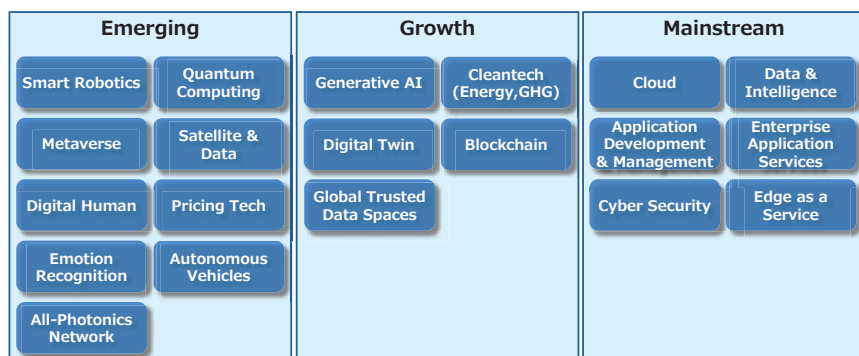


図 EGMによる技術ポートフォリオ



けて、インフラとして高い価値を提供していきたいと考えています。現在、NTTデータグループのデータセンタの保有率は世界3位ですし、ネットワークエンジニアも数多く擁していますし、さらにユニークなサービスを提供できるようになっています。しかも、さまざまなグローバル企業と比較しても、やはり「日本企業」「日本品質」「日本人気質（真面目さ）」はマーケットにおいても非常に価値がありますから、もっとアピールしていきたいと考えています。

ITが活用される範囲は広がってきていますから、その広がりに合わせて私たち、仕掛ける側の発想も広がります。このような

面白い時代を、社員の皆さんが楽しんで働いていただけるような環境をつくるのが私の役割だと思っています。

私自身も若いときから仕掛けるのが好きですし、新しいことにチャレンジすることが大好きです。20万人の社員が一体となってイノベーションを掛け合わせ、大きな仕掛けをしていきたいですね。

また、NTTグループのR&Dは競争の源泉です。知的財産を生み出す能力を社会的価値につなげるのが私たちNTTデータグループの役割であると考えています。だからこそ、良い価値を生み出すプロセスの改善に努めます。IOWN (Innovative

Optical and Wireless Network) をはじめ、NTT研究所の技術には大きな期待を寄せています。スピード感を持った研究開発をしていただきたいと思います。

さらに、私たちはお客さまのsuccessを大切にしています。お客さまに寄り添い、価値を高める事業パートナーになりたいと思っています。ぜひ、ご期待ください。そして、今後、技術がさらにダイナミックに変わる時代において、事業パートナーは不可欠となります。共にITを支えるエコシステムを構築していきましょう。

(インタビュー：外川智恵/撮影：大野真也)

インタビューを終えて

本誌がNTTグループのトップにお話を伺うようになって10年超、すべてのトップに共通しているのは、「前向き」な姿勢かもしれません。そして、前の向き方や表現は実に個性にあふれています。佐々木社長は「性格的に私は後悔をあまりしませんし、過ぎたことを悔やむよりも次のことや最善策を考えたいですね」と、その姿勢を表現されます。ご発言はとても簡切れよく、すべてが前向きで、憂いを全く感じさせません。しかし、それは「憂う」ことのないよう、常に最善策を検討されているからなのだ実感することがありました。数あるご趣味のうち、料理のお話を伺ったときのこ

とです。「揚げ物、よくするんですよ。焼き物だと肉が重なってうまく焼けないことがあったりするけれど、揚げ物ならしっかりと火が通るでしょう?」と、佐々木社長。最良の状態でお料理を提供することをお考えです。さらに、「揚げ物ならば味付けによって変化もつけられる」と、創意工夫も楽しんでおられます。チャレンジや仕掛けが大好きだという佐々木社長。次はあるイベントで制作過程を見て、面白い!と思ったモンブラン(ケーキ)づくりに挑戦するご予定だとか。どんなことも楽しく、面白く、そして、新しいことにつなげる佐々木社長の物事のとらえ方に学ばせていただいたひと時でした。



超高速光物理研究の最前線

NTT物性科学基礎研究所では、光の極限制御技術として、超高速光物理研究を推進してきた。その主要なテーマの1つがアト秒レーザーの発生とそれを用いた超高速光物性の研究である。アト秒レーザーの発生は、2023年ノーベル物理学賞を受賞したテーマであり、タイミングもよいことから、本特集ではNTT物性科学基礎研究所で進めるアト秒レーザー技術とアト秒光物性の研究を軸とした超高速光物理研究の最前線について紹介する。

超高速光物理研究の最前線への期待と展望

——ペタヘルツ波をエンジニアリングする——

10

“アト秒科学”の時代を切り拓いたアト秒パルス発生技術について解説し、NTT物性科学基礎研究所が進めるアト秒パルスレーザー技術と、ペタヘルツ電界-電子系相互作用ダイナミクスに関する超高速光物理研究の概要と展望について紹介する。

高輝度アト秒分光に向けた

1.7サイクル高強度光パルスのMHz繰返し発生

14

現在のアト秒光パルスは光量が乏しく、多様な分光技術への応用において深刻な制約となっていることから、次世代の高輝度アト秒分光技術実現に向けた、高輝度アト秒ドライバ光源の開発について紹介する。

固体からのトポロジカル高次高調波発生

17

極端紫外領域の波長や時間精度の組み合わせにより極限光計測技術が期待されている。高次高調波発生によるトポロジカル光波の生成にかかわる物理現象、およびその背後にある物理法則の世界初の実証について紹介する。

超光速光物理

アト秒光パルス

トポロジカル光波

アト秒時間分解分光

極端非線形光学

アト秒パルスを用いた固体電子系超高速ダイナミクス計測 ——— 21

計測技術を構成する単一パルス光源の発生方法と基本的なアト秒時間分解分光法を解説するとともに、光波電界によって引き起こされる電子応答の実時間計測の成果について紹介する。

高強度光パルス —— 固体電子系の実時間量子ダイナミクスシミュレーション ——— 26

高強度光電場が引き起こす超高速電子ダイナミクスを探求し、トンネル効果による電子の遷移率を評価する方法、および電子間相互作用がトンネル遷移率を増強し、印加電場に応じて増大することが明らかになった結果について紹介する。

主役登場 篠原 康 NTT物性科学基礎研究所 ——— 30

固体電子系の実時間量子ダイナミクスシミュレーションとハイパフォーマンス・コンピューティング



超高速光物理研究の最前線への期待と展望

——ペタヘルツ波をエンジニアリングする

2023年ノーベル物理学賞の対象となったアト秒パルスは、アト秒領域の時間幅を持つ極端紫外光パルス（列）です。アト秒パルスの時間幅は、典型的な光の1周期よりも短く、その時間スケールでは、光はサブペタヘルツ（PHz = 10^{15} Hz）周波数で振動する電界としてとらえ直すことができます。本稿では、“アト秒科学”の時代を切り拓いたアト秒パルス発生技術について解説し、NTT物性科学基礎研究所が進めるアト秒パルスレーザー技術と、ペタヘルツ電界-電子系相互作用ダイナミクスに関する超高速光物理研究の概要と展望について紹介します。

キーワード：#超高速光物理、#アト秒科学、#ペタヘルツ波

おぐり かつや

小栗 克弥

NTT物性科学基礎研究所

光の極限制御技術とペタヘルツ波

NTT事業の中核を占める光ネットワークや光デバイスなど多岐にわたる光通信技術において、私たちは、日常的に“光”を扱っています。そのような中で、私たちは光を特徴付ける単位として“波長〇〇nm”や“光子エネルギー〇〇eV”という表現を用います。一方、高校生のときに学習するように、光は電磁波の一種であり、モバイル通信で用いられる電波や高周波といった電磁波とは波長（もしくはエネルギー）が異なるだけで物理的には同じものです。このような電波は、オシロスコープなどの計測装置を使って、周波数〇〇Hzや、周期〇〇秒の周期的電界として計測が可能で、振動の位相なども制御可能です。例えば、ラジオ放送やモバイル通信帯の電波領域において、私たちは日常的に電波を周波数で表現します。それでは、“光”の場合は、なぜ、周波数や周期といった単位で表現しないのでしょうか？これは、光の振動周波数が電波と比べてあまりに高いためにその周波数を正確に計測・制御することができなかったこと、光の振動周期があまりに短いために計測ができず、振動の位相も制御できなかったという理由に過ぎません。計測も制御もできない対象における特徴的な量を扱うのは不合理であり、そのような量を考える必要がない、というのがこれまでの“光”の常識でした。

しかしながら、21世紀に次々とノーベル物理学賞の対象となった、アト秒（as： 10^{-18} 秒）パルス技術（2023年）⁽¹⁾、光周波数コム^{*1}技術（2005年）、チャープパルス増幅^{*2}技術（2018年）、そして将来のノーベル物理学賞候補の呼び声が高い光格子時計^{*3}技術という4つの革新的光技術により、“光の常識”は変わりつつあります。この革新的光技術により、光の波動としての性質を規定する時間、周波数、位相、振幅というすべてのパラメータを精密に計測・制御することが可能となり（図1）、私たちは、“光”を1周期フェムト秒（fs： 10^{-15} 秒）の周期電界がペタヘルツ（PHz： 10^{15} Hz）周波数で振動する電磁波として認識できるようになりました。光は、いまや、電波の帯域・精度・強度を遥かに凌駕する、いわば“ペタヘルツ（PHz）波”としてとらえ直すことができるようになったといえるでしょう。21世紀は、このペタヘルツ波を自在にエンジニアリングすることによって、これまでの光技術の“常識”の枠を破る新しいフロンティアの可能性が拓けています⁽²⁾。本稿では、特に、光のペタヘルツ電界振動を時間領域でとらえることを可能にした“時間”領域における極限光技術、すなわち、アト秒パルス発生技術、アト秒時間分解能計測技術、そしてアト秒時間スケールの電子ダイナミクスの研究に焦点を絞り、NTT物性科学基礎研究所における超高速光物理研究の取り組みを紹介します。

アト秒パルスとは？

レーザーの発明直後より、超短パルスレーザーの開発が始まり、ナノ秒（ns： 10^{-9} 秒）、ピコ秒（ps： 10^{-12} 秒）、そしてフェムト秒と順調に短パルス化技術が進捗し、物質中の超高速現象の観察に利用されてきました（図2(a)(b)）。1990年代に入り、数フェムト秒のパルス幅でその進展は一時停滞しましたが、2001年にアト秒の壁を突破しました。

*1 光周波数コム：周波数軸上に等間隔に並んだ櫛状（櫛=Comb コム）の周波数スペクトルを持つレーザーであり、時間軸上では等間隔に並んでいるパルス列を発生するレーザーです。光周波数コムの周波数成分を原子時計などに同期させることで、各周波数を精密に安定化させ、光の精密周波数計測や、精密長さ・距離計測、精密分光計測など、さまざまな分野で利用されています。

*2 チャープパルス増幅：パルスレーザーのパルスエネルギーを増幅する際には、増幅によってパルスピーク強度が高くなり過ぎると、その増幅過程自身で増幅物質が損傷してしまうという問題が起こります。それを回避するために、増幅する低パルスエネルギーのパルスを、増幅前にパルス幅を長くする（チャープをつける）ことによって、ピーク強度をあらかじめ十分に低くした状態でパルスレーザーを増幅する方法です。パルスエネルギーを増幅後、再びパルス幅を圧縮して高強度・超短パルスレーザー光をつくり出すことが多くなります。

*3 光格子時計：レーザー光を利用して原子を光の格子に捕らえ、その振動を基に非常に高精度な周波数を発生する装置です。光格子時計は、従来の1億年に1秒程度の誤差のセシウム原子時計に対して数10~100億年で1秒の誤差しかなく、国際標準時の精度向上や、重力の影響を測定する研究など、さまざまな分野での応用が期待されています。

アト秒時間とはどのくらい短い時間スケールか想像できますでしょうか？ 典型的な例としてよく挙げられるのが、水素原子の回りを運動する電子です（図2(c)上）。電子がボーア半径*4で古典的に円運動していると仮定すると、1周期およそ150 asで電子が運動しているとみなすことが可能です。また、私たちのなじみの深い通信波長帯の光の1周期について考えてみましょう。通信波長帯として1.5 μmの波長を仮定しますと、1周期およそ50000 asに対応します。このように、私たちの常識では“瞬間的に起こっている”という現象も、アト秒という時間スケールでとらえ直すと有限の時間スケールで動いていると認識できます。アト秒パルスは、このような物質の“瞬間的な動き”を計測する際に威力を発揮する、アト秒の時間幅（パルス幅）を擁する電磁波パルスのことを指します（図2(c)下）。

計測したい対象物の“動き”よりも十分に短い時間幅を持つアト秒パルスで、その対象物を照射すれば、その時間幅だけ平均化された（ぼやけた）“動き”の一部を撮影できます。そして、次にその時点からわずかに時間をずらしたタイミングで、“動き”をアト秒パルスで撮影します。以下同様に、その“動き”全体にわたって、タイミングを細かく区切ってコマ撮りし、時間の経過にしたがってアト秒パルスで撮影したコマを並べれば、一連の動きを再現する動画ができます。ここで、どれだけ短い時間の“瞬間”を鮮明に計測することができるかは、アト秒パルスの時間幅によって制限されます。それまで、私たちが認識（コマ撮り）できる時間スケールは、1999年に Ahmed Zewail 教授が受賞したノーベル化学賞の対象である化学反応過程の典型的な時間スケールに代表されるようにフェムト秒領域でした。アト秒パルスの発生は、人類が認知できる最短の時間スケールを、それまでのフェムト秒領域から桁違いに向上させたということに直結します。この理由により、2023年のノーベル物理学賞は、“物質中の電子ダイナミクス研究のためのアト秒パルス発生・計測の実験的手法の開発”に貢献した Pierre Agostini 教授、Ferenc Krausz 教授、Anne L’Huillier 教授の3名に授与されました^{(3)~(5)}。

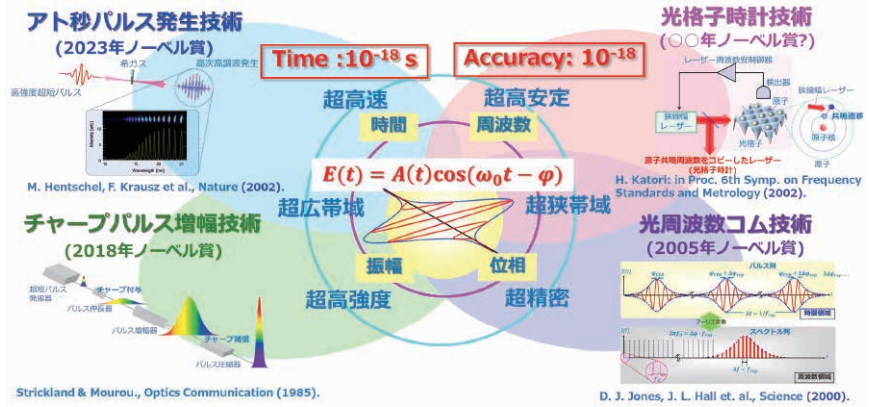
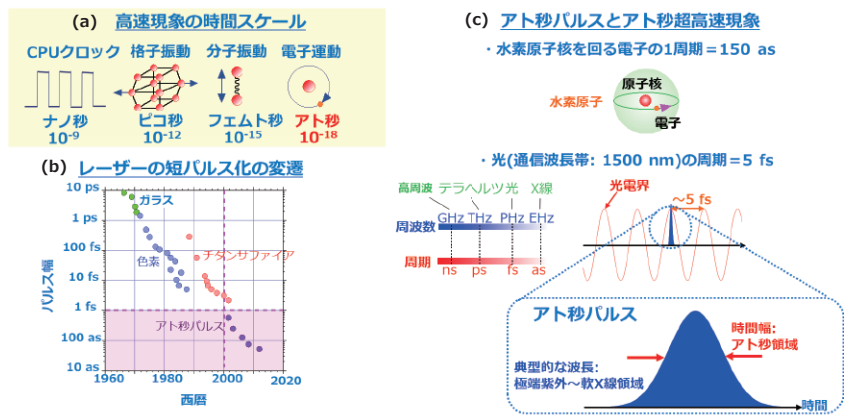


図1 光波を特徴づける時間、周波数、位相、振幅の4つのパラメータを制御することを可能にした光波制御技術



(a) 各時間スケールにおける典型的な超高速現象
 (b) レーザーの短パルス化の変遷。レーザーの発明直後より、パルス化が始まり、短パルス化技術が発展した。
 (c) アト秒パルスとアト秒時間スケールの超高速現象

図2 超高速現象と超短パルスレーザー技術

アト秒パルスの発生方法

アト秒パルスは、高強度超短パルスレーザーから出力される近赤外領域の光パルスを、主に希ガス原子中に集光することによって発生する高次高調波（HHG: High Harmonic Generation）パルスです。高次高調波発生メカニズムは、3ステップモデルという直感的にイメージしやすいモデルで理解されています⁽⁶⁾（図3左下）。まず、ピーク強度およそ 10^{14} W/cm²以上に集光した直線偏光の近赤外高強度・超短光パルスを希ガスに照射すると、光パルスのピーク近傍で振動する光電界がもっとも強くなる（振動の山と谷）タイミングで、希ガス原子の束縛ポテンシャルが強い光電界によって瞬間的に大きく歪み、最外殻の電子がその歪んだポテンシャル障壁をトンネル効果によって束縛から逃れてイオン化します（Step1: 光トンネルイオン化）。次に、

そのトンネルイオン化した電子が、その後続く電界に従って加速運動し、光電界の向きが反転することでイオン化した元の原子の近傍に戻ってくる過程で、光電界から運動エネルギーを獲得します（Step2: エクスカーション）。最後に、ある確率でイオン化した元の原子と再結合し、初期状態に戻ることによって、光電界の加速によって獲得した運動エネルギーと再結合の際に獲得するイオン化エネルギー一分に対応するエネルギーの光を放射します（Step3: 再結合）。この放射される電磁波パルスの波長は、一般的には極端紫外から軟X線の波長領域にあり、これがアト秒パルスに対応します。この一連の過程は、基本波の半周

*4 ボーア半径：ボーアの原子模型において、水素原子の第一軌道半径を表す物理定数です。ボーア半径 a_0 をSI単位のメートルで表した値は、 $a_0 = 5.292 \times 10^{-11}$ m となります。

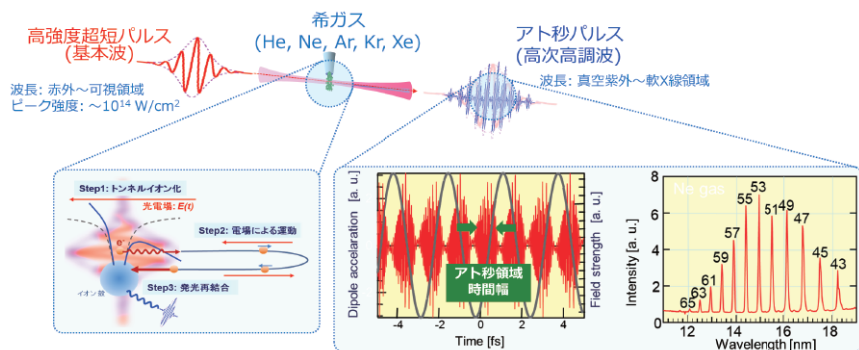


図3 アト秒パルスの発生原理 (3ステップモデル)

期ごとに正確に繰り返されるため、アト秒パルスは、基本波の半周期ごとに放射されるアト秒パルス列となっています (図3真ん中下)。このため、アト秒パルス列を周波数 (波長) 軸上で計測すると、基本波周期の2倍ごとに次数が増加し、奇数次数のみ発生することになります (図3右下)。このスペクトルの分布から分かるように、高次高調波のスペクトル帯域の分布の幅は数eVから数10 eVにわたります。このように極めて広いスペクトル帯域を持つ電磁波パルスがコヒーレントに重ね合わされた場合、そのパルスを時間軸上でみると、フーリエ変換の関係によって、スペクトル帯域の逆数に相当する時間幅のパルスになっており、数eVから数10 eVのスペクトル帯域は、数100 asから数10 asの時間幅に相当します。これがアト秒パルス発生の基本原理です。

以上のように、アト秒パルスは、通常、基本波の高強度超短パルスを構成する光電界が振動した数だけ連なるアト秒パルス列として発生しますが、これをパルス列ではなく、1パルス分だけ発生させることも可能です (単一アト秒パルス)。そのもっとも簡単な方法が、高強度超短パルスのパルス幅をできるだけ短くし、パルスの中で、電界がほぼ1回しか振動しないようなパルス (モノサイクルパルス) を基本波として用いることです。単一アト秒パルスは、次に紹介するアト秒時間分解分光法のプローブ光として利用することが可能です。

アト秒パルスの展開——アト秒科学: 光と物質のアト秒時間スケールダイナミクスの研究

アト秒パルス発生技術のもっとも重要な展開の1つが、前述した極めて高速な現象のアト秒動画技術です。それでは、“極めて高速な現象”とは何でしょうか？ その1つが、光と物質の相互作用におけるアト秒時間スケール動的現象 (ダイナミクス) です。例えば、光検出器などの原理となっている半導体中の電子と光 (可視光や近赤外光など) の相互作用について考えてみます⁷⁾。半導体の教科書に記載されているもっとも素朴な描像としては、半導体に光が照射されると電子系が光子エネルギーを吸収し、価電子エネルギーバンドから伝導エネルギーバンド*5へ量子遷移 (励起) するととらえます。光は、瞬間的にエネルギーを電子系に受け渡す役割を担っているだけで、時間的に高速振動する電界としての振る舞いは考慮されていません。光と相互作用する電子系も事情は同じで、電子は光のエネルギーを受け取り、“瞬間的”に高いエネルギー状態に遷移すると考え、光の振動電界によって引き起こされているはずの電子系の運動は考えません。一方、冒頭で紹介しましたように、光をパタヘルツ波としてとらえ直した場合、光電界で駆動される電子系のアト秒時間スケールの相互作用ダイナミクスそのものが主役に躍り出ます。可視光や近赤外領域の光電界の1周期はおよそ10000 asですが、光電界が1回振動している時間の途中では、電子はどのような状態、運動をとるのでしょうか？ 電子による光の吸収という、光と物質のもっとも基本的な相互作用でさえ、アト秒の時間ス

ケールでとらえ直すと、教科書的な見方では、分からないことがたくさん出てくるのがお分かりいただけたと思います。アト秒動画技術は、このような疑問に対して、実験的にアクセスするもっとも有効な手段といえます。アト秒科学は、このようなアト秒時間分解能の光源・計測・分光技術を創出することや、これらの計測技術を用いたさまざまな物質系におけるアト秒時間スケールの現象を解明する学術分野です。

NTT 物性科学基礎研究所での取り組み

本特集では、NTT 物性科学基礎研究所におけるアト秒パルス技術・アト秒科学の最近の進展に関する4つのトピックスについて取り上げます。詳細は、各記事をご覧ください。なっていただくこととして、ここでは概要を紹介します。

■高輝度アト秒分光に向けた1.7 サイクル高強度光パルスのMHz繰返し発生

1番目の記事では、アト秒パルスを発生させるためのドライバとなる高強度・モノサイクル級パルス光源に関する成果を紹介します。近年、第1世代アト秒パルス発生におけるドライバレーザの主役であったチタンサファイア (Ti:sapphire) レーザ増幅器に代わり、高平均出力・高繰返し発生が可能なイットリビウム (Yb) 系レーザ増幅器の技術が急速に進展し、注目を集めています。Yb系レーザ増幅器の典型的なパルス幅は200 fs以上であり、パルス幅15 fs級が実現可能なチタンサファイアレーザと比較して、その短パルス性には及ばないものの、平均出力が100 W級以上、パルス繰返し数も数MHzまで可変可能です。本記事では、このようなYb系レーザ増幅器とマルチプレートパルス圧縮技術を組み合わせることで、モノサイクル級パルスを発生し、高い平均出力を有する単一アト秒パルス発生が可能なドライバ光源の開発について解説します。

*5 価電子帯 (エネルギーバンド)、伝導帯: 固体結晶は、バンドと呼ばれるエネルギー構造を持っています。価電子帯は、電子を含むもっともエネルギーの高いバンドであり、伝導帯は、電子の存在しないもっとも低いエネルギーバンドです。

■固体におけるトポロジカル高調波発生

NTT 物性科学基礎研究所では、これまで、希ガス原子を媒質としたアト秒パルス（高次高調波）発生の研究に取り組み、高次高調波パルスの短パルス化、短波長化、高出力化などのパラメータの拡大・制御を実現してきました。

2 番目の記事では、固体を媒質として利用し、固体特有の空間的な結晶対称性を利用することによって、高次高調波パルスの空間位相（波面形状）の制御を実現した成果について紹介します。波面形状を制御した光は、トポロジカル光と呼ばれ、トポロジカル高次高調波の発生は、アト秒の時間幅と特異な波面形状を兼ね備えた新たなアト秒パルスの発生と、アト秒パルスの応用領域の拡大・展開が期待されます。本研究では、固体におけるトポロジカル高次高調波発生について、その変換ルールが固体の対称性を反映して決まる汎用的な法則のうえに成り立っていることも明らかにしました。

■アト秒パルスを用いた固体電子系超高速ダイナミクス計測

アト秒パルスを用いたもっとも基本的な時間分解計測系は、超短パルス光と高次高調波パルスを組み合わせたポンプ・プローブ型アト秒時間分解分光です。アト秒時間分解分光法は、2001年の単一アト秒パルス発生の実現の直後から始まり、当初、気体の原子中の電子ダイナミクス計測へ適用されました。2010年代に入ると、固体電子系への適用が本格的に開始され、超短光パルスポンプ・単一アト秒パルスプローブ型吸収分光がスタンダードな手法として用いられてきました。

3 番目の記事では、NTT 物性科学基礎研究所が、アト秒パルス分光計測の第一線をリードしてきた、固体中の光誘起電子系応答の観測や、超高感度フォノン振動計測、時間分解角度分解高電子分光計測など多彩なアト秒時間分解分光手法による固体電子超高速ダイナミクス計測の中から、アト秒時間分解吸収分光法を用いた光誘起非織維系分極振動ダイナミクスの研究について紹介します。

■高強度光パルス——固体電子系の実時間量子ダイナミクスシミュレーション

光をペタヘルツ波ととらえ直すと、光電

界の1周期よりも短いアト秒時間スケールにおける光電界と物質の相互作用が問題となります。

4 番目の記事では、高強度光電界が引き起こす超高速電子ダイナミクスに注目し、高強度光電界が半導体・絶縁体に印加された際のトンネル効果による電子の遷移率を量子ダイナミクスシミュレーションで評価した成果について紹介します。

高強度光電界と半導体電子系の相互作用において、電子・正孔相互作用を含む理論モデルを構築し、電子間相互作用がトンネル遷移確率に影響することを明らかにしました。このような理論・シミュレーションの研究は、従来の光科学で仮定されてきた近似の枠組みを超えたアト秒時間スケールの電子ダイナミクスを理解し、実験結果を解析する強力な方法論になります。

今後の展望

本特集では、NTT 物性科学基礎研究所で進めているアト秒技術・アト秒科学について、理論・実験の両面からの取り組みについて解説します。2023年度のノーベル賞の選考委員長からのコメントでは、アト秒パルスは発生する段階から「利用する」段階へ移ったとの認識が示されました。私たちが進めてきたアト秒パルスによるアト秒時間領域の電子ダイナミクスの研究は、まさにこの認識を先取りしてきた取り組みです。また、私たちの研究は、摂動の範囲内で包絡線近似や回転波近似などを前提としている従来の光物性を超えた枠組みを開拓するものであると同時に、固体電子系への適用により、ペタヘルツ波による電子機能の極限動作スピードを追求するものといえます。電子の運動の自然な時間スケールと同等なパルス幅を持つアト秒パルスの応用は多岐にわたると考えられますが、ペタヘルツ波によるアト秒スケール電子系制御は、その応用へのブレークスルーとなる最重要ターゲットであることは間違いありません。

19世紀後半、英国の写真家エドワード・マイブリッジは、最高の高速写真撮影技術を開発し、馬が疾走する様子のコマ撮り撮影に成功することで、当時話題となった“走る馬の脚は4本同時に離れるか？”という

論争に終止符を打ちました。いつの時代も人々を引き付けてやまない“どのように動いているのか？”を見たいという好奇心は、21世紀の“走る馬”をとらえる研究の原動力になっています。

■参考文献

- (1) <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2023/press-release/>
- (2) 小栗：“ペタヘルツエンジニアリング創出に向けたアト秒光物性～NTT 物性科学基礎研究所における超高速光物理研究～,” 日本物理学会誌, Vol.70, No.12, pp.936-940, 2015.
- (3) M. Ferray, A. L'Huillier, X.F. Li, L.A. Lompre, G. Mainfray, and C. Manus: “Multiple-harmonic conversion of 1064 nm radiation in rare gases,” J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., Vol.21, L31, 1988.
- (4) P. M. Paul, E. S. Toma, P. Breger, G. Mullot, F. Augé, Ph. Balcou, H. G. Muller, and P. Agostini: “Observation of a Train of Attosecond Pulses from High Harmonic Generation,” Science, Vol.292, No.5522, pp.1689-1692, 2001.
- (5) M. Hentschel, R. Kienberger, Ch. Spielmann, G. A. Reider, N. Milosevic, T. Brabec, P. Corkum, U. Heinzmann, M. Drescher, and F. Krausz: “Attosecond metrology,” Nature, Vol.414, pp.509-513, 2001.
- (6) P. B. Corkum and F. Krausz: “Attosecond science,” Nat. Phys., Vol.3, pp.381-387, 2007.
- (7) 小栗・増子・後藤：“半導体の光電場駆動ペタヘルツ電子応答,” 固体物理, Vol.54, No.11, pp.713-725, 2019.



小栗 克弥

光速光物理の研究は、レーザー制御技術の究極を追求する最先端技術研究と、極限レーザー光電界と物質の新しい相互作用物理を開拓する物性研究の2つを両輪とする光の極限をめざす研究です。新しい光技術の“知の泉”を産み出すワクワクする可能性を感じ取っていただければ幸いです。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
フロンティア機能物性研究部
量子光デバイス研究グループ
TEL 046-240-3461
FAX 046-270-2358
E-mail katsuya.oguri@ntt.com



高輝度アト秒分光に向けた1.7サイクル高強度光パルスのMHz繰返し発生

アト秒光パルスは現状人類が持つ最短の光パルスであり、極限的な超高速現象を露わにするための重要な要素技術です。しかし、現在のアト秒光パルスは光量が乏しく、多様な分光技術への応用において深刻な制約となっています。本稿では、次世代の高輝度アト秒分光技術実現に向けた、高輝度アト秒ドライバ光源の開発について紹介します。

キーワード：#超短パルスレーザー、#高強度レーザー、#アト秒光パルス

おかもと たくや ながい こうへい
岡本 拓也 / 永井 恒平
さなだ はるき おぐり かつや
眞田 治樹 / 小栗 克弥

NTT 物性科学基礎研究所

高輝度アト秒分光に向けて

アト秒光パルスの発生に2023年にノーベル物理学賞が与えられたことは記憶に新しいでしょう⁽¹⁾。アト秒光パルスとは、パルス幅がアト秒域（100京分の1秒、 10^{-18} 秒）のパルス光であり、典型的には波長が100 nm以下の極端紫外光領域や軟X線領域の光です。このアト秒光パルスを用いてストロボ撮影することで、アト秒の時間スケールの超高速物理現象を時間分解して観察できることから、物質中の電子ダイナミクス^{(2),(3)}や化学反応過程を研究するうえで重要な要素技術となっています。

このアト秒光パルスの発生原理は、高強度レーザー光（ドライバ光源）を原子に照射することで引き起こされる高次高調波発生というものです。原子内の電子は原子核によるクーロンポテンシャルによって束縛されていますが、そこに高強度光電場が印加されるとクーロンポテンシャルが歪められ、電子がトンネルイオン化します。光電場は交流電場であるため、光電場の半周期後には電子がUターンして元の原子核に戻り、再結合します。この衝突の際にドライバ光源の整数倍の周波数を持つ光（高調波）が放射されます。これが高次高調波発生であり、アト秒パルス発生の原理です。このアト秒光パルスはドライバ光源の半周期ごとに発生するため、1つひとつのアト秒光パルスがアト秒時間精度を持っていても、最終的には基本波のパルス幅に近いアト秒パルスの“束”（アト秒パルス列）が発生してしまい、アト秒の時間精度が得られませ

ん。そのため、アト秒時間分解分光を行うには、アト秒光パルスを単一化する必要があります。その代表的な方法が、ドライバ光源を数サイクル化（典型的には2サイクル以下）し、かつ光電場そのものの形（CEP: Carrier Envelope Phase）をコサイン型に固定することで、アト秒パルスの発生を1回に限定する手法です。これは商用レーザーで発生することができず、非常に高い技術が要求されますが、これまでNTT物性科学基礎研究所は単一アト秒パルス発生の先駆的な研究^{(4),(5)}を行い、世界で初めて固体中でのPHzスケール（数百アト秒）時間振動の観測^{(2),(3)}等の計測応用まで達成してきました⁽⁶⁾。

一方で、アト秒分光においては長らく悩ましい問題があります。それはアト秒光パルスの光量の少なさです。これは、高次高調波発生の変換効率が $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 程度であることに由来します。アト秒光パルスの光量の主な決定要因はドライバ光源であり、これまでkHz繰返し・数W程度の平均出力しかできないチタンサファイア増幅器が用いられてきました。しかしながら近年、イッテルビウム（Yb）増幅器が、半導体レーザー直接励起が可能かつ高い励起量子効率を持つことから、MHz繰返しで100 W級の高平均出力動作が可能な次世代ドライバ光源として注目されています。よって、これまでkHz繰返しであったアト秒光が今後はMHz繰返しで発生可能であると期待でき、アト秒分光技術が劇的に高輝度化できると期待され世界で研究が加速しています。私たちはこの高輝度化によって次世代の新規

アト秒分光技術の開発、ならびに新規アト秒現象の観測をめざしています。

MHz繰返しパルス圧縮

Yb増幅器は高平均出力が可能である一方で、発振遷移帯域幅に起因してパルス幅が数psから数100 fs程度と長く、これを単一アト秒発生に直接応用することはできません。そこで、パルス圧縮技術を適用し数サイクル化を行いました。時間領域で短い光パルスは、周波数領域でのスペクトル成分を同位相に重ね合わせるにより得られます。ここで重要なのは、時間一周波数の不確定性関係により、特定のスペクトル帯域においてすべてのスペクトル位相をそろえた場合でも、それ以上パルス幅を短縮することができない限界が存在する点です（フーリエ限界パルス）。したがって、数サイクル程度の超短パルスレーザー光を得るには、もともとのレーザー光を広帯域化する必要があります。

パルス圧縮における広帯域化には一般的には自己位相変調効果が利用されます。自己位相変調効果とは、光パルス自身が引き起こす非線形屈折率によって光の強度に依存して屈折率が変化し、光パルスの前半部分で周波数が低く、後半部分で周波数が高くなる現象です（図1中央）。これにより“新たな周波数成分”が生じ、スペクトルが広帯域化します。この広帯域化された光パルスのスペクトル位相を周波数ごとに同位相に整えることで、短いパルス化されず（図1右）、この操作をパルス圧縮と呼

びます。

本研究では、80 Wの高平均出力で動作するYb:KGW増幅器（エネルギー：80 μ J、中心波長：1035 nm、パルス幅：184 fs）のレーザ光を1 MHzの繰り返し動作下で数サイクルパルスへと圧縮しました⁷⁾。パルス圧縮器における自己位相変調効果を引き起こす媒質として、非線形効果の強い固体材料を選定しました。具体的には、薄い熔融石英プレートを複数枚重ねて配置し、多段階でスペクトルを広帯域化する手法を採用しました。この圧縮器を2段階で適用することにより、数サイクル化をめざしました（図2）。1段階目の圧縮器を用いて 10^{-3} レベルで960~1100 nmにスペクトルを広帯域化し（図3 (a)）、広帯域化されていない高次モードをアイリスで除去しました。得られたスペクトルは、中心波長1035 nmの成分が減少し、ほぼ左右対称に広帯域化しており、自己位相変調効果の典型的な挙動を示しています。これにより、位相補償は単調な群遅延分散の補償のみで十分であると予測され、 -1600 fs^{-2} の位相補償をチャープミラーで行った結果、49 fsまで圧縮することができました。

圧縮したパルスをさらに再度圧縮し、数サイクルパルスを得ました。最初の圧縮器と同様に、熔融石英プレートを8枚使用し、 10^{-3} レベルで700~1400 nmのオクターブ帯域までスペクトルを広帯域化しました（図3 (a)）。高次モードを空間フィルタリングで除去したあと、 -300 fs^2 のチャープミラーと厚さ2 mmのガラスで位相補償を行い、パルスを圧縮しました。圧縮後のパルスは

フリンジ分解自己相関干渉計で計測し、半値全幅 (FWHM) で11 fsを達成しました（図3 (b)）。波形がsech²の形状であると仮定した場合、このパルス幅は5.8 fsと算出され、元のレーザ光源の中心波長1035 nmに換算すると、1.7サイクルパルスに相当します。これは、MHz繰り返し動作下で世界最短サイクルの高強度パルス光源に位置付けられます。この1.7サイクルパルスをアト秒光

パルス発生に応用可能かを評価しました。アト秒光パルスの発生には、貴ガスをイオン化させるための必要条件として、高強度光を単位面積当りでどれだけ集光できるかが重要な要素となります。したがって、光の空間品質を評価し、その集光性能を計測しました。具体的には光の空間品質を示すM²パラメータを、ISO 11670規格に基づくD4 σ というビーム径で評価しました。取

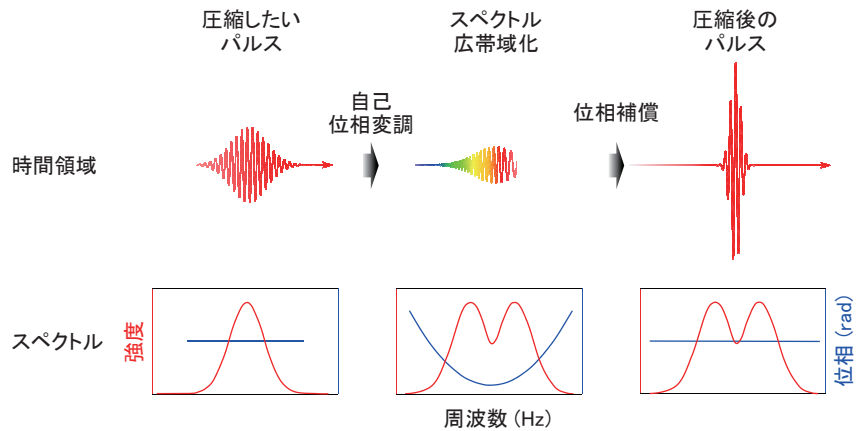


図1 パルス圧縮の概念図

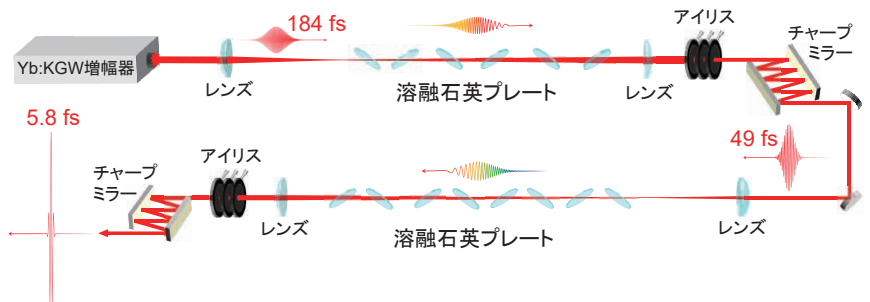
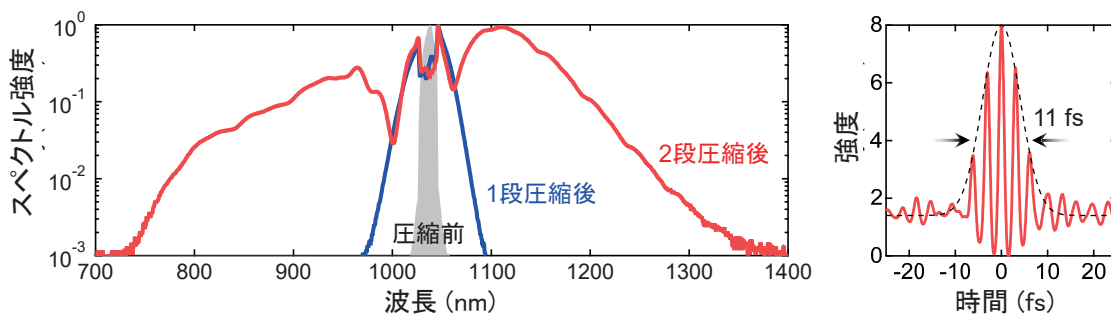


図2 パルス圧縮器の実験図



(a) スペクトル

(b) 圧縮したパルスの自己相関計測結果

図3 圧縮した光パルスの特性

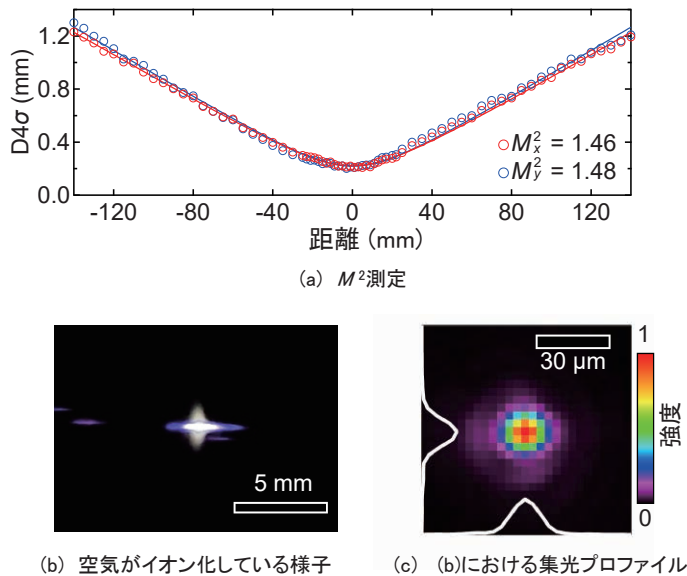


図4 集光性能

差の少ない集光素子を用いて、光を集光した際のD4σの位置依存性を計測したところ、波長が1035 nmという仮定において M^2 は縦横それぞれ1.46および1.48であることが分かりました(図4(a))。これは数サイクルパルス光源として標準的な性能であり、単一アト秒パルス発生に应用可能であると期待できます。そこで実際に、焦点距離10 cmの放物面鏡を用いて1.7サイクルパルスを強く集光したところ、空気中でのプラズマ発光が観測されました(図4(b))。この発光は空気中の主成分である窒素によるもので、アト秒光パルス発生によく使用されるアルゴンと近いイオン化エネルギーを有しています。したがって、アルゴンを用いた単一アト秒パルス発生の可能性を示しています。より定量的に議論するため、ビーム径を計測したところ、 7.1×10^{14} W/cm²まで集光強度があることが分かりました。アルゴンをイオン化するためには 10^{14} W/cm²以上の集光強度が必要であることが知られていることから、アト秒光パルス発生への応用が可能であると結論されます。

まとめと今後の展望

本稿では、単一アト秒光パルスの高輝度化をめざし、Yb増幅器とパルス圧縮技術を組み合わせたMHz繰り返し1.7サイクルドライバ光源の開発に関する成果を紹介しました。今後は、CEPの安定化を進め、前例のない高輝度なMHz繰り返し単一アト秒パルスの発生をめざします。これにより、アト秒時間分解偏光計測やアト秒時間分解顕微鏡といった新たな極限超高速分光技術の創出をめざしていきます。

有益なご意見、ご助言をいただきました National Tsing Hua University の Prof. Ming-Chang Chen に感謝いたします。本研究の一部は、日本学術振興会(JSPS) 科学研究費助成金(20H05670)の支援を受けました。

参考文献

- (1) <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2023/summary/>
- (2) H. Mashiko, K. Oguri, T. Yamaguchi, A. Suda, and H. Gotoh: "Petahertz optical drive with wide-bandgap semiconductor," Nat. Phys., Vol.12, pp.741-745, 2016.
- (3) H. Mashiko, Y. Chisuga, I. Katayama, K. Oguri, H. Masuda, J. Takeda, and H. Gotoh: "Multi-petahertz electron

interference in Cr:Al₂O₃ solid-state material," Nat. commun., Vol.9, No.1468, 2018.

- (4) K. Oguri, H. Mashiko, T. Ogawa, Y. Hanada, H. Nakano, and H. Gotoh: "Sub-50-as isolated extreme ultraviolet continua generated by 1.6-cycle near-infrared pulse combined with double optical gating scheme," Appl. Phys. Lett., Vol.112, No.18, 181105, 2018.
- (5) H. Mashiko, K. Oguri, and T. Sogawa: "Attosecond pulse generation in carbon K-edge region (284 eV) with sub-250 μJ driving laser using generalized double optical gating method," Appl. Phys. Lett., Vol.102, No.17, 171111, 2013.
- (6) 小栗: "超高速光物理研究の最前線への期待と展望——ペタヘルツ波をエンジニアリングする" NTT技術ジャーナル, Vol.37, No.3, pp.10-13, 2025.
- (7) T. Okamoto, Y. Kunihashi, Y. Shinohara, H. Sanada, M.C. Chen, and K. Oguri: "Operation at 1 MHz of 1.7-cycle multiple plate compression at 35-W average output power," Opt. Lett., Vol.48, No.10, pp.2579-2582, 2023.



(左から) 岡本 拓也/ 永井 恒平/
真田 治樹/ 小栗 克弥

光が持つ振幅、時間、位相、周波数といった極限の特性に魅了されながら研究しています。アト秒分光のような極限計測技術は、性能限界がなく常に新たな技術革新が生まれ、未踏の領域に挑戦し続けられる点が何よりの魅力です。皆様が心躍るような極限科学・技術を創出すべく、邁進していきます。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
フロンティア機能物性研究部
量子光デバイス研究グループ
TEL 046-240-3266
E-mail tky.okamoto@ntt.com

固体からのトポロジカル高次高調波発生

トポロジカル光波はレーザー光のビーム断面方向に特異な幾何学空間形状を持った光であり、既存技術によって赤外から可視光領域では光通信をはじめとして分光、レーザー加工、光ピンセット（光操作）など多様な応用が期待されています。このような特異な光を高次高調波発生によりつくり出すことで、これまでにない極端紫外領域の波長やアト秒といった時間精度と組み合わせた極限光計測技術が可能になると期待できます。本稿では、高次高調波発生によるトポロジカル光波の生成にかかわる物理現象、およびその背後にある物理法則の世界初の実証について解説します。

キーワード：#トポロジカル光波、#高次高調波発生、#超短パルスレーザー

ながい こうへい^{†1} / おかもと たくや^{†1}
 永井 恒平 / 岡本 拓也
 しのほら やすし^{†1,2} / さなだ はるき^{†1}
 篠原 康 / 眞田 治樹
 おぐり かつや^{†1}
 小栗 克弥^{†1}
 NTT 物性科学基礎研究所^{†1}
 NTT 理論量子情報研究センター^{†2}

光のトポロジカルな波面の制御を高次高調波で実現する

レーザー光の持つ色（波長・周波数）、強度、位相、偏光、波面形状といった重要なパラメータの制御は、光通信をはじめとして科学、産業、医療の非常に広い分野への応用を生んできました。近年は強いレーザー光を照射した際の物質の光応答の研究が進み、レーザー加工や波長変換の技術につながっています。波長変換は目的に応じた波長のレーザー光をつくり出すために重要な技術です。NTT 物性科学基礎研究所（物性研）で研究を行っている「高次高調波発生」は波長変換現象の一種です。高次高調波発生は高強度フェムト秒レーザー光^{*1}を媒質に照射することによって、2次、3次といったよく行われている光高調波変換のみならずさらに高い次数（整数倍の周波数）まで高調波が発生する過程です。2023年にノーベル賞を受賞したアト秒光パルス発生⁽¹⁾の原理にもなっています。

ノーベル賞を受賞した技術といえども、まだその周辺技術は発展途上の段階にあります。物性研では高次高調波発生の研究に

長年取り組み、これまで高調波の短パルス化、短波長化、高出力化により、光の周波数、強度、位相といった光の基礎的なパラメータの制御を実現してきましたが、さらに残りの重要な光のパラメータである偏光や波面形状を制御することで高次高調波のすべてのパラメータの制御をめざしています。

物性研ではレーザー光の偏光や波面形状を特徴付ける方法として、それぞれ円偏光や光渦と呼ばれる光の状態に着目しました（図1）。円偏光は偏光の回転方向の自由度として左右の2種類（ヘリシティs = -1または+1）を持ち、偏光状態を記述するベースとなる量です。一方で、光のトポロジカルチャージは空間モードを記述するためのベースとなる量で光の軌道角運動量（OAM: Orbital Angular Momentum）とも呼ばれます。通常のレーザー光は波面形状が平坦でガウシアンビーム^{*2}とも呼ばれる状態ですが、螺旋状の波面を持った光もビームとして直進することが知られています。このビームは中心に位相特異点を持つことからトポロジカル光波と呼ばれます。螺旋の回転数や回転の向きを決めているのがト

ポロジカルチャージという量であり、無限通りの整数の値（l = … -2, -1, 0, 1, 2, …）をとります。これまで、可視や赤外光、電波などの領域においてこの波面をつくり出すことで、例えば光通信の多重化、顕微分光、微小物質の光ピンセット（光操作）、レーザー加工などさまざまな応用が期待されています^{(2)~(5)}。高次高調波においてこのような波面形状の制御が可能ならば、高次高調波発生がレーザーでは直接発生することが難しい真空、極端紫外領域にわたる広い波長領域の光まで同時に波長変換によって発生できるため、例えばナノメートルスケール顕微分光や露光などの極限計測、加工技術等への応用を可能にすると期待できます。

高次高調波発生で到達できる極端紫外領域の光の制御は、波長の短さに起因して対応する光学部品の作成が困難なことから難しい課題です。1つのアプローチが高次高調波として発生した後の光を制御するのではなく、もともと光の偏光や波面が制御された光を高調波として発生する方法です。

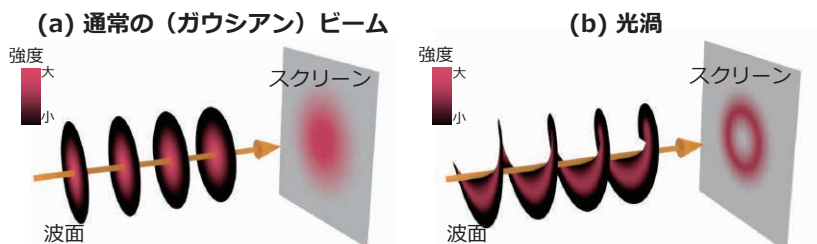


図1 波面とスクリーンに当たった際のビーム断面の強度分布

*1 高強度フェムト秒レーザー光：レーザー光が定常的でなく時間的にパルス状に光るもので、光っている持続時間がフェムト秒（1000兆分の1）単位の時間であるレーザー光。2018年にノーベル物理学賞を受賞したチャープパルス増幅法の発明により、卓上のレーザーを用いて高次高調波発生に必要なレーザー光のピーク強度である $1 \text{ cm}^2 \text{ 当り } 10^{14} \text{ W}$ 程度が達成できるようになりました。

*2 ガウシアンビーム：波面形状が平面状であり（光渦でない）、ビームの中心から外側に向かって強度が徐々に（ガウス関数に従って）小さくなる断面構造を持つビームが通常のレーザービームであり、ガウシアンビームと呼ばれます。

しかし、高次高調波発生においてレーザ光の偏光、波面形状がどのように変換されるのかということについて、その過程の物理的な難しさもあって統一的な指針となる理解はなく、それらの制御が課題でした。

これに対して私たちは、固体結晶の対称性^{*3}をうまく利用して円偏光から光渦を作成することで、高次高調波発生で変換される偏光と波面形状の同時制御に成功しました⁽⁶⁾ (図2)。そして、それらの変換ルールが固体の対称性を反映して決まる汎用的な法則のうえに成り立っていることを明らかにしました。今回見出した法則は、固体結晶を用いてレーザ光の波長を変換するときのような偏光や波面形状の特徴を持つ光が発生するのかを決められる汎用的な法則であり、基礎的な光技術の発展に重要な発見です。

対称性を利用した固体高次高調波発生技術

波長変換によって発生する光を望みの特徴を持った偏光や波面形状に制御したい場合、「対称性」に注目することが良い手段です。対称性とは、ある物理的な系に特定の変換を行ってもその性質や形状が変わらないことを指します。特にレーザ光をかたちづくっている電磁波と固体結晶の時間・空間的な特徴を特徴付ける「動的対称性^{*4}」に着目すると、波長の変換前後で偏光や波面形状の規則性を保ったまま高調波発生を行うことが可能です。これにより自

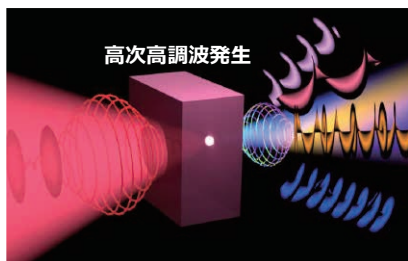
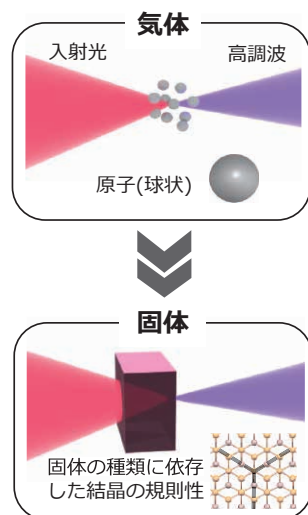


図2 円偏光の光を固体に照射した際に光渦が高次高調波として発生する様子

由自在な制御とはいかなくとも、“素性の良い”光の状態である円偏光や光渦の状態を選択的に発生させるといった制御が可能になります。

2次や3次よりさらに高次の高調波発生を起こすために従来主要な媒質として利用されてきたのが気体です。ただし、気体中では球状の原子がばらばらの状態で空間に浮かんでいるだけであり、気体の種類を変えても高調波の偏光や波面形状を定性的に変化させるような制御は不可能でした。これに対して近年注目を集めている固体結晶を用いることで、固体中の規則的な原子配列に起因する対称性を利用した光の制御を行いました (図3)。それぞれの固体が持つ分類された規則性は、単純な法則で決まる“素性の良い”光の状態を選択的に作り出すことを可能にします。これまで固体の対称性の利用の範囲は偏光に対してのみにとどまっていた。例えば円偏光の基本波を固体結晶に照射すると、結晶が対称性を持っていた場合には2次、3次、4次など各次数の高調波で左周り、右回りの円偏光が次数ごとに選択的に放出されることが知られており、それが結晶の回転対称性に起因することが分かっていました⁽⁷⁾。今



気体と固体では形状の規則性(対称性)が異なる
図3 高次高調波発生における媒質の違い

回の研究では、これを偏光だけでなく波面形状の自由度まで適用できる原理を発見しました。

円偏光との相互変換によるトポロジカル光波発生

固体高次高調波発生において比較的制御が簡単な円偏光だけでなく、光渦状態まで同時制御できる光学実験系を考案しました。円偏光のガウシアンビームを厚い一軸性結晶^{*5}に短い焦点距離のレンズで集光(タイトフォーカス)すると光渦の光成分を発生し、特殊な偏光状態の空間分布を物質内で実現できることに着目しました (図4)。この光渦成分の発生はタイトフォーカスによって結晶の厚み方向に対して斜め入射するビームの成分が複屈折^{*6}を起こすことに起因します。これにより通常は特殊な光学素子を必要とする光渦の生成を簡便に行いつつ、同じ固体結晶中で高次高調波発生を起こすことができます。ここで重要なのは結果としてできる電磁場のプロファイルが良い対称性を持つことです。特に偏光、波

*3 対称性：ある物理的または数学的な系が特定の変換を行ってもその性質や形状が変わらないことを指します。これは、自然界の法則や物理現象において非常に重要な概念です。例えば、図形を60度、90度、120度、180度など回転させても同じかたちに見える場合、その図形は回転対称性を持つといえます。

*4 動的対称性：非常に強い光を物質に照射した際に有用な考え方です。強い光が照射されると物質は元の状態から大きく変化し、光と物質が渾然一体となった状態を形成します。その際に、物質に対して光の電磁波が時間周期的な外力として働くため、光が持つ時間周期性と光、物質の両方が持つ空間対称性を同時に含んだ対称性である動的対称性が物質の光応答を決めます。

*5 1軸性結晶：1軸方向にだけ異なる光の屈折率を持つ結晶。その1軸方向を光学軸と呼びます。

*6 複屈折：屈折率が光の進行方向に垂直な2方向の間で異なることで光の2つの偏光間で光の進む速さおよび進む向きが物質内で異なること。今回の実験において光学軸は結晶の厚み方向に向いており、結晶の厚み方向とそれと垂直な面内方向の間で複屈折が起こります。

面形状と固体結晶を合わせた対称性が存在することによって、発生する高調波の偏光と波面形状の同時制御を実現し、偏光、波面形状と次数の関係性を決める単純な変換法則（等式）を導くことができます。

固体の対称性を用いたトポロジカル高次高調波発生と光の変換法則

固体の対称性によるトポロジカル高次高調波の制御を実験的に実証し、光の変換法則の検証を世界で初めて行いました。高次高調波発生で変換されるさまざまな波長の光の円偏光や光渦の状態の制御が実現していることを観測により明らかにしました。波長2500 nmの強い赤外フェムト秒レーザー光の円偏光ガウシアンビームを発生し、1軸性結晶である2 mm厚のセレン化ガリウム (GaSe) 結晶に6 mmの焦点距離のレンズを用いて集光することで高次高調波発生を起こしました (図5)。集光したレーザー光の周波数の何倍も高い周波数に対応する、赤や橙や青の光を偏光成分ごとに分解した後、発生した光をカメラで撮影することで高調波のビームの空間形状を確認しました。その結果、赤、橙、青などのさまざまな波長の高調波が得られ、その波長、偏光成分に依存したビームの空間形状が観測されました (図6)。タイトフォーカスをするとき、しないときを比較すると固体結晶と相互作用する赤外光の偏光の空間分布に違いがあるために、現れる高調波の空間形状が大きく異なります。タイトフォーカスしない際には次数と偏光に対する従来から知られた法則に従って高調波が発生しており、そこには通常のガウシアン状のビームの断面形状しか現れません。一方でタイトフォーカスした際にはドーナツ状や風車状のビームの断面形状が観測されました。ドーナツ状 (3次) は1つの光渦の状態、風車状 (4次) は異なる複数の光渦が同時に発生していることを示しています。これらの観測結果はタイトフォーカスによって、

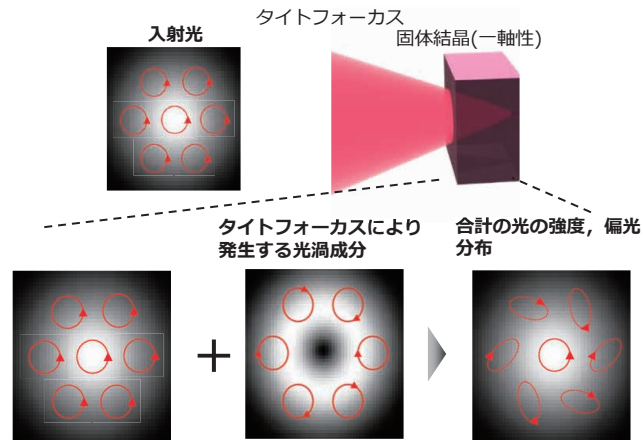


図4 固体結晶にタイトフォーカス（焦点距離の短いレンズで集光）された光がつくる偏光状態

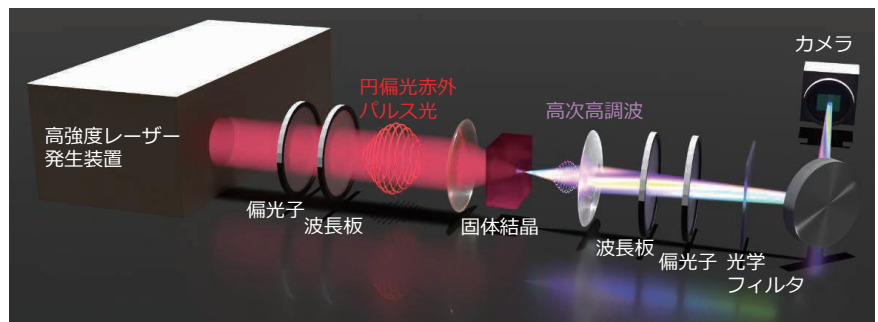


図5 高次高調波発生のための光学実験系

円偏光から光渦への光の成分の変換が起こり、0でないトポロジカルチャージを持った複数の成分の光が現れていることを示しています。今回の実験状況では対称性を考えることで、 $J_m = mJ_1 + nQ$ (m は高調波の次数、 n は結晶の回転対称性を表す指数、 Q は整数、 $J_m = s_m + l_m$ は全角運動量) という非常に単純な数式を導くことができます。これは物理的には光の全角運動量保存則とも呼べるもので、波長変換の前後で光の持っている角運動量^{*7}と呼ばれる物理量が保存することを示します。例えば今回の実験条件においては右回り円偏光 ($s_1 = 1$)、ガウシアンビーム ($l_1 = 0$) を入射光として用い、ビーム断面方向に結晶が3回転対称 ($n = 3$) を持ちます。この条件の下で Q が整数の範囲内で m 次高調波に関して全角運動量の J_m のとることが出来る値

を決められます。すなわち入射光と高調波変換に用いる媒質の対称性によって高調波の円偏光の向き (s_m) とトポロジカルチャージ (l_m) を決めることができます。実際に得られた空間プロファイルはこの法則から予測されるものと完全に一致していることが分かり、円偏光、光渦状態の同時制御の実現が実証されました。この実験においてはGaSeを用いていますが、この結晶を他の固体結晶に置き換えたり入射する光の波面形状を操作したりすれば、数式上の n や J_1

*7 角運動量：物理学において物体または粒子等の回転運動の大きさを示す量。光の円偏光の回転方向は「スピン角運動量（粒子の自転運動を表す量）」、光渦の渦度が「軌道角運動量（粒子の公転運動を表す量）」に対応します。これらを足し合わせた量を全角運動量と呼びます。

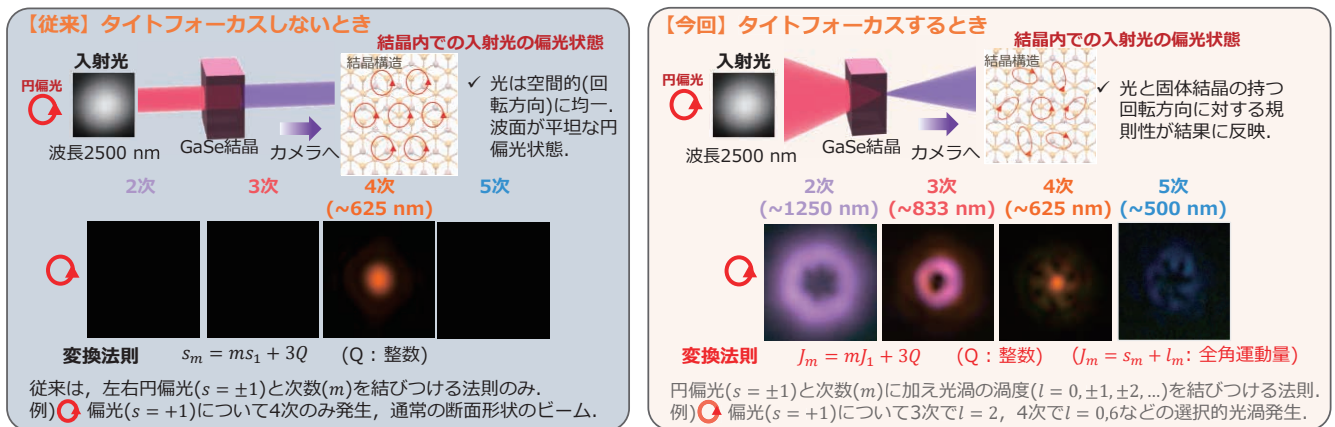


図6 撮影された高調波のビームの空間形状(片方の円偏光状態の成分の高調波のみ示す)と変換法則

の値を変えることで高調波の円偏光の向きやトポロジカルチャージを選択することができます。よって、この法則は高調波の偏光や波面形状を制御するうえでそのベースとなる一般法則を与えている重要なものであるといえます。

まとめと今後の展望

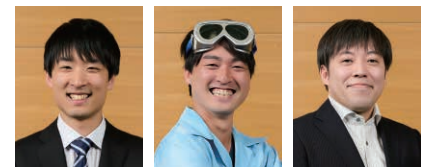
本稿では、高次高調波発生によってトポロジカル光波を発生する試みについて、その根本原理となる法則の世界初実証や関連技術である固体高次高調波発生について紹介しました。対称性から導かれたこの法則の適用範囲は広く、条件さえそろえば世の中のどこでも非線形光学現象が普遍的に従うべきものです。例えばエネルギー保存則も対称性から導かれる法則ですが、これが私たちの生活の奥底で常に働いている重要な原理であることは疑いありません。今回発見した法則は近年発展している強いレーザー光を用いた光の変換過程について、その根底にある一般法則を見つけたものといえます。今後、今回明らかにした法則を高次の紫外線領域の高調波の空間モードの制御にまで適用できれば顕微分光や露光技術など超高速、紫外光領域での新しい計測技術への展開が見込まれます。

本研究の一部は、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費助成金 (20H05670) の支援を受けました。

参考文献

- (1) <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2023/summary/>
- (2) J. Wang, J. -Y. Yang, I. M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, S. Dolinar, M. Tur, and A. E. Willner: "Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing," *Nature Photonics*, Vol.6, pp.488-496, 2012.
- (3) K. I. Willig, S. O. Rizzoli, V. Westphal, R. Jahn, and S. W. Hell: "STED microscopy reveals that synaptotagmin remains clustered after synaptic vesicle exocytosis," *Nature*, Vol.440, No.7086, pp.935-939, 2006.
- (4) M. Padgett and B. Richard: "Tweezers with a twist," *Nature photonics*, Vol.5, pp.343-348, 2011.
- (5) K. Toyoda, K. Miyamoto, N. Aoki, R. Morita, and T. Omatsu: "Using optical vortex to control the chirality of twisted metal nanostructures," *Nano Letters Journal*, Vol.12, No.7, pp.3645-3649, 2012.
- (6) K. Nagai, T. Okamoto, Y. Shinohara, H. Sanada, and K. Oguri: "High-harmonic spin-orbit angular momentum generation in crystalline solids preserving multiscale dynamical symmetry," *Science Advances*, Vol.10, No.31, 2024. doi: 10.1126/sciadv.ado7315
- (7) N. Saito, P. Xia, F. Lu, T. Kanai, J. Itatani, and N. Ishii: "Observation of

selection rules for circularly polarized fields in high-harmonic generation from a crystalline solid," *Optica*, Vol.4, No.11, p.1333, 2017.



(上段左から) 永井 恒平 / 岡本 拓也 / 篠原 康

(下段左から) 眞田 治樹 / 小栗 克弥



超高速光物理の研究では、近年の目覚ましいレーザー技術の発展の下で光のまだ見ぬ利用可能性が明らかになり続けています。そこには物理の原理に立脚してボトムアップで明らかにしていくべき現象が多く残っています。その発展の先にある将来の世の中の可能性を一緒に想像いただければ幸いです。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
 フロンティア機能物性研究部
 量子光デバイス研究グループ
 TEL 046-240-3299
 E-mail kouhei.nagai@ntt.com



アト秒パルスを用いた 固体電子系超高速ダイナミクス計測

単一アト秒パルスをプローブ光としたポンプ・プローブ型アト秒時間分解計測技術は、アト秒パルスの時間幅で超高速現象をとらえることが可能な人類が持つ最速のコマ撮り技術です。本稿では、本計測技術を構成する単一アト秒パルス光源の発生法と、もっとも基本的なアト秒時間分解吸収分光法について解説します。また、本分光法をワイドギャップ半導体に適用し、光波電界によって引き起こされる電子応答の実時間計測の成果について紹介します。

キーワード：#アト秒パルス、#アト秒時間分解分光、#光波-電子系相互作用

光波-電子系相互作用を用いた 電子系ダイナミクスの アト秒制御に向けて

21世紀初頭のアト秒パルスの発生・計測は、“より速いものを見たい・分りたい”という人類の尽きることのない探求心の集大成です。“電子”は、情報処理、化学反応、エネルギー生成、生体反応など現代社会を支えるあらゆるテクノロジーの根本を担う物理系ですが、その運動の自然な時間スケールはアト秒領域にあり、これまであまりに高速のため、人類がアクセスできなかった超高速現象の代表格といえるでしょう。NTT物性科学基礎研究所では、そのような多岐にわたる電子の超高速現象の中でも、特に、光と電子の相互作用によって引き起こされるアト秒時間スケールダイナミクスに着目しています⁽¹⁾。その理由は、光、すなわちペタヘルツ波の制御技術の革新により、私たちは、既存の技術と比較して、電子に対する桁違いの高速制御ノブをすでに手にしている、という点にあります。アト秒時間分解計測技術は、このような光電界に対する電子系応答の超高速ダイナミクスを可視化する技術であり、その手法は、現在2つに大別されます。1つは、“高次高調波分光”と呼ばれる手法であり、高次高調波のエネルギースペクトルを計測し、その特性からその背後にある物質中のアト秒電子ダイナミクスを導き出す手法です。本特集冒頭の『超高速光物理研究の最前線への期待と展望』(以下、記事1と表記)で

紹介した3ステップモデルから分かるように、高次高調波発生は、高強度超短パルスレーザー電界の1サイクル中に引き起こされる電子の運動が起源となっており、その発生過程そのものが物質中の光波電界によって駆動されたアト秒電子ダイナミクスです。気体、液体、固体を問わずさまざまな物質系を対象として、高次高調波を発生させ、計測された高次高調波のスペクトルの各種パラメータ(波長、強度、偏光など)依存性を詳細に解析し、実験結果と理論・シミュレーションを組み合わせることによって、アト秒電子ダイナミクスを推定することができます。もう1つの方法が、高強度超短パルス光と高次高調波によるアト秒パルスを組み合わせた“ポンプ・プローブ型アト秒時間分解分光”です(図1)。本手法は、高強度超短パルス光をポンプ光、単一アト秒パルスをプローブ光とすることが基本形であり、記事1で紹介したアト秒パルスによるコマ撮りの概念に相当します。逆に、単一アト秒パルスをポンプ光、高強度超短パルスをプローブ光とすることも可能であり、また、高強度アト秒パルスをポンプ光・プローブ光とした“アト秒ポンプ・アト秒プローブ分光法”も次のターゲットとして注目されていますが、変換効率が著しく低い現状のアト秒パルス発生技術では極めて難易度の高い手法と認識されています。高次高調波分光法とポンプ・プローブ型アト秒時間分解分光のメリット・デメリットを比較すると、前者の方法は、計測したいサンプルに高強度超短パルスレーザーを照射し、

おぐり かつや

小栗 克弥

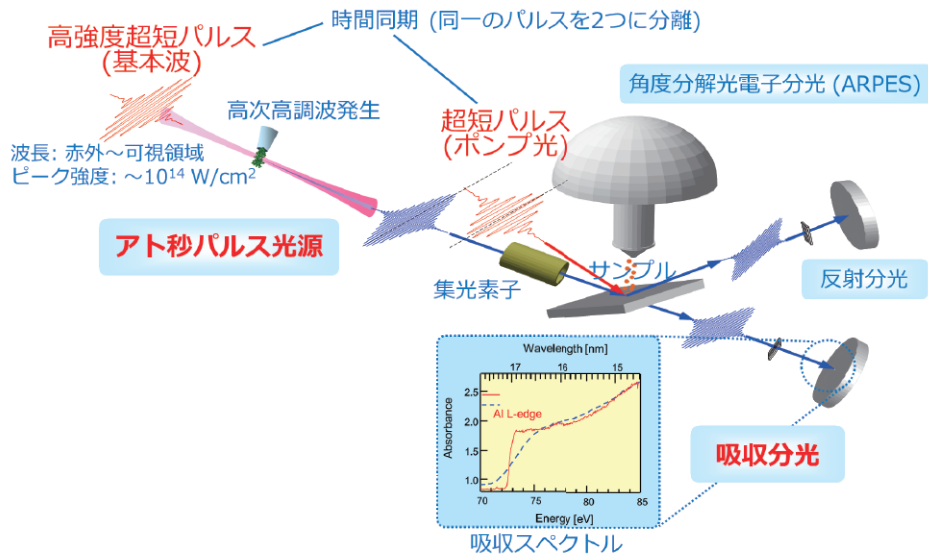
NTT物性科学基礎研究所

発生するアト秒パルスのスペクトルを計測するという点で、技術的には後者と比べてシンプルです。一方、後者は、発生したアト秒パルスをプローブ光として用いて、電子系に対するアト秒パルスの応答を計測するという前者と比べてさらに一段ステップを重ねた技術であるものの、直接的に時間情報の取得が可能で

超短パルスポンプ-アト秒パルス プローブ型アト秒時間分解計測技術

NTT物性科学基礎研究所は、理論・実験共に前述した2つの手法を研究対象としていますが、本稿では、アト秒時間分解計測技術のもっとも典型的な例である高強度超短パルスポンプ-アト秒パルスプローブ型アト秒時間分解分光について紹介します(図1)。

ポンプ・プローブ型アト秒時間分解分光計測技術は、当初、気相の原子系・分子系の電子ダイナミクスを対象として始まりました。気相原子系では、原子の光イオン化過程、内殻励起状態の寿命、光励起状態のコヒーレント制御などのダイナミクス計測に適用されたほか、単純な気相分子系では、分子の光乖離過程や分子内の電荷移動などの計測に適用され、光波-電子系相互作用ダイナミクスの計測手法としての有効性が示されてきました⁽²⁾。固体電子系への適用は、固体からの高次高調波発生を皮切りに、2010年代に本格的に開始され、超短光パルスポンプ・単一アト秒パルスプローブ型吸



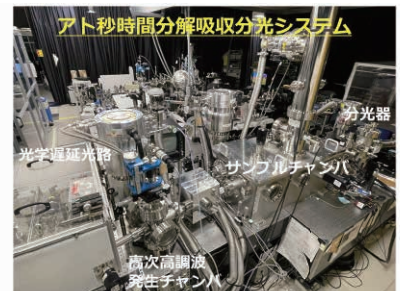
近赤外や可視光波長帯の超短パルスでサンプルを励起し、アト秒パルスでその変化を検出します。アト秒パルスの波長帯に相当する極端紫外から軟X線領域における吸収分光、反射分光、角度分解光電子分光などのさまざまな分光法へ拡張できます。

図1 ポンプ・プローブ型アト秒時間分解分光の基本セットアップ

収分光法が、典型的な手法として用いられています。図1に示すように、その計測システムは、極めてシンプルであり、プローブ光として用いられる単一アト秒パルス光源と、それと時間同期した高強度超短パルスポンプ光、そして、プローブ光の透過スペクトルを取得するための吸収分光系になります。ポンプ光とプローブ光の時間同期を実現するためには、通常1台の高強度超短パルスレーザからの出力パルスをビームスプリッターで分岐し、ポンプ光とプローブ光発生に用いています。ポンプ光とプローブ光は、光学遅延回路により、サンプルに届く相対的なタイミングをアト秒時間精度で制御することが可能です。例えば、10 asの時間精度を実現するためには、光学遅延回路を構成する2つの光路を数nm精度で安定化するとともに、コマ撮りの時間間隔に従って光路長を掃引する必要があります。そのためには、基本的な計測システムの振動対策に加えて、光路長の揺らぎによる効果を相殺するためのポンプ・プローブ光の光路の共通化や、光路長安定化フィードバックなどが必要です。また、アト秒パルスの典型的な波長は、真空紫外域にあり、空気中を伝搬することはできません。したがって、計測システムは、基本的



(a) 高強度フェムト秒レーザ-マルチパルス増幅器



(b) 単一アト秒パルスの発生およびアト秒時間分解分光ビームライン

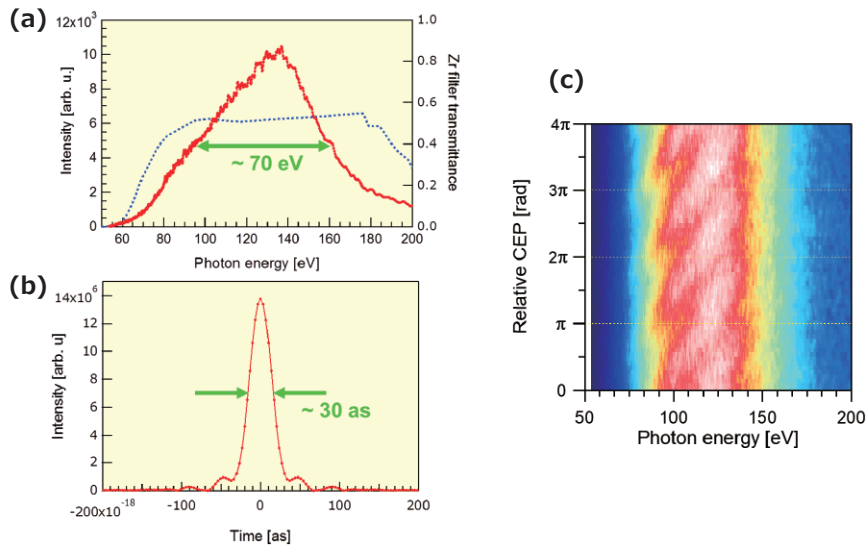
図2 アト秒時間分解計測技術を構成する主要装置

に真空チャンバで構成されます。

NTT 物性科学基礎研究所が構築したアト秒時間分解計測実験ステーションでは、ポンプ光・プローブ光発生の源となる中心波長790 nm、パルスエネルギー3 mJ、パルス幅20 fs、3 kHzヘルツ繰返しの高強度チタンサファイアフェムト秒レーザマルチパルス増幅器を配備しています(図2(a))。各レーザシステムには、キャリアエンベロープ位相(CEP: Carrier-Envelope Phase)*1安定化機構を組み込み、それぞれ中空ファイバ圧縮器により、4~7 fsの数サイクルパルスを発生させることが可能です。その下流側には、単一アト秒パルスの発生およびアト秒時間分解分光の真空チャンバで構成されたビームラインを構築

しています(図2(b))。これらのビームラインでは、本稿で取り上げるアト秒時間分解吸収分光による電子ダイナミクス計測実験だけでなく、アト秒時間分解反射分光、アト秒時間分解光電子分光など新しいタイプのポンプ・プローブ型アト秒時間分解計測技術の研究を進めています。

*1 キャリアエンベロープ位相: 光パルスの包絡線(エンベロープ)のピーク(最大値)に対応するタイミングを時間原点として表現する光波(Carrier:搬送波)の位相です。例えば、包絡線のピークと、光波の電界振動の山が一致しているような場合は、時間0で振動が最大値をとっているのがコサイン波と呼ばれます。



(a) 発生させた単一アト秒パルスのスペクトル。単一アト秒パルスの特徴である広帯域の連続スペクトルを示しています。
 (b) 本スペクトルに対してフーリエ変換限界を仮定した場合の時間波形。時間幅30 asカバーする帯域を有していることが分かります。
 (c) スペクトルのキャリアエンベロープ位相依存性。

図3 発生させたアト秒パルスのスペクトルおよび時間波形

準モノサイクルパルスを用いた単一アト秒パルスの発生

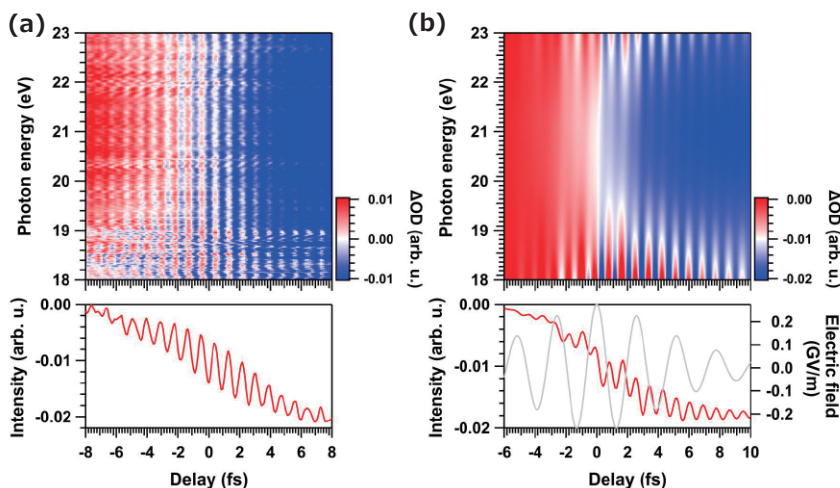
アト秒時間分解計測システムを構成するもっとも重要な技術は、プローブである単一アト秒パルス光源です。記事1で紹介しましたように、単一アト秒パルスを得るためには、通常、基本波の半サイクル周期のパルス列で発生するアト秒パルス列から1本だけを取り出すことが必要です。私たちは、そのために、基本波のパルス幅をほぼ1サイクルに近い準モノサイクルパルスにする技術と、アト秒パルス列発生に超高速遮断ゲートをかける二重光学ゲート技術^{*2}を組み合わせるとほぼ理想に近い単一アト秒パルスを発生しています⁽³⁾。単一アト秒パルス発生の基本波として用いる準モノサイクルパルスと、発生させたアト秒パルスのスペクトルおよび時間波形を図3に示します。準モノサイクルパルス発生には、3 kHz 繰返し周波数 CEP 安定化チタンサファイアレーザーから出力された約20 fsの時間幅を持つパルスを用いました。この元パルスを、圧力約1 気圧のNe ガスを注入している中空ファイバ（長さ1 m、内径400 μm ）に集光し、自己位相変調効果によりスペクトルを超広帯域化した後に、超

広帯域チャープミラー対で分散補償・パルス圧縮をします。その結果、800 nm帯におけるバンド幅139 nm、パルス幅4.1 fs、パルスエネルギー1 mJを持つ1.6サイクルの準モノサイクルパルスの発生に成功しました（図3(a)）。上記の準モノサイクルパルスを基本波として、二重光学ゲート法と組み合わせ、長さ1 mmのNe ガスセルを媒質として発生させた単一アト秒パルスのスペクトル波形を示します（図3(b)）。アト秒パルス列に特徴的な櫛状スペクトルではなく（記事1図3）、広帯域にわたってスペクトルが連続的に分布しているコンティニュームであることが分かります。スペクトルのピークは、およそ140 eVにあり、コンティニュームの半値全幅はおよそ70 eVに到達しています。この帯域幅は、フーリエ変換限界パルス^{*3}を仮定した場合には、32 asのパルス幅に相当します（図3(b)）。計測されたアト秒コンティニュームが単一アト秒パルスであることを裏付けるため、スペクトルの CEP（相対値）依存性を計測しました（図3(c)）。CEP を変化させることは、基本波のピーク電界を変化させることに対応するため、アト秒パルスのスペクトル分布が CEP に従って周期的に変化していきます。スペクトルの CEP の周期的依

存性と、すべての CEP にわたるスペクトル形状のコンティニューム性の維持は、発生させたアト秒パルスが単一であることを裏付けます。私たちが発生させたアト秒パルスのスペクトルの CEP 依存性は、 2π の周期性を持っており、スペクトルのコンティニューム性がすべての CEP にわたって維持されていることが見て取れます。その結果、単一アト秒パルス発生が確認できました。なお、周期が 2π になっているのは、

*2 二重光学ゲート技術：高次高調波発生により生ずるアト秒パルス列から、時間ゲートに対応する基本波波形を整形することによって、1本のアト秒パルス（単一アト秒パルス）だけ取り出す技術。気体からの高次高調波発生は、その発生原理より円偏光では発生しないことを利用した偏光ゲートと、光波電界の大きさに極めて敏感であり、基本波とその2倍波の合成波が非対称な電界波形であることを利用した二色ゲートという2つの1 fsスケールの時間ゲートを組み合わせることで、単一アト秒パルスだけ発生させることができます。

*3 フーリエ変換限界パルス：光パルスの周波数（波長）領域におけるスペクトルの帯域において、もっとも短い時間幅となるようなスペクトル位相を持つ光パルス。光パルスの特徴付ける時間領域のパルス波形と、周波数（エネルギー）領域のスペクトル波形は、互いにフーリエ変換の関係で結びついており、スペクトル帯域全体にわたって位相が同一であるような場合に最短の時間幅になることが知られています。



(a) GaNにおける単一アト秒時間分解吸収分光計測により得られた、18 - 23 eVにかけての差分透過スペクトルの遅延時間依存性。アト秒パルスの帯域全体にわたって、振動周期860 asの特徴的な振動構造が現れています。
 (b) GaNのエネルギーバンドを準位として単純化した光学的Bloch方程式によるアト秒時間分解吸収分光シミュレーション結果。

図4 ポンプ光-プローブ光間遅延時間依存性⁽¹⁾

二重光学ゲート法における二色ゲートの効果により、基本波パルスは反転対称性を失い、非対称な電界になっていることが原因です。本実験では、2時間にわたって 12π の周期性が明瞭に確認され、基本波のCEPが長時間にわたって安定であり、適切なCEPを設定することで長時間安定的に単一アト秒パルスを発生できることも裏付けられました。

ワイドギャップ半導体におけるペタヘルツ電子振動の観測

単一アト秒パルスを用いて、光波-電子系相互作用のアト秒時間分解計測を実現することを考えた場合、そのもっともシンプルな基本形が超短光パルスポンプ・単一アト秒パルスプローブ型アト秒時間分解吸収分光です。本分光法は、超短パルス光波をサンプルに照射することにより物質中の電子系を励起している状態を生成し、励起状態におけるアト秒パルスの吸収量を検出することで、光波の1周期よりも短い時間分解能で電子系励起状態ダイナミクスをサンプリングする手法です。その先駆的代表的例が、中心周波数 ω の高強度超短パルス光をシリカ(SiO₂)薄膜に照射した際に観察されたアト秒パルス吸収量の 2ω 周期変調で

す⁽⁴⁾。この観測結果は、1 V/Å級の2サイクル光波電界を絶縁体に照射することで、電子バンドのWannier-Stark局在化^{*4}が引き起こされ、光波電界によりWannier-Stark局在準位の占有・非占有状態が 2ω 周期で可逆的に変化したと解釈されています。このような固体電子系における電界周期スケールの光波電界コヒーレント操作は、ペタヘルツ級信号処理の機能として有望です。

一方、1 V/Å級光波電界のような超高電界でなくても、光と物質の相互作用において引き起こされるもっとも基本的な光-物質コヒーレント応答は、光によって誘起される分極振動です。分極振動は、光を物質に相互作用した際に起こる反射や透過、吸収といった一連の光学応答の起源となる電子系応答です。その振動周期は、基本的に照射する光の周期程度であることから、アト秒時間分解能で計測しにくい限り実時間測定が不可能でした。ここでは、その一例として、私たちが行った窒化ガリウム(GaN)電子系の非線形分極応答の単一アト秒パルス過渡吸収分光計測を紹介します⁽⁵⁾。実験では、中心エネルギー21 eV、パルス幅は約660 asのアト秒パルスをプローブ光とし、パルス幅約7 fs、ピーク強度 1×10^{10} W/cm²の近赤外パルスをGaN

の薄膜結晶に照射し、その差分吸収スペクトル(ポンプ光照射時の吸収スペクトルと無照射時の吸収スペクトルの比)のポンプ光-プローブ光間遅延時間依存性を計測しました(図4(a))。吸収スペクトルの帯域全体にわたって、特徴的な時間領域における振動構造が現れていることが明瞭に見取れます。エネルギー方向に平均化したプロファイルに直すと、アト秒パルスの吸収量は、周期860 asで振動しながら、減衰していることが分かります。その周期は、周波数1.16 PHzに相当しており、固体電子系において1 PHzを超える振動現象の実時間計測に成功しました。この周期は、ちょうど照射した近赤外パルスの周期2600 as

*4 Wannier-Stark局在：電子系のエネルギー状態がバンド構造をとる物質系に、(強い)電界を印加すると、バンド構造から量子化されたエネルギー準位(離散準位)へと変化する現象。本現象は、半導体超格子構造素子中に形成された電子系ミニバンドに、静電界を印加した場合に、実験的に観測され研究が進められました。

*5 フォトンエコー法：3次の光非線形効果により、物質の電子分極振動の位相緩和時間を計測する方法。時間差をつけた2つの光パルスを物質中で干渉させて、周波数空間上に電子分極の干渉縞を形成させ、その干渉縞を回折格子と見立てることにより、第3パルスで回折された光の信号強度を記録することで、位相緩和時間(分極が振動を保持している時間)を計測することができます。

の3分の1に一致することから、本結果は3次非線形分極振動の計測と考えられます。また、GaNの価電子バンド、伝導バンド、そしてアト秒パルス吸収バンドを疑似準位として単純化した光学的Bloch方程式のシミュレーションの結果⁽¹⁾、実験結果を良く再現することが分かりました(図4(b))。また、シミュレーションでは、減衰時間を、実験結果をよく再現するように選んだ結果、その時定数は3.3 fsと見積もられました。この減衰時間は、フォトンエコー法^{*5}で計測された室温におけるGaAs(ヒ化ガリウム)のバンド間位相緩和時間3.5 fsと類似しており、GaNにおける室温のバンド間位相緩和時間を反映していることが示唆されます。以上のように、単一アト秒パルス吸収分光法は、光電界周期スケールの電子分極応答を時間領域で計測できる技術です。このことは、光波電界によって、電子系の運動を引き起こし、それをとらえることが可能であることを示しており、ペタヘルツ波によるアト秒スケール電子系制御の第一歩であるといえます。

今後の展開

本稿では、NTT物性科学基礎研究所が進めてきたアト秒時間分解計測技術において、その主な構成要素である単一アト秒パルス発生技術とアト秒時間分解吸収分光技術について解説しました。そして、本技術を実際に固体電子系に適用した例として、GaN半導体における光波誘起電子分極のペタヘルツ周波数振動の実時間計測実験を紹介しました。現状、このようなアト秒時間分解吸収分光技術において、データのS/N比の向上には、プローブ光検出信号の数10時間に及び長時間積算による平均化が必須です。しかしながら、信号の検出感度(変調前の信号強度に対する変調強度の比)はたかだか 10^{-2} であり、それ以下の微小信号の検出はできません。さらに、温度依存性やポンプ光強度の依存性、サンプルのキャリア濃度依存性といったパラメータ依存性の計測が実質困難となっています。今後は、本特集記事『高輝度アト秒分光に向けた1.7

サイクル高強度光パルスのMHz繰返し発生』で取り上げたように、ドライバレーザの平均出力を10倍以上に増強し、単一アト秒パルス発生の高輝度を図ることで、S/N比の大幅向上をめざします。さらに、今回取り上げた吸収分光法だけでなく、反射分光法⁽⁶⁾や干渉分光法⁽⁷⁾、角度分解光電子分光法⁽⁸⁾など、多様なアト秒時間分解分光技術へと拡張を図る予定です。これにより、互いに相補的な実験情報を計測することが可能となります。こうした実験側からのアプローチと、本特集記事『高強度光パルス——固体電子系の実時間量子ダイナミクスシミュレーション』で取り上げる第一原理に基づく実時間量子シミュレーションと組み合わせることによって、包括的に光波-電子系相互作用の物理を創出していくことが期待できます。このような光源技術、計測技術、シミュレーション技術の極限追求の営みの先に、ペタヘルツ波によるアト秒スケール電子系制御へのブレークスルーが拓けてくるでしょう。

本稿で紹介した研究は、増子拓紀博士(現NTTアドバンステクノロジー)、弘前大学の花田修賢教授・小川達也氏、東京理科大学の須田亮教授・山口量彦氏、そして、後藤秀樹教授(現広島大学)、中野秀俊教授(現東洋大学)との共同研究の成果です。また本研究の一部は、JSPS科研費(JP23310086, JP25706027, 16H05987, 16H02120)の支援を受けて行われました。

参考文献

- (1) K. Oguri, H. Mashiko, A. Suda, and H. Gotoh: "Lightwave-driven electronic phenomena in solids observed by attosecond transient absorption spectroscopy," K. Yamanouchi, P. Martin, M. Sentis, L. Ruxin, and D. Normand (Eds.), *Progress in Ultrafast Intense Laser Science XIV*, Springer Nature, 2018.
- (2) F. Krausz and M. Ivanov: "Attosecond Physics," *Rev. Mod. Phys.*, Vol.81, p.163, 2009.
- (3) K. Oguri, H. Mashiko, T. Ogawa, Y. Hanada, H. Nakano, and H. Gotoh: "Sub-50-as isolated extreme ultraviolet continua generated by 1.6-cycle near-infrared pulse combined

with double optical gating scheme," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.112, Vol.18, p.181105, 2018.

- (4) M. Schultze, E. M. Bothschafter, A. Sommer, S. Holzner, W. Schweinberger, M. Fiess, M. Hofstetter, R. Kienberger, V. Apalkov, V. S. Yakovlev, M. I. Stockman, and F. Krausz: "Controlling dielectrics with the electric field of light," *Nature*, Vol.493, pp.75-78, 2013.
- (5) H. Mashiko, K. Oguri, T. Yamaguchi, A. Suda, and H. Gotoh: "Petahertz optical drive with wide-bandgap semiconductor," *Nat. Phys.*, Vol.12, pp.741-745, 2016.
- (6) K. Kato, H. Mashiko, Y. Kunihashi, H. Omi, H. Gotoh, and K. Oguri: "Highly sensitive transient reflection measurement in extreme ultraviolet region for tracking carrier and coherent phonon dynamics," *Opt. Express*, Vol.28, pp.1595-1602, 2020.
- (7) H. Mashiko, M.-C. Chen, K. Asaga, A. Oshima, I. Katayama, J. Takeda, T. Nishikawa, and K. Oguri: "Spatially resolved spectral phase interferometry with an isolated attosecond pulse," *Opt. Express*, Vol.28, pp.21025-21034, 2020.
- (8) K. Toume, K. Oguri, H. Mashiko, K. Kato, Y. Sekine, H. Hibino, A. Suda, and H. Gotoh: "Time-resolved ARPES Based on 8-fs High-harmonic Source in the Extreme Ultraviolet Region," *CLEO, San Jose, CA, U.S.A.*, pp.1-2, May 2018.



小栗 克弥

光と物質の相互作用の研究は、長い歴史を持つとともに、現代社会を支えるさまざまな光技術や光デバイスを産み出す基礎を築いています。光を時間領域で振動する電界としてとらえ、アト秒時間スケールで物事を考えただけでも、これまでの成熟化した光と物質の相互作用物理とその応用の枠を超える大きな可能性があることを読者の皆様にお伝えできたら幸いです。

問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
技術革新推進室
TEL 046-240-3461
FAX 046-270-2358
E-mail katsuya.oguri@ntt.com



高強度光パルス——固体電子系の実時間量子ダイナミクスシミュレーション

本研究は、光と物質の相互作用の物理限界を探求し、特に高強度光電場が引き起こす超高速電子ダイナミクスに注目しています。高強度光を念頭に、大振幅電場が半導体・絶縁体に印加された際のトンネル効果による電子の遷移率を量子ダイナミクスシミュレーションで評価しました。電子・正孔相互作用を含む理論モデルを用いることで、電子間相互作用がトンネル遷移率を増強すること、増強度が印加電場に応じて増大することを明らかにしました。

キーワード：#極端非線形光学、#実時間量子ダイナミクスシミュレーション、#電子間相互作用

しのはら やすし
篠原 康
さなだ はるき
眞田 治樹
おぐり かつや
小栗 克弥

NTT 物性科学基礎研究所

高強度光電場が引き起こす超高速電子ダイナミクスとその理論

NTT 物性科学基礎研究所では、光と物質の相互作用の秘めたポテンシャルを明らかにする基礎研究に取り組んでいます。本研究では、光電相互変換の物理限界を探求しました。

半導体は典型的に0.1-3 eV程度のバンドギャップがあり、これをプランク定数 $h=4.136 \text{ eV/PHz}$ で変換すると、24-730 THzの周波数（周期に直すと42-1.4 fs, $fs=10^{-15}$ 秒）に相当します（図1）。光を半導体に照射すると、バンドギャップに相当する数fs周期を持つ励起電子の高速な振動が物質内に誘起されますが、この光による電子励起を検出しようとする、大抵の場合は数100 GHz以下（周期に直すと10 ps以上, $ps=10^{-12}$ 秒）に検出頻度が落ちてしまいます。その理由は、励起された電子を反応中心から検出部に移動させる必要が

あったり、用いるエレクトロニクスの動作周波数が律速されたりするからです。私たちは、光で生成された半導体・絶縁体中の励起電子の振動する様子をfsスケール（場合によってはasスケール）で観測・制御し、光電相互変換の物理限界の探求に取り組んでいます。換言すると、本研究は「光と物質はどれくらい高速に相互作用できるのか？」という基本的な問いに答えるための基礎研究といえます。

それでは、1 eV ($= h/(4.136241 \text{ fs})$)の極めて速い光学応答を調べるにはどのようにすればよいでしょうか？ もっともポピュラーな方法は、1 eV以上の光子エネルギーを持つ光を数fs程度のパルス幅を持った超短パルスに圧縮して、そのパルスの包絡線の極大値を光学応答の時間原点とするポンプ・プローブ法です。ポンプ・プローブ法は2つのパルス対の遅延時間を調整して、1番目のパルスの影響を2番目のパルスへの応答から観測するテクニックで

す。このパルス幅は最短でも光のキャリア振動の周期程度です。本研究では、これとは異なる着眼点を持つ、大振幅光電場が引き起こすトンネル効果による超高速電子ダイナミクスに注目します。これは電場自身の振幅により支配される現象で、振動電場のゼロ点を時間原点とし、キャリア周波数（光子エネルギーに相当）よりも速い応答が現象を支配する点が大きな特徴です。こうした現象は光のサブサイクルダイナミクスとも呼ばれています。

エネルギーギャップのある半導体・絶縁体に高強度電場が印加されると、価電子帯にある電子は、トンネル効果により禁制帯を通過して伝導帯に遷移します。大きさEの電場を印加すると、電子は eEx ($e > 0$)というポテンシャルを感じます。このポテンシャルにより、価電子帯および伝導帯は傾き eE のエネルギー勾配を持ちます（図2）。電場Eが大きくなると、間に挟まれた禁制帯がどんどん薄くなり、ある程度薄くなると、この薄い禁制帯をトンネル効果で電子が通過できるようになり、絶縁破壊が起きます。トンネル効果によって、単位時間当りに禁制帯を通過するトンネル遷移率 Γ は、格子定数 a 、有効換算質量 μ 、エネルギーギャップ Δ を使って

$$\Gamma = \frac{aE}{\pi} \exp\left(-\frac{\pi\sqrt{\mu}\Delta}{2E}\right), \quad (1)$$

と近似的に表せます^{(1),(2)}。この式は、状況を簡便化しているので、必ずしも正確ではありませんが、大雑把な値を評価するうえ

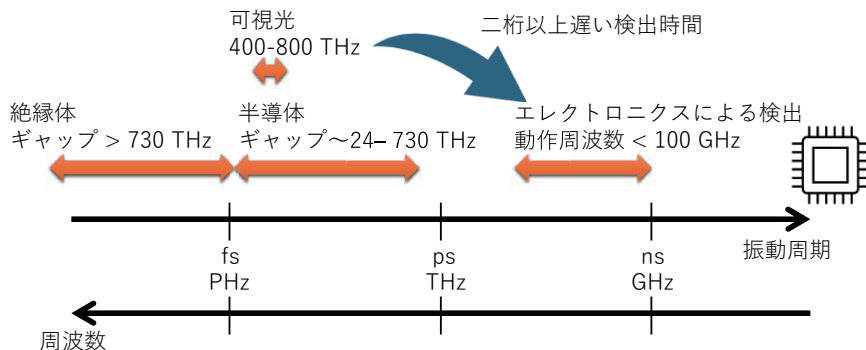
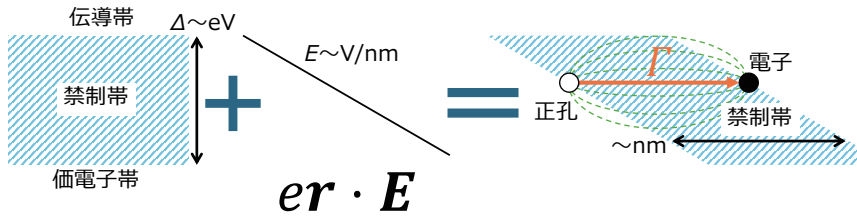


図1 光と物質、エレクトロニクスの時定数



薄い禁制帯をまたいでできる電子と正孔にはクーロン相互作用が働く。

図2 バンドギャップのある物質に電場が印加された際の禁制帯の傾く様子

では有用です。水晶を念頭に、 $\mu = 0.347$, $\Delta = 9.08$ eV, $a = 0.339$ nmのとき、実験室では達成可能な15.4 V/nmの電場を印加すると、 $\Gamma = 6.57$ THz = 1/152 fsになります。152 fsという時定数は、一見遅いと思われるかもしれませんが、この時定数は、電子自体の運動の周波数ではなく、光電場によりキャリアドーピングの速さを決める定数である点に注意が必要です。つまり、15.4 V/nmの電場をかけると、10 fsの間に体積比6.57%の光キャリアが導入される計算です。これだけ大振幅の光電場を長時間照射すると、あまりに多量の電子が励起され、物質に不可逆なダメージが入ってしまうため、実験的には数fs程度の極めて短い光パルスが用いられています。肝心の電子の振動の時定数は、バンドギャップと同じなので、水晶のケースでは9.08 eVの電荷振動が物質に誘起されます。

実際の高強度光による現象では、トンネル効果以外の過程も起きますが、いずれにしてもかけた電場に対して著しく非線形な応答が起き、光のキャリア周波数よりも短い電子の振動が現れるため、その時定数はfsを切ってasの領域に達することもあります⁽³⁾。こうした大振幅光電場を物質に照射して、極めて速い光学応答を調べる分野を極端非線形光学と呼びます。

超高速かつ原子スケールの現象を理解するうえで、理論的研究が必要不可欠で量子力学的なシミュレーションが有効です。極端非線形光学で調べる現象は、V/nm級の電場を数fsだけ物質に印加する実験で、典型的な物質は半導体や絶縁体です。こうした極限的な実験では、実験的に直接観測できる対象はマイクロメートル程度にわたっ

て平均化された光学応答、数ns秒積算された時間分解電流、時間で分解した光電子スペクトル等がありますが、どれも現象の一端を切り取ったデータを示してくれるのみで、実験結果の解釈には困難を極めることもしばしばです。そこで、現在の実験技術では直接観察できないような、原子スケールかつフェムト秒 (fs)・アト秒 (as) の光と物質の相互作用の様子をあらわにする理論的研究が必要となるわけです。

極端非線形光学を明らかにする理論的アプローチにはさまざまなものがありますが、量子ダイナミクスの実時間シミュレーションは直接的に現象を模擬しやすく強力なアプローチです。例えばトンネル遷移率を評価する際、量子ダイナミクスが従う運動方程式の定常解を近似的に求めるアプローチがよくとられますが、仮定する定常解のあたりに依存してトンネル遷移率の値が異なることがよく知られています⁽²⁾。このとき、運動方程式を時間領域で解き、その数値解が定常的であることを確認のうえ、トンネル遷移率を評価する方法が、解いている運動方程式の解をもっとも正確に評価する方法です。本研究では多体効果を平均場のレベルで取り込んだ電子の従う運動方程式を時間領域で解いて、トンネル遷移率を評価しました。

超高速電子ダイナミクスにおける電子間相互作用

ここでは、本研究における最大の技術的課題である、電子間相互作用の理論的記述法についての概略を説明します。

固体中の電子間相互作用を取り扱う、理

論的枠組みは、静的な物性についてはかなり成熟していますが、時間依存するダイナミクスについての検証は十分ではありません。この四半世紀の計算機技術の進展により、かなりの物質の静的性質（最安定原子構造、弾性係数、バンドギャップの値、光学定数等）は原子スケールの理論計算で精度良く再現できるようになってきました。こうした原子スケールの理論計算の多くは、近似こそ含むものの、素電荷やプランク定数等の基本的な物理定数、電荷の間に働くクーロン力、量子力学といった基本的な物理法則のみを前提にしており、第一原理計算*とも呼ばれています。対象物質固有の物性値などは頼りにせず物質を模擬するため、非経験的理論計算、ab initio計算などとも呼ばれています。一方で、光等の外場に伴って時間依存する量子多体系に対しては、定量的妥当性は静的な性質ほど十分に検証されていません。この要因として、動的な性質は理論と実験の比較が難しいケースが多いこと、理論シミュレーションの計算コストが大きく解ききることが困難なことが挙げられます。「解ききることが困難」とは、例えばシミュレーションのサイズを順次大きくしていったときに、計算コストが大きすぎるために、注目している物理量が解く系の大きさに対して十分収束したことが確認できない状況です。解ききれてい

* 第一原理計算：物質科学の分野では、クーロン力で相互作用する電子と原子の多体系のシュレーディンガー方程式を指導原理に、物質ごとの実験的物性値などを頼りにすることなく物質の状態を求める計算を第一原理計算と呼びます。入力されるパラメータは、素電荷の大きさや原子番号、原子核の質量、プランク定数といった普遍的な物理定数のみです。実物質の情報をよりどころにしない非経験的計算手法で、未知物質（例えば惑星内部の高圧高温下の物質等、実測が困難なものを含む）の原子構造や電子状態、光学特性について一定の信頼性をもって予言することができるのが大きな特徴です。ボルン-オープンハイマー近似をはじめとしてさまざまな近似（ただし物質に応じて導入する近似を変えたりはしない）を施してシミュレーションが行われることが通常で、したがって得られる結果は導入された近似の程度に依存しています。本文にも記載したとおり、原子系が基底状態であれば、数原子程度の周期の結晶であれば、安定構造や物性値については精度良く実験値を説明できるところまで進化しています。一方で、任意の外場に対する量子ダイナミクスのシミュレーションについては、電子基底状態における状況ほどは成熟していないのが現状です。

ないシミュレーションは、たとえ同じ方程式を出発点を選んで計算しているときでさえ、数値計算の実装方法によって答えが変わるため、シミュレーションどうしの一致はもちろん、実験との一致も確認することが困難になります。

本研究では、半導体等の光学応答でもっとも重要な相互作用である、電子・正孔相互作用を含んでいる平均場近似を採用し、定常電場下で電子の量子ダイナミクスを解くコードを開発しました。本研究で採用した平均場近似とは、電子どうしの二体相互作用をうまくならして、注目している電子以外の分布が構成するポテンシャルにまとめてしまう近似です。このポテンシャル形状は、各々の電子が従う運動方程式の解から決まる電子の分布と整合するよう、自己無撞着に解かれます。特にフェルミオンにおいては、時間依存Hartree-Fock (TD-HF) 法として知られているものです。TD-HF法は半導体の光学応答において極めて重要な役目を演じる電子・正孔相互作用を含んだ理論です。価電子が完全に占有した状態に光などの外場が加わると、伝導帯に電子が持ち上がり、価電子には電子の抜けた正孔が発生し、それぞれ電荷 $-e, e (>0)$ の粒子としてふるまいます。この電子と正孔の間に働く相互作用が電子・正孔相互作用 (図1) で、この相互作用によって電子と正孔が束縛状態をつくった励起子の存在が多くの半導体の光吸収に色濃く表れています。

本研究では、既知の条件で実験値を再現できる平均場モデルを採用し、多体効果を調べました。TD-HF法を解く際、計算コストの主要部分は電子間の相互作用の計算で、そのコストは系の大きさの二乗に比例して増大します。そのため、第一原理計算に倣った三次元空間のクーロン相互作用をそのまま解くと極めて大きな計算コストを要してしまいます。本研究では一次元空間の有効モデルを採用しました。また、第一原理的に解くTD-HF法は電子・正孔相互作用を過剰に評価することが知られています。そこで、本研究では実験や高精度な理論計算で得られている励起子の束縛エネルギーを再現するように電子・正孔相互作用

の強さを調節できるようにTD-HF法を改造した、時間依存quasi Hartree-Fock (TD-qHF) 法を開発しました。第一原理的な記述を諦めた代わりに、バンドギャップや換算有効質量を、実験値や高精度理論計算の値に調整することができ、電子・正孔相互作用の有無を切り替えて、電子ダイナミクスの様子をシミュレートすることができます。また、モデル化により計算コストが抑えられたため、系の大きさに対して十分収束した結果を求めることができます。

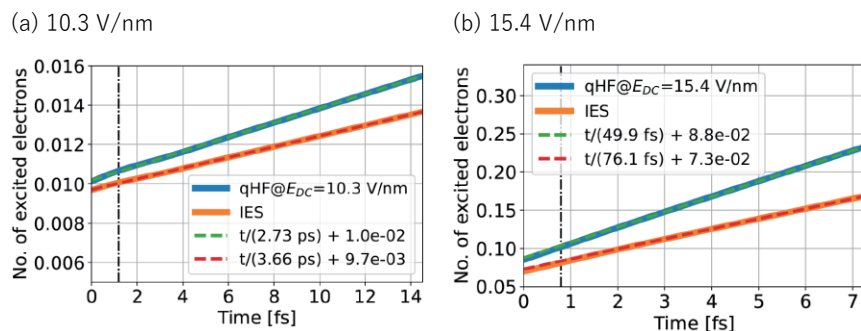
電子間相互作用によるトンネル遷移率の増大

本研究では、高強度電場を結晶に印加した際に、価電子が単位時間当りに伝導帯にトンネル効果で逃げ出していくトンネル遷移率を調べました⁽⁴⁾。電子間相互作用の有無を切り替え、トンネル遷移率にどのように影響が現れるのかを評価した結果を紹介します。

水晶を例に、10.3 V/nm, 15.4 V/nmの定常電場を印加した際に、伝導帯に遷移した電子数の時間発展を図3に示しました。伝導帯にいる電子数は時間に比例して増加していることが確認できます。この傾きからトンネル遷移率 Γ が算出されます。電場振幅を10.3 V/nmから1.5倍した15.4 V/nmに増加させることで、 Γ は60倍程度増大し、極めて非線形性が強いことがわかります。TD-qHFの結果と電子・正孔相互作用を

含まない独立電子系 (IES: Independent Electron System) を比較すると、どちらも前者のほうがトンネル遷移率が大きくなっています。この電子・正孔対相互作用に起因するトンネル遷移率の増大係数は10.3 V/nmと15.4 V/nmでそれぞれ1.33, 1.50です。ほかの物質を模擬したシミュレーションを行うと、いくつかの例外を除いて、基本的にはこの増大係数は電場の大きさに対して単調に増大する傾向が見て取れました⁽⁴⁾。電場が大きくなると電子ダイナミクスは運動エネルギーが支配的になり、相対的に電子・正孔対相互作用の影響は小さくなるだろう⁽³⁾という予想もありましたが、私たちの研究は必ずしもそうなっていないことを示しています。

電子・正孔相互作用がトンネル遷移率を増強しているという点が見えると、そのメカニズムが気になるところです。メカニズムを明らかにするため、極端に電子・正孔相互作用が強い系のシミュレーションを行い、時々刻々のバンドギャップの変化を図4に示しました。両方の電場振幅に対して、TD-qHFではバンドギャップが独立電子近似に比較して小さくなっていることがわかります。さらに、10.3 V/nmのケースでは、バンドギャップが時間に依存して減少していることがわかりました。このケースでは、時間に依存して電子・正孔対の数がトンネル遷移で増大していき、その結果バンドギャップが減少しています。このバンドギャップの変化自体も光電子分光により、実験的に検証可能な興味深い現象です。



TD-qHF (青実線)、独立電子系 (橙実線) の結果と、それぞれの一次関数によるフィット (緑破線、赤破線)。バンドギャップのある物質に電場が印加された際の禁制帯の傾く様子。Reprinted with permission from Ref. 4. Copyright 2023 by American Physical Society.

図3 水晶を模擬した系に定常電場をかけた際の伝導帯に遷移した電子数の時間発展

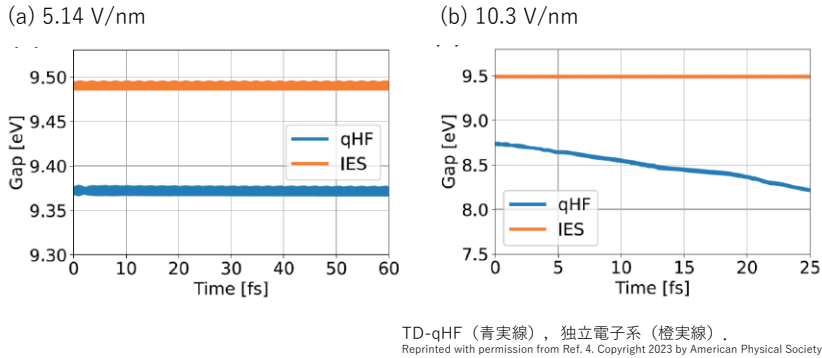


図4 極端に電子・正孔相互作用の強い系に定常電場をかけた際の、バンドギャップの時間発展

このバンドギャップの変化に加えて、換算有効質量の変化を考慮して、式(1)を用いてトンネル遷移率の増大係数を評価すると、2つの電場振幅に対して49%、75%は説明できるものの、完全には説明できないことが分かりました。このことは、静的な電子状態変化以外に時間的に変化する電子・正孔対の分極振動がトンネル遷移率増大に寄与していることを示唆しています⁽⁵⁾。

本研究の結果は、定常電場に対してのレートの評価したもので、直接に「光と物質はどれくらい高速に相互作用できるか」に答えていません。以下で、この問いへの本研究からいえる範囲の回答をしようと思えます。光には振動周期という時定数があるため、素朴にはこの時定数が光と物質の相互作用の物理限界を与えようと考えられます。しかし、極端非線形光学として調べる領域では、非線形性を通じて電場振幅が時定数を決めるパラメータになります。V/nm級の電場を用いれば、数fs程度で物質のバンドギャップに相当する周波数を持った電子の振動が誘起されることをみました。したがって、本研究から「光子エネルギーがバンドギャップよりも低くとも、強い光電場を物質に印加することで物質のバンドギャップに相当する時定数で光と物質は相互作用できる」ということがいえます。

今後の展開

本研究では、電子間の相互作用により、電子が電場に応じて応答する時定数が変化することを示しました。本研究の主役であったトンネル遷移率は、原理的には観測

可能な量といえますが、実験的に直接測定するのは極めて困難であり、現時点では絵に描いた餅に過ぎません。実験的なトンネル遷移率の実測に向けて、振動電場の振動周期というもう1つの時定数を導入し、電場の時間波形に応じた変化を調べるなどのアプローチを現在検討しています。いずれにしても、実測できる物理量を理論と実験で突き合わせることで、超高速電子ダイナミクスのメカニズム解明とそのダイナミクスの制御の研究に取り組んでいく考えです。

本研究の主題は電子間相互作用によるトンネル遷移率の変化ですが、実験対象の物質には電子間相互作用が働いており、これを人為的に取り除くことはできない点が本研究の価値を評価するうえでのアキレス腱です。本研究の価値を、電場印加時の過渡的な物性制御という観点でとらえ、多体効果を通じた異方的な物性の超高速制御の可能性を理論的に探求していく方向性を検討しています。例えば、ある方向に直線偏光の光電場をかけた際、光電場の向きと並行および垂直な方向で電子・正孔の分布は異方的になります。物質がそもそも等方的なものであれば、電子・正孔分布に由来する異方性が物性に反映されるはずですが、この異方性は多体効果に起因するため、実験的に測定できる量から多体効果に由来する現象をうまく評価できることが期待されます。このような物性の異方性を超高速で制御できる技術が確立すれば、新たな超高速光デバイスの動作原理の1つとなるかもしれません。

参考文献

- (1) C. Zener: "A theory of the electrical breakdown of solid dielectrics," Proc. R. Soc. London, Ser. A, Vol.145, No. 855, pp.523-529, 1934.
- (2) M. Holthaus: "Bloch oscillations and Zener breakdown in an optical lattice," J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt., Vol.2, p.589, 2000.
- (3) S. Y. Kruchinin, F. Krausz, and V. S. Yakovlev: "Colloquium: Strong-field phenomena in periodic systems," Rev. Mod. Phys., Vol.90, No.021002, 2018.
- (4) Y. Shinohara, H. Sanada, and K. Oguri: "Enhancement of Zener tunneling rate via electron-hole attraction within a time-dependent quasi-Hartree-Fock method," Phys. Rev. B, Vol.108, No.134309, 2023.
- (5) T. Ikemachi, Y. Shinohara, T. Sato, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami, and K. L. Ishikawa: "Time-dependent Hartree-Fock study of electron-hole interaction effects on high-order harmonic generation from periodic crystals," Phys. Rev. A, Vol.98, No.023415, 2018.



(左から) 篠原 康 / 眞田 治樹 / 小栗 克弥

本研究は、光と物質の相互作用の限界を探る基礎研究です。高強度光電場による超高速電子ダイナミクスの解明を通じて、超高速光デバイスの新原理発見に貢献します。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
フロンティア機能物性研究部
量子光デバイス研究グループ
TEL 046-240-3838

E-mail yasushi.shinohara@ntt.com



主役登場

固体電子系の実時間量子ダイナミクスシミュレーションとハイパフォーマンス・コンピューティング

篠原 康 Yasushi Shinohara

NTT 物性科学基礎研究所
主任研究員



大学院入学後から現在まで、光による電子ダイナミクスのシミュレーションを軸に研究してきました。本稿の執筆を機に振り返ったところ、研究対象や共同研究、成果発信方法は変わっても、シミュレーション内容自体はほとんど変わっておらず驚きました。キャリアの初期には全く重視していなかった、技術や経験の特殊性こそが私の研究キャリアを大きく支えてくれたことを実感しています。

技術や個別の経験は、論文では割愛されることが多く、記録に残りにくいものです。本稿では、私が取り組んできたハイパフォーマンス・コンピューティングの計算技術の内情を紹介し、研究内容に興味を持っていただくきっかけとなれればと思います。

量子ダイナミクスのシミュレーションは、基本的に時間依存シュレーディンガー方程式 (TDSE: Time-Dependent Schrödinger Equation) $i\psi = \hat{h}(t)\psi$ を数値的に解きます。電子の量子ダイナミクスでは、波動関数 ψ は空間座標と時間を引数に持ちます。ほかの科学技術計算と同様、TDSEの連続変数は何らかのかたちで離散化され、それを基に計算コードが記述されます。この離散化により、波動関数 ψ は時間依存の M 次元列ベクトルに、ハミルトニアン \hat{h} は $M \times M$ 行列になります。この離散化の妥当性を議論する際には科学的知識が重要ですが、いったん離散化された TDSE が得られれば、その後は微分方程式をどれだけ精度良く高速に解けるかという単純 (ながら難しい) タスクに集中するこ

とになります。TDSE を解く計算コストの大部分は、ハミルトニアンと波動関数の行列ベクトル積に由来し、これを繰り返し実行して時間発展を行います。

計算コストを具体的に見積もってみます。私がよく用いていた第一原理計算手法の一つである時間依存密度汎関数理論 (TDDFT: Time-Dependent Density-Functional Theory) では、粒子数 N の分だけ単一電子に対する TDSE を解く必要があります。TDSE の離散化に空間のグリッド化を採用すると、素行列となるハミルトニアンの行列ベクトル積の計算コストはベクトル次元 M に比例するので、TDDFT の計算コストは LMN に比例します。大学院時代のシミュレーションでは $(L, M, N) = (40000, 16^3, 24^3)$ の規模で、複素数演算の回数はおおよそ 10^{13} 回です。この計算を共同利用研究施設のスーパーコンピュータを使用して 512 コアで並列計算を行い、約 20 時間で実行しました。私が当時開発したコードとその技術の一部が SALMON プロジェクト (<https://salmon-tddft.jp/jp/index.html>、筑波大学の矢野一浩教授を中心とするメンバが開発) に受け継がれています。

並列計算はタスクを複数 CPU に分担し速度向上を図る技術で、専用コードの開発が必要です。私たちのケースでは、波動関数 ψ_i の i のインデックスでタスクを分割しました。一般に並列計算コードを開発する際には、タスクの分割法に応じた、計算効率、データ通信コスト、メモリ使用量、そして実機での計算可能性を検討する必要が

あります。クラスタ計算機やスーパーコンピュータを用いた大規模な並列計算は、ハイパフォーマンス・コンピューティング (HPC) と呼ばれる分野で、盛んに研究されています。数理モデルと問題規模によって並列化の方針はある程度決まりますが、多くの場合、個別事例の経験に基づく技術が重要な役割を果たします。こうした技術が参入障壁となることで、私が TDDFT による量子ダイナミクスシミュレーションで研究の第一線にとどまることができていると考えています。

最後に、TD-qHF (quasi Hartree – Fock) 法との関係についても簡単に説明します。TD-qHF 法の元となった TD-HF 法は TDDFT と類似の方程式を解きますが、ハミルトニアンを波動関数に演算する個所が MN^2 に代わり、全コストは LMN^2 に比例します。著しく大きな計算コストに打ち勝つため、スーパーコンピュータ「富岳」級の環境を念頭に、並列アルゴリズムの開発とコード実装に取り組んできました。このコードはまだ開発途中ですが、培った技術を TD-qHF に適用することで「解ききった」結果を出せました。TD-qHF は高度で先端的な理論というわけではありませんが、蓄積された技術を用いて精度よく解ききった点が、科学技術の中で重要な意義を持つと私は考えています。

引き続きこれまで培った固体電子系の実時間量子ダイナミクスシミュレーションを駆使して、高速光デバイスの新原理探求に勤んでいきたいと思っています。



観光地経営の現在地と観光DX —後編—

前編では、日本人にとっての「観光地」の変遷について「観光資源」に着目しながら歴史的に振り返りました。コロナ禍がもたらしたインパクトを確認するとともに、観光地経営に求められる「情報の重要性」について俯瞰しました。後編では、2024年現在の「観光地経営の現在地」について、観光を取り巻く環境を、PEST分析の観点（政治、経済、社会、技術）で俯瞰しながら、観光DX（デジタルトランスフォーメーション）の事例について紹介します。これらを通じて、DXが観光地経営に貢献し得る意義を再確認するとともに、新たに付加価値を生む可能性や新たなビジネスチャンスの萌芽を見出すことを目的とします。



観光分野のPEST分析

前編でも述べましたとおり、観光分野は新型コロナウイルス感染症による深刻な影響を受け、ほかの業種と比べても厳しい状況が継続しました。ここでは、観光を取り巻く環境を、PEST（政治「Politics」、経済「Economy」、社会「Society」、技術

「Technology」）分析の観点で俯瞰することで、ポストコロナの現在の状況を把握します。

■政治的要因（Politics）

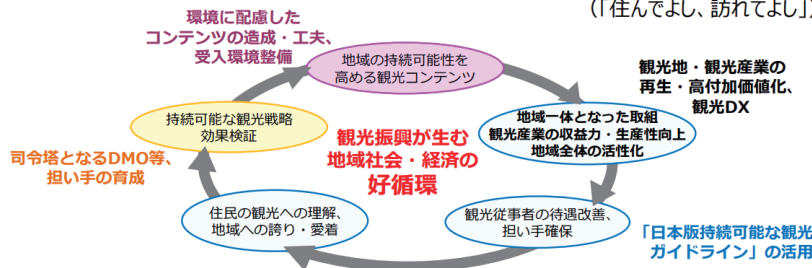
2023年3月31日に「観光立国推進基本計画（第4次）」が閣議決定されました。本計画では、観光立国の持続可能なかたちでの復活に向け、観光の質的向上を象徴する「持続可能な観光」「消費額拡大」「地方誘

客促進」の3つをキーワードに、「持続可能な観光地域づくり」「インバウンド回復」「国内交流拡大」の3つの戦略に取り組む（図1）こととし、2023年度から2025年度の3カ年計画となっています。

「観光立国推進基本計画」からは、生産性向上や地方創生などの社会的な課題への対応により観光を持続可能なものにすると同時に、インバウンドの回復や国内旅行の

持続可能な観光地域づくり戦略

- 観光振興が地域社会・経済に好循環を生む仕組みづくりを推進する
- 観光産業の収益力・生産性を向上させ、従事者の待遇改善にもつなげる
（「稼げる産業・稼げる地域」）
- 地域住民の理解も得ながら、地域の自然、文化の保全と観光を両立させる
（「住んでよし、訪れてよし」）



インバウンド回復戦略

- 消費額5兆円の早期達成に向けて、施策を総動員する
- 消費額拡大・地方誘客促進を重視する
- アウトバウンド復活との相乗効果を目指す

国内交流拡大戦略

- 国内旅行の実施率向上、滞在長期化を目指す
- 旅行需要の平準化と関係人口の拡大につながる新たな交流需要の開拓を図る

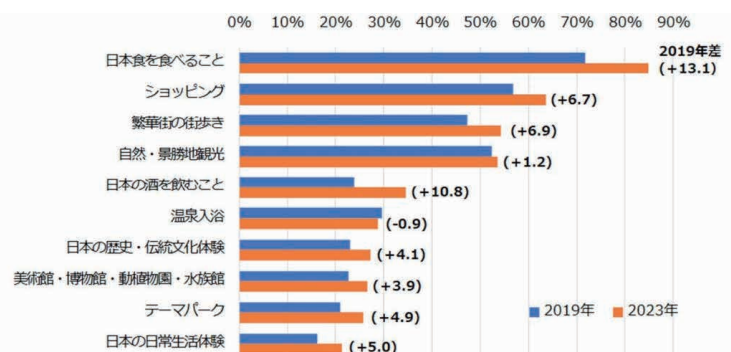
出典：観光庁「観光立国推進基本計画（第4次）概要」<https://www.mlit.go.jp/kankochu/content/001597355.pdf>

図1 観光立国推進基本計画（第4次）の基本的な方針



出典:観光庁「訪日外国人消費動向調査 2023年中間報告書」<https://www.mlit.go.jp/kankochu/content/001734815.pdf>

図2 訪日外国人旅行消費額推移



出典:観光庁「令和5年度観光の状況及び令和6年度観光施策」<https://www.mlit.go.jp/kankochu/news02.000517.00001.html>

図3 訪日外国人旅行者が訪日前に期待していたこと

需要喚起、旅行の高付加価値化などの実現により、観光による経済的な成長をめざしていることがうかがえます。日本の観光業のGDPは、コロナ禍前の2019年に国内GDPの約2%を占めていましたが、フランスは2017年で同7.2%、イタリアは2017年で同6.0%⁽¹⁾でした。日本の観光業は、まだまだ成長の余地があると考えられます。

観光立国推進基本計画に基づき、さまざまな観光振興施策が行われている一方で、一部の自治体では宿泊税の引き上げが検討されています。例えば、京都市では宿泊税の上限を1泊1万円に引き上げることが検討されています⁽²⁾。市議会の可決と総務大臣の同意が得られれば、2026年3月からの引き上げをめざすとされています。本件は、オーバーツーリズム対策へ宿泊税を活用す

ることで課題の解消につながることを期待される一方で、観光客が他国・地域へ流出する懸念もあり、その影響を注視する必要があります。

■経済的要因 (Economy)

訪日外国人数は、2019年に3188万人と当時の過去最高を記録し、コロナ禍による激減を経て、2023年には2507万人と、2019年の80%弱まで回復しました。人数は過去最高の2019年には及ばなかった一方で、図2に示したとおり、訪日外国人の消費額は約5.3兆円と過去最高を記録しました。これは、1人当たりの消費額の増加(2019年1人当たり15.9万円⁽³⁾、2023年同21.3万円⁽⁴⁾)によってもたらされましたが、主要因は、ホテル・旅館など宿泊料金の高騰と、平均宿泊日数の増加(2019年8.8泊⁽³⁾、2023年10.1

泊⁽⁴⁾)に伴う宿泊費の上昇によるものです。

直近の2024年11月までの訪日外国人数は累計3337万人となり、これまでの過去最高であった2019年の年間累計(3188万人)を上回りました⁽⁵⁾。これは、観光による経済成長をめざすうえで、強力な追い風が吹いているといえるでしょう。

日本人の国内旅行者数も、2023年時点では訪日外国人数と同様な傾向がみられます。日本人の国内延べ旅行者数は2019年の5.8億人から2023年の4.9億人と約15.2%減少した一方で、国内旅行消費額は21.9兆円と、2019年とほぼ水準まで回復しました⁽⁶⁾。これは、宿泊費をはじめとして、旅行に必要な費用が増加していることが主要因です。

2024年9月時点での日本人の国内旅行者数は、累計4.1億人であり、2019年比-8.9%⁽⁷⁾と減少しています。2023年は上回るものの、過去最高を記録した訪日外国人と比較して伸び悩みがみられます。

■社会的要因 (Society)

前編で述べたとおり、人々が観光に求めるものは過去から現在にかけて変遷してきました。それは、日本人の国内旅行者のみならず、訪日外国人も同様です。

訪日外国人が日本旅行に期待していることを図3に示します。日本食への関心がより一層高まっているのと同時に、日本の歴史や日常生活など、さまざまなことに対する関心も高まっています。これは、全国各地の郷土料理や歴史、日常生活を体感できる観光地を活かすことで、現在東京・大阪・京都に偏っている訪日外国人の滞在地を、地方に向かわせる可能性を秘めていると考えられます。

日本人の国内旅行者の旅行目的も変化しています。例えば、前編でも触れた「聖地巡礼」(コンテンツツーリズム)はSNSの普及とともに2010年以降身近な存在になり、地方に無視できないレベルの経済効果をもたらしています。例えば、2016年に岐阜県飛騨市などが舞台になったアニメ映画『君の名は。』のヒットにより、ほかの2作品も含めた岐阜県への経済効果は253億円にのぼりました⁽⁸⁾。

一方で、観光の負の側面による社会問題

		(%)		
		2022年10月	2023年10月	2024年10月
1	飲食店	76.3	↑ 82.0	↓ 64.3
2	旅館・ホテル	75.0	↓ 73.5	↓ 60.9
3	人材派遣・紹介	57.5	↑ 64.2	↓ 55.2
4	メンテナンス・警備・検査	46.4	↑ 54.9	↓ 54.1
5	娯楽サービス	55.3	↓ 44.0	↑ 52.0
6	飲食料品小売	47.3	↑ 50.0	↓ 49.7
7	各種商品小売	51.2	↓ 50.0	↓ 48.9
8	金融	36.7	↑ 45.1	↓ 43.8
8	繊維・繊維製品・服飾品小売	36.8	↑ 44.2	↓ 43.8
10	教育サービス	37.5	↑ 50.0	↓ 43.5

※母数が20社以上の業種が対象

出典：帝国データバンク「人手不足に対する企業の動向調査(2024年10月)」
<https://www.tdb.co.jp/report/economic/20241113-laborshortage202410/>

図4 非正社員の人手不足の割合（上位10業種）

も顕在化しています。例えば、前編でも触れた「オーバーツーリズム」が各地で社会問題になっており、観光客が押し寄せることで地元住民の暮らしに支障が出ています。一例を挙げますと、京都の中心部の路線バスでは、清水寺などの有名観光地への移動や、大型の荷物の持ち込みを行う観光客によって、地元住民が利用しにくい状況が発生しています⁽⁹⁾。

さらに、昨今、少子高齢化などに起因する人手不足が深刻化していますが、観光分野の主要業種である「旅館・ホテル」においても例外ではありません。帝国データバンクによる「人手不足に対する企業の動向調査」の結果の一部を図4に示します。この結果からは、非正社員に関して人手不足と感じている企業の上位10業種とその割合（例えば、2024年10月の調査では飲食店業の64.3%の企業が人手不足と感じている）を把握できます。

「旅館・ホテル」は、非正社員の人手不足割合の第2位（図4）であり、正社員でも第6位です。「旅館・ホテル」は、コロナ禍での観光客激減の影響により働き手を減らさざるを得なかったため、アフターコロナで深刻な人手不足に陥りましたが、最近では、観光客の回復により若干の緩和傾向がみられます。とはいえ、過半数の企業

が人手不足と感じている状況は継続しています。

■技術的要因（Technology）

「観光立国推進基本計画」では、観光DX（デジタルトランスフォーメーション）の推進が掲げられています。その主な目的は、同計画に「旅行者の利便性向上及び周遊促進、観光産業の生産性向上、観光地経営の高度化等を図る」と示されています。このことから、国として、観光DXにより単に生産性を向上させるだけではなく、同時に旅行者に対する付加価値や、観光地経営の高度化も追求したいと考えていることがうかがえます。

ここで、観光地経営の高度化について説明します。同計画には、「事業者間・地域間のAPI連携等を促進するため、連携するデータの仕様統一化を図るとともに、実証事業を通じて先進事例を創出する」と示されています。例えば、地域間の複数の事業者（観光、宿泊施設など）で予約状況や宿泊料金などを連携することで、観光施設の人員配置や宿泊料金を最適化することが可能になり、収益を最大化できます。

このように、観光立国推進基本計画におけるめざす姿である「地域の社会・経済に好循環を生む「持続可能な観光地域づくり」」において、観光DXは非常に重要な

取り組みであると考えられます。

一方で、観光分野に限らず、DXを支える人材不足が深刻化しています⁽¹⁰⁾。観光分野においては、その対策として、外部専門家の起用により観光事業者の担当者にDX等のノウハウを蓄積させることや、経営層向けの教育プログラムの提供によりデジタル人材育成に関する意識の醸成などが行われています⁽¹¹⁾。

それに加えて、観光分野のデジタル化の進展に伴い、システム障害に対する影響が深刻化しています。例えば、2024年7月19日に、統合セキュリティソリューションの「CrowdStrike Falcon」の不具合が発生し、発生後72時間で全世界の1万6896の旅客便が欠航となりました⁽¹²⁾。観光DXの推進に際しては、システム障害の回避策を講じることや、障害発生時の業務フローの整備など、対策がより重要となります。

観光分野における課題

これまで「観光分野のPEST分析」で述べた内容を「機会」「脅威」に大別したものを表に示します。

■「機会」を踏まえた課題

観光分野における機会は、順調に増加している訪日外国人や旅行消費額、観光に対するニーズの多様化、そして、観光庁による観光DXの推進です。特に、観光に対するニーズの多様化は、訪日外国人や日本人旅行者を、活性化が必要とされている地方に向かわせる可能性を秘めていると考えられます。

この機会を活かすために取り組むべき課題は、「デジタルテクノロジーと地域資源を活かして新たな魅力をつくり、観光の高付加価値化を実現する」ことです。この課題解決により、観光立国推進基本計画における「地域の社会・経済に好循環を生む「持続可能な観光地域づくり」」の実現に寄与します。

■「脅威」を踏まえた課題

一方、観光分野における脅威は、観光客の増加によるオーバーツーリズムの社会問



表 PEST分析まとめ

	P	E	S	T
機会	<ul style="list-style-type: none"> 観光立国推進基本計画(第4次)の策定 ビザ緩和 民泊新法成立 	<ul style="list-style-type: none"> 訪日外国人の増加(過去最高を更新) 旅行消費額の増加 	<ul style="list-style-type: none"> 旅行ニーズの多様化(歴史, 日常生活, 聖地巡礼など) 	<ul style="list-style-type: none"> 観光庁による「観光DX」の推進 生成AI, AR/VRなどの新技術 キャッシュレス決済・QRコード決済の普及
脅威	<ul style="list-style-type: none"> 宿泊税の引き上げ(検討)による他国・地域への流出 	<ul style="list-style-type: none"> 日本人の国内旅行者数の伸び悩み 民泊・OTAの台頭による競争激化 為替レートの変動(円高による, 旅行先として日本以外の国・地域への代替) 	<ul style="list-style-type: none"> オーバーツーリズムの社会問題化 旅館・ホテルなどにおける人手不足の深刻化 	<ul style="list-style-type: none"> DX推進人材不足 システム障害の影響増大

※太字：本文中で説明した内



出典:「オーベルジュほまち三國湊公式ウェブページ」<https://www.homachi.jp/rooms/>

図5 オーベルジュほまち三國湊フロント・客室・レストランの分布

題化や、少子高齢化に起因する人手不足の深刻化です。いずれも、「持続可能な観光地域づくり」を妨げる重大な要因となります。

この脅威に対処するために取り組むべき課題は、「デジタルテクノロジーを活用し、生産性を向上させたり、集中する観光客を分散させたりする」ことです。これにより、「持続可能な観光地域づくり」の実現に寄与します。

デジタルテクノロジーと地域資源を活かした新たな魅力づくりの事例

ここでは、前述の観光分野における「機会」を踏まえ、デジタルテクノロジーと地域資源を活かして新たな魅力をつくり、観光の高付加価値を実現させた事例を紹介します。

■福井県坂井市の分散型ホテル「オーベルジュほまち三國湊」

福井県坂井市の三國湊は、江戸から明治にかけて北前船交易で隆盛を極めた港町で

す。北前船交易で栄えた豪商の邸宅や町家などが数多く残る、情緒あるレトロな街並みの散策や、越前がにをははじめとする三國湊で獲れた新鮮な海産物などの美食を楽しむことができます⁽¹³⁾。また、2024年3月16日に北陸新幹線の金沢～敦賀間が延伸開業し、東京からのアクセスが容易になったため、より一層の賑わいが期待されるエリアです。

現存するいくつかの町家を改修して宿泊できるようにしたホテルが、2024年1月に開業した「オーベルジュほまち三國湊」です⁽¹⁴⁾。同ホテルは、分散型ホテルの思想を参考として、NTT三國ビルをホテルフロントに、広場はロビー、通りは廊下、10軒の町家を利用した客室・レストランというかたちで、街中に分散してホテルを形成しています(図5)。

分散型ホテルとは、「地域の廃屋や空き店舗をリノベーションし、レセプション(図5の「ホテルフロント」)、客室(同「青色の建物アイコン」)、食堂(同「レストラン」)などの機能をそれぞれの棟に分散させ、町をまるごと1つのホテルにすることで、宿泊した人たちが自ずと町を回遊し、地域そのものに活力をもたらす仕組み」と定義されています。分散型ホテルはイタリアで生まれ、過疎化した地域における空き家対策として発展しました。2006年には、イタリア国内における分散型ホテルの全国的な普及啓発を目的とした「アルベルゴ・ディフォーゾ協会」(イタリア語でAlbergo = ホテル、

Diffuso = 分散した) が設立されました。日本国内でも、空き家問題への対応が喫緊の課題になっていることや、旅行のニーズの多様化、そしてコロナ禍における3密(密集・密接・密閉)の回避もあり、より注目されるようになりました^{(15),(16)}。イタリア国内においては、アルベルゴ・ディフーズ協会が認定した分散型ホテルは2020年11月時点で67件^{(17)*1}にのぼります。

オーベルジュほまち三國湊では、実際に地域の人々が生活していた古い町家をリノベーションなどにより活かして、ホテルの客室などの施設として利用しています。そのため、前述の訪日外国人のニーズで触れた、日本の歴史や日常生活を体験したいというニーズにこたえることができ、高付加価値化を実現できます。また、地域にとっては、三國湊の街並みや景観の保全や、街歩きや調理体験などのアクティビティを通じた地域住民と観光客との交流促進による地域活性化により、地域課題の解決に寄与することができます。

同ホテルの事業オーナーを、NTT西日本など11社の共同出資により2022年10月に設立した、株式会社Actibaseふくいが務めています。また、三國湊における地域課題の解決を後押しするために、NTT西日本と、その100%子会社である株式会社地域創生Coデザイン研究所がサポートします。具体的には、観光客の行動データなどを収集し、周遊ルートの最適化やタビ아트販売などの顧客接点の増加と、データを活かしたレベニューマネジメントなどの観光地経営の効率化を行い、住民幸福度に関するKPI (Key Performance Indicator) の設定や効果検証を通じて地域全体のWell-beingをめざしていくことです⁽¹⁸⁾。本取り組みは、観光による地域課題解決の好事例になると期待しており、今後も動向を注目していきます。

■大分県インタラクティブ観光DX事業

大分県は、温泉の源泉数・湧出量共に日本一を誇り「おんせん県」として広く認知されており、別府温泉をはじめとして全国的な知名度を誇る温泉街を多数擁します。しかしながら、若年層の観光離れに加えて、

コロナ禍の影響により旅行者数や収益が大幅に減少してしまいました。そのため、特に若年層に対して、大分エリアに対する興味・関心をどのように創出・拡大させていくかが課題でした。

その課題の解決のために、別府温泉エリアを対象に、2022年10月～2023年2月にかけて、デジタル技術を活用し、「認知 > 興味・関心 > 購入・消費 > 来訪 > リピート・ファン化」のカスタマージャーニーに沿った各種企画が実施されました⁽¹⁹⁾。具体的には、PR動画のネット配信や地上波での放送(認知)、参加型ライブ配信(興味・関心)、地域OTAサイト^{*2}や物販サイトの拡張(購入・消費、来訪)、別府訪問者向けSNS企画(来訪)が行われました。加えて、PR動画やライブ配信には、若年層に効果的にアプローチするために、2.5次元俳優^{*3}を起用しました。

それらの企画のうち、2022年11月21日に行われた「参加型ライブ配信」の内容と結果について説明します。この企画は、2.5次元俳優たちが別府温泉で宴会を行い、視聴者がライブ配信を経由してスマートフォンで一緒に参加するというスタイルでした。一般的なライブ配信における「投げ銭」に相当するものとして、地域OTAサイトで別府の宿が予約されたり、物販サイトで別府の物産品が購入されたりすると、2.5次元俳優たちの宴会の料理がリアルタイムで増えていく仕組みが用意されていました。

本企画の結果、2時間のライブ配信で、宿泊予約・物販を合わせて約257万円の売上を達成し、アーカイブ配信も含めると約271万円に到達しました⁽²⁰⁾。一般的なライブ配信の「投げ銭」とは異なり、ユーザ、出演者のみならず、宿泊を伴う来訪や物産品の購入によって地域も潤う「三方よし」のかたちをつくることができ、地方創生のモデルとなり得るものだと考えています。

本事例は、元々大分県が持っていた温泉などの観光資源を活用して、ライブ配信などのデジタル技術や、推し(自分の好きな俳優やアイドル)が薦める物産品の購入などによる「推し活」、推しが訪問した場所に自分も訪問したいという「聖地巡礼」の

要素を加えることで、観光による地域活性化の可能性を示した事例です。今後の課題は、参加型ライブ配信などをきっかけに大分県の物産品の購入や来訪に至った層をファン化(リピート化)することで、再来訪や再購入につなげ、収益拡大を実現することです。そのためには、本事例のアンケートの分析で得られた「俳優の紹介したスポットへの再来訪や、前回実施できなかったことがしたい」という再来訪意向などを活用し、再来訪や再購入につなげる取り組みを継続していくことが重要です。

デジタルテクノロジーを活用した持続可能な観光地域づくりの事例

ここでは、前述の観光分野における「脅威」を踏まえ、デジタルテクノロジーを活用し、生産性を向上させたり、集中する観光客を分散させたりした事例を紹介します。

■福井県観光データ分析システム (FTAS) 活用による生産性向上

観光分野は、平休日や季節などで繁閑の差が大きいため、それに合わせて仕入量や人員配置の最適化をすることや、その差をなるべく小さくすることが生産性や収益性を向上させるうえで重要になります。その

*1 イタリアのアルベルゴ・ディフーズ協会の認定件数。内訳は、AD (Albergo Diffuso: 「分散型ホテル」)、レセプションから半径200～500 m以内に施設が集約) が54件、ADC (Albergo Diffuso di Campagna: 「田舎の分散型ホテル」)、宿泊施設が町の中心から離れた場所にあるもの) が6件、OD (Ospitalità Diffusa: 「分散されるおもてなし」)、レセプションからおおむね半径1 kmの範囲に施設が分散) が7件です^{(15),(16)}。

*2 地域OTAサイト: 国内の代表的なOTA (Online Travel Agent) は、じゃらんnet (リクルート)、楽天トラベル (楽天) ですが、地域OTAは、地域のDX推進 (オンラインでの情報発信、予約管理自動化、データ活用など) を目的に構築された独自のOTAです。本事例では、イベントなどの情報提供や旅行商品の提供を行いました。

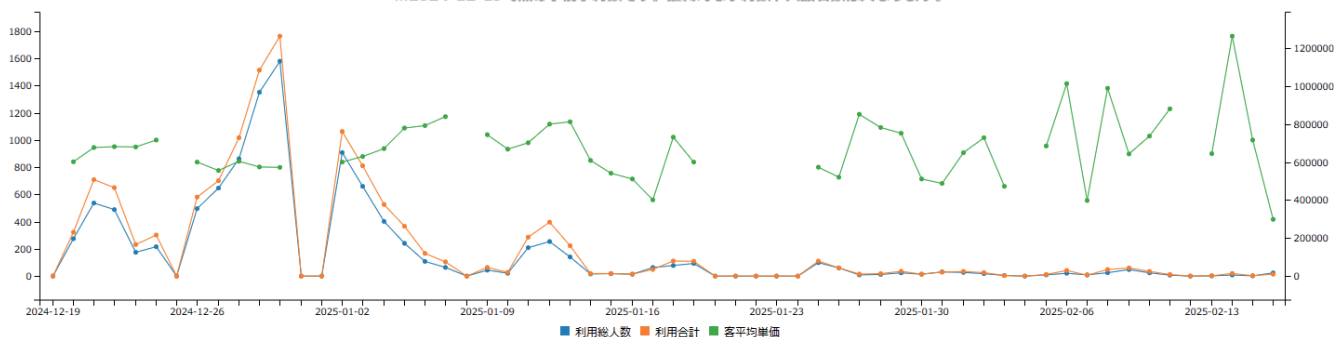
*3 2.5次元俳優: 漫画・アニメ・ゲームなどを原作とした舞台に出演する俳優。本事例では、鳥越裕貴、高橋健介、ゆうたろう、井阪郁巳の4名が起用されました。なお、この4名は共同でYouTubeチャンネル「ぼくたちのあそびば」を運営し、同チャンネルで大分県のPR動画の配信やイベントの告知を実施しました。



恐竜博物館ダッシュボード

60日先までの予約状況（人数、金額、平均単価）

※2024-12-19時点の事前予約数です。最終的な予約数や入館者数は異なります。



福井県立恐竜博物館の予約状況オープンデータです。

「CSVオープンデータダウンロード」(2024-12-19現在)

(関連リンク、福井県AI観光アドバンス - 勝山市 / スーパーアショップラブルエリア、福井県観光アンケートオープンデータ活用アプリ)

出典：「恐竜博物館ダッシュボード」<https://code4fukui.github.io/dinosaur-opendata/>

図6 恐竜博物館ダッシュボード

実現の鍵は、宿泊施設や観光施設の予約状況や人流情報をはじめとするデータを活用することで、観光客の動向を正確に把握することです。

福井県観光DX推進マーケティングデータコンソーシアムでは、生産性や収益性の向上に資する各種データを収集しオープンデータとして公開するDMP(Data Management Platform)である、福井県観光データ分析システム(FTAS:FUKUI Tourism data Analytics System)を構築しました⁽²¹⁾。観光地のセンサから取得した人流や、宿泊施設・県立恐竜博物館の予約情報、アンケート情報など8つのデータセットをFTASに連携しています。FTASの活用により、需要を踏まえた最適化を実現した事例が2点あります。

1点目は、恐竜博物館の予約データを活用し、周辺の事業者の運営の最適化を実現した事例です。具体的には、恐竜博物館の60日までの予約データをFTASに公開しており、周辺の土産店等の事業者は、いつでも最新の予約状況や来場者数の見込み等を把握することが可能になりました。それにより、仕入量や人員配置を最適化することが可能になり、生産性や収益性の向上に寄

与しています。

実際に恐竜博物館の予約データを確認した結果を図6に示します。URLにアクセスするだけで簡単に最新情報が得られるように工夫されており、データ活用に不慣れた方でも利用しやすくなっていると感じました。

2点目は、宿泊予約データを活用して、需要に応じた取り組みを実施した事例です。具体的には、あわら温泉・小浜・福井駅前のエリアにおける宿泊施設から予約人数・単価等のデータを収集し、エリア別に集計してFTASに公開しています。各宿泊施設は、このデータに基づき自エリアの予約状況から需要を把握して、価格を変動させる(閑散期には安く、繁忙期には高くする)ダイナミックプライシングを行えるようになり、収益性の向上や繋閉の差の平準化に寄与しています。また、能登半島地震発生後に、2024年1月6～8日の3連休における宿泊予約のうち23%がキャンセルされたことをFTASのオープンデータから把握し、それを踏まえて県独自の宿泊支援キャンペーンの対象地域を北関東から全国に拡大する施策を講じたことで、需要の喚起を促すことができました。

FTASは、2023年7月～2024年1月にユニークユーザ数3400人を記録し、目標値の3000人を上回っていることから、さまざまな人に活用されている様子がうかがえます。

■スペイン バルセロナ市における入場券のデジタル化

前述したとおり、有名観光地では「オーバーツーリズム」が社会問題となっています。それを解決するための1つの方法として、観光客が訪れる日時を分散させることや、施設などへの入場者数に上限を設ける方法があります。

外国人観光客数が世界第2位(2023年)のスペインにおける需要平準化の優良事例として、バルセロナ市の例を紹介します。バルセロナ市は、世界的に有名な建造物である「サグラダ・ファミリア」をはじめとして、建築家ガウディの作品群が複数あり、世界中から多くの観光客が訪れています。バルセロナ市では、観光客の集中を防ぐために、観光施設の入場券のデジタル化により、施設の滞在人数の抑制を実施しています⁽²²⁾。具体的には、サグラダ・ファミリアやグエル公園などの有名観光施設は、日時指定のデジタル入場券を施設の公式サイトやOTAサイトで販売しています。その際

に、時間帯ごとに入場券の販売数の制限を設定（サグラダ・ファミリアの場合、1時間当たり1500人）することで、施設の滞在人数を抑制しています。本施策の結果として、2点の効果がありました。

1点目は、各時間帯の入場者数が管理されているため、観光施設内が過剰に混雑せず、旅行者が快適に滞在可能になりました。それにより、バルセロナ市の観光客満足度評価の改善に寄与し、2018年には8.8点を達成（10点満点中、2014年比0.4ポイント向上）しました。

2点目は、オンライン販売により、ガイド付きツアーのセット券など、多様な商品を設定することが可能になり、収益が増加しました。また、デジタル化によりチケットの販売データを分析できるようになり、商品ラインアップの刷新や新商品の開発に役立っています。

日本国内でも、有名テーマパークにて現地での当日券販売を廃止し、入場券のデジタル化（事前予約）を実現しています。混雑緩和が求められる観光地で、今後同様の仕組みの導入が予想されます。

新技術活用による今後の展望

前編から後編にかけて、観光の起源から現状に至るまで概観してきました。本稿のむすびとして、観光分野における生成AI（人工知能）の活用事例から、観光分野の今後を展望します。

2022年11月30日のChatGPT（OpenAI社）の公開以来、生成AIが大変注目されています。生成AIは、自然言語による指示（プロンプト）により、情報の要約や専門知識に基づく回答を多言語で行えるなど、これまでの技術では困難であったさまざまなタスクをこなすことが可能です。観光分野では、これまで人間が行っていた業務の置き換えによる人手不足の解消などが生成AIに期待され、昨今、観光案内において生成AIが活用され始めています。一例を挙げますと、札幌市の地下鉄大通駅に新設された「アイヌ文化PR・AI観光案内コーナー」

では、株式会社ティファナ・ドットコムが提供する、生成AIを活用した案内システム「AIさくらさん」の運用を2024年12月16日から開始しました⁽²³⁾。観光案内所は、地域の魅力を旅行者に伝え、回遊を促進するうえで重要な拠点ですが、観光地に関する知識や多言語対応などが必要なため、人材の確保は容易ではありません。「AIさくらさん」は、生成AIにより、無人で交通案内や観光地情報を多言語で提供することが可能です。また、リモート通話機能が備わり、生成AIが回答できなかった場合には、別拠点である札幌駅の「北海道さっぽろ観光案内所」の職員が案内することも可能です。その際、生成AIが質問・回答の翻訳を行うため、言語のギャップを埋めることをサポートしてくれます。

この事例を踏まえ、これまで人間が行ってきた業務を生成AIに置き換えることで人手不足の解消に寄与しています。生成AIは現在も急速な進化が続いていますので、多様な活用が行われる可能性があります。これにより、観光分野のより一層の発展と、それによる地方創生、ひいては日本経済の活性化が期待されます。

参考文献

- (1) 国土交通省 観光庁：“旅行・観光産業の経済効果に関する調査研究（2021年版）”，2023.3.
- (2) <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20250108/k10014688261000.html>
- (3) 国土交通省 観光庁：“訪日外国人消費動向調査 2019年 年次報告書”，2020.3.
- (4) 国土交通省 観光庁：“訪日外国人消費動向調査 2023年 年次報告書”，2024.3.
- (5) 日本政府観光局：“訪日外客統計 月別推計値 2024年11月推計値”，2024.12.
- (6) 国土交通省 観光庁：“旅行・観光消費動向調査 2023年年間値（確報）”，2024.4.
- (7) 国土交通省 観光庁：“旅行・観光消費動向調査 2024年7-9月期（速報）”，2024.11.
- (8) <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOCC1046K0Q1A510C2000000/>
- (9) <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20231023/k10014234211000.html>
- (10) <https://www.ipa.go.jp/digital/chousa/discussion-paper/dx-talent-shortage.html>
- (11) https://www.mlit.go.jp/kankocho/seisaku_seido/kihonkeikaku/jizoku_kankochi/kanko-dx/content/001596702.pdf
- (12) [what-does-it-mean-for-airline-industry/](https://www.cirium.com/thoughtcloud/crowdstrike-it-outage-what-does-it-mean-for-airline-industry/)
- (13) <https://kanko-sakai.com/feature/mikuniminato/>
- (14) <https://www.homachi.jp/>
- (15) 日本交通公社：“観光文化248号「特集 2-3 分散型ホテル」”，2021.2.
- (16) <https://albergodiffuso.jp/>
- (17) 農林水産政策研究所：“ICT活性化プロジェクト【農泊】研究資料 第2号 地域資源を活用した農泊による農村活性化の現状と課題—日本、イタリア、フランスにおける事例を中心に—「第10章 イタリアにおけるアグリツーリズムとアルベルゴ・ディフーズ」”，2022.3.
- (18) <https://www.projectdesign.jp/articles/0031b1b3-5b64-4596-9df6-f5572b54c130>
- (19) <https://kanko-dx.jp/case-study/1026/>
- (20) https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/digitaldenen/menubook/2022_winter/00043.html
- (21) 国土交通省 観光庁：“令和5年度「観光DX」ナレッジ集「Next Tourism “DX” Knowledge Report」”，2024.10.
- (22) <https://www.mlit.go.jp/kankocho/content/001736089.pdf>
- (23) <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000152.000060004.html>

※各サイト情報は、執筆時点（2025年1月）で得られたものに基づきます。



株式会社情報通信総合研究所
主任研究員 小田原亨

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
上席特別研究員

澤田 宏 Hiroshi Sawada

「相関」と「複素数」を駆使したアルゴリズムで、「音源分離」と「ハードウェア向けのニューラルネットワークの訓練方法」の異なる分野の研究に挑む

解決したい問題を数式で表し、問題に対する最適な解を求める最適化問題は、従業員の出勤の頻度や時間帯が均等になるシフトの作成や、利益を最大化するための商品の生産量の決定など、あらゆる方面で応用されており、さまざまなアプローチがあります。AI（人工知能）の普及に伴い、最適化問題の解決にAIを活用する機会も増えています。こうした応用だけではなく、AIの機械学習そのものにおいても最適化が活用されています。概念は古くからある最適化のアプローチを、「音源分離」「ハードウェア向けのニューラルネットワークの訓練方法」の研究に取り入れて新たな成果を創出する、NTTコミュニケーション科学基礎研究所 澤田宏上席特別研究員に、「音源分離」「ハードウェア向けのニューラルネットワークの訓練方法」の研究アプローチとその成果、自分の技術の軸足をもって他分野との接点をとることの重要性を伺いました。



「音源分離」の研究で取り組んだ「自然勾配法」を「ハードウェア向けのニューラルネットワークの訓練方法」の研究に適用

現在、手掛けていらっしゃる研究について教えていただけますでしょうか。

「音源分離」と「ハードウェア向けのニューラルネットワークの訓練方法」に関する研究に取り組んでいます。

音源分離に関しては約20年にわたり取り組んできています。前回（2022年3月号）のインタビューでは、データや信号などの情報源の構造や特徴をうまくとらえる非負値行列因子分解（NMF：Nonnegative Matrix Factorization）と、データや信号が観測系を通じてどのようにセンサで観測されたかを推定する独立成分分析（ICA：Independent Component Analysis）を統合したILRMA（Independent Low-Rank Matrix Analysis：独立低ランク行列分析）による音源分離を紹介し、分野ごとに毎年5名選出されるIEEE（Institute of Electrical and Electronics Engineers）Signal Processing Society Distinguished Lecturer（期間2年）のうちの1人として選出された話をしました。Lecturerについてはコロナ禍により実質的な講演が開催され

たのが2023年で、オーストラリア、ニュージーランド、ドイツの研究機関でライブデモを交えてILRMAを紹介し、特にドイツでは音響信号処理に関して権威のある研究者が多数参加しており、30分を超える質疑応答が飛び交うなど、大好評でした。

さて、ILRMAは音源の数と同数かそれより多いマイクで拾った音で、部屋の残響が比較的短い場合の音源分離をするものですが、その後、音源数がマイクの数より多く、かつ部屋の残響が長い状況に有効な新たな音源分離手法、mfFCA（multi-frame Full-rank spatial Covariance Analysis）の提案を行い、国際会議ICASSP2022で発表し、IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processingに採録されました。図1に示すとおり、私はそれまでICAやILRMA、FCAなど残響が比較的短い状況で有効な音源分離手法に取り組んできました。一方、同じ研究所には、残響除去WPE（Weighted Prediction Error）を



	音源の数 ≤ マイクの数 	音源の数 > マイクの数 
残響が比較的短い	ICA ILRMA	FCA
残響が長い	WPE	mfFCA

図1 ILRMAとmfFCAの比較

研究開発した中谷智広上席特別研究者らがいますので、彼らと相談しながら残響が長い問題にもチャレンジし、異なる時間のフレーム間での相関に着目してモデル化するmfFCAを提案できました。

「ハードウェア向けのニューラルネットワークの訓練方法」はどのような研究でしょうか。

ニューラルネットワークの訓練（機械学習）は、一般的にバックプロパゲーション（誤差逆伝播法）という学習アルゴリズムで行われています。入力層、隠れ層、出力層から構成されるニューラルネットワークにおいて、出力と目標値の誤差をネットワークの各層を逆向きに伝播させることで、これらの層間の重みを調整し、効率的に目標値に近い出力を生成できる（性能向上）ようにするのがバックプロパゲーションで、これにより、ニューラルネットワークは複雑なパターンを認識し、予測や分類などの機能を実現することができます。

さて、最近では、ニューラルネットワークの電力消費が増大していることが話題になっていますが、光デバイスのようなハードウェアそのものにニューラルネットワークを実装することでこれに対応することが期待されています。一方、例えば製造におけるばらつきや、わずかな温度変化でも特性が変わるといった、ハードウェア固有の特徴があり、こうしたばらつきや特性の変化により、バックプロパゲーションがどうしても不正確なものになってしまいます。

私の研究テーマは、このように一般的な訓練方法が通用しない状況に対して、その課題を解決する「ハードウェア向けのニューラルネットワークの訓練方法」です。1つのアプローチとして、Zeroth-Order Optimization (ZOO: ゼロ次最適化) という、訓練においてパラメータを初期状態から少しずつ変化させる（摂動を与える）中で、損失関数を減少させるという良い結果が出た方向にパラメータを変化させていく方法があります。ZOOの手順を図2に示します。はじめに摂動を何個か（Q個とします）生成します。次に各摂動について、実際にハードウェアに実装されたニューラルネットワークを用いて、損失関数の変化量を評価します。こうして摂動とその評価値がそろると、近似勾配が計算でき、それに基づいてパラメータを更新します。このループの繰り返しで訓練を進めます。

通常、ニューラルネットワークのパラメータは行列の形式であり、その行列に途中経過のベクトルを掛けてさらにベクトルを得るといった計算をしています。ところが、ニューラルネットワークをハードウェアで直接実装するとき、例えば光デバイスに実装する場合、光の位相をパラメータとして連続的にずらすことで、任意のユニタリ行列（実数による直交行列を複素数へ拡張したもの）を実装し、それぞれのユニタリ行列を面的かつ層状に広げることでより大きなユニタリ行列を計算します。これは明らかに通常の行列形式のパラメータとは異なっています。特に課題となるのは、パラメータが層状に配置されるため、光の経路において多くのパラメータが寄与し、それらが互いに絡み合ってしまうという状況です（図3）。

この研究に関する最初の成果として、自然勾配法（Natural Gradient Method）の考え方に基づく新たな近似勾配の計算方法を考案し、2024年6月に米国サンフランシスコで開催された、電子設計自動化分野の世界トップカンファレンスである、Design Automation Conference (DAC) 2024で発表しました。自然勾配法は最適化のアルゴリズムの1つで、どのようにパラメータが配置されるかという構造の影響を受けにくい方法であるため、光デバイスに実装されたニューラルネットワークの訓練において、効率化や精度向上を図ることができます。私は、音源分離におけるICAに取り組む中で自然勾配法を標準的な手法として用いていましたし、近年ではバックプロパゲーションを用いる通常のニューラルネットワークの訓練でも使われていて、今回のZOOによる訓練でも使えるのではないかと発想し研究に取り組みました。通常のニューラルネットワークの訓練で自然勾配法を用いようとす

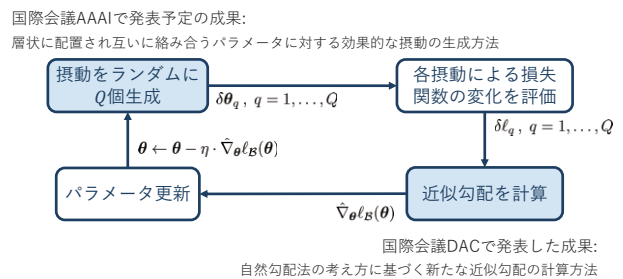


図2 ゼロ次最適化ZOOの手順と成果の位置付け

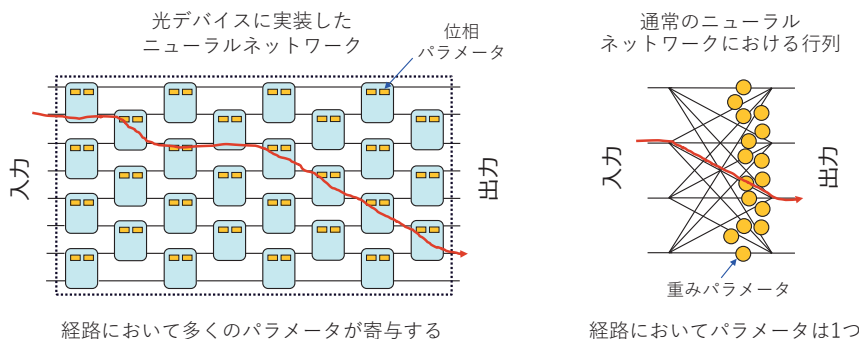


図3 光の経路において互いに絡み合うパラメータ（左）と通常の行列形式のパラメータ（右）

ると、パラメータ数×パラメータ数の巨大な行列の逆行列を計算する必要があるので、現実的には数千以上のパラメータ数でその計算は不可能になり、いくつかの近似手法が提案されています。一方、本成果では、摂動数 Q ×摂動数 Q の行列の逆行列を計算する手法を提案しましたので、これにより摂動数 Q が現実的には数百程度となるため、少ない計算オーバーヘッドで実行できるものとなっています。

音源分離についてはmfFCAで一区切りが付き、現在は研究の軸足を「ハードウェア向けのニューラルネットワークの訓練方法」にシフトしてきているのですが、前回紹介した、次世代の研究者育成をめざして新入社員や入社3年目あたりの社員向けの技術講座「機械学習」も継続しています。始めて8年目となりますが、ここ数年はほぼ同じ内容〔最初の導入部分で最近の生成AI（人工知能）ブームなどには触れますが〕のため、説明が安定して分かりやすいためか、「本質的な説明や踏み込んだ内容を聞けた」と好評です。こうした取り組みを通じて、私自身もニューラルネットワークについてかなり理解が深まり、今回の研究においてもこれが活かしていることはいうまでもありません。

最近新しい成果が出て国際会議で発表するというホットな話題があるそうですね。

最新の情報なのですが、次の成果としてAI分野の最大級の学会である、AAAI (Association for the Advancement of Artificial Intelligence : 米国人工知能学会) に投稿していた論文が2024年12月に採録されました。そして、2025年2月末から始まる国際会議、AAAI-25で発表予定です。本成果の位置付けは図2において摂動をランダムに生成する部分にあたります。ZOOにおいて通常は、多変量の標準正規分布からランダムに摂動を生成します。これはパラメータの独立性が高い場合には有効な手法です。しかし、すでに述べたとおり、光ニューラルネットワークではパラメータが互いに絡み合うため、どのようなランダムから摂動を生成すべきか、ということにも配慮すべきであると思いつきました。本成果として、面的かつ層状に構成されるユニタリ行列に対して、すべてのパラメータ間の相関を計算し、その相関を打ち消すように摂動を与える方法を考案しました。

自分の技術の軸足を定め、他の分野の人との接点をとることで成果を生み出す

研究者として心掛けていることを教えてください。

私の研究は、デジタル計算機的设计自動化、音源分離、ハードウェアを中心とした光ニューラルネットワークといったように、分野が変わってきています。途中で研究部長や企画部長も経験しており、そのときは自身の専門とは異なるほかの研究の話聞く機会もありました。こうした中で、専門とする技術を軸足として、極力その軸足となる技術に何らかのかたちでかかわってみたいと

の思いを持っています。全く異なる分野で研究を進める場合、本当に成果を出せるのか不安に思うこともあります。しかし、軸足の技術が共通であれば、こうした不安も払拭されます。軸足となる共通の技術という意味では、例えば前述の設計自動化、音源分離、光ニューラルネットワークいずれにおいても、共通的にコアとなっているところは、「相関」と「複素数」を駆使したアルゴリズムなのです。

興味を持った分野をテーマにしようか考えるときに、共通の技術を確認して、それをベースに次のテーマを設定するというアプローチをしている、つまり興味を持つ分野の入り口が共通の技術となっているため、これまでの研究テーマは結果として共通の技術でつながってきているのです。

そして、異なる分野の人との接点を意識し、できれば連携をしていきたいと思っています。ここ10年ぐらい、AIや、ビッグデータ・機械学習等が注目されるようになり、さまざまな分野で利用されるようになりました。私自身、信号処理や機械学習を中心に研究をする中で、研究所をまたいだコロキウム等に参加してきました。信号処理や機械学習の研究の中だけでは、「相関」と「複素数」等に関する数式を操作するだけの範囲にとどまりそうだったのですが、応用分野の方々とコロキウムで意見交換や議論を進めることで、研究の出口に対して多くの知見を得ることができました。最近は音声音響、言語、ハートタッチング、人間研究等テーマのコロキウムが研究所をまたぐかたちで同時多発的に発生し、議論の成果とともに収束しており、非常に良いことだと思います。私は、過去にはコロキウムを仕掛ける側でもありましたが、常に仕掛けるわけではなく、興味のある分野について積極的に参加することが重要だと思います。

得意分野を軸足に補完関係、協力関係を構築し、研究を良い方向へ導く

後進の研究者へのメッセージをお願いします。

国際会議などにおける論文採択は非常に難度が高いのですが、挑戦し続けていくことは大切だ、と前回話しました。それに加えて、長期間研究者を続けていると常に1つのテーマで研究しているわけではなく、テーマが変わることが一般的です。また、ほかの分野の人との共同研究も今後ますます重要になるばかりではなく、その機会は増えていくと思います。こうしたときに、自分の軸足となる技術を持つことが重要で、これにより新しい分野で自分が活躍する場を見出すことができるのではないのでしょうか。今後技術分野はさらに細分化されていくことは十分予想されるのですが、こうした環境下ですべての分野において実力を十分発揮できるスーパー研究者がいるわけではありません。だからこそ、「これだけは」というような自分の得意分野を軸足として、それをそれぞれが示すことで補完関係や協力関係を構築することができ、それが相乗効果を生んで研究を良い方向へ進めることができるのではないのでしょうか。




NTTコミュニケーションズ
エバンジェリスト

西塚 要 Kaname Nishizuka

DDoS対策のための国際標準「DOTSプロトコル」

2024年末から2025年はじめにかけて、日本の公共機関、航空会社、金融会社等多くの機関に、マルウェアによりボットと化した端末から大量のトラフィックが送信され、コンピュータが停止等となるDDoS (Distributed Denial of Service) 攻撃が頻発し、それぞれのサービス提供に影響がでました。DDoS攻撃は古くからあるサイバー攻撃で、PCなどがボットとして遠隔操作されているため、攻撃者の特定が困難なこと、未然防止が困難なこと、攻撃を受けた機関単独での解決が困難なことから、対策が急務であり、国際的な課題にもなっています。こうしたDDoS攻撃への対策である新しいプロトコルDOTS (DDoS Open Threat Signaling) を開発し、IETF (Internet Engineering Task Force) において国際標準化を行った、NTTコミュニケーションズ 西塚要氏に、DOTSプロトコル、IETFにおける標準化、コンフォートゾーンにとどまらずに積極的にチャレンジする思いを伺いました。



 **DDoS対策の自動化、複数の対策事業者に対して共通のプロトコルで防御依頼、別の対策事業者を含む事業者間連携を実現するDOTSプロトコル**

現在、手掛けている業務の概要をお聞かせいただけますか。

NTTコミュニケーションズの技術開発部（現：イノベーションセンター）で「DDoS (Distributed Denial of Service) 対策のための新しいプロトコルDOTS (DDoS Open Threat Signaling)」に関する研究開発に取り組んでいました（DOTS標準化後に現所属に異動）。

インターネットにおけるサイバー攻撃やセキュリティに関する課題の1つにDDoS攻撃があります。DDoS攻撃は、攻撃者がマルウェアに感染した端末（遠隔操作を可能とする：ボットネット）を利用し、攻撃者の命令によりターゲットとなるコンピュータに過剰なトラフィックを送ることで、正常なサービスを妨害するサイバー攻撃です。DDoS攻撃自体の技術は古くから存在していましたが、インターネットの普及とともにその脅威が増大し、2000年代初頭から急速にサイバーセキュリティの重要課題となりました。今日では攻撃手法はますます高度化し、Tbit/s級の強力な攻撃が可能となり、依然として大きな脅威として存在しています。

各企業や組織が独自にDDoS対策を施しているものの、相互に連携できず、効果が限定的である現状があります。大量のトラフィックを送信しているのはボットネットと化した端末であり、それを操作する攻撃者を突き止めるのは多くの場合で困難で、さらに攻撃を受けた側もシステムやネットワーク自身がほぼ停止状態で、自ら大量の攻撃トラフィックを判別して事前に破棄することも不可能であるため、攻撃を受けている組織がその組織単独で解決することができず、DDoS攻撃は解決が難しい攻撃手法になっています。

いったんDDoS攻撃が発生すると、攻撃トラフィックが上流のネットワーク帯域を埋めてしまうため、上流のネットワーク事業者に対策を依頼する必要があります。従来、この依頼は電話やメールで行われていましたが、オペレーターどうしのコミュニケーションには時間がかかり、サービスへの影響が長期化する問題がありました。このような状況において、DDoS攻撃の脅威が深刻化していく中で、対策技術が国際的に整備されていないことが大きな課題となっていました。

こうしたDDoS攻撃に対して組織間の連携をベースとして対応するプロトコルがDOTSであり、IETF (Internet Engineering Task Force) において標準化されました。DOTSは、攻撃を受けているエンティティ（コンピュータやネットワーク）や、攻撃

元の特定等、これまでに共通的に定義されていなかった防御主体側が守るために必要な情報を伝達するためのシグナリングのプロトコルで、これによりDDoS対策の自動化、より大規模な防御システムの構築、ベンダ独自のソリューションからの開放を目的としており、パケットフィルタアウトソーシングとセキュリティオートメーションを、相互信頼のもとで実現する技術です(図1)。

DOTSプロトコルの動作は、①利用者側のDOTSがインプリメントされたクライアント(DOTSクライアント)から提供者側のDOTSがインプリメントされたサーバ(DOTSサーバ)に対して、攻撃を受けているIPアドレスなどの情報とともに防御を依頼し、②依頼を受けたDOTSサーバ側は、認証および防御依頼のバリデーションを実施したうえでフィルタリングやDPI(Deep Packet Inspection)等によるパケット弁別・破棄等のDDoS対策を実施する、という手順になります。

DOTSプロトコルにより、①人間を介さない防御受付のインタフェースが規定されることで、DDoS対策の自動化が可能になる(図2(a))、②複数の対策事業者に対して共通のプロトコルで防御依頼をすることができるようになる(図2(b))、③キャパシティオーバーの際に別の対策事業者に防御依頼をするような事業者間連携を実現できる(図2(c))といった効用が期待できます。

DOTSのIETFにおける国際標準化の経緯を教えてください。

IETFはインターネットで利用される技術・プロトコル等の標準化を行うフォーラムで、ITU-T(International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector)のような法人や国などのメンバーシップにより参加してデジュール標準を策定する団体に対して、技術者等が個人として自由に参加するフォーラム標準を策定する団体です。検討課題ごとにWG(Working Group)が設置され、自由に投稿された提案(Internet Draft)をベースに、メーリングリストや年3回の全体会議で各規格の仕様の検討が行われています。検討の中では複数による仕様実装と相互接続性の確認が行われるのが特徴です。こうした検討結果はそれに引き続くいくつかの手続きの後にRFC(Request For Comments)としてドキュメント化され、国際標準となります。

さて、DDoS攻撃対策技術が国際的に整備されていないことが大きな課題となっていることを背景に、2015年6月にIETFにおいてDOTS WGが立ち上げられ、DDoS攻撃を受けているシステムと防御システムが相互に連携し、攻撃を迅速に検知・緩和できる通信プロトコルの策定が始まりました。私は、DOTS WGの立ち上げから参加しましたが、活動初期はごく少数でプロトコルの目標や必要な仕様について議論を重ねていました。しかし、Internet Draftの理論検討だけではその有用性に確信を持つことができず、実証にかかわる議論を深めるために、年3回の会合と併催のIETFハッカソンに10回近く継続して参加しました。こうした中、私たちは、自社と他社のDDoS対策サービスの連携を念頭に、2017年にDOTSを世界初実装し、OSS(Open Source

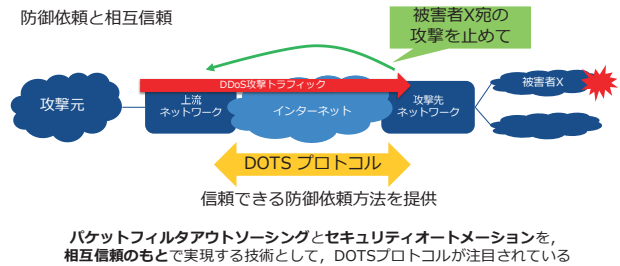


図1 DOTSプロトコルの概要

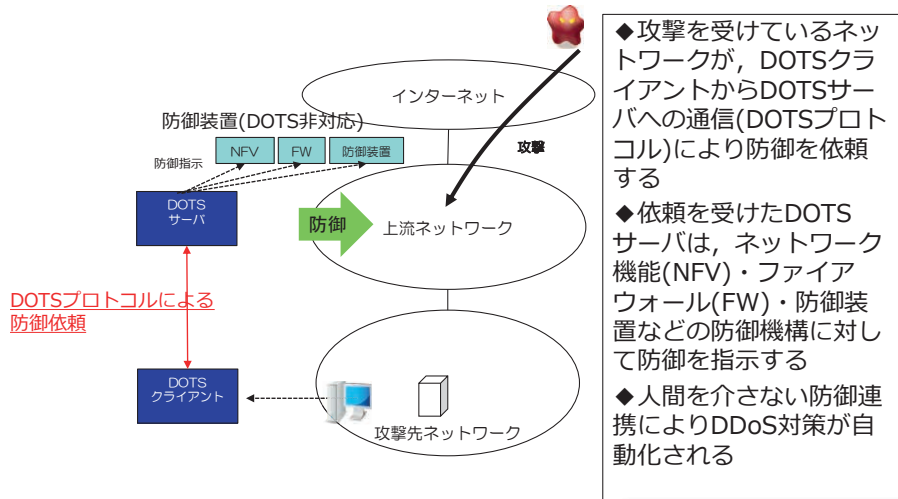
Software)化(リファレンス実装)し、NTTコミュニケーションズのネットワークを利用した実環境を構築しました。引き続き英国のDDoS対策装置ベンダがDOTSプロトコルの実装を行い、NTTコミュニケーションズの実環境との相互接続試験を行い、最終的にテスト用に発生させたDDoS攻撃を止めることに成功しました。当初は様子見状態であったRadware, Verisign, Cisco, Orangeなどの企業も、DOTS WGに人を派遣し、精力的に活動するようになり、DOTSプロトコルを実装する組織が徐々に増え、実証内容も次第に実践的な内容になりました。こうした検討、実証等を経て、DOTSプロトコルが13件のRFCとしてIETFとして国際標準となり、2023年にDOTS WGも終了しました。

これらの取り組みの中で、私は筆頭AuthorとしてのInternet Draftを3回提案し、そのうちの1つはRFC 9133(Controlling Filtering Rules Using Distributed Denial-of-Service Open Threat Signaling(DOTS)Signal Channel)としてProposed Standardになりました。その他、ユースケースを記したRFC 8903にも自身の運用経験に基づいた知見を数多く記載して貢献しています。また、IETFハッカソンにおいては成果発表が優れたプロジェクトに対する表彰、「Best Open Source Project賞」を受賞しました。さらに、IETFのDOTS WGにおけるDDoS攻撃対策のためのプロトコル策定への貢献に対して、2024年に一般社団法人情報通信技術委員会(TTC)から、情報通信技術賞TTC会長表彰をいただきました。

○ IETFへの参加がスキル向上、意識向上の貴重な経験

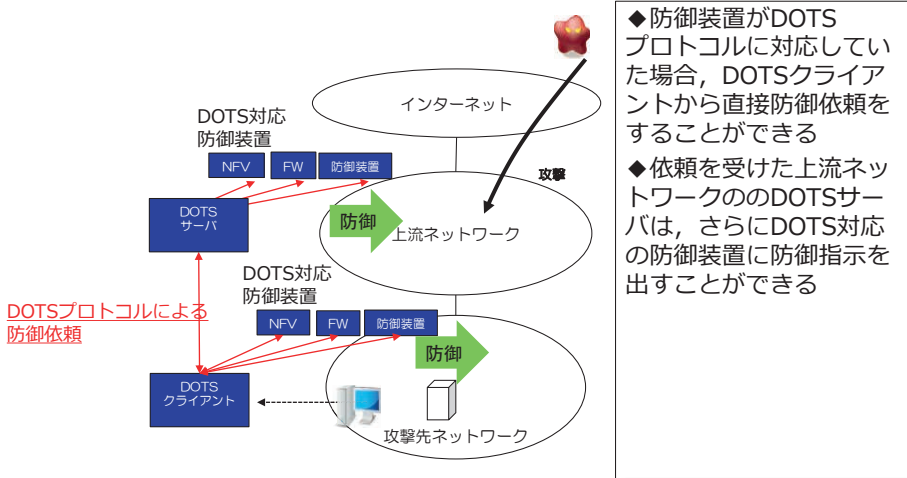
開発者としてのスキルはどのように磨いているのでしょうか。そして、IETFに参加した経験はどのような意識につながったのでしょうか。

私は2006年にNTTコミュニケーションズに入社し、OCNのアクセス系を中心としたネットワークの開発、お客さまであるISPのネットワークの開発保守に従事した後、研究開発の部署に異動しました。そして、IPv4アドレスの枯渇問題とIPv6技術の展開、トラフィックの分析・予測・異常検知とそれに基づくDDoS検知とDDoS対策等ISPが抱えている課題を解決する技術開発を行ってきました。



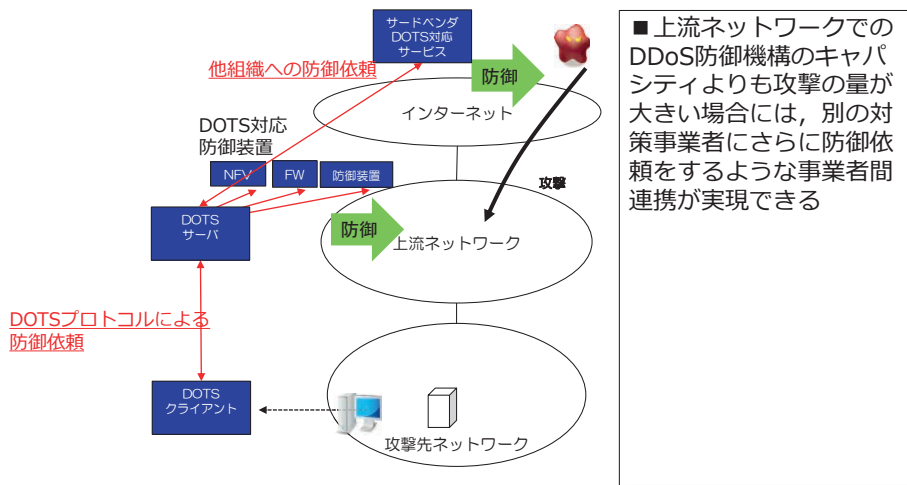
- ◆ 攻撃を受けているネットワークが、DOTSクライアントからDOTSサーバへの通信(DOTSプロトコル)により防御を依頼する
- ◆ 依頼を受けたDOTSサーバは、ネットワーク機能(NFV)・ファイアウォール(FW)・防御装置などの防御機構に対して防御を指示する
- ◆ 人間を介さない防御連携によりDDoS対策が自動化される

(a) DDoS対策の自動化



- ◆ 防御装置がDOTSプロトコルに対応していた場合、DOTSクライアントから直接防御依頼をすることができる
- ◆ 依頼を受けた上流ネットワークのDOTSサーバは、さらにDOTS対応の防御装置に防御指示を出すことができる

(b) 防御依頼の共通化



- 上流ネットワークでのDDoS防御機構のキャパシティよりも攻撃の量が大い場合には、別の対策事業者にさらに防御依頼をするような事業者間連携が実現できる

(c) 別の事業者との事業者間連携

図2 DOTSプロトコルの効用

学生時代の研究は、機械学習・データ分析系のテーマであり、入社と同時にインターネットを中心としたネットワーク系の開発を行うことになり、インターネット技術・標準・社会に関連する開発を推進することとなりました。このような環境に対応していくために、日常業務に関係するところから勉強し、経験を積むことでそれを自分のスキルとして定着させてきました。トラフィックの分析・予測・異常検知に関しては学生時代の専門知識が活かすことはいうまでもありません。

さて、私は事業会社としては珍しくIETFで標準化に関する活動も行ってきました。IPv4アドレスの枯渇問題に取り組み出したころからIETFに参加し始めたのですが、標準化の会合に参加するためには、技術的な専門性や英語力はもちろん必要となりますが、標準化に向けた手続きや、ドキュメント作成・プレゼンテーションの作法等、独特な知識が必要となります。日本からは多くの諸先輩方がIETFの場で活躍しており、こういった方々の行動を見よう見まねで自分の中に取り込んでできました。そうした中で自然とWIDEプロジェクト系の方々と連携も出てきました。初めてのInternet Draftは、IPv4 枯渇対策技術のうちのNAT (Network Address Translation) 技術の実装上の課題に関するものなのですが、作法的なものは何も知らずに提出し、今思い返すと非常に未熟で恥ずかしいのですが、それでも上司や諸先輩方(特にWIDE プロジェクトの方々)にご指導をいただき、次のInternet Draftへとつなげることができました。こうした経験から、何に関しても自ら飛び込んでやってみようという思いが強くなり、日本の技術者たちに知見を伝える活動も積極的に行ってきました。

IETFに限らず欧米から標準化の活動に参加する人のほとんどは標準化を専業として活動しています(標準をつくることそのものが成果)が、日本から参加する人は自ら研究開発を行う傍らで標準化活動を行っている(研究開発の成果の出口としての標準化)人がほとんどです。こうした環境のギャップのある中で、英語で議論を進めて標準を策定していくこととなります。英語については、こちらの伝えたいことを伝えようと話をすれば、たとえ拙い英語であっても何とか伝わるので、とにかくこちらから積極的に話しかけるようになりました。ただし、当然の話ですが、伝えたいこと(自分の考え)をしっかりと持っていることが必須です。そして、議論される技術は研究開発の成果であるため、人から伝わったものではなく、自らが検証・確認したものです。これは標準化専業の参加者の議論の戦術に勝る、説得力のある材料になります。以前上司から言われて心に残っている、日常の業務において「自ら手を動かす」「人からの伝言も自ら確認する」ことの大切さそのものだと思います。

DOTS プロトコルがIETFの標準となった後に異動されたそうですが、今後どのような業務経験をしたいのでしょうか。

DOTS プロトコルはIETF 標準となり、DOTS WGも終了し、今後製品への実装、マーケットへの展開というフェーズになります。

DOTS WGでは、各国のキャリアだけでなくDDoS対策装置のベンダが協力して標準化を進めておりましたが、多くのベンダがすでに独自のAPI (Application Programming Interface) を持っており、これとの兼ね合いでマーケットへの展開を模索している状況です。NTTコミュニケーションズとしてはすでにDOTSを実装した実績があるため、それを事業や市場の中でどのように展開していくのか検討しており、DOTSの開発という意味では一区切りついたタイミングで私は異動しました。

私は、元々DDoS対策も含めて、トラフィックの分析を自分のライフワーク的に思っているところがあり、現在の業務はDDoS対策等の対策側ではなく、トラフィック等の異常検知等、分析側の比重が高まっています。そのためのデータ基盤を構築していわゆるビッグデータ解析を行う中で、機械学習をはじめとするAI (人工知能) 技術を使ってトラフィックの異常なところを探す技術開発と、それに基づいた対策に関する技術開発を行っています。しばらくはこのテーマに取り組むこととなりますが、将来的にもライフワークであるトラフィック分析にかかわりのある技術に取り組んでいきたいと思っています。

 **自分のコンフォートゾーンにとどまらず、少し無理に感じたところでも勇気をもって挑戦**

後進や読者へのメッセージをお願いします。

私は、IETFの活動で刺激を受けたところが多いのですが、自分のコンフォートゾーン、自分の知っている範囲にとどまらないで、少し無理に感じたところでも勇気をもって挑戦してみることが大事だと思います。最初の一步を踏み出してみることは、自分を成長させる一番の起爆剤であり、奮起させる材料にもなるので、どんどんチャレンジしてほしいと思います。

また、事業会社では機会が少ないとは思いますが、NTTグループに限らず、国際標準化の場に出てほしいと思います。私が参加してきたIETFは、日本人の発言力がまだまだ弱いと感じており、日本人の参加者どうしの会話の中で、これは層の薄さに起因するものではないか、という意見も出ています。標準化の場はルールをつくる場であり、そこで活躍することはまさにゲームチェンジャーになるということです。一度標準になるとそれに従うことにはなるのですが、不都合が見つかった場合、標準を上回る新しい発想、技術がある場合は、標準の変更や新しい標準の策定等、実際に行われているのです。つまり、いつでもゲームチェンジができるということです。IETFのハッカソンはまさにその典型的な例だと思います。そういった場にも積極的に参加してほしいと思います。



NTT社会情報研究所
特別研究員

佐々木 悠 Yu Sasaki

IoT向け軽量共通鍵暗号の標準化と実装保護技術の研究

人間どうしのコミュニケーション用途だけではなく、さまざまなデバイスもインターネットにつながる時代になりました。その反面、インターネット上で流通する情報は、多岐にわたり個人情報や機密情報だけでなく、デバイスが発する情報が傍受され、犯罪などに悪用されるリスクも高まっています。通信の第三者の傍受を防ぐ「共通鍵暗号」の分野で、IoT (Internet of Things) デバイスの通信を想定した「軽量暗号」を研究されている佐々木悠特別研究員にお話を伺いました。



◆PROFILE: 2007年電気通信大学電気通信学研究科情報通信工学専攻博士前期課程修了。同年、日本電信電話株式会社入社。2010年電気通信大学電気通信学研究科情報通信工学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。2015～2016年Nanyang Technological University (NTU) にシニアリサーチフェローとして赴任。2022年から現在までアメリカ国立標準技術研究所(NIST)に海外客員研究員として赴任中。世界中の通信が暗号で保護される世界の実現のために安全性共通鍵暗号方式の設計・安全性解析研究に従事。2023年 International Association for Cryptologic Research (IACR) テストオブタイムアワード、2019年 第75回(平成30年度)電子情報通信学会 論文賞。

IoTで活用するような末端の通信まですべて暗号化し、あらゆる機器が暗号により守られる世界をめざす

■どのような研究をされているのでしょうか。

私の研究テーマは入社してからずっと同じで、共通鍵暗号について研究しています。暗号には公開鍵暗号と共通鍵暗号の分野があり、共通鍵暗号はその演算の速さや実装コストの低さから日常生活で利用するデータ通信の暗号化に使われています。共通鍵暗号の中にはデファクトとして国際的に標準化された暗号もあるのですが、設計の妥当性が不透明であるという問題もあるため、最先端の理論を取り入れ、安全と利便性がうまく両立されたことが誰から見ても分かるような暗号の設計をめざしています。

さらに、安全性評価が不十分な共通鍵暗号は、弱点をついて攻撃されると通信の情報を盗聴されるおそれもあります。それを防ぐ堅牢な要塞をつくるためには、敵の攻撃を事前に想定する必要があります。入社してからは「アタック」という暗号の解読技術の習得をしていました。アタックは公開された暗号に対し、さまざまな攻撃アプローチを試すことにより脆弱性を見つけ出し、安全ではないことを示します。もちろんアタック自体が目的ではなく弱点を克服し、すべての通信が守られている世界をめざしています。

公開鍵暗号の世界ではその安全性を「数学的に解読困難と証明されている問題」に帰着することで証明することができるのですが、私が研究している共通鍵暗号は職人の手により性能をチューニングしてセキュリティを担保するという、絶妙なバランスを取らなければいけない分野です。想定される攻撃や、過去の攻撃パターンなどを網羅して対策し、新たなアプローチでの攻撃も予測して対策するなど、職人気質な専門性が求められます。

■この研究がもたらす影響について教えてください。

共通鍵暗号の活用例として、IoTのような末端の通信に使われる「軽量暗号」があります。近年ではスマートシティプロジェクトなどが流行っている中で、スマートセンサなどが注目されています。もしすべてのガスメータにセンサが搭載されIP通信が可能になり、使用者のデータをガス会社がセンサから集め、月ごとの使用量と金額を算出して人を介せず自動的に請求できるとします。では、そのガスメータの情報を暗号化せずにそのまま送るとどうなるのでしょうか。

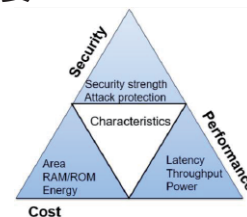
そのまま通信した電波を傍受する悪人に情報が漏れてしまう可能性があります。それがどれぐらい問題になるかというと、「ここしばらくガス代が0円のため、この人は今留守なのだろう」ということが泥棒に知られてしまいます。ほかにも、ジョギングするときにGPSと連動して走行距離やタイム、ルートを地図上に表示するようなチップの通信が暗号化されていなければ、利用者の

軽量暗号に関するNISTの見解

- 汎用PCから限られたリソースを持つデバイス（RFIDタグ、センサー、IoT）への遷移に対応した暗号が必要。
- 暗号アルゴリズムの重量とは、ターゲットとなるデバイス・実装環境に依存した評価方法で計測される実装性能を指す。
 - ハード：回路規模、レイテンシ、処理速度、消費電力等
 - ソフト：RAMサイズ、コードサイズ、処理速度等
- さまざまな利用用途があるため、全性能で優れた暗号を1つ選ぶことは難しい。最適なトレードオフが重要。

汎用暗号では対応できない例

- AESの暗号化・複合を実装するだけのメモリがない16-bit マイコンが存在。
- ハッシュ関数SHA-3はもっと大きなメモリが必要。軽量版のSHA-3も存在するがまだ標準化されていない。



以下の資料から要点抽出
<https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Presentations/nist-lwc-standardization/images-media/session1-turan-update-on-nist-lwc-standardization.pdf>

図 軽量暗号に関するNISTの見解

住所や生活パターンが漏洩します。それを防ぐため、末端のユーザに至るすべての情報を暗号で守ることが私の目標です。

最近では、その職人が悪い人で自分たちだけが簡単に暗号化された通信を解読できるようなバックドアを仕込む可能性もあるため、自分の設計した暗号の安全性を第三者に評価してもらう傾向があります。公の場で暗号の仕様を全部公開し透明性を高め、アカデミック等、公平な第三者から評価を受け安全性を認めてもらうことで信頼性を高め、「これは良い暗号だ」というコンセンサスがコミュニティにできれば、それを標準化して世界中の人にも私たちの技術を使ってもらえます。私はそこをめざして研究しており、暗号の標準化を見据えた設計を心掛けています。

NISTのコンペティションでは複数チームに所属し、暗号設計の選択肢を広げる

■研究環境について教えてください。

基礎的な研究は計算機科学に近く、例えば量子コンピュータが完成した際に今の暗号はどれぐらいのコストで解読されてしまうのかという未来について議論をする場合、想定する量子コンピュータはまだ存在しないので、紙と鉛筆でシミュレートするしかありません。このようなケースは頻繁に発生します。

私の研究テーマの1つは公開されている暗号への「アタック」ですが、アタックを考える際も誰かがつくった暗号を理解するこ

とから始めますので、まずは公開されているマニュアルやスペックを読み込みます。複数人でアタックを検討する場合は大学の研究室のような小部屋に皆で集まり資料を読みあさって議論しています。

その後、実際にこの暗号の脆弱性はどこなのか、過去に知られた攻撃が適用できないか、などの検証段階になると、最近では自動評価ツールをつくり、計算機サーバで実際に攻撃できるかを検討していきます。

現在私は米国のワシントンD.C.からすぐ近くにあるアメリカ国立標準技術研究所（NIST）に赴任しています。NISTは米国政府が使う標準技術を決める機関で、以前までは世界中からコンペティション形式で良い暗号を募集しており、私も複数チームに所属して応募していました。

チーム内の役割は安全性評価や各暗号のコンポーネント設計、速度計測など複数のタスクがあり、各専門家が集まり分業作業で暗号をつくり上げます。その中で私が専門としている軽量暗号の場合は使用する機器の問題も考えなければなりません⁽¹⁾ (図)。

対象がPCであれば電源から電気が供給されますが、IoTの場合はチップに電池が組み込まれていて、電池が切れたらもうその機械は使えなくなります。メモリもなく、そこまで高速に実装できるCPUもなく、使える電池は限られている、そういう状況で何を求めるのかを考え選択する必要があります。

しかし、高速演算と低消費電力は相反した目標ですので、両方を同時に達成することはできません。そのため特定のアプリケー



ションを考慮してそれに最適なバランスを実現するものを選びなければいけないと考えています。

複数チームに参加している理由はそこにあり、このアプローチが得意なのはこのチーム、というようにチームにより特性が異なるため、より多くの選択肢を見つけるために複数のチームに参加していました。

つくり上げた暗号の安全性を示して「標準化」させ、多くの方に利用していただく未来をめざす

■現時点での研究の成果や、これからの展望について教えてください。

暗号研究は数学の研究に似た部分があり、理論的研究の側面があります。その点で現実利用を進めるといふより、数学のように暗号理論を突き詰めるという作業をしています。この側面での成果といえば、多くの論文が採録されたり、私たちの活動の場でありコミュニティである国際暗号学会 (IACR) から少しずつ重要な仕事を任されることが増えてきました。個人としても、NIST のコンペで最終選考に残るなど、少しずつ認められてきたと感じています。

研究所として「共通鍵暗号の研究の権威になる」ことを目標としており、NTT の名前とともに「共通鍵暗号だったらNTT の佐々木に聞け」と言われるように努力していきます。

また、自分が見つけた暗号を多くの方に利用していただきたいとも考えています。暗号を使ってもらう方法は2つあり、標準化して皆さんが自由に使っていただく方法と、実際にそのプロダクトをつくる中で自分たちの暗号の使用を提案する方法があります。

具体的にはSKINNYという軽量暗号を設計したのですが、2022年にISOで標準化されており、自分が見つけた暗号も少しずつ使われる機会が出てきたと感じています。そのSKINNYの利用についていうとプリミティブとモードの2つのキーワードがあります。プリミティブとはエンジン設計、モードとはエンジンをどのように使ってどのような機能を実現するのかという使い方に該当し、SKINNYはそのエンジン部分にあたります。

数カ月前からは、私たちが提案していた「SKINNYを使ってどんな機能を実現するかというモード部分の標準化」についてもISOから国際標準化を開始する合意が取れたため、モードの標準化を進めているところです。

■NISTに赴任された経緯を教えてください。

1年の留学ではなく複数年にわたる長期の海外赴任は研究所の中でもかなり例外的かもしれません。NISTは、サイバーセキュリティの研究がとても盛んな場所にあります。従来、NTTとNISTには直接パイプはなかったのですが、5～6年前からNIST

のコンピュータセキュリティ部門をとおして、NTTの研究者を受け入れてもらえることになりました。

前任者が3年ほどNISTに赴任し、任期が終わるころに誰か後任はいないかという話があったときに、当時のNISTの暗号研究者が私のスキルを知っていたこともあり、私を後任に選んでいただきました。

米国の標準技術は実質的な世界標準なので、米国の政府の組織で標準化の仕組みを学ぶことや、標準化の裏側で何が走っているかをみて今後の活動に活かしたいというモチベーションでしたので、3年間でとても貴重な経験をさせてもらいました。

近年、NISTのコンペティションは透明性の確保はできてもNISTの負荷が大きいと、NISTが主になって標準技術を決めていくという流れになってきました。そうになると、パブリックコメントとして世界中誰でも意見はできても、最終的に判断するのはNISTのため、標準化を決めるにあたってその内部にいることは非常に重要です。そのため、任期を延長してあと2年NISTに滞留し、標準を決める流れを直近でみていきたいと思っています。

■この研究における課題や困難だったことをお伺いできますでしょうか。

先ほど研究チームの分業体制について話をしましたが、やはり自分1人では専門性が不足するため、その各業務を各タスクの専門家をお願いをしなければいけません。そうすると、人脈などヒューマンネットワークもとても重要です。自分と同じ熱意と感覚の人を見極めるのは難しく苦勞することが多いのですが、暗号研究者は仲が良い傾向があります。

まだ人脈がなく知識も不足していた時期、少しビクビクしながらも海外の研究会などに参加していましたが、急に参加者全員でグループディスカッションが始まったりします。そうしていくうちに少しずつ参加者の得意分野が分かり、自分のことも知ってもらうことで人脈が広がっていきました。今では国際的な研究会などに積極的に参加し、その世界でもっとも技術が優れている人を見つけています。

また、サイバーセキュリティと同様、暗号の研究も相当トレンドの流れが速く、アンテナを張り続けていないとあっという間に流行り廃りが変わります。2015年ぐらいまでは量子コンピュータを共通鍵暗号に応用する話はほとんど聞きませんでしたが、数年後にはとてもアクティブに研究が始まりましたし、今は当然AI (人工知能) を暗号に応用することも研究されています。暗号の設計でも多くの方がトライをしていますが、暗号の設計や暗号解読を全部AIに任せることでできていません。しかし、AI関連の論文や研究はすごく流行っており、そういうところでも流行り廃りを感じます。

■この研究の魅力はどのようなところにありますか。

共通鍵暗号は知恵比べのようなものだと思います。公開鍵

暗号はすべてを数学で議論できる分野ですが、共通鍵暗号は職人氣質な分野であり、やはり職人の腕を競うのは楽しいものです。カジュアルな話をすると、私は昔からパズル作家をしており、ひねりが効いた数独やクロスワードの問題をつくって知恵比べをするのがもともと好きだったので、同じようにアイデア1つで良いものもできるし、逆に悪いものにするところに魅力を感じています。

例えばアタックにおいて、皆が安全だと思って自分もその弱点を見つけられ、しかるべき機関に報告できたときには、達成感があります。

ほかにも、暗号設計が完成して、その設計が良いものだと思われた瞬間というのはやはり嬉しいものです。ISOで標準化された瞬間や、NISTのコンペティションで第1ラウンド、第2ラウンド、ファイナリストと勝ち進んだところは少しゲーム感覚を彷彿させるような楽しみがありました。

■若き研究者の方や学生、ビジネスパートナーへのメッセージをお願いします。

日本にいたときは学生の方と共同研究する機会があり、そういうときには研究者の道も楽しいよという話をしていました。

その楽しさはいくつもありますが、私自身は国を越えて活動できるのが楽しいと感じるので、今NISTにいるのもそうですが価値観も違えば生活も違うのに、数式なり計算式の話で語り合えることも面白く思います。出張に行くだけでもいいと思いますし、そういう異文化の体験はとても楽しく学びがありますので、国際的な研究をすることはお勧めです。

基礎研究をやりたい方に関しては、研究のアイデアで生きていくしかありません。私が研究している共通鍵暗号の世界は知恵比べのようなものなのですが、知恵が出なくて辛いこともあります。しかし、何にも思いつかないということも経験上あまりなくて、苦しめば苦しんだ分、何かの役に立つアイデアや成果は出てくるものです。

また、研究する機関としてNTTはとてもいい機関だと感じています。大学などで研究されている方も多いと思うのですが、どうしても大学の業務や資金面でも苦しんでいるのを見ている。NTTは、少なくとも今は暗号の研究に関して価値を認めてくれて、自分のやりたいことを後押ししてくれます。もちろん会社と意識を合わせ、会社にとって必要なことをするのですが、やりたいことを思い切ってやらせてくれる会社です。

さらに私がいるグループは、基礎研究の重要性を認めていて、自分が選ぶ大学で共同研究留学をして、技術を学んだり経験を積めるようにしてくれます。2015年にシンガポールのNanyang Technological Universityに1年間留学させてもらいました。

人間関係でいえば、各個人がプロフェッショナルで実績も多いので、お互いにリスペクトし合っています。逆にいえば、同じグループの同僚と研究テーマが離れているということでもありますが、阻害要因ではなく、ある程度距離を保ってお互いにリスペクトを

持って、良い雰囲気です。NTTの研究者の特徴として、科学や技術に向き合っていて楽しみながら真摯に取り組んでいる方が多いので、研究をしたい人には、NTTなら良い環境で研究ができるのでお勧めです。

また、私は現在NISTで客員研究員というポジションにいますが、2年後には日本に戻ります。すでに具体的な話もみえてきていますが、今後は日本のプロダクトやプロトコルに実際に私が設計した暗号の活用を提案していきたいと考えています。

ビジネスパートナーの方にはぜひ実際にお話をお伺いして、需要に合ったできる限り良いものを設計したいと考えていますので、アイデア交流をどんどん行っていきたいと思っています。

■参考文献

- (1) <https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Presentations/nist-lwc-standardization/images-media/session1-turan-update-on-nist-lwc-standardization.pdf>



(今回はリモートにてインタビューを実施しました)

株式会社NTT データ先端技術

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

NTT Data

株式会社NTTデータ先端技術

人と技術で、まだ見ぬ未来へ—ITの最新技術を駆使し、お客さまの事業革新を実現する

NTTデータ先端技術は1999年の創業から25年、最先端の技術と専門性を活かし、NTTデータやNTTグループと共にお客さまの挑戦を支援するIT技術者集団として発展し続けています。ますます高度化、複雑化する情報社会でお客さまの高度な課題解決に取り組むNTTデータ先端技術の今とこれからについて、藤原遠社長にお話を伺いました。



NTTデータ先端技術
藤原遠社長

IT最新技術を活用した多くの経験から、お客さまにとって最適なソリューションを提供

■設立の背景と会社の概要について教えてください。

NTTデータの国内グループ会社の中で、NTTデータ先端技術はITシステムにかかわる最新テクノロジーを全分野横断に提供する会社として1999年8月に設立されました。現在では当社のグループ会社であるNTTデータ ニューソンを含め社員数は約1600名になります。特にこの10年で社員数が3倍に拡大し、その多くが専門性を持つITエンジニアや技術コンサルタントであり、お客さまに最適なソリューションを提案・提供しています。

会社の事業規模が急速に拡大する中で、全社員で当社の存在意

義（パーパス）を共有する必要性を強く感じたことから、全社員による検討を行い、2024年9月に対外的なブランドスローガンとして「人と技術で、まだ見ぬ未来へ」と、社内向けには3つの行動指針（技術への誇り、多様な力の結集、未来への挑戦）を制定しました。お客さまの求める高度な課題にこたえるIT技術者集団として、専門性を活かし、難問へと挑み、誰よりも先端で解決への道を切り拓いていくことがミッションであることを明確にしたところ です。

■どのような事業展開をしているのでしょうか。

2024年4月から新たに4事業本部と1グループ会社の事業体制に移行しました（図1）。

当社はNTTデータグループをテクノロジーでけん引する**技術者集団**として
お客様ビジネスの飛躍的成長を**技術で支えています**

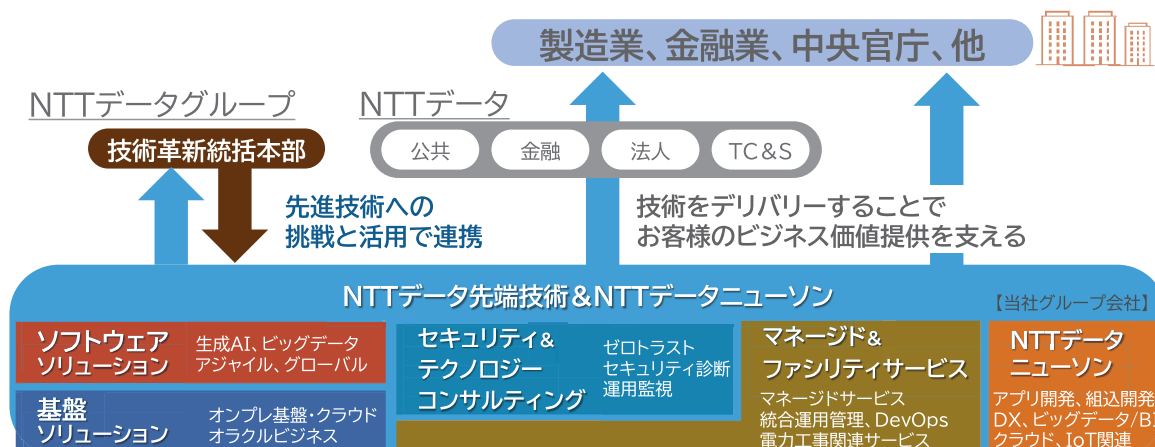


図1 NTTデータグループにおけるポジショニング

AIガバナンスコンサルティングサービスとは
AIリスク診断から対策実行までトータルで支援可能なサービスです。

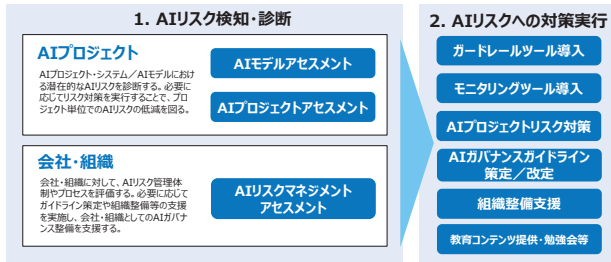


図2 AIガバナンスコンサルティングサービスの提供イメージ

これら5事業組織のもと、当社は3つの注力領域として「テクノロジーコンサルティング」「ソリューション」「マネージドサービス」について成長戦略を定め、取り組んでいます。

まず「テクノロジーコンサルティング」では、生成AI（人工知能）活用技術や基盤ノウハウを活用し、ITシステムグランドデザインやサイバーセキュリティなどの最上流コンサルティングに取り組んでいます。「ソリューションサービス」では、当社の持つ技術オフリングにより、お客さまのビジネステーマに対して最適な技術による価値を提供しています。そして、3番目の「マネージドサービス」では、当社がご提供するコアツールにより、運用品質やアジリティの向上、さらに自動化による運用高度化を実現する取り組みを進めており、順次開発・提供を進めている生成AIを活用したAIドリブン運用につなげているところです。

生成AIの飛躍的進化によるITシステム環境の変革期を迎え、見直すべきITプラットフォーム

■事業を取り巻く環境はどのような状況でしょうか。

国内IT関連事業トレンドは堅調を持続していますが、お客さまが求めているITの位置付けは「効率化の実現」から「価値提供」へと大きく変化しています。

これにこたえるために、当社が長年取り組んできたAI技術の活用は欠かすことができません。特に、近年急速に進化を遂げている生成AIは利用が拡大しており、企業における生産性の向上、問題解決や意思決定に大きく貢献する重要な存在になっています。

一方で、悪意を持った利用者は「AIを使った攻撃」や、「AIに対して攻撃」をして、攻撃対象企業が保有する個人情報や機密情報の漏洩インシデント、誤情報や有害コンテンツの生成による混乱、さらには企業システムそのものの乗っ取りまでも試みています。また、企業においては、各国のデータ保護法や規制に準拠することで、法的リスクを回避し信頼を高めることが求められつつあります。このような背景から、LLM（Large Language Model）を含む生成AIへのセキュリティ対策が不可欠な要素となっています。

当社では、最新の「OWASP（Open Worldwide Application Security Project）Top 10 for Large Language Model Applications 2025」に対応したセキュリティ診断サービスの開発に取り組んでおり、お客さまへの提供開始に向けて準備を進め



写真1 インド・ブネの提携会社訪問

ています。

この診断サービスやその後のAIガバナンスコンサルティングサービスにより、AIのリスクへ適切に対応できる環境を整えたうえで、お客さまが各種AIの検証、開発、適用範囲の拡大に安心して取り組んでいただけることをめざしています（図2）。

当社がこれらの取り組みを実施するうえで非常に重要な役割を担っているのが、長年日本向けの開発プロジェクトに当社とともに発展してきたインド・ブネを拠点とする開発チームと、当社が直接業務提携をしている世界でも有数の優れたAIエンジニア集団である現地の先進AI開発企業です（写真1）。

各社が競って開発を進める生成AIプラットフォームから、それぞれの特徴を見極め、最適なソリューションをお客さまへ提供するための取り組みや、各分野の高度な専門知識を持つ複数のAIの連携利用を、国内外の開発パートナーと当社で丸となって進めています。

■今後の展望についてお聞かせください。

ビジネス面では生成AI、サステナビリティ対応などのお客さまニーズにおこたえできる体制を整えると同時に、開発者変革の領域を中心にプロジェクトや技術が持つ固有のナレッジを対象としたナレッジマネジメント、そして、開発に付随するオペレーションをサポートするAIモデルの開発を中心に、さまざまな職場環境における属人的なナレッジを広く共有できる仕組みの実現を加速しています。

そのうえで「最先端の技術」に加え、NTTデータグループ企業に向けた豊富なコンサルティング実績から、「お客さまの事業変革に対するニーズを理解し、最適な移行プランの提案、システム開発、導入後の維持運用までを一貫してトータルで提供できること」が大きな強みとなるよう引き続き取り組んでいきます。

また、当社が新たなステージにレベルアップしていくための環境整備の一環として、2025年1月にオフィスの集約を図り本社を東京駅前のJPタワーに移転しました。見通しの良い1フロアにお客さまやベンダ、パートナー、社員といった多才な人々が集まって化学反応を起こしていけるような、そんな場所、機会を提供し、より良い未来を創り出していく会社をめざしていますので、ぜひ近くにお越しの際はお立ち寄りください。

NTTデータ先端技術がマネージド&ファシリティサービスで企業の成長を強力に支援

マネージド&ファシリティサービス事業本部
 マネージドサービス事業部
 サービスマネジメント担当
 担当部長



大上 貴充 さん

■どのような業務を行っているのでしょうか。

企業のITインフラは、クラウド化やDX（デジタルトランスフォーメーション）の進展により複雑さを増し、運用管理は大きな課題となっています。私たちマネージド&ファシリティサービス事業本部は、このような課題に対し、革新的なソリューションを提供します。

この本部は、2024年4月に新設され、「システム運用高度化」「働き方改革・セキュリティ」「クラウド活用」、そして「ファシリティサービス」を柱に、現代企業が直面する喫緊の課題を解決へと導き、お客さまのビジネス成長へ長期的に貢献していきます。

具体的なサービスとして、データセンタやオフィスなどのファシリティ管理、ネットワーク構築・運用などの包括的な提供に加え、高付加価値のマネージドサービスを提供しています。お客さまのITインフラ全体を最適化し、事業成長を力強く後押しします。

■INTELLILINK 統合運用ソリューション

私たちは、生成AI技術を活用したシステム運用の「品質向上」「アジリティ向上」「コスト低減」を実現する「INTELLILINK 統合

運用ソリューション」を提供しています。この「INTELLILINK 統合運用ソリューション」には大きく3つの特長があります（図3）。

(1) 運用標準化のメソドロジ

実績に基づく開発・運用メソッドを活用し、運用の標準化と集約化を推進します。AIを活用した運用高度化を考慮し、システムアーキテクチャを設計・構築します。サービスレベル目標の指標を定義し、運用開始後も継続的な改善を支援します。

(2) コアツールによる運用自動化

統合運用管理ソフトウェアHinemosやオペザバビリティを実現するNew Relic、ITサービスマネジメントクラウドサービスであるServiceNowを活用し、最適な運用環境を構築します。これによりシステムの可用性、性能、拡張性、セキュリティを保ちながら運用の自動化を推進します。また、運用課題に応じたxOps（DevOps、SecOps、PerfOps、CloudOps、FinOps、AIOps、NoOpsなど）の導入と実装も支援します。

(3) AIドリブン運用による高度化

従来の人手による業務を見直し、AIを用いた自動化を推進します。これによりヒューマンエラーの撲滅と対応の迅速化を実現します。良質な学習データを蓄積し、AIのパフォーマンスを継続的に改善します。また、「システム運用AIアシスタント」との協働によりITシステムの運用作業を効率化し、作業負荷の軽減と属人化の排除を図ります。

■AIドリブン運用

ITシステムの運用にAIを活用する試み（AIOps）は以前から存在していましたが、従来人間の経験や直感に頼っていた部分について、生成AIがデータ解析によるトレンド・異常予測などをサポートすることで変革が行われてきています。

この変革をさらに推進するためには、AI活用を前提としたシス

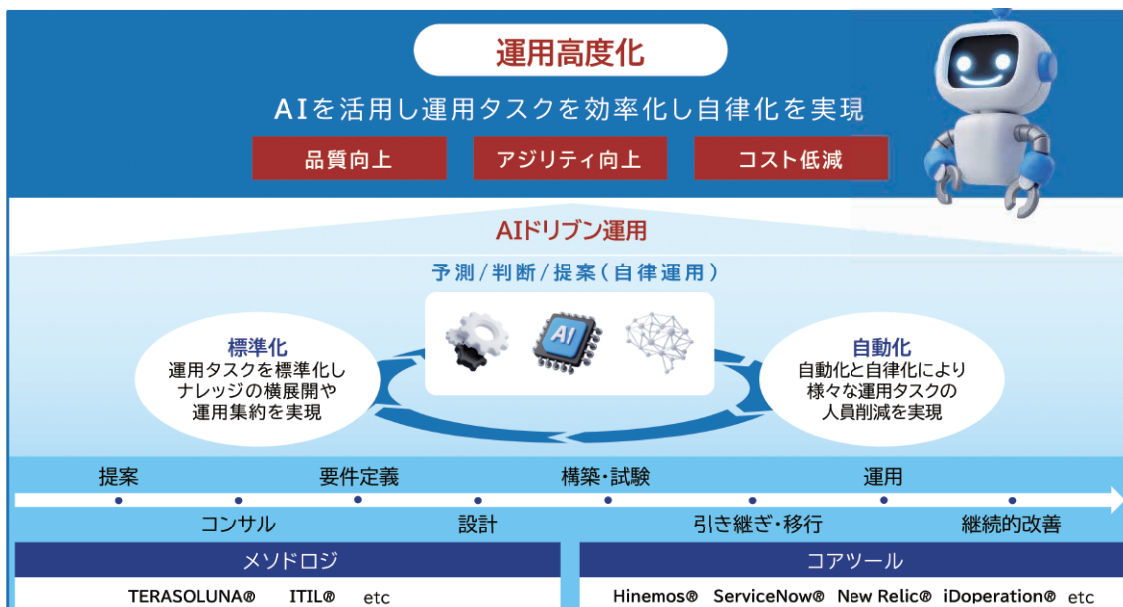


図3 INTELLILINK 統合運用ソリューションの特長

テム運用の仕組み（AIドリブン運用）が必要です。

当社では「AIドリブン運用」を実現するために必要な運用設計や運用プロセスをメソッドとして整理するとともに、「システム運用AIアシスタント」構想を描いています。

「システム運用AIアシスタント」は、ITシステムから収集・蓄積したデータなどの運用に関するシステム固有の情報や、当社がこれまでに培ってきた設計や保守などに関する運用ナレッジを基に、生成AIを活用してシステム運用の自動化・効率化をめざすものです。

さまざまな情報をシステム運用AIアシスタントが総合的に処理することで、運用業務上のサービスマネージャの判断をアシストしたり、自動でシステムへの実行指示を行ったりすることを可能とし、ITシステム運用の高度化を実現します。

■今後の展望について教えてください。

私たちの強みは、既存ビジネスで培ってきた豊富な経験と高度な技術力です。これを基盤に、単なる保守にとどまらず、お客さまにとって真に価値のあるサービスを提供していきます。システム運用・保守、監視、障害対応という従来のサービスのみならず、システム改善提案や運用効率化はもちろん、高度な技術サポートや専門コンサルティング、そしてお客さまのニーズに合わせた新たなソリューション開発まで、幅広く対応します。さらに、ITインフラ全体のフルアウトソースにも対応することで、お客さまがIT運用から解放され、コアビジネスに専念できる環境を提供します。

NTTデータ先端技術のマネージド&ファシリティサービス事業本部は、お客さまのビジネスパートナーとして、変化の激しい時代を共に乗り越え、持続的な成長を支援します。

NTTデータ先端技術 ア・ラ・カ・ル・ト

■新オフィスで開催の創立25周年記念イベントは、社員・家族への感謝がテーマ

2024年8月にNTTデータ先端技術は創立25周年を迎えました。これまでお客さま・お取引先や協力会社の皆様のお力添えにより、ここまですることができたようですが、それにも増して常にその中心で貢献し続けていたのは社員とその家族です。そのため、これまでの感謝を伝え、家族で気持ち新たに新環境を迎えられるよう願いを込めて、社員とその家族を新オフィスに招く「オープンハウス」イベントを開催（写真2）。約600人が来場し、盛況に終わったそうです。

イベントでは家族を新本社に招いたオフィスツアーが開催され、AI技術をPC上でより身近に触れていただく体験コーナーや、お子様向けにはオフィス内各エリアでシールを集めるシールラリーを楽しんでいただくなど、ご家族にとっては貴重な体験を提供。互いに感謝を伝え、社員やご家族のさらなる一体感が生まれたイベントとなったようです。



写真2 イベントの様子

■“人が集まる場所”をコンセプトに、本社をJPタワーに移転

中期経営計画の達成に向けて、新しいことに挑戦できる人や組織を育てるオフィス環境が重要であるととらえ、動く環境のダイナミックな見直しが進められました。社員が「オフィスワーク」「ハイブリッドワーク」のどちらでも最大限能力が発揮できる環境をめざし、最終的に本社が東京駅至近の千代田区丸の内に位置する「JPタワー」に移転されました（写真3）。

新本社のコンセプトとして“人が集まる場所”が掲げられています。各エリアにコンセプトを設け、特に「コミュニケーションエリア」と称したエリアは、中央に半円のステージが配置されています。Intelligence(知性)+Link(つなぐ)の造語である英語社名の一部“INTELLILINK”にかけて、情報が“輪”のように広がり駆け巡るイメージをデザインコンセプトの1つとしたそうです。

今後も、社員どうしが業務に最適な場所を自律的に選んでコミュニケーションを活発化させ、組織がより持続的に成長できる環境づくりをめざすとのことでした。

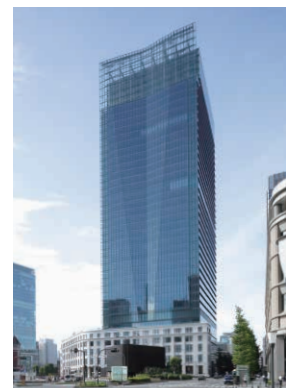


写真3 JPタワー外観