

NTT 技術ジャーナル

ISSN 0915-2318 平成2年3月5日第三種郵便物認可
令和4年2月1日発行 毎月1回1日発行 第34巻第2号(通巻395号)

2 FEBRUARY
2022
Vol.34 No.2

特集

データセントリック時代のソフトウェア技術 ナノメカニクス研究の最前線

グループ企業探訪

ドコモ・テクノロジー

from NTTコミュニケーションズ

データ流通とDXにて実現する「日本版Smart Society」
——未来の可能性と選択肢が開かれた社会をめざして



NTT 技術ジャーナル

2 FEBRUARY
2022
Vol. 34 No. 2

CONTENTS

4 特集

データセントリック時代の ソフトウェア技術

- 6 データセントリック時代のソフトウェア技術
- 9 組織を越えたデータ利活用を安全・便利にする次世代データハブ
- 14 将来のスマートシティを支える高解像度多カメラ分析基盤
- 18 繰り返し型の効率的なテストを実現するテスト活動データ分析技術
- 22 主役登場 榎本 昇平
NTTソフトウェアイノベーションセンター



24 特集

ナノメカニクス研究の最前線

- 26 ナノメカニクス研究の概要と展望
- 30 ナノメカニカル振動子による新しいカオス信号生成手法
- 34 フォノン導波路やフォノンニック結晶を用いた弾性波の制御
- 39 光のエネルギー損失が極めて少ないオプトメカニカル素子の創出
- 43 光キャビティを用いたナノワイヤ振動子の高感度検出と制御
- 47 インクジェット技術を用いた
架橋ナノワイヤ電気機械素子の作製
- 51 主役登場 岡本 創
NTT物性科学基礎研究所



52 *from* ★NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル

スポット画像特徴量を用いた観光スポットマイニング手法
「ジェネリック観光地」抽出技術

58 挑戦する研究者たち

中島 和秀

NTTアクセスサービスシステム研究所
上席特別研究員



研究者にはゴールはない。
満足したら終わりだと思うのが健全

63 挑戦する研究開発者たち

藤井 雅雄

NTTデータ 技術革新統括本部
データベーステクニカルリード



シンプルなコードにこだわるという美学。
最後の番人として「中身まで分かる人」でありたい

67 明日のトップランナー

村上 友規

NTTアクセスサービスシステム研究所・
NTT未来ねっと研究所
特別研究員



「インテリジェント空間形成技術」を実現する
インテリジェント反射板制御および無線センシングの研究

70 グループ企業探訪

ドコモ・テクノロジー株式会社

移动通信関連の研究開発を通じて培った
強みを活かしてお客さまの期待にこたえる



74 from NTTコミュニケーションズ

データ流通とDXにて実現する「日本版Smart Society」
—— 未来の可能性と選択肢が開かれた社会をめざして

Webサイト オリジナル記事の紹介 78

3月号予定

編集後記

NTT技術ジャーナルはWebで閲覧できます。

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



本誌掲載内容についての
ご意見、ご要望、お問い合わせ先

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

本誌ご購入のお申し込み、
お問い合わせ先

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

企画編集

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

発行

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

©日本電信電話株式会社2022

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます●

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

特集

データセントリック時代のソフトウェア技術

実世界のデータからさまざまな価値を生み出す「データ中心社会」の到来に向けて、IOWN(Innovative Optical and Wireless Network)構想の中でNTT研究所が取り組む、データセントリック時代のソフトウェア技術について特集する。本特集では、組織を越えたデータ流通・分析を促進する技術と、価値創出を支えるソフトウェア開発を加速する技術について紹介する。

情報処理基盤

データ流通

I O W N

スマートシティ

ソフトウェアテスト

Data-centric era

データセントリック時代のソフトウェア技術 6

データ中心社会を支え、ビジネスの進化に対応できる、データセントリック時代の情報処理基盤の実現に向けたさまざまな技術課題と、NTT研究所の取り組みについて、NTTソフトウェアイノベーションセンタでの活動を紹介します。

組織を越えたデータ利活用を安全・便利にする次世代データハブ 9

NTTが研究、実用化を進めている次世代データハブの主要な構成要素である「仮想データレイク」「データブローカー」「データサンドボックス」について紹介する。

将来のスマートシティを支える高解像度多カメラ分析基盤 14

AI推論処理の処理量・消費エネルギーの大幅な削減を実現する「イベント駆動型推論」のコンセプトと、その要素技術である「多層推論技術」と「推論リソース共有技術」について紹介する。

繰り返し型の効率的なテストを実現するテスト活動データ分析技術 18

NTTが研究開発を行いOSS化した、ソフトウェアテストを飛躍的に効率化する技術について紹介する。

主役登場 榎本 昇平 (NTTソフトウェアイノベーションセンタ) 22

AIの省電力化をめざして

データセントリック時代のソフトウェア技術

実世界のデータからさまざまな価値を生み出す「データ中心社会」の到来とともに、ビジネスの進化に伴いシステム基盤やソフトウェア開発手法への要求はより一層高まっています。本稿では、データ中心社会を支え、ビジネスの進化に対応できる、データセントリック時代の情報処理基盤の実現に向けたさまざまな技術課題と、NTT研究所の取り組みについて、NTTソフトウェアイノベーションセンタでの活動を中心に紹介します。

きはら せいじ たなか ひろゆき
木原 誠司^{†1} 田中 裕之^{†2}

NTTソフトウェアイノベーションセンタ センタ長^{†1}
NTTソフトウェアイノベーションセンタ^{†2}

情報処理基盤を取り巻く環境

実世界の問題を、実世界のさまざまなデータを用いて解決していくプロセスはますます重要となりつつあります。製造業においては工場稼働データに基づく予実管理や設備の故障予測、小売業においては気象データに基づく需給予測や顧客行動データに基づくマーケティングや動線設計など、そのようなプロセスの事例は枚挙に暇がありません。データから価値を生み出すという意味で、このようなプロセスを私たちは「データ価値化」と呼んでいます。企業間競争の激化や環境問題・社会問題の深刻化に加え、新型コロナウイルス感染症の流行によるリモート型社会への強制的移行等により、社会全体がデジタルトランスフォーメーション（DX）を迫られ、データ価値化への期待は高まる一方です。このような背景から私たちは、意思決定や最適化、未来予測など、あらゆる場面でデータに基づき価値を生み出す「データ中心社会」が到来すると考えていま

す。データ中心社会においては、多種大量のデータの流通や分析の礎となる情報処理基盤の役割がより重要になると考えられます。

これまでの技術的歴史を振り返ると、情報処理基盤はたゆまぬ進化を遂げてきました。システム基盤の観点では、まずプロセッサの性能向上が、微細化によるシングルコアCPUの高速化、そしてマルチコア化により実現されてきました。またサーバ単体によるプロセッシングから、分散・並列化による高速化・スケール化へと、システム全体の高速化・高度化も進められてきました。私たちの提唱するIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想^{(1), (2)}では、ハードウェアやネットワークの進化に加え、それらに対応できるソフトウェア、すなわちシステム基盤技術にも進化が求められます。ソフトウェア開発手法の観点では、基幹システム等の大規模・高品質なソフトウェアが求められる場合に適したウォーターフォール型開発に加え、近年ではユーザビリティや開発の

迅速性が求められるWebアプリケーション等の開発に適したアジャイル型開発も広く取り入れられるようになってきており、さらに高速化するビジネス変革に追従できる、新たな開発技術が求められます。

このような背景から、NTTソフトウェアイノベーションセンタ（SIC）では、IOWN構想に基づく将来の情報処理基盤の実現に向けて、関連する技術を専門とする各NTT研究所と連携し、データ中心社会を支えビジネスの進化に対応できる、システム基盤技術とソフトウェア開発技術の研究開発に取り組んでいます。

データ中心社会を支える情報処理基盤技術

データ中心社会におけるデータ価値化の大まかな流れを図に示します。まず実世界の各所において、センシングデータやログデータ等として実世界のモノやコトに関するデータが生成・収集され、蓄積されます。次に、このデータを分析・変換し、これに基づき問題

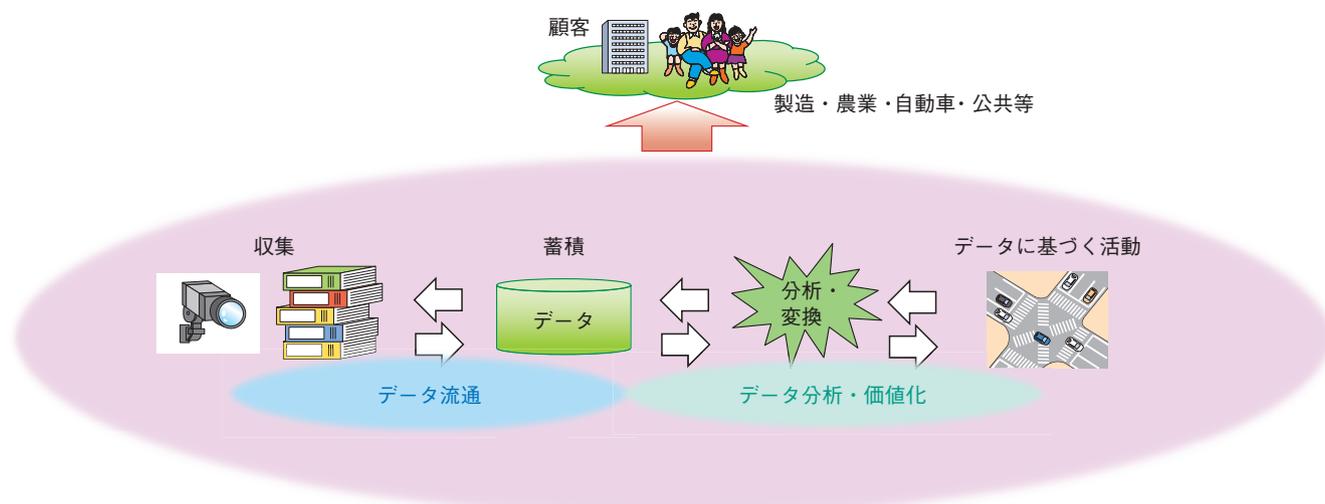


図 データ中心社会のバリューチェーン

を解決すべく実世界へ働きかける活動を行います。多くの場合、この活動により変化した実世界について、またデータ収集していく、という循環を繰り返すことで、漸次的に改善したり、実世界の変化に継続的に追従したりします。データをエビデンスとして、実世界へフィードバックをかけていくこのようなプロセスにより、堅実に実世界を良い方向へ動かす、さまざまなドメインの顧客へ価値を提供していくことが可能となります。

このようなデータ中心社会のバリューチェーンを支えるべく、以下のような情報処理基盤技術の研究開発に取り組んでいます。

(1) ディスアグリゲータッド・コンピューティング技術

データ中心社会で生まれ活用される膨大なデータを価値とするためには、

データを生み出し、運び・処理し・届けるといった処理すべてにおいて高速性が求められます。NTTでは、IOWN構想を提案し、スマートな社会の実現に向けて研究活動を進めており、その中で共通的に求められるのが、高速・広帯域ネットワークと、高い処理能力を持つコンピュータです。このコンピュータの実現に向けて、光電融合技術を活用した「ディスアグリゲータッドコンピューティング」という概念を提案しました⁽³⁾。私たちは、2021年7月に発足したNTT IOWN総合イノベーションセンタ⁽⁴⁾、⁽⁵⁾のもとに共に集結したNTTネットワークイノベーションセンタ、NTTデバイスイノベーションセンタと協働し、特にシステムソフトウェアについて取り組んでいます。本誌特集記事『ディスアグリゲータッドコンピューティングに向けたメ

モリセントリックアーキテクチャ⁽⁶⁾」がその一例になります。

(2) データ流通技術

データ中心社会で生み出されたデータを真に活用するためには、地理的・ネットワーク的に離れたデータ群の組み合わせとともに、組織や国などの垣根を越えたデータ群を掛け合わせることも必要となってきます。この掛け合わせには、高速なネットワークやコンピュータ等はもちろんのこと、実世界におけるデータの発生・蓄積の状況に合わせた管理・処理とともに、データ所有者の意思に合わせた権限やライフサイクルの管理・処理も必要となります。このような課題の解決に向けた取り組みとして、本特集記事『組織を越えたデータ利活用を安全・便利にする次世代データハブ⁽⁷⁾』において、NTT社会情報研究所⁽⁸⁾との取り組みを紹介

します。

(3) データ分析・価値化技術

データから価値を生み出すためには、もちろん、コンピュータや情報流通の仕組みだけでは足りません。価値を創出する各ドメインにて具体的な問題と向き合い、入手できる多様なデータと多様な分析方法から、適切な組み合わせを見つける、すなわち問題の定式化をする必要があります。このためには、統計学や機械学習のような素養と各ドメインの理解が必要で、能力とともに、ツールや基盤による支援が必要となると考えています。これらは今やいかなる領域でも必要となるため、NTTの研究所においても、NTTコンピュータ&データサイエンス研究所⁽⁹⁾を中心として、多数の組織にて取り組みがなされています。SICでは特に、問題の定式化に基づいてデータを価値に変換する処理を高速に実行するための処理基盤に取り組んでおり、具体例を本特集記事『将来のスマートシティを支える高解像度多カメラ分析基盤』⁽¹⁰⁾にて紹介します。

(4) ソフトウェア開発技術

データ中心社会においてはビジネスやサービスに求められる進化のスピードが大きくなるため、ソフトウェア開発の従来の手法ではいずれ限界がくると考え、ソフトウェア開発における人の作業の一部をAI(人工知能)が代替・超越する技術の実現により、AIと人が協働できる新たな高速開発の実現に向けた技術の研究開発に取り組んでい

ます。その1つとして、本特集記事『繰り返し型の効率的なテストを実現するテスト活動データ分析技術』⁽¹¹⁾にて、機能の追加や改良に伴い繰り返し実行される回帰テストを効率化する技術を紹介いたします。

今後の展開

データ中心社会を支え、ビジネスの進化に対応できる将来の情報処理基盤の実現に向けては、本稿で述べたようにさまざまな課題を解決していく必要があります。IOWN構想のもと、さまざまな産業分野のパートナーの方々、学術分野・技術分野の専門家の方々とのコラボレーションを通じて、各技術の早期確立をめざしていきます。

参考文献

- (1) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2019/05/19/190509b.html>
- (2) <https://rd.ntt/iown/>
- (3) 岡田・木原・岡崎：“IOWNを支えるディスアグリゲータッドコンピューティング,” NTT技術ジャーナル, Vol.33, No.5, pp.40-44, 2021.
- (4) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2021/05/12/210512d.html>
- (5) <https://www.rd.ntt/iic/>
- (6) 石崎・山部：“ディスアグリゲータッドコンピューティングに向けたメモリセントリックアーキテクチャ,” NTT技術ジャーナル, Vol.33, No.5, pp.50-53, 2021.
- (7) 大村・ジェイ・片山・河井・柏木・馬越・除補・木村：“組織を越えたデータ活用を安全・便利にする次世代データハブ,” NTT技術ジャーナル, Vol.34, No.2, pp.9-13, 2022.
- (8) <https://www.rd.ntt/sil/>
- (9) <https://www.rd.ntt/cds/>
- (10) 三上・史・井上・樽林・松尾・山崎：“将来のスマートシティを支える高解像度多カメラ分析基盤,” NTT技術ジャーナル, Vol.34, No.2, pp.14-17, 2022.
- (11) 丹野・切貫・川口・但馬・生沼・村本：“繰り返し型の効率的なテストを実現するテ

スト活動データ分析技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.34, No.2, pp.18-21, 2022.



(左から) 木原 誠司 / 田中 裕之

ソフトウェアに関するエンジニアの力と研究者の力、SICが持つこれら2つの力に加え、各NTT研究所の力、そしてOSS(オープンソースソフトウェア)活動を含む世界中のさまざまな方とのコラボレーションにより、将来の情報処理基盤の実現をめざしていきます。

◆問い合わせ先

NTTソフトウェアイノベーションセンター
企画担当
TEL 0422-59-2207
FAX 0422-59-2072
E-mail sic@hco.ntt.co.jp

組織を越えたデータ利活用を 安全・便利にする次世代データハブ

経済的発展と社会課題解決の両立が期待されるデータ駆動型社会においては、企業や組織を越えたさまざまなデータの利活用が必須です。しかし、機微なデータやアルゴリズムの取り扱いや、遍在する多種多様なデータ群からの所望のデータの発見や取得に関して多くの課題が存在し、広く実践されるに至っていません。本稿では、それら課題を解決し、組織を越えたデータ利活用を安全・便利にする次世代データハブと主要な技術を紹介します。

次世代データハブとは

スマートシティや企業横断型DXなどの例にみられるように、企業や組織の枠を越えたデータの流通と利活用による新たな価値の創出や社会的課題の解決に向けた取り組みが始まりつつあります。しかし、このような取り組みを一部の限定的なものではなく、社会全体に拡大していくには以下のような課題があります。

- ・それぞれの企業で個別に収集、管理されている膨大なデータの中から目的に合致するデータを見つけ出すことや、必要時に迅速に取得することが困難である。
- ・一方、データを提供する立場からすると、自身の貴重なデータの利用可否を適切に制御し、また、その流通範囲や利用実績を把握することが困難である。
- ・特に希少性の高いデータや重要なノウハウの詰まった分析アルゴリズムを他の企業に利用させるに

は、目的外利用などによる機密情報漏洩の懸念がある。

これら課題の解決に向け、私たちは次世代データハブの研究開発に取り組んでいます。次世代データハブは、提供者によるデータに対するガバナンスを維持しつつ、多拠点に遍在するデータから利用者が必要なデータを迅速に効率良く入手し利用できるようなデータ流通の基盤であり、企業や組織の枠を越えたデータの利活用を安全で便利にするものです。

次世代データハブの主要な構成要素は以下の3つです（図1）。

- ① 複数企業のデータを仮想的に統合し、効率的なデータ検索・取得を可能にする「仮想データレイク」
 - ② 多拠点間での効率的なデータ送受信を可能にする「データブローカー」
 - ③ 企業間でデータやアルゴリズムを互いに秘匿したまま実行可能にする「データサンドボックス」
- 以下、それぞれが解決する課題とア

おおむら 大村	けい 圭^{†1}	ジェイ ホンジェ ^{†1}
かたやま 片山	しょうこ 翔子^{†1}	かわい さきこ 河井 彩公子^{†1}
かしわぎ 柏木	けいいちろう 啓一郎^{†1}	うまこし けんじ 馬越 健治^{†2}
よすけ 除補	ゆきこ 由紀子^{†1}	きむら たつろう 木村 達郎^{†1}

NTTソフトウェアイノベーションセンタ^{†1}
NTT社会情報研究所^{†2}

プローチを説明します。

仮想データレイク

複数の組織や拠点に遍在するデータを活用する場合、従来モデルでは、図2(a)に示すように各拠点で生成されたデータを単一の拠点に集約して1つの巨大なデータレイクをつくり、各利用者はそこにアクセスすることでデータ活用を行ってきました。しかし、このモデルでは、データ利用者が実際に利用するデータはごく一部であっても全量コピーが必要となるなどの一般的な問題に加え、データ提供者の視点からは自身のデータのコピーが大量に生成されデータへのガバナンスが効かなくなるといった問題が生じ、企業間でデータを流通させ、さまざまな分析・解析をすることが困難でした。

そこで私たちは、各拠点に遍在するデータを単一拠点に集約することなく活用可能とするためのデータ基盤技術を仮想データレイクと呼び、研究開発に取り組んでいます。

仮想データレイクは、図2(b)に示すとおりデータそのものではなくメタデータ*1を収集することで、遍在するデータを仮想的に集約・一元化し、データ利用者がオンデマンドに必要なデータのみを効率良く取得して分析や解析処理に活用することを可能とします。また、データ提供者からするとマスタとなるデータを常に自拠点で管理し、要求に応じて仮想データレイクを介して利用者にデータを提供すること

で、自身のデータに対するガバナンスを維持することが容易となります。

この仮想データレイクの実現に向け、2つの観点からの問題の解決に取り組んでいます。1番目は、さまざまな取得経緯により形式や品質の異なる膨大なデータの中からデータ利用者の目的達成に必要なデータをどのように効率的に発見し、活用につなげるかというデータ発見・活用の観点、2番目は、各拠点で日々生成され増加してい

く遍在データをどのように効率良く管理するか、また、データ利用者が常に利用可能な状態とし適切なタイミングで手元に届けるかというデータ管理・配信の観点です。以降ではそれぞれの観点での問題解決の取り組みについて説明します。

*1 メタデータ:本稿では、データの所在や作成者、形式などの「データを説明するためのデータ」全般のことをメタデータと呼びます。

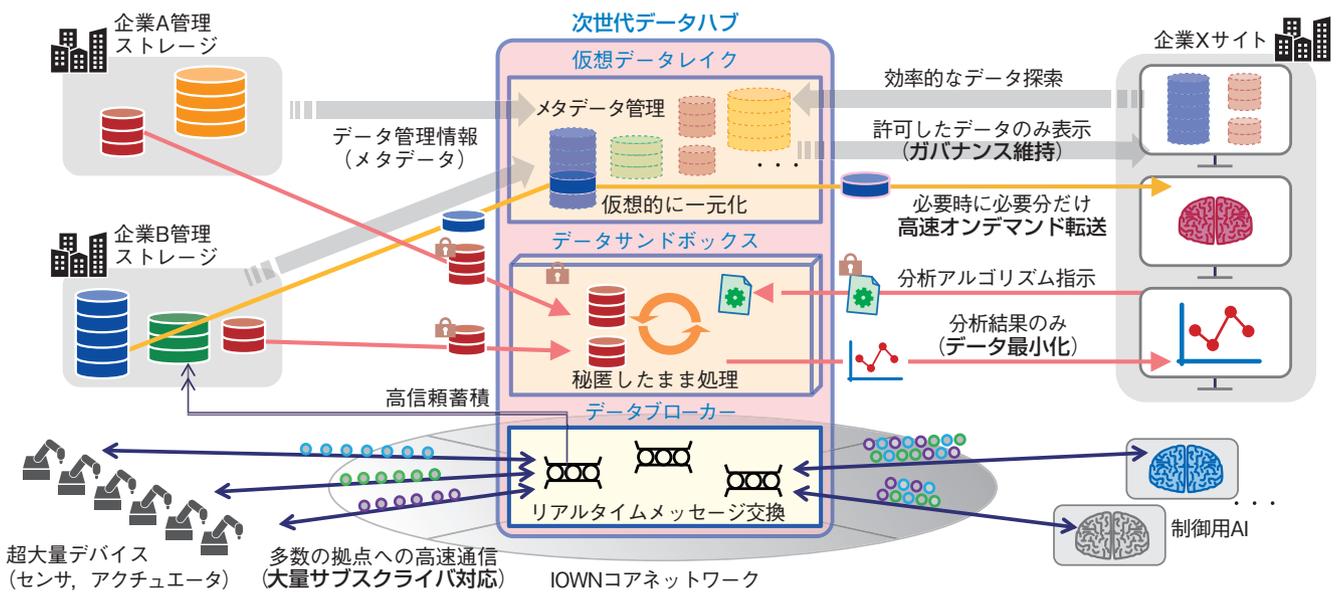


図1 次世代データハブの全体像

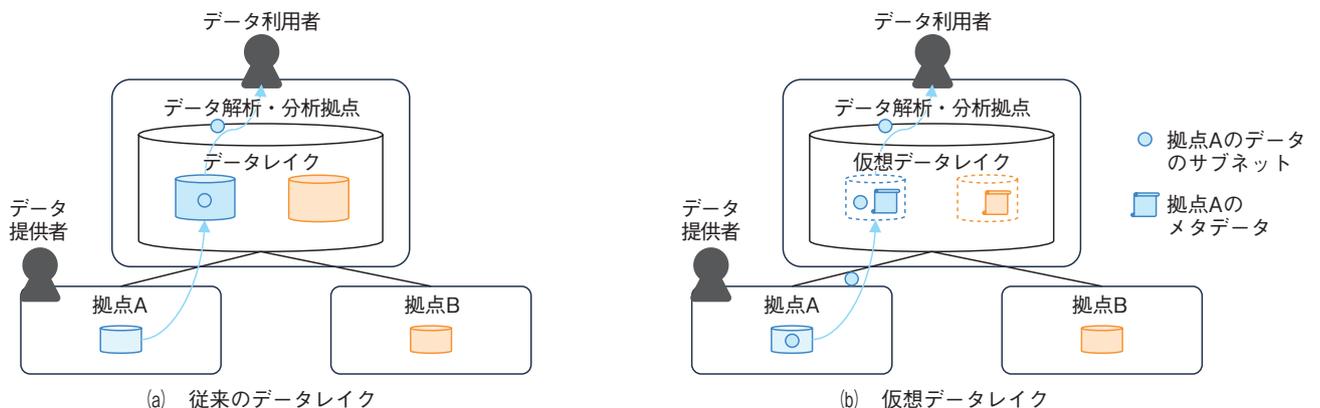


図2 データ活用モデル

■データ発見・活用

膨大なデータの中からデータ利用者が必要とするデータを発見できるようにするために、データを詳しく説明する“メタデータ”を一定の規則に従って統一的に付与し、管理します。

メタデータには、データの意味情報のようにデータ提供者によってあらかじめ付与されるものもあれば、データの形式や品質情報のように自動付与されるものもあります。これらを用いたさまざまな条件での柔軟な検索を可能とし、データ利用者の目的達成に必要なデータの絞り込みを容易にします。

また、データ間の関連性や、プロビダンスデータと呼ばれるデータの出自から流通経路や加工プロセスに至る情報もメタデータとして付与し、管理します。前者により、データ利用者が曖昧な手掛かりしかない場合でも関連したデータをたどることで本当に必要なデータを発見しやすくなります。また、後者により、データに不適切な加工がなされていないことや出自が不明な怪しいデータではないことを確認でき、データの信頼性を判断できるようになります。

■データ管理・配信

遍在するデータを集約することなく、遍在した状態のまま効率良く管理し、オンデマンドに取得できるようにするには、いくつかの課題があります。本稿では特に、各拠点で日々生成、更新されていくデータの最新状態を遠隔からどのように効率良く把握し管理するか、データの要求から返却までのレスポンスタイムを高速化し単一データレイクに集約したときのそれにどのように近づけるか、といった課題への取り組みについて述べます。

すべての拠点のデータを利用者がいつでも活用できる状態とするために、各拠点でのデータの作成・更新・削除といったイベントを低遅延に収集しメタデータとして管理します。こうした最新の状態のメタデータを用いることで、利用者からは手元にデータが存在するかのように、ファイルの一覧情報を表示したり、要求を出してその中身を取得したりすることが可能となります。

また、利用者がデータを要求してから返却されるまでのレスポンスを実用上問題のない長さにするために、データの差分配信を行えるデータフォーマットや、仮想データレイク内でのキャッシュ機構を導入します。これにより機械学習のように同じデータを繰り返し活用する処理においては、データの転送に伴う処理時間の増大を抑えることが可能となります。また、データへのアクセスのパターンや頻度に応じて動的にデータをキャッシュするプリフェッチ機能や各拠点から仮想データレイクへPUSH型の配信を行う機能を整備し、データ利用者や提供者が自身の要件に応じたアルゴリズムをプラグラブルに適用できるように、設計・開発を進めています。

データブローカー

近年、スマートファクトリーやコネクテッドカーなどの分野では、数万～数10万台のセンサや車両などの端末がネットワークに接続され、監視や制御に必要なメッセージの送受信を行っています。正確な監視や制御のためには、端末からのデータ収集と端末へのフィードバック伝達をごく短時間で確実に行う必要があります。私たちは、

このような大量の端末との間での低遅延かつ高信頼なメッセージ交換を可能とする、新たなデータブローカー技術の開発に取り組んでいます。

従来のデータブローカー技術では、大量端末への同報配信を効率良く行うことのみを重視してメッセージの永続化や再送制御を行わず信頼性に欠ける設計、もしくは、確実な配信のみを重視して大量端末に対応できない設計のいずれかとなっており、前述した要件の双方を同時に満足することができません。これらを両立するうえでの課題の1つとして、端末が受信できなかったメッセージの再送処理があります。再送のためには、端末1つひとつについてメッセージの配信状態を記録する必要がありますが、端末が大量に接続される場合、その状態管理コストは非常に大きく、リソース不足による転送遅延が生じ得ます。私たちは送受信プロトコルの見直しや状態管理アルゴリズムの改善によりこの課題の解決を試みています(図3)。

こうした課題解決の積み重ねにより、大量端末との低遅延かつ高信頼なメッセージ交換を可能とする新しいデータブローカーを実現していきます。

データサンドボックス

■背景

前述のように、異なる企業がそれぞれ保有する希少性の高いデータやアルゴリズムを掛け合わせることで新たな価値を生むことが見込まれているにもかかわらず、その漏洩への懸念から、そうした企業間の連携はほとんど行われていません。

データやアルゴリズムを互いに開示せずに掛け合わせる単純な方法とし

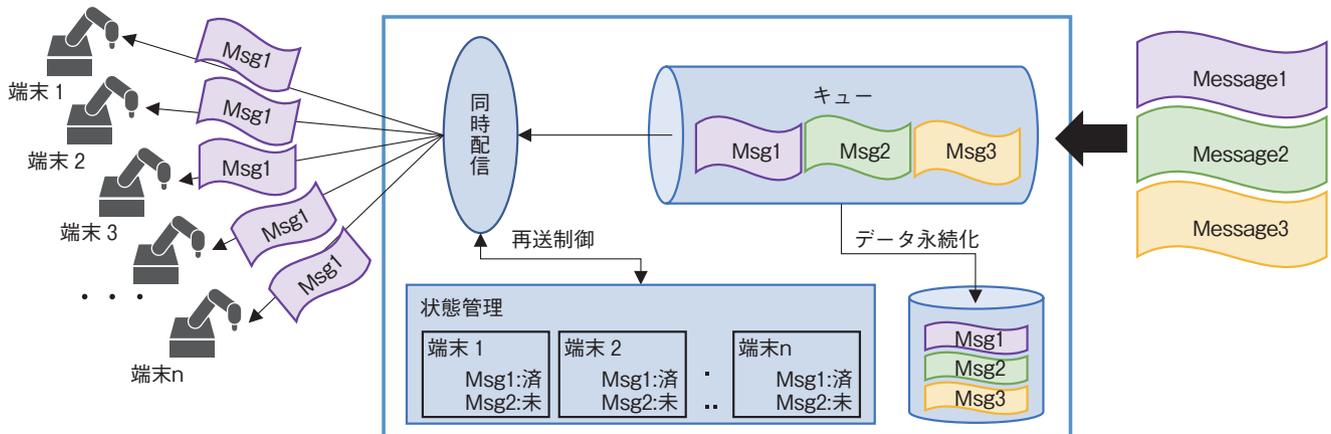


図3 データブローカーの再送・永続化機構イメージ

て、「データやアルゴリズムを信頼できる第三者（プラットフォーム事業者）に預けて計算した結果のみを返してもらう」というものが考えられます。この方法では、データやアルゴリズムを互いに開示する必要はなくなりますが、プラットフォーム事業者には開示してしまうことになります。

私たちは、プラットフォーム事業者が計算を代行するモデルをベースとしつつ、プラットフォーム事業者にもその内容を秘匿したままデータとアルゴリズムを掛け合わせることが可能な「データサンドボックス技術」の研究開発を進めています。本技術により以下のようなデータやアルゴリズムの利活用の実現をめざしています。

- ・ 競合各社がデータを持ち寄って統合して処理し、その結果を各社で共有する（ただし、各自のデータは相手やプラットフォーム事業者には開示されない）。
- ・ 自社の貴重なデータを他社が有する秘伝の分析プログラムで分析し、その結果を得る（ただし、元のデータや分析プログラムは相手やプラットフォーム事業者には開示

されない）。

■技術課題と解決アプローチ

これらを実現するには、主に以下に示す課題の解決が必要です。

- ① なりすましによるアルゴリズムの不正実行、それによる元のデータや結果の不正取得
 - ② 誤ったアルゴリズムの実行による元のデータや結果の流出
 - ③ プラットフォーム事業者によるデータやアルゴリズムの不正取得
- データサンドボックスでは、これら課題を下記技術の組み合わせにより解決します（図4）。

■技術1：認証と合意に基づくアクセス制御

データサンドボックスは利用するユーザ（データやアルゴリズムの提供者、結果データの利用者）を認証し、なりすましを防止します。また、元データやアルゴリズムおよび結果データに対するアクセスをユーザどうしが事前に合意した内容（データ利用ポリシー）にのっとり制御し、アルゴリズムの不正実行やデータの不正取得を防ぎます。

■技術2：揮発性のある独立した実行環境の生成

データサンドボックスはユーザどうしが合意したデータ利用ポリシーごとに独立した実行環境を生成します。また、この実行環境から外部へのアクセスを制限し、アルゴリズムによる利用ポリシーに反したデータの外部への持ち出しを防止します。さらに、アルゴリズムの処理完了と同時にこの実行環境を消去し、データやアルゴリズムの流出を防止します。

*2 TEE：OSの管理権限を持つユーザによるメモリ参照を防止するため、CPUがメモリ領域を暗号化して利用するように構成された隔離実行環境のこと。これまではモバイル端末や組み込み系機器を中心に利用されてきましたが、近年ではIntelやAMDなどのサーバ用CPUにも多く搭載され始めています。

*3 リモートアテステーション：ユーザがTEEの真正性を確認する手段としてCPUベンダが提供する機能。ユーザはTEEの構成情報を取得し、これをCPUベンダがインターネット上で提供するリモートアテステーションサービスを用いて検証することで、そのTEEがCPUベンダの提供した機能を利用して作成され、改ざんされていないことを確認できます。

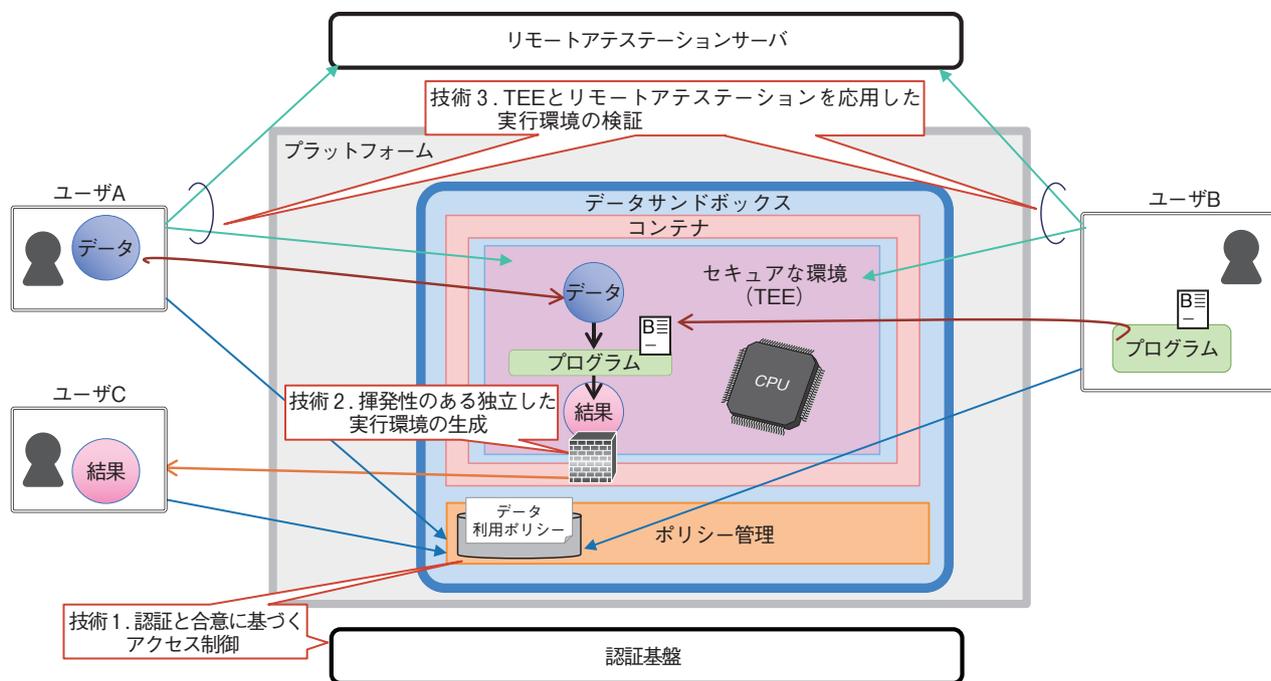


図4 データサンドボックスの技術構成

■技術3：TEEとリモートアステーションを応用した実行環境の検証

プラットフォーム事業者など実行環境を運用、管理する者によるデータやアルゴリズムの参照を防止する既存の仕組みとしてTEE (Trusted Execution Environment)^{*2}とリモートアステーション^{*3}があります。データサンドボックスは、これらを応用することで、「実行環境に取り込んだデータやアルゴリズムがデータ利用ポリシーで合意されたものであること」、および「利用している実行環境がTEEを用いて生成され、データやアルゴリズムが秘匿化されていること」をユーザ自身により検証可能としています。これにより、プラットフォーム事業者によるデータやアルゴリズムの参照を防ぎつつ、データとアルゴリズムを掛け合わせて結果を得ることを

可能としています。

今後に向けて

本稿では、私たちが研究、実用化を進めている次世代データハブの主要な構成要素である「仮想データレイク」「データブローカー」「データサンドボックス」を詳しく紹介しました。次世代データハブにより、安心・安全かつ効率的なデータ流通が可能になり、これまで困難とされてきた企業や組織の枠を越えた機密性の高いデータやアルゴリズムの相互利用による新たな価値の創出や社会的課題の解決が促進されると考えています。今後は要素技術の研究開発やパートナーの皆様との検証評価をさらに加速させ、データ駆動型社会の1日も早い実現に貢献します。



(上段左から) 大村 圭/ ジェイ ホンジェ/
片山 翔子/ 河井 彩公子
(下段左から) 柏木 啓一郎/ 馬越 健治/
除補 由紀子/ 木村 達郎

私たちは、本稿で紹介した次世代データハブの技術確立とその実用化を通じて、企業や組織の枠を越えたデータの流通と利活用による新たな価値の創出や社会的課題の解決に貢献していきます。

◆問い合わせ先

NTTソフトウェアイノベーションセンタ
企画担当
TEL 0422-59-2207
FAX 0422-59-2072
E-mail sic@hco.ntt.co.jp



将来のスマートシティを支える 高解像度多カメラ分析基盤

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 時代のスマートシティは、都市のあらゆる情報を価値化しアクセス可能とするCPS (Cyber-physical system) の上に構築されます。本稿では、都市規模のCPSを支える、高解像度・多数のカメラ映像を効率的に処理するAI (人工知能) 推論基盤、および基盤上でのAI推論処理の処理量・消費エネルギーの大幅な削減を実現する「イベント駆動型推論」のコンセプトと、その要素技術である「多層推論技術」と「推論リソース共有技術」について紹介します。

みかみ	けいた	し	きよく
三上	啓太	史	旭
いのうえ	のりあき	くればやし	りょうすけ
井上	規昭	樽林	亮介
まつお	よしのり	やまさき	いくお
松尾	嘉典	山崎	育生

NTTソフトウェアイノベーションセンタ

スマートシティとCPS

皆様がスマートシティという言葉聞いて思い浮かべるのはどのような都市でしょうか。国土交通省の定義⁽¹⁾によると、スマートシティとは「都市の抱える諸課題に対して、ICT等の新技術を活用しつつ、マネジメント(計画、整備、管理・運営等)が行われ、全体最適化が図られる持続可能な都市または地区」としています。また、野村総合研究所の定義⁽²⁾では、より具体的に、スマートシティとは「都市内に張り巡らせたセンサー・カメラ、スマートフォン等を通じて環境データ、設備稼働データ・消費者属性・行動データ等の様々なデータを収集・統合してAIで分析し、更に必要に応じて設備・機器などを遠隔制御することで、都市インフラ・施設・運営業務の最適化、企業や生活者の利便性・快適性向上を目指すもの」としています。いずれの定義でも「都市を対象として、ICT技術を活用して管理運用を行い、全体最適を目指す」点は共通しています。こ

ういった、現実世界を対象に情報処理を行い、最適化等を実現する仕組みを表す概念として、サイバーフィジカルシステム(CPS: Cyber-physical system)があります。CPSとは図1に示すように、現実世界(フィジカル)の情報を仮想空間(サイバー)に取り込み、コンピューティングによる

分析を行ったうえで、その分析結果を再び現実世界にフィードバックすることで、現実世界に最適な作用を及ぼすという、いわば「現実をプログラム可能にするシステム」です。

現実がプログラム可能になると何が起ころうでしょうか。それは「現実のソフトウェア化」です。実は現実のソフ

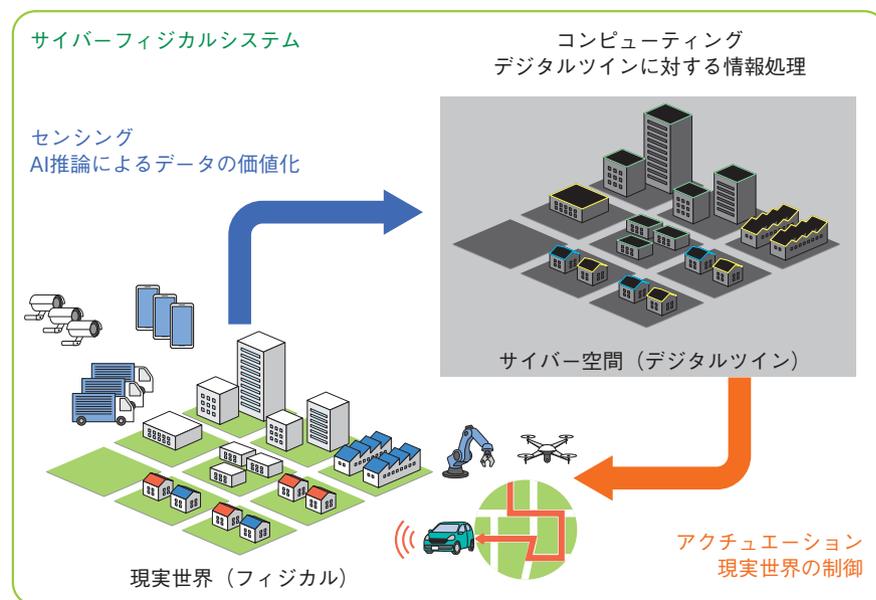


図1 サイバーフィジカルシステム (CPS)

トウェア化はすでにあちこちで起こっています。例えば電話です。かつて電話といえば、それは受話器とダイヤルを備えた箱であり、それが小型化・無線化した携帯電話も、はじめはあくまで遠隔地の音声をつなぐ端末でした。しかし、電話が「ソフトウェア化」したスマートフォンの登場は世界を変えました。物理的なボタンはタッチスクリーン上のアイコンとなり、やがて自由に姿を変えてあらゆる手のひら大のインタフェース（電話、電卓、書籍、カメラ等）を兼ねるようになりました。電子書籍やデジカメも、書籍やカメラがソフトウェア化した例といえるでしょう。このソフトウェア化により、従来の静的で一方通行のインタフェースは動的でインタラクティブなものに変化し、また提示される情報も受け手に応じたパーソナライズやレコメンドが可能となるなど、劇的な変化と利便性・快適性向上が起りました。

話をスマートシティに戻します。そう、スマートシティというのは、「ソフトウェア化した都市」なのです。これまで都市を構成する要素というのは、コンクリートでできたビルであり、金属製の看板であり、その上で運行される交通機関でした。しかし、スマートシティではビルはBMS（Building Management System）で制御されたスマートビルディングに、看板はデジタルサイネージに、交通機関はコネクティッドカーをはじめとしたスマートモビリティになり、それらはすべてプログラム可能です。都市がソフトウェア化されれば、「いつも混雑する道路」は「交通状況に応じて車線や制限速度が最適化されるスマート道路」になるかもしれませんし、「なかなか

来ない路線バス」は「移動したいと思った瞬間に目の前に止まる自動運転タクシー」に置き換わるかもしれません。

都市規模のCPSを構築し、その上でさまざまな都市サービスのソフトウェア化を進めることで、電話がスマートフォンになることで手元に起きたような、劇的な変化と利便性・快適性向上が都市規模で起こることが期待されています。

鍵となるのは AI推論処理における処理量・ 消費エネルギーの削減

では、スマートシティを支える基盤である都市規模のCPSは、容易に実現可能なのかということ、そんなことはありません。CPSは大きく、センシング、コンピューティング、アクチュエーションの3ステップからなり、それぞれの領域では現在進行形でさまざまな研究が進められています。その中でもNTTソフトウェアイノベーションセンター（SIC）が課題として取り組んでいるのが、センシングおよびコンピューティングを担うAI（人工知能）推論基盤です。スマートシティにおけるセンシングは、都市の各所に配置されたカメラや各種センサ、都市内のコネクティッドカーやスマートフォンから発生し続ける大量のストリームデータを深層学習による推論（いわゆるAI推論）によって分析し、意味のある情報として価値化することによって行われます。また、価値化された情報を「デジタルツイン」として計算機上に再構築し、現実世界に望む結果をもたらすフィードバックを計算するのにもAI推論は欠かせません。

従来からAI推論は大きな計算リソー

スを必要とする「重い処理」であり、私たちも「ストリームマージ技術」や「GPUオフローディング技術」といった効率化・高収容化技術に取り組んできました。しかし、IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想がめざす、「ヒトでは扱いきれない規模の事象をとらえ、ヒトを超える速度で分析・判断できるAIシステムの実現」に向けては、入力データのさらなる高解像度化・高FPS（Frame Per Second）化と、都市規模のカメラ・センサ数への対応が必要となります⁽³⁾。一般にAI推論の処理量と消費エネルギーは分析対象となるデータ量に比例するため、入力データ量の爆発的な増加は、そのまま処理量と消費エネルギーの爆発的な増加につながります。IOWN時代のスマートシティを支える都市規模のCPSを実現するためには、この処理量・消費エネルギーを持続可能なレベルまで削減する技術が必要となるのです。

イベント駆動型推論の コンセプトと要素技術

前述の処理量・消費エネルギーの削減のために私たちが取り組んでいるのが「イベント駆動型推論」というストリームデータ向けAI推論の実装コンセプトです。イベント駆動型推論の目的は、AI推論に必要な処理量を、「入力データ量依存」から「価値ある情報量依存」に変えていくことにあります（図2）。

従来の、すべてのフレームを逐次的に処理する常時処理型のAI推論においては、処理量と消費エネルギーは入力されるデータ量（解像度・FPS・ストリーム数等）に依存します。した

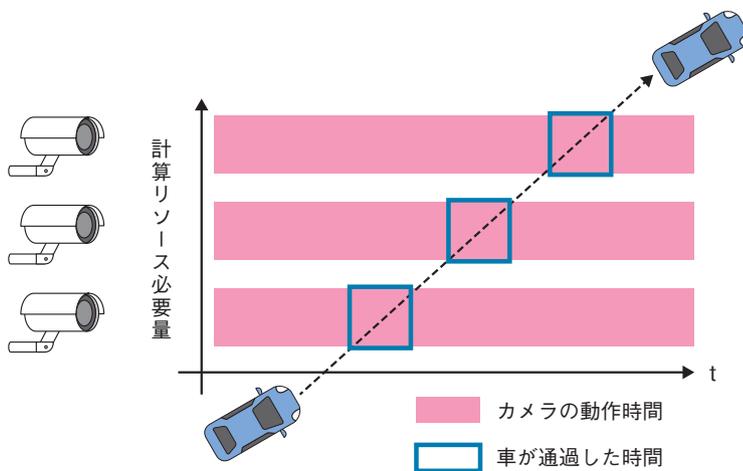
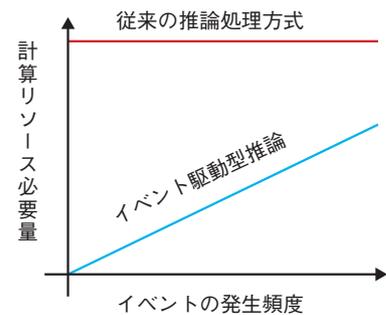


図2 イベント駆動型推論の概観



がって、スマートシティに配置されるカメラやセンサの高解像度化・高FPS化・数量増加は、そのまま処理量と消費エネルギーの増加につながります。これは一見当たり前のようですが、例えば人間の認知のメカニズムを考えると、解像度の増加が処理量・消費エネルギーの増加に直結することはありません。それは人間が、普段はなんとなく全体を把握しておき、いざ何かイベント（目の前に急に現れる、音を立てる等）が起きたときにはそちらに注意を払い、対象を詳しく見るというイベント駆動型の認知を行っているためです。この場合、認知に必要な処理量・消費エネルギーは、「注意を払うべき対象の量」すなわちその人にとって「価値ある情報の量」に依存するはずで、AI推論を実装する際も同様の工夫を行うことで、「価値ある情報量依存」の処理量を実現しようというのが「イベント駆動型推論」のコンセプトです。

イベント駆動型推論の実現方式としていくつかのアプローチが考えられます。代表的なアプローチとして、多層

推論が挙げられます。多層推論は、同一フレームを複数ステップに分けて分析するもので、次節にて詳しく紹介します。その他のアプローチとして、時間的制御、および空間的制御があります。時間的制御では、時間的に前のフレームの分析結果を基に、以降のフレームの分析パラメータを制御します。例えば、「通常時は5FPSで分析を行い、人物が検知された場合のみ分析の頻度を上げ、15FPSで分析する」といった制御がこれにあたります。空間的制御では、カメラやセンサのトポロジーを活用し、ある入力ソースの分析結果を使って他の入力ソースの分析パラメータを制御します。例えば、「監視エリアの入口のカメラにおいて人物が検知された場合のみ、エリア内のカメラ映像を分析する」といった制御がこれにあたります。

このコンセプトの実現に向けて、SICでは「多層推論技術」および「推論リソース共有技術」に取り組んでいます。

多層推論技術

イベント駆動型推論を実現するためには、何らかの方法でイベントを検知する必要があります。多層推論では前段のイベント検知を行う軽量な前さばきモデルと、後段の本格的な分析を行うAI推論モデルを組み合わせ、イベントが起きたときのみ後段のAI推論モデルを駆動することで系全体での処理量を削減します（図3）。前さばきモデルとしては、イベント検知により後段に送るフレームの絞り込みを行うもの、後段と同一のタスクを前段でより軽量・低解像度なモデルで推論し、処理結果の確信度が低い場合のみ後段に送るもの、AI推論を分割してその前半部分を前さばきモデルとし、中間出力を後段に送るものなど、複数のバリエーションが考えられ⁽³⁾、ユースケースや利用するハードウェア構成によって最適な構成は変わってきます。

推論リソース共有技術

イベント駆動型推論により処理量が「価値ある情報量依存」になった場合

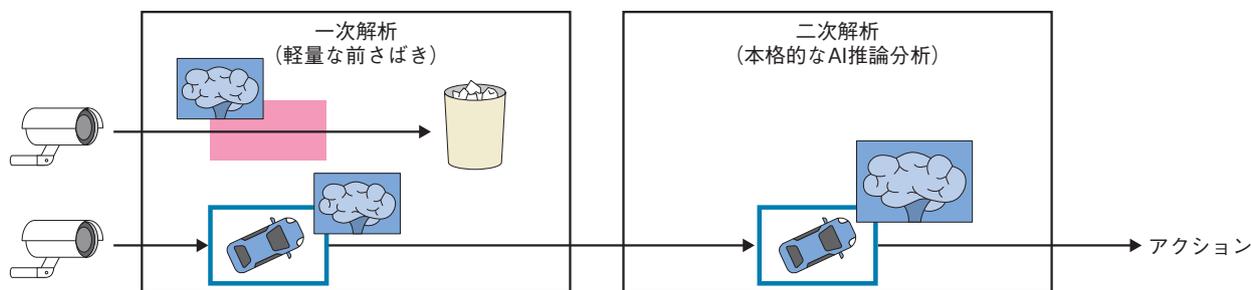


図3 前さばきモデルを用いた多層推論技術の例

に必要となるのが推論リソース共有技術です。従来の常時処理型のAI推論では、必要となるハードウェアリソースは常にほぼ一定であり、その収容設計は容易でした。一方で、イベント駆動型推論では、必要となるハードウェアリソースはイベントに応じて変化します。イベントが集中し負荷が上昇した場合にも対応可能なリソースを用意する必要がありますが、ピーク時に合わせて確保したリソースを普段は遊ばせてしまうのは望ましくありません。

このように、変化する推論の要求に応じて動的にハードウェアリソースを割り当てる技術としてはサービング技術 (Triton Inference Server⁽⁴⁾, KServe⁽⁵⁾等) がありますが、一般にサービング技術はオンデマンドなユースケースに特化しています。SICでは、サービング技術をリアルタイムなストリーム処理ユースケース向けに拡張した「推論リソース共有技術」の研究開発に取り組んでいます。推論リソース共有技術を用いることで、リアルタイムなストリーム処理のユースケースにおいても、ストリーム間で推論リソースを共有し、ピークの異なる複数のストリームを束ねて統計多重効果を得ることが可能となります。

今後の展望

本稿では、都市規模のCPSによって実現される、ソフトウェア化された都市 (=スマートシティ) の世界観と、それを支える、高解像度・多数のカメラ映像を効率的に処理するAI推論基盤、およびイベント駆動型推論のコンセプトと、その要素技術である多層推論技術と推論リソース共有技術について紹介しました。

多層推論技術や推論リソース共有技術を利用し、イベント駆動型推論のコンセプトを導入することで、IOWN時代のスマートシティで必要となる膨大なAI推論の処理量・消費エネルギーを大幅に削減することが期待できます。さらに、IOWNに向けた1つひとつの要素技術を積み重ねることで、ヒトを超える速度で分析・判断できるAIシステムを実現します。そして、より安全で、誰にでも利用でき、持続可能で、より快適なサービスを創造し、さまざまな社会課題を解決していきます。

参考文献

- (1) https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/smartcity/index.html
- (2) https://www.nri.com/jp/knowledge/glossary/lst/sa/smart_city
- (3) 江田・樽林・榎本・史・飯田・羽室：“IOWN時代のAIサービスを支える高効率イベント駆動型推論,” NTT技術ジャーナル, Vol.32, No.12, pp.16-22, 2020.
- (4) <https://developer.nvidia.com/nvidia-triton-inference-server>
- (5) <https://kserve.github.io/website/>



(上段左から) 三上 啓太/ 史 旭/
井上 規昭
(下段左から) 樽林 亮介/ 松尾 嘉典/
山崎 育生

私たちは、現状のデータセンタやクラウドでも動くソフトウェアを開発すると同時に、IOWN を見据えて情報処理基盤に必要な要素技術を創出しています。

◆問い合わせ先

NTTソフトウェアイノベーションセンタ
AI基盤プロジェクト
TEL 0422-59-7262
E-mail keita.mikami.mp@hco.ntt.co.jp

繰り返し型の効率的なテストを実現するテスト活動データ分析技術

近年、コストを抑えながらソフトウェアを早期にリリースすることへの要求が増えています。そのため、開発全体のコストに占める割合が大きく、ソフトウェアの一定の品質を確保するために必要となるソフトウェアテストは、開発におけるQCD (Quality, Cost, Delivery) の要といえます。本稿では、NTTソフトウェアイノベーションセンタ (SIC) が研究開発を行いOSS化した、テストを飛躍的に効率化する技術について紹介します。

たんの 丹野	はると 治門	きりぬき 切貫	ひろゆき 弘之
かわぐち 川口	たかひろ 敬宏	たじま 但馬	まさき 将貴
おいぬま 生沼	もりひで 守英	むらもと 村本	たつや 達也

NTTソフトウェアイノベーションセンタ

ソフトウェアテストの重要性

ウォーターフォールモデルによるソフトウェア開発は図1のように行われます*。テストで抽出できなかったソフトウェアの不具合はそのままユーザの元へリリースされてしまうため、ソフトウェアの品質確保においてテストは欠くことのできない大事な工程です。しかし、これらを手動ですべて行おうとすると大きなコストがかかります。また、近年ではユーザのニーズの変化や、動作環境となるソフトウェア、ハードウェアの進化のスピードが早いと、必要に応じて素早くソフトウェアを改良し短期で繰り返してリリースすることも求められています。しかし、一定の品質を確保しながらソフトウェアのリリースを繰り返すためには、新規部分のテストに加

えて、新規機能追加等による既存機能の劣化が引き起こされていないかを確認するためのテスト (回帰テスト) を、リリースのたびに旧機能全体に対して行う必要があります。これにも大きなコストがかかります。NTTソフトウェアイノベーションセンタ (SIC) では、ソフトウェア開発におけるQCD (Quality, Cost, Delivery) の要となっているテストを変革し、ソフトウェア開発の生産性を飛躍的に向上させることをめざしています。

ソフトウェアテストの現状

ソフトウェアテストの目的は、ソフトウェアが正常に振る舞うことを確認したり、ソフトウェアの不具合数を減らしたりすることです。テスト工程における主要なタスクはテスト設計、テスト実施となります。テスト設計では、行うべきテストのバリエーションの洗い出しを行い、テストケースを網羅的に設計し、各テストケースそれぞれについて具体的にテスト実施可能な手順への詳細化や、自動実施用のスク

リプト作成を行います。そしてテスト実施では、テストケースごとに、入力データを与え、ソフトウェアを動作させ、それぞれのテストケースでソフトウェアの振る舞いが期待どおりであるかを確認します。現状のテストでは大きく3つの課題があると考えています。

1番目の課題は、従来の事前計画した指標値に基づいた網羅的かつ詳細なテスト設計には大きなコストがかかるという点です。品質向上をめざして網羅性を追求すると膨大な時間がかかります。加えて、テストの再現性や監査性の確保のために、各テストケースについて、テスト手順など詳細に記述するような重厚長大なテストケース表の作成にも大きな稼働がかかります。

2番目の課題は、テストの実施には膨大な稼働とスキルを要するという点です。多数あるテストケースそれぞれについて、手順に沿って、テスト対象アプリへの操作や入力、そして結果の

* 図1はウォーターフォール開発におけるプロセスとなっており、アジャイル開発ではこのようなプロセスを短期で繰り返すこととなります。



図1 ソフトウェア開発プロセス

確認を行う必要があります。手順どおりにすべてを実施していくことに多大な時間がかかります。

3番目の課題は、短期で繰り返しリリースを行うために必要となる回帰テストの自動化にコストがかかる点です。JUnit, Seleniumなど、テストを自動実行するための既存のフレームワークやライブラリは多く存在しますが、自動実行のためにはスクリプト作成が必要となり、スクリプト作成に大きな手間がかかります。そのうえ、スクリプトは一度作成したら終わりではなく、テスト対象ソフトウェアの修正に合わせてスクリプトを修正するという保守作業にも大きな手間がかかります。

めざす世界

SICでは、多様化・曖昧化するビジネスの要件とビジネスの進化スピードに対応した超高速開発の実現のため、人の作業の一部を代替・超越するAI

開発技術を確立し、AIと人が協働して開発を行うというアプローチをとっています。超高速開発におけるテストについては図2に示すような世界をめざしています。

私たちのアプローチでは、闇雲に網羅性を追求せず、テストすべき個所を選択し、そこに集中します。そして、どこへ選択・集中するかについては、テスト実施状況・結果のデータを収集、分析して逐次判断します。これにより、従来の網羅的なテストの課題を解決し、テストの飛躍的な効率化を実現します。収集したテスト実施状況・結果のデータに詳細なテスト手順も含まれるため、テストの再現性と監査性も担保することができます（1番目の課題の解決）。加えて、収集したテスト活動データを活用し、保守しやすいテストスクリプトの自動生成も行うことで、回帰テストの自動化を容易に行えるようにし、ソフトウェアを改良したあとに迅速なリリースを可能にしま

す（3番目の課題の解決）。

そして、最終的には、大量に蓄積したテスト活動データを解析することで、過去のテスターの知見を再利用し、テスト実施中に繰り返し行われる手順については自動実施による補助を行うことに加え、テスト品質を向上させるためにテスト推薦を行うことで、テスト実施についても大幅に省力化することをめざします（2番目の課題の解決）。

今回、本稿では、NTTグループ内でも多く開発されている、Webアプリケーションをフロントエンドとして持つ業務アプリケーションにおける、効率化のニーズが高い結合テストを対象とした技術「LatteArt」が、どのように1番目と3番目の課題を解決しているかについて説明します。

繰り返し型の効率的なテストを実現するテスト活動データ分析技術LatteArt

業務アプリケーションは、多くのユー

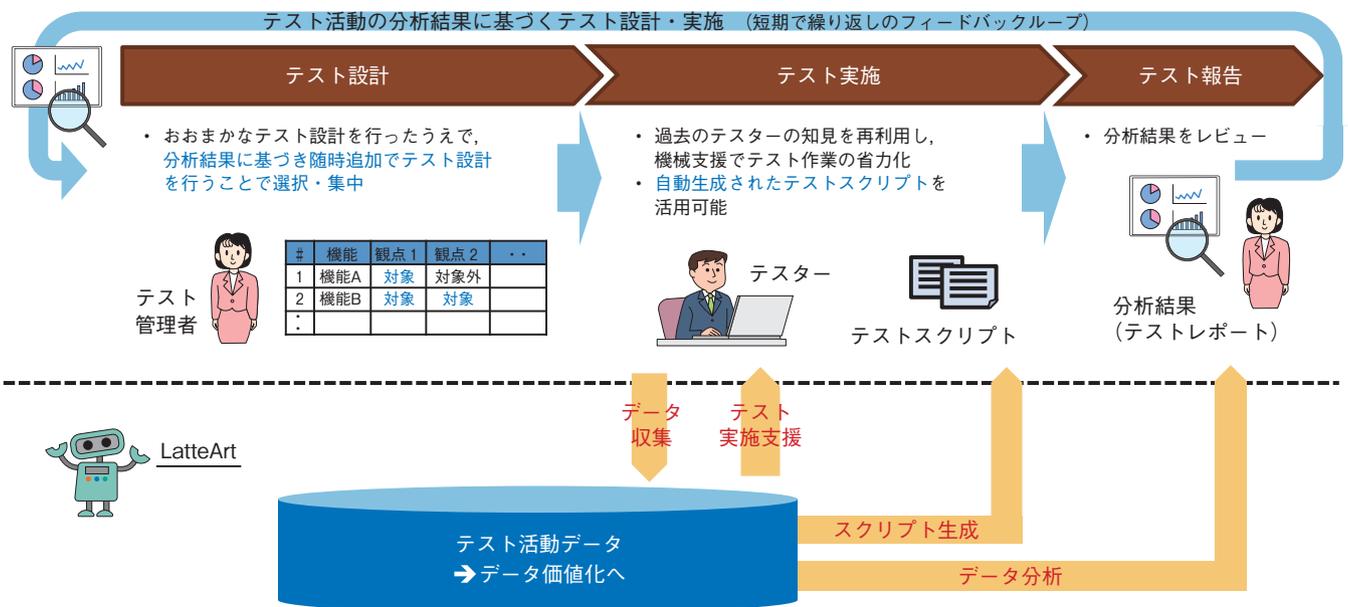


図2 めざす世界

スペースシナリオ、機能、画面があり、各画面における入力のパターンも多くの組み合わせが存在し、従来の網羅的なテストには大きなコストがかかります。なんらかのモデル（例えば、ソフトウェアの設計モデル）から網羅的なテストを自動設計することでテスト設計を支援するツールも存在しますが、ソフトウェアの設計モデルの作成という追加のコストが発生してしまうという課題がありました。また、Webアプリケーションのテストを自動化するためには、画面の操作を自動で行うテストスクリプトの作成が必要となります。このようなテストスクリプトは、例えば、既存のキャプチャ&リプレイツール（例：SeleniumIDE）を使うことで、高いスキルがなくてもスクリプトを作成することはできますが、スクリプト作成の手間はかかりますし、キャプチャ&リプレイツールで記録したテストスクリプトはモジュール化されていないため、修正しづらく保守性が低いという課題もあります。

このような課題を解決するため、私たちは、繰り返し型の効率的なテストを実現するテスト活動データ分析技術LatteArtの開発を進めてきました。LatteArtには以下のような特徴があります。

- ① テスト活動データの収集：テスターのWebアプリケーション画面上の操作ログ、スクリーンショット、およびテスターがテスト実施中に入力したテスト目的、バグ、気付きなどを自動で収集し、テスト活動データとしてデータ化します。
- ② テスト活動データの分析：自動で収集されたテスト活動データを

分析し、さまざまなデータモデルで可視化することが可能です。例えば、図3、4に示すようなシーケンス図、画面遷移図といったモデルで可視化することが可能で

す。これにより、随時人がテストの充分性を確認し、必要最低限のテストを補うことで効率的なテストを実現できます。加えて、テスト活動データに基づき、テスト

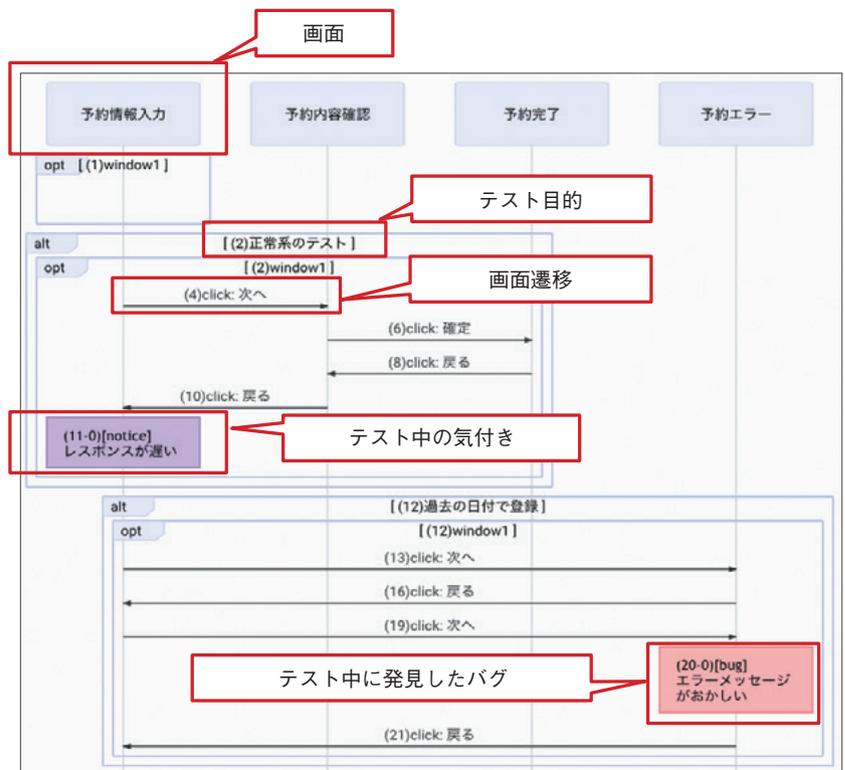


図3 シーケンス図

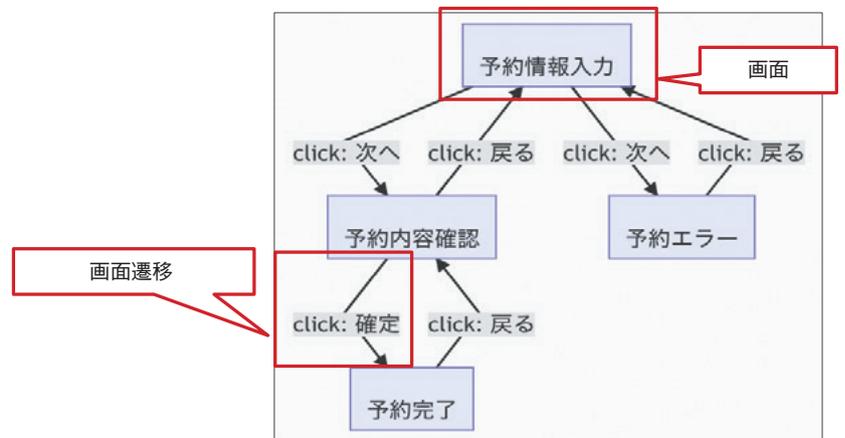


図4 画面遷移図

```
doGotoNext({
  reserveMonth,
  // ...
}) {
  this.reserveMonth.setValue(reserveMonth);
  this.reserveDay.setValue(reserveDay);
  // ...
  return new 予約内容確認();
}
```

図5 テストスクリプト

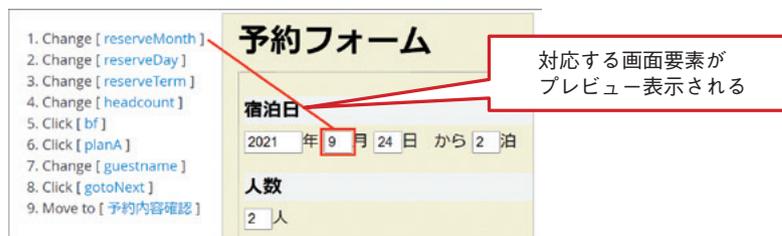


図6 テストスクリプトのドキュメント

ケース表とテスト結果相当の情報をテスト活動データから自動で生成するので、従来作成していた詳細なテスト手順を含む重厚長大なテストケース表も不要となります。

③ 回帰テスト向けテストスクリプト生成：テスト活動データから、ページオブジェクトパターンに基づいてモジュール化した保守性の高いテストスクリプトの雛形を自動生成⁽³⁾します。さらに、ドキュメントも合わせて一緒に自動生成⁽⁴⁾することで、編集の際のテストスクリプトの可読性を向上させます。ドキュメントには、テストがどのような画面遷移を行うかを示す画面遷移図や、操作される要素を示したスクリーンショットも含まれています。図5、6にテストスクリプトの例を示します。これにより、テストスクリプトの実装、保守が容易になり、手間をかけずに回帰テストを自動化することを可能とします。

到達点と今後の展望

現在、NTTグループ会社との共同実験でLatteArtの適用評価を行っており、開発現場から好感触を得ています。また、LatteArtの技術については国内の学会における発表でも高い評価を受け、複数の賞をいただくことができました。LatteArtを用いた短期

繰り返し型のテストは新しいテスト手法であるため、NTTグループ内外のステークホルダ（開発者・システムオーナー）により、新しいテスト手法が理解され、広く受け入れられる土壌をつくり上げることが重要と考えます。そのために、LatteArtのOSSコミュニティを立上げ、ソースコードをGithubで公開しました⁽⁵⁾。

今後は、実践で得たデータも武器に、大量に蓄積されたテスト活動データから、過去のテスターの知見を抽出することにより、テスト実施時に繰り返し行われる事前手順作業の自動化やテスト推薦を行うことで、テスト実施についても大幅な省力化を実現し、テスト全体のさらなる効率化をねらいます。加えて、NTTグループに閉じず、NTTグループ外の企業、大学等とも連携し、産学のさまざまな知見をいただきながら進めることで、LatteArtのOSSコミュニティを中心としたテスト変革のエコシステムを育てていくつもりです。めざす世界の実現のため、一步一步着実に研究開発を進めていきたいと考えています。

■参考文献

- (1) 熊川・峯尾・丹野・切貫・倉林：“SONAR Testing 効率と客観性を両立した新たなテスト手法,” 日本科学技術連盟 ソフトウェア品質シンポジウム2019, 2019.
- (2) H.Kirinuki, T.Kurabayashi, H.Tanno, and I.Kumagawa: “Poster: SONAR Testing - Novel Testing Approach Based on Operation

- Recording and Visualization,” ICST 2020, pp. 410-413, Oct. 2020.
- (3) 切貫・丹野：“手動テストのログを用いた有用なEnd-to-Endテストスクリプトの自動生成,” ソフトウェアエンジニアリングシンポジウム2020論文集, pp. 106-114, 2020.
 - (4) 但馬・切貫・丹野：“ドキュメントの自動生成によるEnd-to-Endテストスクリプトの理解支援,” ソフトウェア工学の基礎28, pp. 177-178, 2021.
 - (5) <https://github.com/latteart-org/latteart/>



(上段左から) 丹野 治門/ 切貫 弘之/ 川口 敬宏
(下段左から) 但馬 将貴/ 生沼 守英/ 村本 達也

私たちはテストを飛躍的に効率化することをめざし、繰り返し型の効率的なテストを実現するテスト活動データ分析技術の研究開発を進めています。今後も、開発現場のフィードバックを得ながら技術を磨いていきます。

◆問い合わせ先

NTT ソフトウェアイノベーションセンター
ソフトウェア開発技術プロジェクト
TEL 03-6712-9638
FAX 03-6712-8372
E-mail iso-tool-support-p-ml@hco.ntt.co.jp



主役登場

AIの省電力化をめざして

榎本 昇平

NTTソフトウェアイノベーションセンタ
研究員

深層学習に代表されるAI（人工知能）技術は数多くの商用サービスに利用され、ビジネスを変革する技術として発展してきました。NTTが進めるIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想においても、データ中心社会におけるデータ分析・価値化に向けAIをさらに進化させた、より高度な認知・自律・予測システムの実現をめざしています。すなわち、ヒトでは見えないものを知覚し、ヒトでは扱いきれない規模の事象をとらえ、ヒトを超える速度で分析・判断できるAIシステムの実現です。それらのAIシステムを用いてデータを価値化することでより安全に誰もが利用でき、持続可能で快適なサービスを創造し、さまざまな社会課題を解決していきます。

AIの利便性への期待が高まる一方で、AIによる電力消費の問題が注目されています。AIの認知能力・処理速度を高めようとすると、より多くの電力を消費する結果となります。NTTソフトウェアイノベーションセンタ（SIC）では、AIの能力向上と合わせて消費電力を飛躍的に低減させるために、イベントが起きた際にのみAI処理を行うイベント駆動型推論の研究開発に取り組んでいます。

イベント駆動型推論を実現する技術の1つとして、私はカスケード推論技術に着目しています。カスケード推論とは、計算コストや精度が低いが高速度なAIモデル（軽量モデル）と計算コストが高く速度が遅いが高精度なAIモデル（高精度モデル）を組み合わせることで推論を行う技術です。近年、低消費電力でAI推論が可能なエッジデバイスが多

数あります。これらのデバイス上の軽量モデルで大部分の処理を行い、一部の処理のみをクラウド上の高精度モデルで行うという役割分担により、精度低下なく計算量・データ転送量を削減し、系全体で省電力化と高収容化につながることが期待できます。

軽量モデルが正解可能なデータは軽量モデルが処理すべきです。一方で、不正解なデータはすべてクラウドへ転送すればいいというわけではありません。高精度モデルも不正解な場合は無駄な転送・計算になってしまいます。

これらのモデルの推論の正誤の判定が自動で可能ならば無駄な転送と計算を回避できますが、この判定は困難です。そこで、私は軽量モデルの学習時に高精度モデルの正誤情報も同時に学習させることで、データを転送するかしないかを判定するスコアを出力させる技術を研究しています。提案技術は必要なデータのみをクラウドへ送信するため無駄な転送を省くことができます。実際に従来に比べて最大で36%の計算コストと41%の通信コストを削減することを確認しています。

提案技術は計算・転送コストを削減し大幅な消費電力削減につながることが期待できます。私は、ヒトを超える速度で分析・判断できるAIシステムの実現のために現在もさまざまな研究を行っています。そして、より安全に誰もが利用でき、持続可能で快適なサービスを創造しさまざまな社会課題を解決していきたいと考えています。

ナノメカニクス研究の最前線

振動や音波・弾性波を利用したナノメカニカル素子は、
発熱や集積化の点で優れた省エネ微小デバイスとして期待される。
本特集では、電気や光を用いてナノメカニカル素子を制御し、
これをセンサや情報処理応用などへとつなげる
NTT物性科学基礎研究所の最新成果について紹介する。

ナノテクノロジー

カオス

フォノン

エルビウム

機械振動

Nanomechanics

ナノメカニクス研究の概要と展望 26

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術をさらに発展させたナノメカニクス技術について、NTT研究所で行われている研究成果を中心に、その概要と今後の展望を紹介する。

ナノメカニカル振動子による新しいカオス信号生成手法 30

NTT研究所で最近実現することに成功した、ナノメカニカル振動子を用いた簡便で汎用性の高い新しいカオス生成手法について紹介する。

フォノン導波路やフォノンニック結晶を用いた弾性波の制御 34

電気機械フォノンニック結晶という新しいプラットフォームを用いて、フォノンのオンチップ制御技術の向上に取り組んだこれまでの研究成果について紹介する。

光のエネルギー損失が極めて少ないオプトメカニカル素子の創出 39

半導体材料よりも桁違いに長い発光寿命を持つ希土類エルビウム元素を用いて実現した“光のエネルギー損失が極めて少ないオプトメカニカル素子”に関する研究成果について紹介する。

光キャビティを用いたナノワイヤ振動子の高感度検出と制御 43

機械的な機能と光・電子デバイスとしての機能を融合した新しいハイブリッド量子デバイスの創出へ向け、NTT研究所が最近開発したナノワイヤの微小振動を高感度に検出・制御する技術について紹介する。

インクジェット技術を用いた架橋ナノワイヤ電気機械素子の作製 47

身近なインクジェット技術を用いることによって、機械振動素子を手軽に効率良く、かつ資源の無駄を極力抑えて作製できることについて紹介する。

主役登場 岡本 創 (NTT物性科学基礎研究所) 51

物体の小さな振動を利用する

ナノメカニクス研究の概要と展望

昨今、微細な構造の機械的な振る舞いを活用したMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) の技術が、携帯端末や車載機器などさまざまな場面で用いられています。本稿では、このMEMS技術をさらに発展させたナノメカニクス技術について、NTT研究所で行われている研究成果を中心に、その概要と今後の展望について紹介します。

やまぐち ひろし ことう ひでき
山口 浩司^{†1} 後藤 秀樹^{†2}

NTT物性科学基礎研究所^{†1}

NTT物性科学基礎研究所 所長^{†2}

ナノメカニクス技術とは

「ナノメカニクス」という言葉を聞かれて、皆さんは何を想像されるでしょうか。ナノテクノロジーという言葉が使われ始めて随分経っていますので、「ナノ」は非常に小さいことを表現する言葉としてご存じの方も多いと思います。「ナノメートル」という単位がその語源であり、正確に書くと10億分の1メートルという極めて小さいサイズを表します。なかなか簡単に想像できない大きさですが、原子の大きさが0.1~0.2ナノメートル程度なので、その数倍程度の大きさというわけです。次の単位は「マイクロメートル(ミクロン)」となり100万分の1メートルを意味しますので、だいたい1ナノメートルから1ミクロンに至る範囲の大きさを扱う技術をナノテクノロジーと呼ぶこととなります。現在猛威を振るっている新型コロナウイルスは、おおよそ100ナノメートルという大きさなので、ちょうど、その程度の大きさを扱う技術ということができるとおもいます。

では「メカニクス」のほうはどうい

う意味でしょうか。英語のmechanicsの和訳は力学とされています。力学と聞いてまず思い出すのは、リンゴが落ちるのを見て万有引力の発見につながったとされるニュートン力学です。これは、モノ(リンゴ)の動きと、それを引き起こす力(万有引力)が、どのような関係にあるかを記述した学問です。したがって、ナノメカニクスとは、ウイルスのサイズに代表される極めてミクロな世界において、モノに加わる力と、それによる動きを研究する分野ということになります。私たちが研究の対象としているナノメカニクス技術は、このような小さな力と小さな動きを用いて、新しい微細構造素子(デバイス)技術を開拓しようという試みになります。

さて、ナノの世界からは少し離れ、お寺の鐘を想像していただけたでしょうか。鐘を叩くとなぜゴーンという音が鳴るかという、鐘を構成している金属が、叩かれることによって周期的な弾性振動を引き起こすためにほかありません。この振る舞いも力学の法則を用いて正確に記述できるわけです。

が、例えば、1秒間に440回振動を繰り返すと、440ヘルツ(Hz)の振動になります。これは音楽の「ラ」の音に対応します。523.23 Hzだと少し高い「ド」の音、783.98 Hzだと、さらに高い「ソ」の音になります。振動が早くなるほど高い音になるわけですが、高い音を出すためには鐘を小さくすればよいことは容易に想像できると思います。すなわち、もしナノのサイズで鐘をつくったらその振動は極めて高い周波数で起きるわけです。私たちの研究のエッセンスはこの部分にあります。すなわち、最先端の微細加工技術を用いて極めて小さな「鐘」を作製し、それが持つ高い周波数の振動を用いた新しい技術を開拓しようとしているわけです。

ナノメカニカル振動子

いくら半導体の微細加工技術が進んでいるといっても、お寺の鐘と同じかたちの構造をナノスケールに縮小したものをつくることはたやすくありません。そこで、もっとつくりやすい簡単な構造を振動させて、その機能を使い

ます。図1にその代表例を示します。図1(a)はカンチレバー（片持ち梁）と呼ばれる構造です。ちょうど、プールの飛び込み板のような形状で、端を叩けば振動するわけです。図1(b)は両持ち梁と呼ばれ、橋のようなかたちです。両側が固定されていますのでカンチレバーより動きが硬く、高い振動周波数を持ちます。薄い板状の例を図1(a)(b)に示しましたが、円柱状の構造でもかまいません。本特集で紹介するナノワイヤを用いた研究は、結晶成長により作製した直径数百ナノメートルの円柱構造をカンチレバーあるいは両持ち梁状の振動体として用いたものです。図1(c)は円形メンブレン振動子で、ちょうど太鼓のような形状になっています。今回の特集でフォノンニック結晶導波路と呼ばれる弾性振動

を回路に沿って伝えていく素子についても解説していますが、この導波路はメンブレン振動子を多数等間隔に連続させた形状となっています。

さて、表1は、カンチレバーならびに両持ち梁の周波数が、構造のサイズとともにどのようになるかを、代表的な半導体の1つであるガリウムヒ素（GaAs）に対して示したものです。同じ形状でも両持ち梁のほうがカンチレバーより6倍ほど周波数が高くなりますが、長さがマイクロンサイズより短くなった段階で、ギガヘルツの周波数領域に入ることが分かります。ギガヘルツというのは携帯電話の電波に使われている周波数です。私たちの耳に聞こえる音は、もっとも高い音でも10～20キロヘルツ程度ですが、その10万倍も高い周波数ということになります。

したがって、ナノメカニカル素子を活用することにより、いわゆる超音波あるいは携帯電話の周波数に相当する極超音波と呼ばれる高い周波数の振動を制御できる技術を実現できることになります。私たちはこのような視点から、20年近く前よりナノメカニクスの研究を続けてきました。扱っている周波数は100キロヘルツ程度から1ギガヘルツの範囲に及びますが、今回の特集では主に10メガヘルツまでの比較的低い周波数領域の研究を紹介します。

ナノメカニクスの応用

ところで、このような弾性的な動きを素子として活用する技術として、いわゆるMEMS（Micro Electro Mechanical Systems）が活発に研究されています。私たちの研究では2つの独自のアプローチを用いることにより、MEMSの次世代技術ともいえるべき「ナノメカニクス」技術の研究を進めています（表2）。第一は、弾性特性の非線形性を用いることです。「非線形性」というのは耳慣れない言葉かと思いますが、実はダイオードやトランジスタなどの半導体素子は、コイルやコンデンサ、抵抗などの「線形」な特性を持つ素子にはない非線形性を持つことで、さまざまな機能を持たせることに成功しました。非線形性とは、入力と出力が比例しないことを意味します。例えば、抵抗器では加えた電圧に比例する電流が流れますが、ダイオードでは、それらは比例しません。さらにトランジスタでは電極に加えた電圧や電流によって、この非線形特性が変化します。メカニカル振動子の場

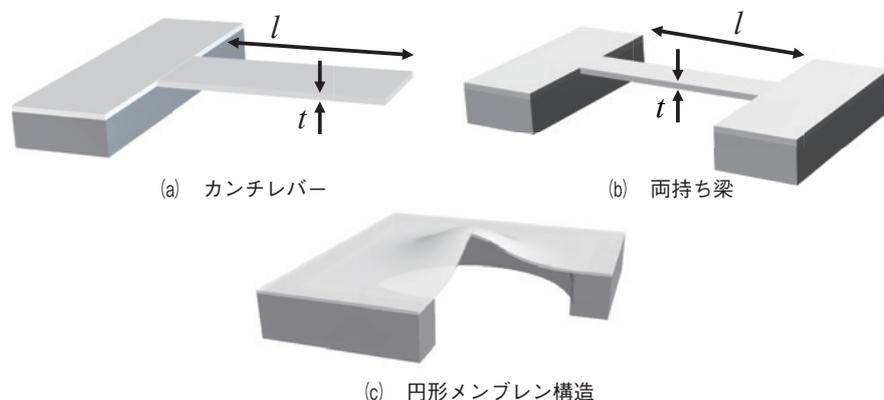


図1 ナノメカニカル振動子の代表例

表1 カンチレバーならびに両持ち梁の振動周波数の計算値

lの長さ	1 mm	100 μm	10 μm	1 μm	100 nm
カンチレバー	32 kHz	320 kHz	3.2 MHz	32 MHz	320 MHz
両持ち梁	200 kHz	2 MHz	20 MHz	200 MHz	2 GHz

lは構造の長さ、tは厚さ（図1参照）で、それらの比 (l/t) を20、材料としてガリウムヒ素を用いたときの計算値

合、この特徴は加えた力に対し振動の大きさが比例しないことに相当しますが、微細化に伴い、このような非線形性の影響は顕著になります。この特性を活用した「非線形」ナノメカニカル素子を実現することにより、ダイオードやトランジスタなどと同じような革新的機能を持つナノメカニカル素子をつくり出すことをめざしています。もう1つの試みは、半導体や光材料などの機能性材料を用いることにより新しい機能をつくり出すことです。これまで電子デバイスや光デバイスとして用

いられてきたこのような材料においては、弾性振動による新しい原理の電子デバイスや光デバイス、あるいは、超高感度のセンサ技術などの応用が期待されます。特に、いわゆる量子デバイスとして知られているナノ構造を組み込むことにより、昨今注目されている量子技術への応用が可能となります。

図2はこのような一例として実現した超高感度センサの電子顕微鏡写真です⁽¹⁾。両持ち梁構造の根元部分に量子ドット構造が埋め込まれており、梁の弾性振動を超高感度に検出することが

可能です。どの程度小さな振動を検出できるかという点、0.1ピコメートル(10兆分の1メートル)という、原子よりさらに小さな原子核の直径に匹敵する小さな変位を検出することができます。この原理により、梁が受けた著しく小さな力による変位を検出することが可能となり、超高感度の加速度や磁気、あるいは分子や原子のセンサの核心部として用いることができます。

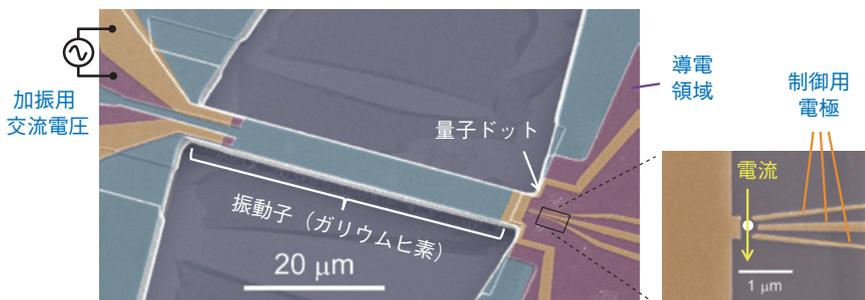
本特集では、最近、私たちのグループで研究が大きく進んだ5つのトピックスについて紹介します。まず、非線形ナノメカニクスの例として、新しいカオスの発生手法について紹介します⁽²⁾。カオスはこれまでランダムで掴みどころのない振る舞い、という意味で、応用するうえでは、むしろ障害となる現象とみられていました。しかし、昨今の機械学習の分野では、このカオス的な振る舞いが機械学習の効率を改善するうえで重要な役割を果たすと期待されています。また、カオスを使った秘匿通信なども提案されており、いかにしてカオスを制御よく発生させるかは、応用上も重要な研究課題であるということが出来ます。

2番目のトピックスとして、フォノン結晶を用いたフォノン導波路について紹介します⁽³⁾。フォノンとは、光に対するフォトン、電流に対する電子などと同じ意味で用いられ、音波などの弾性振動の基本単位となる「音の粒子」にあたります。私たちは非線形性を用いて、このフォノンの流れを制御する手法を新たに開拓しました。これはちょうど、電子回路を流れる電流、すなわち電子の流れを電圧で制御する

表2 エレクトロニクスとメカニクスにおける素子と機能の比較

	線形素子	非線形素子		量子素子
		二端子素子	三端子素子	
エレクトロニクス	インダクタ コンデンサ 抵抗器	ダイオード	トランジスタ	量子ビット 量子メモリ
	同調器 フィルタ	検波 整流	増幅・スイッチ メモリ・演算	量子計算 量子計測
メカニクス	共振器	今後の研究対象		
	高周波フィルタ センサ・ジャイロ マイクロフォン			

メカニクスでは非線形素子ならびに量子素子はまだこれからの研究対象であり、それらが発展することによりダイオードやトランジスタと同様の大きな技術的飛躍が期待される。



構造が振動することにより量子ドットに歪が加わるが、この歪が量子ドットを流れる電流に大きな変化を与えるため、電流の変化を測定することにより梁構造の振動を超高感度に検出できる。

図2 量子ドットを組み込んだ振動子(両持ち梁構造)

トランジスタと同様の役割を持ち、音波、すなわちフォノンの流れを外部から制御する「フォノントランジスタ」を世界で初めて実現した研究といえます。電子回路と同様に、ナノメカニクスデバイスの集積回路が実現できれば、この素子は、その中核を担う役割を持つことが期待されます。

3番目のトピックスは、光ファイバなどに広く用いられている光材料である希土類元素を用いた新しいオプトメカニクス素子です⁽⁴⁾。オプトメカニクスとは、光とメカニクスの両方の機能を融合した技術のことで、昨今、研究が大きく進展している技術分野の1つです。エルビウムなどの希土類元素は、通信波長帯の光の吸収や発光を担う材料であり、その特性制御は光通信技術において広く活用できるとともに、量子技術への応用も期待されます。本特集では、希土類元素の1つであるエルビウムをカンチレバーに組み込み、希土類元素の発光を弾性振動により変調する新しい技術について紹介します。

4番目のトピックスでは、同じくオプトメカニクスの技術を使って、光により半導体ナノワイヤからなるカンチレバー構造の振動を高感度に検出した例について紹介します⁽⁵⁾。半導体ナノワイヤは、気相成長などの結晶成長法によって作製されるナノ構造です。リソグラフィなどの微細加工を使用しないため構造の結晶性が高く、半導体レーザや高速トランジスタに用いられているヘテロ構造や、量子技術の要である量子ドットなどのナノ構造を組み込むことが可能です。ナノワイヤをナ

ノメカニカル振動子として用いることにより、電子デバイス、光デバイス、量子デバイスを組み合わせた高度な機能をナノメカニクスデバイスに取り込むことが期待されます。

最後のトピックスでは、これらのナノメカニカル素子を作製する手法として、インクジェット技術を用いた架橋ナノワイヤ電気機械素子の作製について紹介します⁽⁶⁾。インクジェット技術は皆さんの身近にあるプリンターの基盤技術として知られていますが、昨今、この手法は新しい微細構造作製技術としても使われ始めています。この解説では、結晶成長により作製した半導体ナノワイヤを、どのようにして半導体ウエハの上の所望の位置に並べ、ナノメカニカル素子として組み上げるかについて説明します。

今後の展望

本稿では、本特集で紹介するナノメカニカル技術に関して、その概要を簡単に紹介しました。電子デバイスや光デバイスと比較し、ナノメカニカル素子はまだまだ研究が始まったばかりの段階であり、今後大きな発展が得られる可能性があります。NTT物性科学基礎研究所では、機械学習などの新しい情報処理や、高感度低消費電力センサなどのIoT (Internet of Things) 技術、さらには量子通信や量子計測などに貢献する新しい原理のナノメカニカル素子の開拓をめざして研究を進めています。

参考文献

- (1) Y. Okazaki, I. Mahboob, K. Onomitsu, S. Sasaki, and H. Yamaguchi: "Gate-controlled

electromechanical backaction induced by a quantum dot," Nat. Commun., Vol. 7, No. 11132, 2016.

- (2) 山口・Samer・浅野: "ナノメカニカル振動子による新しいカオス信号生成手法," NTT技術ジャーナル, Vol.34, No.2, pp.30-33, 2022.
- (3) 畑中・黒子・山口: "フォノン導波路やフォノン結晶を用いた弾性波の制御," NTT技術ジャーナル, Vol.34, No.2, pp.34-38, 2022.
- (4) 太田・Victor・山口・岡本: "光のエネルギー損失が極めて少ないオプトメカニカル素子の創出," NTT技術ジャーナル, Vol.34, No.2, pp.39-42, 2022.
- (5) 浅野・章・山口・岡本: "光キャパシティを用いたナノワイヤ振動子の高感度検出と制御," NTT技術ジャーナル, Vol.34, No.2, pp.43-46, 2022.
- (6) 佐々木・館野・岡本・山口: "インクジェット技術を用いた架橋ナノワイヤ電気機械素子の作製," NTT技術ジャーナル, Vol.34, No.2, pp.47-50, 2022.



(左から) 山口 浩司 / 後藤 秀樹

メカニカル振動子は、鐘や太鼓などの楽器に始まり、水晶振動子や携帯端末用の高周波フィルタなど、さまざまな場面で活用されてきた技術要素です。非線形性や量子性などを活用したナノメカニクスは、その機能を大幅に広げる新技術として今後の発展が期待されます。

◆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
ナノメカニクス研究グループ
TEL 046-240-3475
FAX 046-240-4317
E-mail hiroshi.yamaguchi.zc@hco.ntt.co.jp

ナノメカニカル振動子による 新しいカオス信号生成手法

さまざまな自然現象にみられるカオスは、不規則で複雑な振る舞いをその特徴とするため、学術的な重要性は認められつつもデバイス技術への応用はあまり進んでいませんでした。しかし、最近のセキュリティ技術やAI（人工知能）技術の進歩により、カオス信号を利用しようとする試みが具体化し始めています。本稿では、NTT研究所で最近実現することに成功した、ナノメカニカル振動子を用いた簡便で汎用性の高い新しいカオス生成手法について報告します。

やまくち

山口

あさの

浅野

ひろし

浩司

もとき

元紀

Samer Houry

NTT物性科学基礎研究所

カオスとは

カオスという言葉を検索すると、「無秩序で、さまざまな要素が入り乱れ、一貫性が見出せない、ごちゃごちゃした状況・様相を形容する表現」とされています。「今の株価の動きはカオス的だ」とか「私の机の上はまさにカオスだ」など、予測のつかない不規則な状態が一般にカオスと呼ばれているようです。一方、数学の世界でカオスというと、こちらは学問の対象として具体的に性質が規定されているようです。数学的に厳密な表現ではありませんが、分かりやすく書くと「一見無秩序に見える複雑な動きでありながら、決まった法則に従って時間変化をする再現性のある振る舞い」という表現ができるかと思います。不規則でランダムな動きと、規則性を持つ周期的な動きのちょうど中間的な振る舞いとして、数学や物理学の対象として注目を集めてきたわけです⁽¹⁾。

カオスには、いくつかの特徴があります。まず、同じ初期条件でスタート

したら、その後は同じ振る舞いを示すという「規則性・再現性」があるという点で、これはランダムな動きとは一線を画す重要な性質です。したがって、最初の状態が把握できれば、原理的にはその後の動きを完全に予測できることとなります。しかし、カオスには、ほんの少しの初期条件の違いが大きな変化を引き起こす「バタフライ効果」という性質があり、これにより実際には将来予測が極めて困難になるという特徴も持っています。最初の状態が完全に把握できれば、原理的にはその後をすべて予測できるわけですが、最初の状態がほんのちょっと、例えば0.01%違うだけでも、しばらく時間が経ったのちの振る舞いが大きく異なってしまうわけです。これは例えば、ラグビーボールを平らな床の上に落とし、たどる軌道を想像すると分かりやすいかもしれません。ラグビーボールの動きはあくまで物理の法則に忠実に従っているわけで、もし完全に同じ条件で床の上に落とすことができれば、その後の運動も繰り返し再現できるはずで

しかし、実際にはほんの少しだけ落とす角度や速度が違うだけで、それにより、その後の振る舞いは全く変わってしまいます。

このような複雑な振る舞いが、非常に簡単な力学系において発生することもカオスの特徴です。そういう意味では、例えば、天気振る舞いは、気温、湿度、風向、風速、気圧等、非常に複雑な系に依存しており、実際にはカオスと呼べないということになります。しかし、例えば3つの星がお互いの重力で引き合う「三体問題」では、カオス運動が起きることが知られています。3つの星と重力という極めて簡単な力学系であるにもかかわらず、複雑な振る舞いがみられる点がカオス現象の興味深いところです。

このように、カオスは複雑で取り扱いが難しい現象なので、従来はむしろ制御不能で技術応用は難しいと考えられてきました。しかし、カオスの複雑さをむしろ積極的に利用し、情報の暗号化を行う秘匿通信や、カオスが生成される直前の「カオスの縁」状態

を用いた高効率の機械学習^{*1}など、カオスを技術応用しようという試みが現在進められています⁽²⁾。ただ、前述したように、カオスは初期条件の変化に対して極めて敏感なので、いかにして安定にカオスを生成できるかが、カオスの応用を考えるうえでの大きな技術課題であるといえます。このような背景のもと、私たちはナノメカニカル振動の非線形性を用いることにより、外部から安定にカオス発生を制御が行える新しいカオスの生成手法を提案することに成功しました^{(3), (4)}。以降ではその手法について、概略を述べます。

秤動運動によるカオス生成

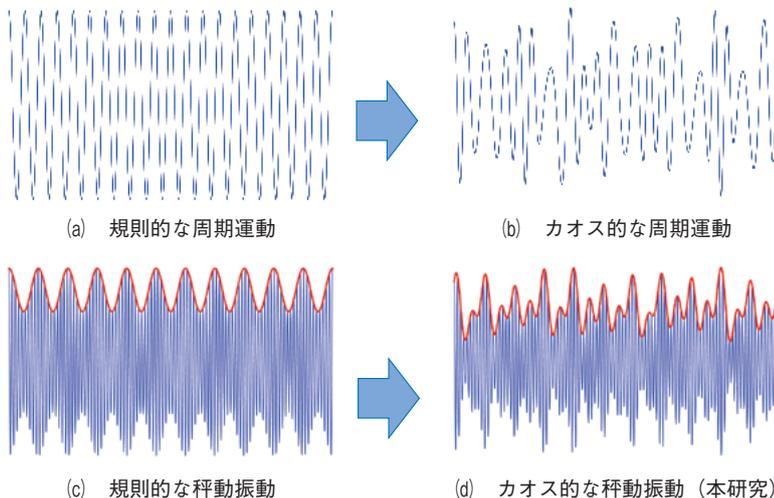
高感度センサや高周波フィルタ、プロジェクタなどさまざまな機器応用が行われているMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) は、微細構造の機械的な「動き」を使って動作させる素子を、チップ上に集積させたものです。このMEMS技術

におけるメカニカル振動子^{*2}を用いたカオス発生手法の研究は、MEMSによるセンサ部と機械学習を行う信号処理部の集積化など、応用上の重要性が着目されていました。しかし、メカニカル振動子を用いたカオス生成について成功した例はあったものの、応用上の研究はあまり進んでいませんでした。その大きな理由の1つは、メカニカル振動子を用いたカオス発生には楕型電極などの複雑な素子構造が必要であり、また数10ボルトという高電圧が不可欠であったことにあります。今回、NTTの研究所ではナノメカニカル振動子の「秤動^{*3}」運動に着目し、2つの異なる高周波信号を入力するだけという、極めて簡便な方法でカオス信号を発生させる手法を実証し、素子の小型化と低電圧駆動を実現しました。

図1に振動子によるカオス生成の様子を示します。通常の振動子は規則正しい周期運動(図1(a))を行います。ある条件の下ではこの周期運動が乱

れ、カオス振動になります(図1(b))。このカオス振動をつくり出すには振動子の非線形性を活用する必要があり、メカニカル振動子で実現するには、楕型電極と呼ばれる大きな構造と、数10ボルトという高い電圧を加える必要がありました。これに対し、私たちの研

- *1 機械学習とカオスの縁：機械学習とは人工知能を構成する技術の1つです。コンピュータにより大規模データから共通のパターンやルールを見つけ出し、それを新しい入力データに適用することにより、さまざまな判断や結果の予測を可能とする技術です。機械学習にもさまざまな手法が存在しますが、データ処理を行うネットワーク自体を学習させるディープラーニングなどの手法とは異なり、固定されたネットワークからの出力の重み付けだけを学習させることにより機械学習を実現するリザバー計算の手法が、最近注目を集めています。リザバー計算ではカオス状態が発生する近傍の「カオスの縁」状態を用いることにより特性の優れた計算ができる可能性が指摘されています。
- *2 メカニカル振動子(機械振動子)：弾性変形を周期的に繰り返すことにより機械的な振動が継続する人工構造体。鐘や鉄琴など楽器の振動板もメカニカル振動子の一種です。最近では微細加工技術の発展に伴い、髪の毛よりも小さなメカニカル振動子を半導体チップに集積することも可能になっており、MEMS振動子として実用化が進められています。メカニカル振動子のもっとも代表的な形状の1つは本研究でも用いられている両持ち梁と呼ばれるもので、橋や鉄琴の振動板に類似した形状をしています。
- *3 秤動：月や地球などの天体は自転や公転という決まった周期運動を行っています。この運動とともに、ゆっくりとした別の周期運動も行っています。このような運動は「秤動」と呼ばれ、自転や公転と比較して小さく、また周期も数年から数万年という大きなものであり、潮の満ち引きや他の惑星の引力など、さまざまな要因により引き起こされます。メカニカル振動子はある決まった周波数で規則的な振動運動を行います。振動子が持つ非線形性により完全な周期運動にはならず、長い周期の振幅変化を伴います。この振幅変化は天体の秤動運動に相当するものといえますが、通常は天体と同様に非常に小さな変化しかみられません。しかし、秤動運動の周波数に相当する周期的な外力が加わると、共鳴現象により大きな秤動運動が引き起こされます。今回の研究では、外部より2つの振動数を加え、その差周波を秤動運動に共鳴させることにより、カオス信号を発生させることに成功しました。

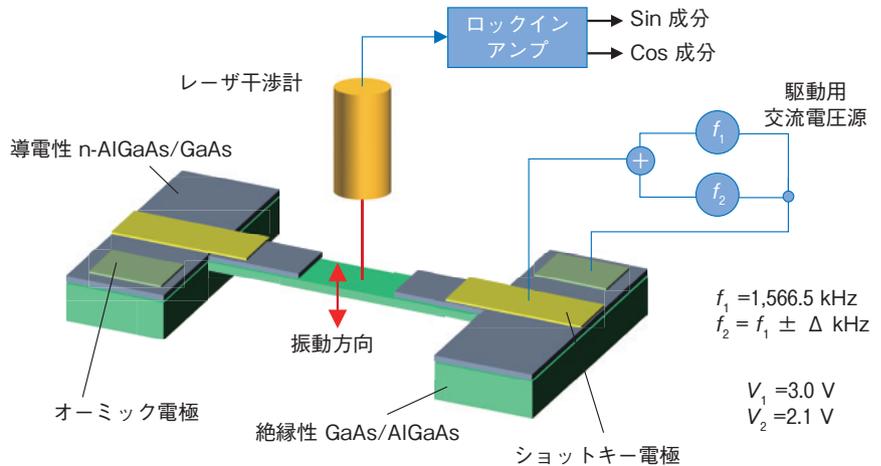


横軸は時間、縦軸は振動子の変位を表します。(a)通常の振動子が示す規則的な周期運動を示します。(b)カオス状態の周期運動です。振動の振幅と位相が不規則に変化しています。(c)規則的な秤動運動です。細かな振動(青線)の振幅(赤線)が周期的に変化しています。(d)カオス的な秤動運動を示します。赤線で示された振動振幅の変化が不規則な振る舞いを示しています。

図1 カオス振動の概念図

究では振動子の「秤動」振動を用いることにより、この問題を解決しました。秤動とは、一般に天体の運動に対して使われる言葉で、例えば月が地球の周りを公転する際、本来の27.3日の公転周期に加え、もっと長い周期の運動を、その公転軌道の周りで行っていることが知られています。これが秤動運動にあたりますが、振動子の場合には、ある決まった周波数の振動において、その振幅が周期的に変化した図1(c)のような振る舞いが秤動運動になります。ちょうど、AMラジオに使われている振幅変調(AM: Amplitude Modulation)された波と同じ振る舞いです。私たちは、この振幅の変化が、ある条件ではカオスとみなされるかたち(図1(d)の赤線)で起きることを初めて見出し、それをナノメカニカル振動子で実現することに成功しました。

図2に実験に用いた装置を示します。「両持ち梁構造」は圧電半導体であるガリウムヒ素(GaAs)とアルミニウムガリウムヒ素(AlGaAs)の接合構造から作製されており、赤矢印の方向に振動します。この電極に交流電圧を加えることによって梁の振動を引き起こし、その動きをレーザ干渉計で計測します。測定された振動の振幅はロックインアンプを用いてSin成分とCos成分に分けて記録します。秤動振動を引き起こす手法は非常にシンプルで、振動子を駆動するのに2つの異なる周波数(図中の f_1 と f_2)の交流電圧を加えるだけです。2つの異なる周波数が合わさると、それらが干渉して「うなり」を打つことはよく知られています。このうなりが振幅変調、すなわち秤動運動を引き起こすわけですが、その周波数と振幅をうまく選んで



梁構造の長さは150 μm 、幅は20 μm 、厚さは0.6 μm です。構造の表面には振動の電氣的な駆動と検出が可能となる電極が形成され、これらの電極に2つの周波数の交流電圧を加えることにより、カオス的な振動状態を発生させます。振動の様子はレーザ干渉計で検出し、ロックインアンプを用いて振動のSin成分とCos成分を個別に測定することによって、カオスであることを確認します。梁の振動周波数は約1.6 MHzです。

図2 実験に用いたメカニカル振動子と測定手法の模式図

やるとカオスの生成が可能になります。図3に得られた振動の様子を示します。2つの駆動周波数の差が3.3 kHzになると振動の振幅と位相がランダムに変化し、カオスとしての振る舞いを示していることが分かります。

さて、カオスであることを確認するにはLyapunov指数^{*4}と呼ばれる値を計算し、前述した「ほんの少しの初期条件の違いが大きな変化を生み出す」という性質を、定量的に確認する必要があります。私たちは東京工業大学との共同研究により、数値計算を用いて実際にそのような性質がみられることを確認しました。

この手法には3つの大きな利点があります。第1に、数ボルト(実験では2~3 V)という小さな電圧で駆動でき、カオスの発生を電氣的に自在に制御できるという点です。このため、現在のエレクトロニクス技術と整合させることが容易です。第2に、楕型電極のような大きな構造を必要としないた

め、微細化・集積化が可能です。MEMSのマイクロフォンやセンサなどと集積化し、マイクで収録した信号をオンチップで機械学習させて処理することができるかもしれません。さらに第3の利点は、このようなメカニカル振動子に限らず、さまざまな物理系の振動子に対しても応用可能であるという点です。例えばレーザに用いられている光共振器など、より広い範囲の通信技術に応用し、秘匿通信や光を用いた機械学習などに応用できるのではないかと考えています。

*4 Lyapunov指数: カオス的な力学系では、ほんの少しだけ異なる初期条件でスタートしても、力学系を表す座標(例えば振動子の変位)が時間とともに大きく異なっていくことが、不規則で複雑な振る舞いを引き起こす原因です。これを数学的に表す指標として、2つの運動の座標間の距離が時間に対してどのように指数関数的に増大していくかを示す指数をLyapunov指数と呼びます。カオスであるためにはLyapunov指数が正であることを確認する必要があります。

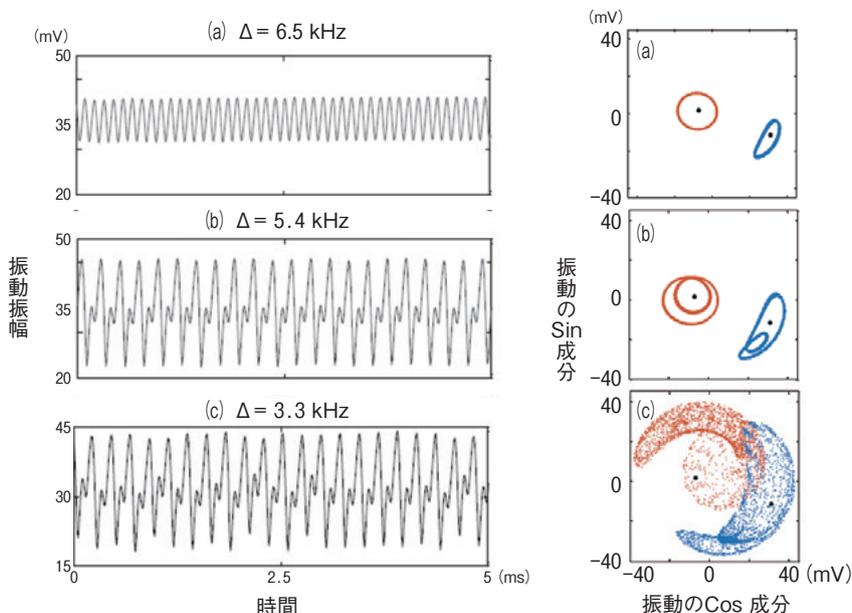


図1で示した赤曲線に対応します。左図は振動振幅（Cos成分）の時間変化，右図はそのときの振動振幅のSin成分とCos成分の軌跡です。Δは2つの交流電圧の周波数差を表します。(a) Δ = 6.5 kHzでは振幅は周期的な変化を示し，Sin振幅，Cos振幅の軌跡は閉じた曲線となります。しかし(b) Δ = 5.4 kHzになると，振動の周期性が変わり始め，(c) Δ = 3.3 kHzではカオス的な不規則な振幅変化となりました。(c)における不規則な様子は，右図に示す振動振幅の軌跡が線ではなく，広い範囲に分布していることから確認できます。

図3 振動振幅の実験値

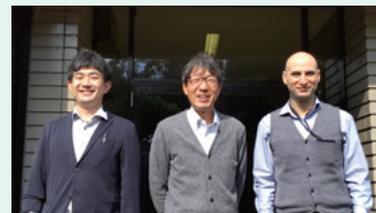
今後の展望

本稿ではナノメカニカル振動子における稜動運動を用いた新しいカオス信号発生手法について，ごく簡単に解説しました。この手法では，従来手法に比較して，桁違いに小さい電圧でカオスの発生を駆動することが可能で，また大きな電極構造を用いないため小型化，集積化に適した素子を実現することができます。一方，図1からも理解できるように，稜動運動によるカオス信号は，もともとの振動に比較して，ずっと周波数が低いため，実用的な周波数のカオス信号を生成するためには，より高い周波数の振動子が必要です。私たちは最近フォノンニック結晶を使ってGHzに至る周波数の振動子を作製することにも成功しており，このような高周波化は，今後進めていかな

ければならない重要な目標となっています。このような方向にも今後チャレンジを進め，機械学習等への応用を実現していきたいと考えています。

参考文献

- (1) 山口：“カオスとフラクタル”，筑摩書房，2010。
- (2) 中野：“小特集 リザーバーコンピューティング”，電子情報通信学会誌，Vol.102，No.2，2018。
- (3) <https://journal.ntt.co.jp/article/10464>
- (4) S. Hourri, M. Asano, H. Yamaguchi, N. Yoshimura, Y. Koike, and L. Minati: “Generic Rotating-Frame-Based Approach to Chaos Generation in Nonlinear Micro- and Nanoelectromechanical System Resonators,” Phys. Rev. Lett., Vol. 125, No. 17, 174301, Oct. 2020.



(左から) 浅野 元紀 / 山口 浩司 / Samer Hourri

「カオス」は100年以上前から調べられている古典的な研究テーマですが，それをデバイス上で制御し，技術応用しようという試みは，まだ発展途上といえます。この研究がカオス技術を新たな方向に展開する一助になることを期待しています。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
ナノメカニクス研究グループ
TEL 046-240-3475
FAX 046-240-4317
E-mail hiroshi.yamaguchi.zc@hco.ntt.co.jp

フォノン導波路やフォノニック結晶を用いた弾性波の制御

エレクトロンや光子と同じように、身近に存在する音や熱にもフォノンと呼ばれる格子振動の素励起があります。信号処理デバイスや通信システムにおけるエレクトロンや光子の重要性とは対照的に、フォノンの制御技術は未発達だったため情報担体としての活用は極めて限定的でした。本稿では、電気機械フォノニック結晶という新しいプラットフォームを用いて、フォノンのオンチップ制御技術の向上に取り組んだこれまでの研究成果について解説します。

はたなか

畑中

やまくち

山口

だいき

大樹

ひろし

浩司

くろす

黒子 めぐみ

NTT 物性科学基礎研究所

情報担体としてのフォノンの可能性

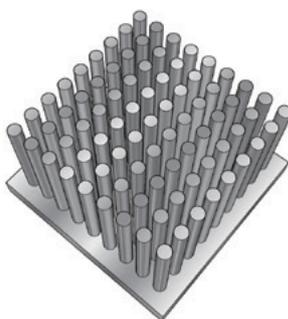
フォノンは物質を構成する原子や格子振動の素励起です。特に、振動数が $10^4 \sim 10^{11}$ Hzのものを超音波と呼び、エコーやソナーのような生体や水中内の観測・探査システムの信号源として古くから利用されてきました⁽¹⁾。一方、情報処理システムにおいては、超音波を含むフォノンは、デバイスの駆動過程で生じる副産物であり、正常な動作を乱す障害物としてみなされ、情報担体としての利用はこれまで積極的に試みられていませんでした。

次世代の情報担体として注目を集める光子（光）も、元々は顕微鏡等の観測分野での応用にとどまっていた。その後、プラナー光波回路やフォトニック結晶などの新しいプラットフォームが登場したことで、チップスケールでの制御技術が向上した結果、現在の産業的価値が見出されました。フォノンは光子と同様に波動性を持ち、その挙動に類似性があ

す。また、同一周波数で比較すると波長が5桁も短く、さらに、自由空間への輻射がなくエネルギー損失が少ないという優れた特徴もあります⁽¹⁾。将来のIoT (Internet of Things) 社会において、高周波情報処理システムのさらなる小型化、省エネ化への要請はますます高まっていくため、短波長かつ低損失なフォノンの情報担体としての活用が有望視されます。そのためには、光子のように、フォノンにもオンチップで多様な制御ができるプラットフォームが必要になります。

フォノニック結晶とマイクロ電気機械システム

フォノンの制御プラットフォームとして、フォノニック結晶とマイクロ電気機械システム (MEMS) が古くから知られています。前者は、異なる弾性体の周期構造から成る人工音響構造で、フォトニック結晶のフォノン版になります⁽¹⁾(図1(a))。周期間隔(a)を、フォノンの波長(λ)程度にすると、構造がつくる弾性周期ポテンシャルの影響を受け、フォノンの分



(a) フォノニック結晶の一例 (模式図)。柱が規則的に並ぶことで、異なる弾性体の周期構造を形成しています。



(b) マイクロ電気機械システムの一例 (模式図)。梁が両端で固定された両持ち梁 (ビーム) 構造をしています。

図1 フォノニック結晶とマイクロ電気機械システムの模式図

散関係^{*1}が変調されます。例えば、ブラッグ条件 ($n\lambda = 2\alpha$, n は自然数) を満たす周波数近傍にはバンドギャップ^{*2}が発生し、波長 λ を持つ波は伝搬できなくなります。さらに、バンドギャップの形成により分散曲線が緩やかになり、その傾斜で決まる群速度も低下します。フォノン結晶を用いれば、その周期構造を通して、フォノンの空間的な伝搬制御が可能になります。それゆえ、フォノン結晶は音響工学の分野において、遮音器などの音響波制御システムの基本構造として利用されてきました。

一方、MEMSは主に半導体工学等のエレクトロニクス分野において精力的に研究されてきました。これはカンチレバーやビームのようなnm, μm スケールの立体梁構造からなり、オンチップかつ電気的に超音波振動を励起できます⁽²⁾(図1(b))。また、梁と基板間では、振動の伝わりやすさを示す音響インピーダンス差が大きいことから、弾性振動の基板への流出が抑えられ、振動の持続時間が長い(高い Q 値^{*3})の共振を保持できます。近年、これら振動子において顕著に現れる非線形効果に着目した、振動の非線形ダイナミクスやそれを応用した動的制御技術に関する研究に学術的な注目が集まっています。これまでに、パラメトリック効果^{*4}や四波混合^{*5}を介した、フォノンの増幅や周波数変換といった振動の外部変調が実証されています。このように、MEMSはフォノンの動的な制御ができる一方で、局所的な構造のため、空間的な伝送はできません。対照的に、フォノン結晶は動的な制

御性はありませんが、空間的な制御性を有しています。

両者の特徴を比較すると、その機能に相補的な関係があることが分かります。私たちはこの点に注目して、2つの異なる構造を融合した「電気機械フォノン結晶」という新しいフォノンの制御プラットフォームを提案しました^{(3), (4)}。これを用いると、フォノンのオンチップ励振や空間伝送、その動的制御を同じデバイス上で実現できるようにします。

電気機械フォノン結晶

図2(a)に示すように、電気機械フォノン結晶はガリウムヒ素(GaAs)を媒質に持つ直径22 μm の円形薄膜(メンブレン)が8 μm の間隔で100個一列に周期的に連結した導波路構造から構成されています⁽⁴⁾。メンブレンと基板の間は中空になっており、太鼓の膜のように振動します。GaAsは圧電性^{*6}を有しているため、メンブレン上に設置した電極に交流電圧を加えることで、メンブレンの上下振動(超音波フォノン)を誘起することができます。この弾性振動はメンブレンの連結方向に沿って伝わっていきますが、その過程で周期孔がつくる弾性ポテンシャルの影響を受け、分散関係が変調されます。数値計算から求めた分散関係と、フォノン伝搬の周波数依存性を実際に測定した結果を図2(b)に示します。上図の分散関係では、1番目のバンド(黄色)が3.5 MHzから7.4 MHzにわたって形成されています。このバンドがフォノンの伝搬を促しますので、図下部の実験結果においても、

導波路の一端から励起されたフォノンがその他端まで伝搬していることが確認できます。このバンドは7.4 MHzで分散関係の端に到達します(波数 $k = \pi / \alpha$)、次のバンド(水色)が生じる周波数までの間に、灰色で示した空隙が生じています。これがバンドギャップです。ここではちょうどフォノンの半波長が孔間隔に一致しブラッグ条件を満たすため($\lambda / 2 = \alpha$)、フォノンは孔の位置でブラッグ反射^{*7}を受けます。実際に、バンドギャップの位置で、フォノン伝搬が著しく抑制

- *1 分散関係(曲線): 波の波数と周波数間の関係性。波数は波長の逆数で、運動量と比例関係にあります。この関係から周波数に対応した波数が一意に決まり、伝搬速度などの基本的な波の伝搬特性が決定します。
- *2 バンドギャップ: 波の周波数に対して分散が決まらない、つまり対応する状態が存在しない周波数帯域のことを意味します。波長と媒質の周期間隔が特定の条件(ブラッグ条件)を満たす周波数において発生します。ここでは、周期構造から強い反射を受け、波の伝搬が強く抑制されます。
- *3 Q 値: 共振周波数(f_{res})の半値全幅(Δf_{res} , 緩和時間の逆数)に対する比によって表される振動の質や寿命の評価に用いる無次元性能指数($Q = f_{\text{res}} / \Delta f_{\text{res}}$)。
- *4 パラメトリック効果: 周波数の異なる波が混合し、それらの和もしくは差の周波数成分を持つ新しい波が発生する現象です。MEMSの場合、外部信号により振動子内の張力を周期的に変調することで実現します。
- *5 四波混合: 三次の非線形効果を介して行われる波の周波数変換法です。周波数 f_1 と周波数 f_2 の異なる2つの波を同時に入力すると、このプロセスを通して新しい周波数の波(f_3, f_4)が発生します。なお、 f_3 と f_4 はエネルギー保存則を満たすようその値が決まります($f_1 + f_2 = f_3 + f_4$)。
- *6 圧電性: 物体に電圧を加えると歪が生じる現象。電気機械フォノン結晶では、この歪により、曲げモーメントが発生し、メンブレンの垂直方向に振動が発生します。
- *7 ブラッグ反射: 原子が周期的に並んだ格子面に角度 θ で波が入射する場合、その波長(λ)と隣接する格子面間隔(α)がブラッグ条件を満たす場合($n\lambda = 2\alpha \sin \theta$, n は自然数)、反射に強い干渉が現れる現象。本実験における一次元系では、 $\theta = \pi / 2$ となります。

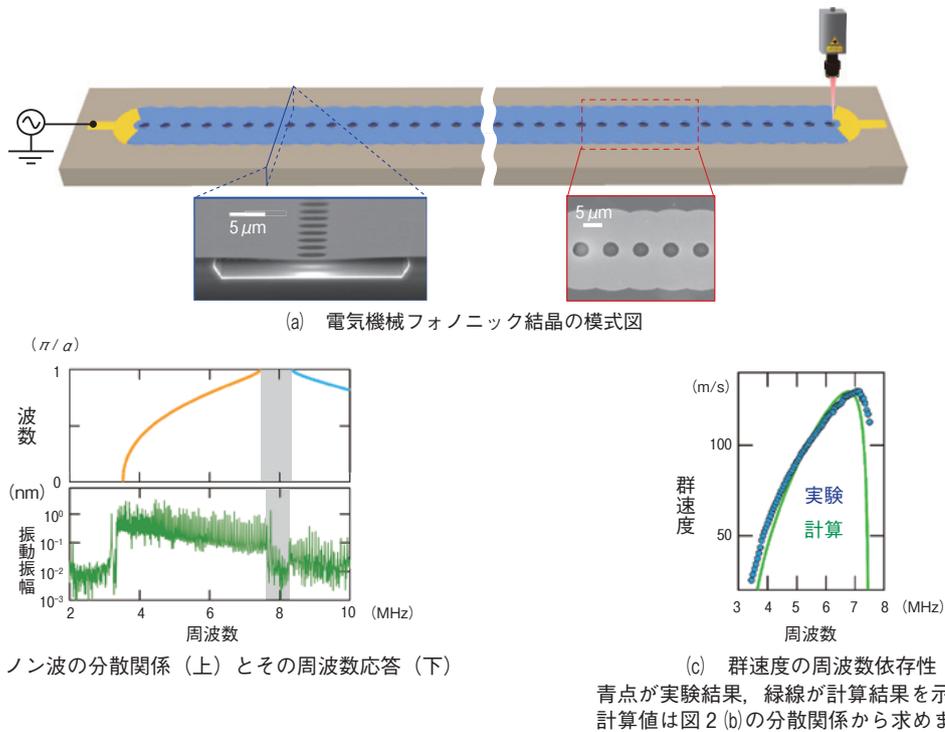


図 2 電気機械フォノン結晶とフォノン伝搬特性

されていることが分かります。また、バンドギャップにより、接する分散曲線の傾斜が緩やかになるため、フォノンの伝搬速度（群速度）が徐々に低下していきはしません。その現象を実験で確かめた結果が図 2 (c) です。3.5 MHz から 7.0 MHz までは、伝搬速度は周波数とともに増加していますが、その後は、反転して減少していることが確認できます。このことから、バンドギャップや群速度変調の発生を実験的に確認し、本構造がフォノン結晶として機能していることが分かります。

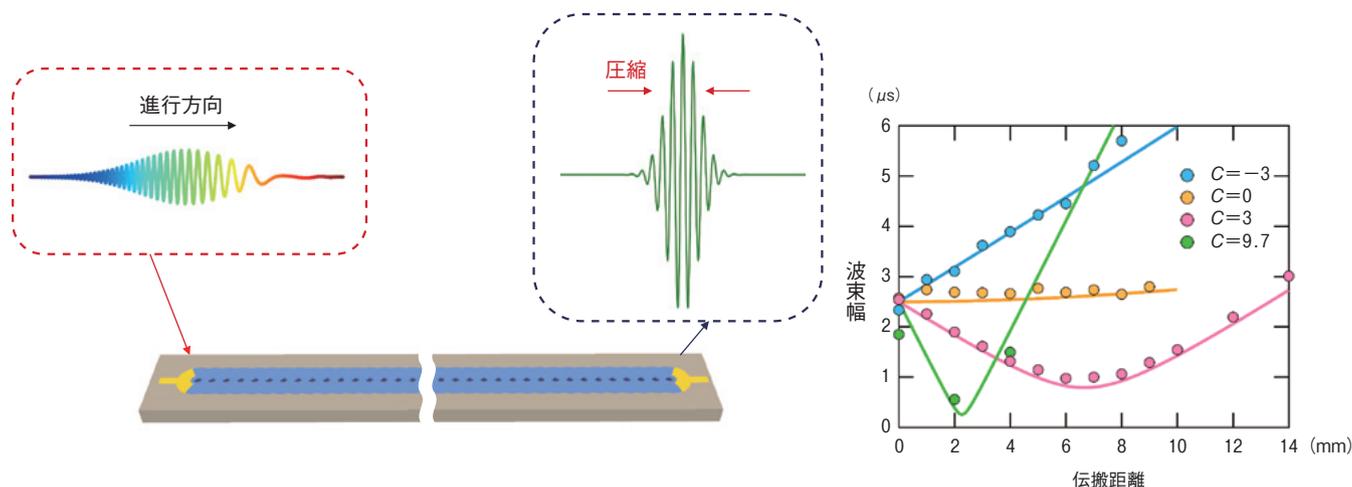
フォノン波束エンジニアリング

フォノン結晶効果の実用例として、フォノンの波束制御の研究について紹介します。この導波路は、群速度

分散と呼ばれる、伝搬速度が周波数によって変化する特徴を有しています。ここに、包絡線が有限の幅を持つ波束（パルス）を入力します。波束には、フォノンの振動周波数（搬送周波数）に加え、近傍の周波数成分の波も含まれています。したがって、群速度に分散がある場合、各々の周波数に応じた速度でそれぞれの周波数の波が進むため、それらを包括する波束は伝搬とともに広がっていきます。このような波形の歪を誘起する群速度分散は、通常の導波路において望ましくない特性ですが、私たちはこれを積極的に利用し、フォノン波の圧縮や拡大といった波束制御を実現しました。

負の周波数変調（チャープ、 $C < 0$ ）を加えたフォノン波束を導波

路の一端から加えます。ここでチャープ定数 (C) の符号は、周波数が時間とともに増大、または、減少するかを決めます。搬送周波数を 5.8 MHz に選ぶと、この導波路では、高い周波数のフォノンのほうが低い周波数よりも速く伝搬していきます (図 2 (c))。負のチャープでは、入力時に高周波数の波が波束前方に低周波数の波が後方にいるので、伝搬とともに高周波数の波はより先に進み、低周波数のそれはさらに遅れるため、結果的に波束は拡大していきます。反対に、正のチャープを入力すると、今度は波束前方に低周波数、後方に高周波数の波が偏在することになりますので、同じメカニズムでも、この場合は伝搬とともに波束が圧縮していきます (図 3 (a))。図 3 (b)



(a) 正チャープ信号 ($C > 1$) の波束圧縮の模式図。波束前方から後方に移るにしたがって、波の周波数が増加しています。

(b) さまざまなチャープ定数 (C) の入力波における波束幅の伝搬距離依存性

図3 群速度の分散による波束形状の変化

はこれを実験的に確かめた結果です。ここでは、さまざまなチャープ定数 (C) で入力した波束幅の伝搬距離依存性をプロットしています。前述のとおり、 $C = -3$ の負のチャープ入力では、波束幅が距離に比例して増加している一方で、 $C = 3$ の正チャープ入力では波束幅が減少していることが分かります。しかし、距離7 mmを超えると波束の変化が、一転、圧縮から拡大へと転じています。これは、入力時のチャープによる波の偏在が解消されたためと理解できます。また、周波数掃引範囲を広げると、この圧縮効果も強くなります。実験では、 $C = 3$ から9.7へ増やしたところ、波束幅が2 μs から測定装置の分解限界値である0.6 μs まで圧縮しました。このように、フォノン結晶の特異な分散関係を用いて、伝搬フォノンの波束形状を制御することができます。この実験では入りにチャープ信号を使いましたが、

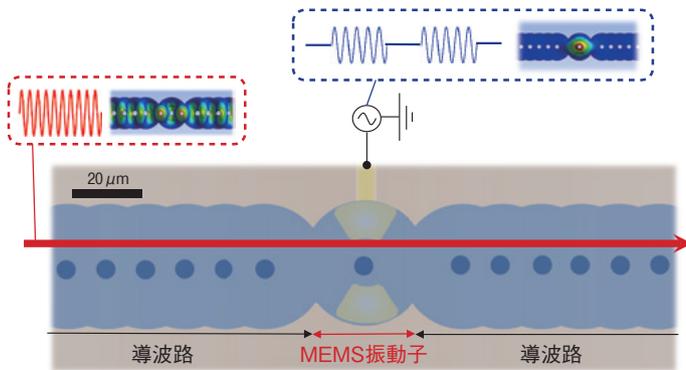
後述する非線形効果を合わせて用いれば、無変調の入力信号からフォノン波束の圧縮・拡大を実現することも可能です⁽⁵⁾。

フォノン伝搬のスイッチング

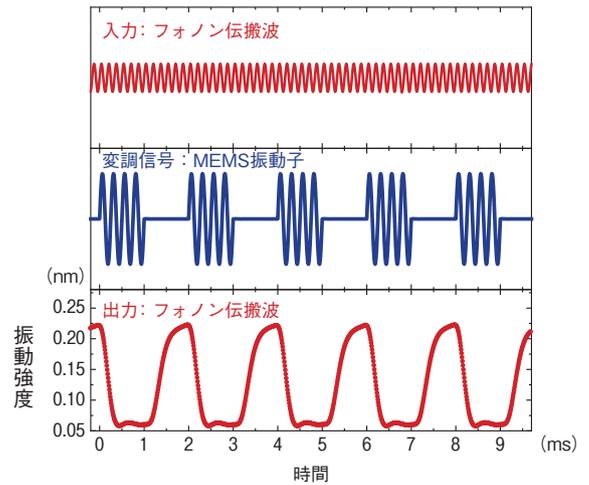
電気機械フォノン結晶が持つMEMSの特性を活用すれば、フォノン波の動的制御も可能です⁽³⁾。ここでは、導波路の中央に設置したメンブレン振動子を外部変調用ノードとして使います(図4(a))。このメンブレンは隣接するメンブレンとの結合が弱いため、3 MHz以下の低周波数領域では単一のMEMS共振器として振る舞います。それゆえ、表面に設置した電極から交流電圧を加えることで、導波路の伝搬モードから、スペクトル的に独立し、振動がメンブレン内に局在した共振を励起できます。これを強く励起すると、大きな振動振幅によりメンブレン内の応力分布が再調整されます。

その結果、中央のメンブレン振動子を通過する導波路のフォノン波もこの弾性特性の変化から影響を受け、伝搬スペクトルが変調します。伝搬波の振動周波数を適切に調整すれば、フォノンの伝搬強度が低下することになります。それを実験的に確かめた結果が図4(b)になります。ここでは、5.745 MHzの伝搬波を連続波として導波路端から加え、同時に、メンブレン振動子から1.855 MHzの共振を1.0 msの間隔で周期的に加えたときの、伝搬波の他端での振動強度を時間領域で測定しています。確かに、中央のメンブレンが振動しているときだけ、伝搬強度が低下していることが分かります。このように、外部から変調信号を電気機械フォノン結晶に加えることで、フォノン伝搬の動的な制御が可能になります。

本稿では説明を割愛しましたが、このほか、振動エネルギー転送や全機械



(a) MEMS振動子-導波路の電子顕微鏡写真とスイッチング測定の構成図。MEMS振動子の共振と伝搬波の振動形状を挿入図に示します。



(b) フォノン伝搬のスイッチング。MEMS振動子のオン・オフに伴い、伝搬波の出力が変調されています。

図4 電気機械フォノン結晶によるフォノン伝搬の動的制御

ランダムアクセスメモリ操作、さらに、フォノン伝搬波の周波数変換も、MEMSの非線形効果を用いて成功しています。

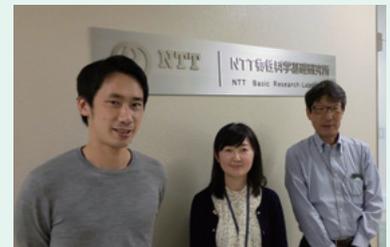
さらなる高周波化とマグノンとの融合

電気機械フォノン結晶を基盤にすれば、オンチップで空間的かつ動的なフォノン制御を実現できます。しかし、その動作周波数は数MHzと低く、実用性を追求するためには、極超音波と呼ばれるGHz帯まで周波数を引き上げる必要があります。私たちは、最近、この極超音波デバイスの作製にも成功しました⁽⁶⁾。また、マグノンと呼ばれる強磁性スピン波を活用した極超音波フォノンの動的制御の研究にも取り組んでいます。本稿で説明した電気機械フォノン結晶のフォノン制御技術と組み合わせることで、高周波で動作するフォノン結晶能動素子やそれ

らを集積したフォノン波回路の構築が可能となり、情報担体としてのフォノンの有用性が飛躍的に高まると私たちは期待しています。

参考文献

- (1) M. Maldovan : "Sound and heat revolutions in phononics," Nature, Vol. 503, pp. 209-217, 2013.
- (2) K. L. Ekinci and M. L. Roukes : "Nanoelectromechanical systems," Review of Scientific Instruments, Vol.76, No.6, June 2005.
- (3) D. Hatanaka, I. Mahboob, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi : "Phonon waveguides for electromechanical circuits," Nature Nanotechnology, Vol.9, No.7, pp. 520-524, July 2014.
- (4) M. Kurosu, D. Hatanaka, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi : "On-chip temporal focusing of elastic waves in a phononic crystal waveguide," Nature Communications, Vol.9, No.1331, 2018.
- (5) M. Kurosu, D. Hatanaka, and H. Yamaguchi : "Mechanical Kerr Nonlinearity of Wave Propagation in an On-Chip Nanoelectromechanical Waveguide," Phys. Rev. Applied 13, 014056, Jan. 2020.
- (6) D. Hatanaka and H. Yamaguchi : "Real-Space Characterization of Cavity-Coupled Waveguide Systems in Hypersonic Phononic Crystals," Phys. Rev. Applied 13, 024005, Sept. 2020.



(左から) 畑中 大樹 / 黒子 めぐみ / 山口 浩司

振動や熱といったフォノンを信号処理に使うという考えは、洗練されたエレクトロニクスやフォトニクスから見ると、非現実的に聞こえるかもしれませんが、だからといって全く価値がないとはじめから見切るのではなく、その潜在性に注目して、有用性を確かめ、社会的価値を引き出すことが、基礎研究に携わる者の責務だと思い、日々研究に取り組んでいます。

◆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
 ナノメカニクス研究グループ
 TEL 046-240-2518
 FAX 046-240-4317
 E-mail daiki.hatanaka.hz@hco.ntt.co.jp

光のエネルギー損失が極めて少ない オプトメカニカル素子の創出

オプトメカニカル素子は発光デバイスなどの光学素子に機械的な自由度を付加した機能素子として近年注目されています。これまでオプトメカニカル素子には微細加工が容易な半導体材料が主に用いられてきましたが、NTT研究所では半導体材料よりも優れた光学特性を有する希土類元素を利用した新規オプトメカニカル素子の研究開発を進めています。本稿では、半導体材料よりも桁違いに長い発光寿命を持つ希土類エルビウム元素を用いて実現した“光のエネルギー損失が極めて少ないオプトメカニカル素子”に関する研究成果を紹介します。

おおた りゅういち

太田 竜一

Victor M. Bastidas

やまくち ひろし

山口 浩司

おかもと はじめ

岡本 創

NTT 物性科学基礎研究所

希土類エルビウム元素を用いた オプトメカニカル素子

シリコンなどの半導体薄膜でつくられた微小な板ばね（カンチレバー）構造は、ばねの上下振動を利用したナノメカニカル素子^{*1}として機能します。そのようなナノメカニカル素子は、例えばモバイル端末で使われる微小センサや最先端の分析装置など、幅広い用途で利用されています。これらのナノメカニカル素子は、電気的な操作が可能なエレクトロメカニカル素子と、光による操作が可能なオプトメカニカル素子に大別されます。このうち後者では、素子の内部に光が効率的に入るよ

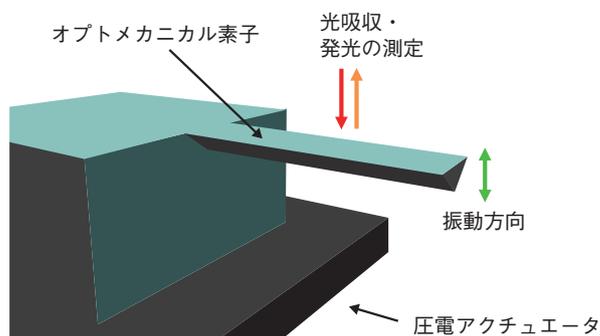
うな特異な構造を組み込むことにより、光と機械振動との相互作用を強めることができます⁽¹⁾。このような加工により高感度な振動検出や高精度な振動制御が可能となる素子としてオプトメカニカル素子は注目されています。

光と機械振動が相互作用するオプトメカニカル素子では、光と機械振動の間のエネルギー損失時間の関係性が素子の振る舞いにとって重要となります。ここでいう「エネルギー損失時間」とは、例えば光の場合では、光がエネルギーを失って暗くなるまでに要する時間を指します。機械振動の場合では、振動がエネルギーを失って止まるまでに要する時間を指します。オプトメカニカル素子ではエネルギー損失時間の短い系を用いて損失時間の長い系を制御することが可能となります。例えば、光が振動よりも長持ちする場合には、振動を用いて光の強度や位相を変調制御することが可能となります。一方、振動のほうが光よりも長持ちする場合には、光を用いて振動を制御することなどが可能となります。半導体

材料で形成された従来のオプトメカニカル素子では、光の寿命すなわちエネルギー損失時間が機械振動の損失時間よりも圧倒的に短いため、光を用いた振動の制御⁽²⁾は可能でしたが、振動を用いた光の制御は困難でした。これに対してNTT研究所では、半導体材料と比べて発光寿命が圧倒的に長い希土類エルビウム元素を含むナノメカニカル素子を作製することにより、光のエネルギー損失時間が振動の損失時間を上回る新しいオプトメカニカル素子を実現することに成功しました⁽³⁾。これにより、機械振動を用いた光の増幅や発振など、従来は困難であったオプトメカニカル技術が可能となります。

エルビウムは長距離伝送に適した通信波長帯（1.5 μm程度）で光を吸収・発光することができるため、光通信用のレーザや光増幅器などへ応用されている材料です。したがって、これをオプトメカニカル素子に用いることにより通信波長帯でのオプトメカニカル素子の動作が可能となります。また、エルビウムは発光寿命が長くエネルギー

*1 ナノメカニカル素子：弾性変形を周期的に繰り返すことにより機械的な振動が継続する人工構造体。鐘や鉄琴など楽器の振動板もメカニカル素子の一種です。最近では微細加工技術の発展に伴い、髪の毛よりも細く小さなナノメカニカル素子を半導体チップに集積することも可能になっており、MEMS振動子として実用化が進められています。ナノメカニカル素子のもっとも代表的な形状の1つは本研究でも用いられている「片持ち梁」と呼ばれるもので、プールの飛び込み板に類似した形状をしています。



オプトメカニカル素子となる領域の両側を削り取ることで、断面形状が逆三角形となるカンチレバー構造を作製しました。素子の内部にはエルビウムが多数埋め込まれており、機械振動による歪に依存したエルビウムの光吸収特性を調べることができます。

図1 エルビウムを含むオプトメカニカル素子の模式図

損失の少ない材料ですので、これを用いることにより素子の省エネルギー化が期待できます。

機械振動によるエルビウム共鳴波長の変調

半導体やエルビウムなど多くの光学材料では、特定の波長（共鳴波長）で強い光吸収や発光が起こります。この共鳴波長は主に材料の特性によって決まりますが、電場や磁場などの外的な要因にも依存します。今回実験で用いたオプトメカニカル素子では、外的因子として歪を機械振動により導入できます。歪によりエルビウムの共鳴波長が変調される光機械特性を用いて、光を用いた振動の検出や、振動を用いた光の制御が可能となります。実は、これまでエルビウムの光共鳴は歪にはあまり敏感に反応しないだろうと考えられていました。それは、共鳴に寄与するエネルギー準位が原子の内殻領域に存在するため、外的な影響は受けづらいと思われていたためです。これに対して私たちは、機械共振により大きな歪を局所的に与えることのできるナノメカニカル素子に着目しました。「共振」とは素子固有の周波数において振

動が増幅される現象です。今回私たちが用いたナノメカニカル素子の機械共振Q値は2500ですので、共振を利用しない場合に比べてQ倍程度、すなわち約2500倍も大きな歪を素子に導入できます。この機械共振を用いた大きな歪の導入により、エルビウム元素の共鳴波長を変調させることに成功しました。

今回実験で用いたオプトメカニカル素子は多数のエルビウム元素が埋め込まれた結晶から作製しています。この結晶を集束イオンビームにより斜めから削る（ミリングする）*2ことにより、断面が逆三角形の片持ち梁カンチレバー（長さ140 μm 、幅14 μm 、最大厚さ7 μm ）が得られます（図1）。これを圧電アクチュエータの上に乗せた後に、エルビウムの鋭い光共鳴が得られる4ケルビン（ -269°C ）程度の温度にまで冷却します。このような極低温環境において、アクチュエータを用いてオプトメカニカル素子の振動を励起します。アクチュエータに交流電圧を印加すると、その周波数でアクチュエータが上下に運動します。アクチュエータの上に設置したオプトメカニカル素子のチップもこれと同様に上

下運動しますが、交流電圧の周波数が共振周波数（1.57 MHz）に合致した際には、機械共振によりQ倍程度の変位がオプトメカニカル素子に生じます。その様子は素子に振動検出用のレーザー（波長633 nm）を照射し、その反射光をドップラー干渉計と呼ばれる装置で検出することにより確認できます（図2(a)）。この機械共振の際にはカンチレバーの中央表面付近に大きな歪がかかり、この歪が結晶に埋め込まれているエルビウム元素に作用します。これらは素子の機械特性を確認する実験でしたが、素子の光学特性は光励起用の波長可変レーザー（波長約1536 nm=1.536 μm ）を照射することにより評価されます。図2(b)はオプトメカニカル素子を駆動していないときのレーザー波長と光吸収強度の関係を示しています。これにより、1536.48 nm付近にエルビウムの光共鳴に基づく急峻なピークを確認できます。

今回作製した素子における重要な特徴の1つは、エルビウムの発光寿命が機械振動の寿命を大きく上回っているという点です。それを確認できる実験結果を図2(c)に示します。このデータは、アクチュエータによる振動の励振とエルビウムの光励起をある時刻で同時に止めて、その瞬間から光の強度と振動の振幅が時間経過によりどれだけ減衰するかを測ったものです。この結果から、光のエネルギー損失時間が振動のエネルギー損失時間よりも十分

*2 イオンビームを用いたミリング手法：真空中で飛ばしたイオンをぶつけることで物理的に材料を削り取る加工方法です。材料の組成などによらず、さまざまな材料を加工できることが特徴です。またイオンを斜めからぶつけることでナノメカニカル素子のような立体構造を作製することもできます。

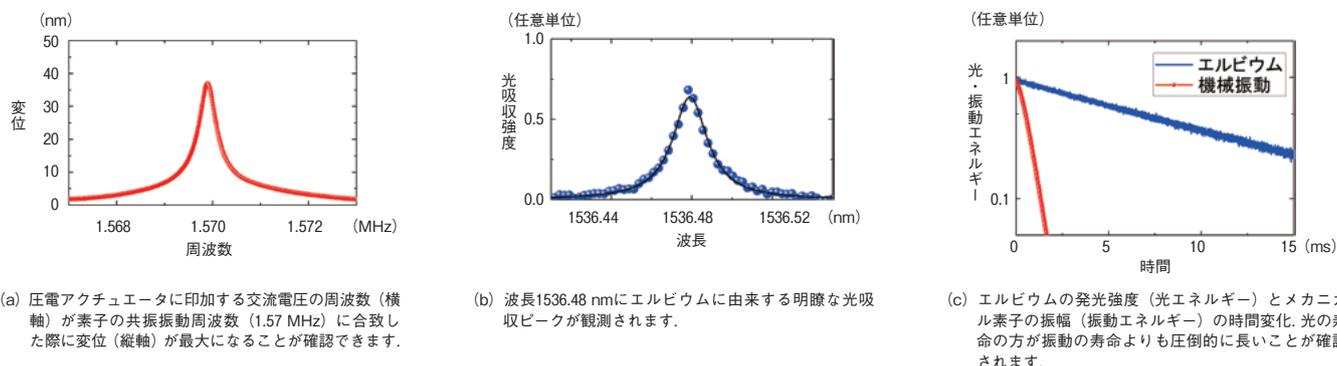
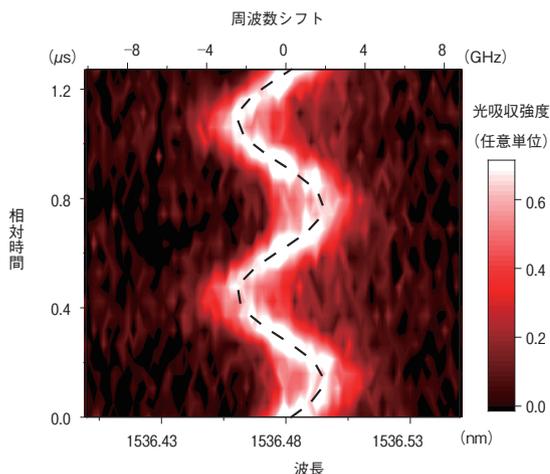


図2 オプトメカニカル素子の振動特性と光学特性



機械共振の周期 (0.64μs) でオプトメカニカル素子に含まれるエルビウムの光吸収波長が正弦的に変化の様子が観測されます (点線は中心波長の変化)。

図3 機械振動によるエルビウムの光吸収スペクトルの時間変化

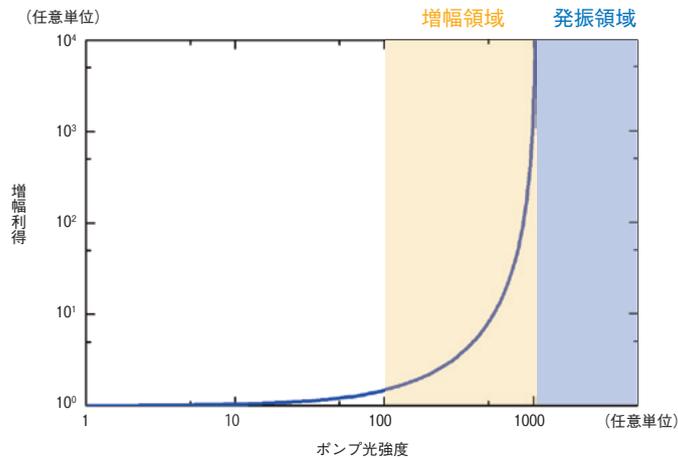
に長くなっていることが分かります。このような関係性は、極めてエネルギー損失の小さな光共鳴を使用しないと達成できませんが、私たちは従来の半導体材料よりも光学特性の優れたエルビウム元素を用いることにより、これを達成することに成功しました。

今回作製した素子におけるもう1つの重要な特徴は、エルビウムの光共鳴が素子の振動変位に応じて変化するという点です。これは、アクチュエータに印加する電圧の周波数を機械共振周波数 (1.57 MHz) に合致させた状態で、

図2 (b)の光共鳴がどのように時間応答するかを評価する実験で確かめることができます。図3は、横軸が光の波長、縦軸が時間、色の濃淡がエルビウムの光共鳴強度を表しており、エルビウムの光共鳴が機械共振の周期 [0.64 μs=1.57 MHz (共振周波数) の逆数] に応じてシフトすることを示しています。その際のシフト量はエルビウムの光共鳴線幅を上回っており、歪を用いてエルビウムの発光を制御できることが確認されます。

機械振動を用いた光の増幅・発振

エルビウムの共鳴波長が振動に応じて変化する現象は、光と機械振動の非線形な相互作用に基づいています。これを応用すれば、例えば光増幅器のような非線形オプトメカニカル素子の実現が視野に入ります。図4は、今回のオプトメカニカル素子に外部からポンプ光を入れた際に、エルビウムの発光強度がポンプ光の強度に応じて増幅される様子をシミュレーションした結果を示しています。このシミュレーションには前述の実験で得られた光と機械振動の相互作用の大きさや損失時間が用いられており、ポンプ光の周波数がエルビウムの共鳴周波数とカンチレバーの機械共振周波数の和周波に合致した際に光の増幅や発振が可能となります。その理由は、このような周波数整合条件において、ポンプ光のエネルギーが光共鳴と機械共振のエネルギーに分配されるためですが、機械共振に分配されたエネルギーは光共鳴のエネルギーに比べて圧倒的に早く損失してしまうので、実質的に光共鳴にのみ選択的にエネルギーを与えることができるためです。つまり、光の寿命が機械



エルビウム共鳴周波数とメカニカル素子の機械共振周波数の和周波に合致したポンプ光を素子に照射した際、ポンプ光強度の増加につれ光信号の増幅利得が増大し(黄色領域)、しきい値を超えると発振する(青色領域)様子が確認されます。

図4 オプトメカニカル素子を用いた光増幅を示すシミュレーション結果

振動の寿命よりも圧倒的に長い今回のオプトメカニカル素子で初めて可能となる現象です。このようにオンチップで形成されるメカニカルな光増幅器は、小型かつ省エネルギーな光デバイスとして注目されます。得られる増幅利得はオプトメカニカル素子の構造やQ値に依存しますので、素子構造の最適化などによるさらなる高利得化が今後期待できます。

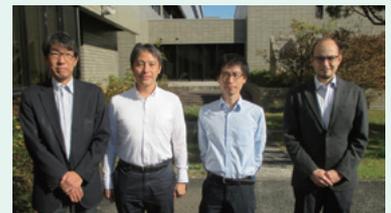
まとめと今後の展望

本稿では希土類エルビウム元素を用いた新しいオプトメカニカル素子について紹介しました。機械振動の寿命よりも長い発光寿命を持つエルビウム元素をナノメカニカル素子に埋め込むことにより、微小な振動を用いた光共鳴波長の制御や光の信号増幅などが可能となることを示しました。今回の原理実証実験は -269°C の極低温環境で行いましたが、今後は液体窒素温度(-196°C)での動作に向けて材料や構造の改良を進め、実際に応用利用のできる素子化をめざします。また、今回の

素子の動作周波数は1 MHz程度でしたが、今後は素子の小型化によりGHz域での高速動作をめざします。そのような高速動作が可能となれば、例えばレーザー光の変調や波長多重化などの光制御技術への応用が期待できます。エルビウムは単に通信波長帯での光アクセスが可能だけでなく、光の量子力学的な性質を利用した情報通信にも利用される材料です。したがって、そのような元素を含むオプトメカニカル素子による量子情報技術への応用展開も今後大きく期待されます。

参考文献

- (1) M. Eichenfield, J. Chan, R. M. Camacho, K. J. Vahala, and O. Painter: "Optomechanical crystals," *Nature*, Vol. 462, pp. 78-82, 2009.
- (2) J. Chan, T. P. Mayer Alegre, A. H. Safavi-Naeini, J. T. Hill, A. Krause, S. Groblacher, M. Aspelmeyer, and O. Painter: "Laser cooling of a nanomechanical oscillator into its quantum ground state," *Nature*, Vol. 478, pp. 89-92, 2011.
- (3) R. Ohta, L. Herpin, V. M. Bastidas, T. Tawara, H. Yamaguchi, and H. Okamoto: "Rare-earth-mediated optomechanical system in the reversed dissipation regime," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 126, No. 4, 047404, Jan. 2021.



(左から) 山口 浩司 / 岡本 創 / 太田 竜一 / Victor M. Bastidas

近年ナノメカニクスの研究分野は急速に拡大しており、光通信技術への応用にも大きな期待が寄せられています。私たちは「優れた材料」と「最先端の加工技術」を組み合わせることで、振動による制御を可能とする新しい光機能素子の実現をめざしています。

◆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
ナノメカニクス研究グループ
TEL 046-240-4665
FAX 046-240-4317
E-mail ryuichi.ohta.rx@hco.ntt.co.jp

光キャビティを用いたナノワイヤ振動子の高感度検出と制御

半導体ナノワイヤは肉眼では見えないほどに細く小さな棒状の構造です。このような微細構造に光や電荷を閉じ込めることにより、光子や電子の1粒1粒を制御できる量子ナノ光・電子デバイスとしての機能が加わります。一方、半導体ナノワイヤは、それ自身が“しなり”運動する振動子としても機能します。本稿では、この機械的な機能と光・電子デバイスとしての機能を融合した新しいハイブリッド量子デバイスの創出へ向けて、NTT研究所が最近開発したナノワイヤの微小振動を高感度に検出・制御する技術を紹介いたします。

あさの 浅野	もとき 元紀	ザン 章	ゴウチャン 国強
やまぐち 山口	ひろし 浩司	おかもと 岡本	はじめ 創

NTT 物性科学基礎研究所

ハイブリッドメカニカルデバイスとしての半導体ナノワイヤ

半導体ナノワイヤは直径が数100 nm（髪の毛の太さの100分の1程度）、長さが数 μ mと非常に細く小さな棒状構造です。これは、数mm角の半導体チップをテニスコートの大きさに例えた場合、その中につまようじが1本立っているようなサイズ感です。したがって、直接目で見ることはもちろん、光学顕微鏡でもその全体像をとらえることは困難です。このように小さな構造ですが、最新の半導体技術を用いて光子や電子を内部に閉じ込めることが可能です。NTT研究所では、この技術を用いて、超低消費電力な半導体レーザや、電子スピンの制御が可能なスピントロニクス素子など、半導体ナノワイヤの光・電子デバイス応用へ向けた基礎研究を展開しています。

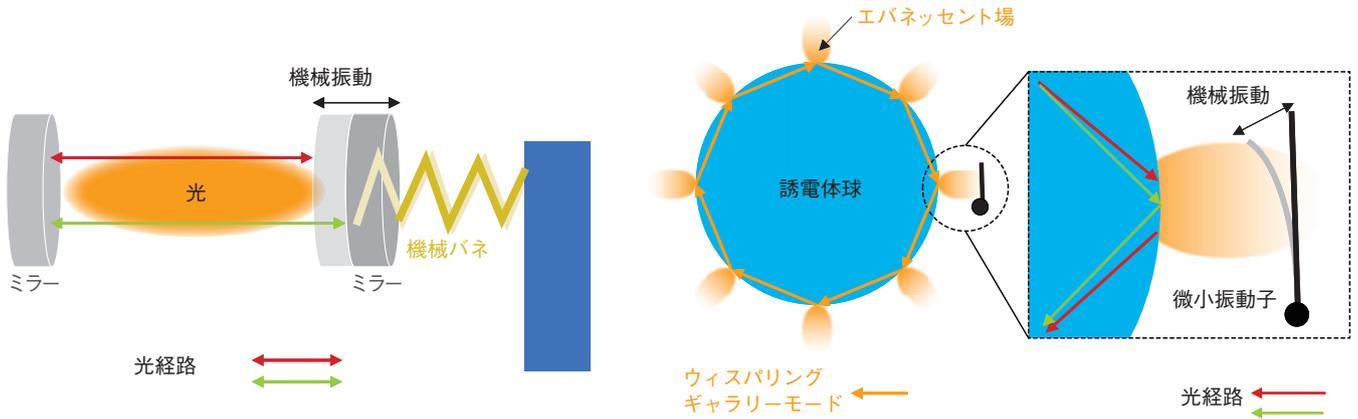
一方、半導体ナノワイヤは優れた機械特性を持つナノメカニカル素子としての側面も有しています。例えば、基板に垂直に成長したナノワイヤは左右

にしなり運動することから、これを振動子として利用することができます。この振動子は非常に小さな構造なので、外から加わる力や物体の付着などに対して振動特性が敏感に変化します。この特徴を利用すれば、振動特性の変化量を読み取ることにより、外力や粒子の量などを検知するメカニカルセンサとして用いることができます。また、光や電気で駆動される機械アクチュエータとしての利用も可能です。このように、半導体ナノワイヤの振動子としての特徴を利用したさまざまな研究が展開されています⁽¹⁾。

これまで微小な光・電子デバイス、あるいはナノメカニカルデバイスとして注目されてきた半導体ナノワイヤですが、これらの機能を有機的に結びつけたハイブリッドデバイス化へ向けた取り組みは始まったばかりです。例えば、光や電気、振動の信号を複合的に用いた新たな情報処理や、振動に応じた光・電子物性の制御など、IoT (Internet of Things) デバイスとしての機能性を半導体ナノワイヤに付与

することが可能となれば、極小デバイスを用いた革新応用が広がります。とりわけ、そのようなハイブリッド化を光・電子・振動のそれぞれに量子力学的な性質が顕著に現れる極限領域で可能とすれば、例えば、光子1粒を生成するための光子源や、量子情報を保存するためのメモリなどといった、昨今注目を集めている量子情報通信の分野における重要技術への応用展開につながります。このようなハイブリッド化により、光・電子・振動が三位一体となった革新的な量子情報デバイスを創出できる可能性が期待されています⁽²⁾。

このように期待が集まる半導体ナノワイヤですが、その微小な機械振動を高感度に検出して制御する技術はこれまで十分に発達していませんでした。その理由は、直接目では見えないほどに小さなナノワイヤのサイズにあります。通常の（かろうじて）目で見える程度の機械振動子の振動検出に用いられるレーザ照射などの手法を、光の波長（1 μ m程度）よりも小さなナノワイヤに適用することは困難です。し



(a) 機械バネに接続されたミラーキャビティにおける共振器オプトメカニクスの構成

(b) 微小振動子を接近させた誘電体球における近接場オプトメカニクスの構成

図1 共振器オプトメカニクスと近接場オプトメカニクスの概念図

たがって、ナノワイヤのような極めて小さな構造の振動を高感度に検出して制御するための新しい有効な手法を開拓する必要があります。

以降では、半導体ナノワイヤの超高感度な振動検出と制御を可能とする新技術として、NTT研究所で最近開発した微小ガラス球を用いた「近接場共振器オプトメカニクス」と呼ぶ技術について簡単に紹介します⁽³⁾。

微小ガラス球を用いた近接場共振器オプトメカニクス

共振器オプトメカニクスの技術は図1(a)に示すような片側が機械バネに接続されたミラーキャビティのモデルで理解することができます。キャビティとは、光を閉じ込めるための「箱」のことです。このモデルでは、2枚のミラーの間を反射によって光が行ったり来たりすることで、光が閉じ込められています。ミラーに取り付けられた機械バネが振動すると、キャビティに閉じ込められた光が通る経路が変化します(図1に赤、緑矢印で表示)。光は波としての性質を有していますので、

この経路変化は波の位相変化として表れます。この位相変化を読み取ることによって、機械バネの振動を高感度に検出することができます。一方、キャビティに強く閉じ込められた光がミラーによって反射される際、光の運動量が変化する反作用としてミラーに力が加わります。この力(放射圧)を利用することにより、機械バネの駆動や周波数の制御が可能となります。

光の放射圧は、古くは「彗星の尾」にその存在が発見されていましたが、これを積極的に活用した「共振器オプトメカニクス」が応用技術として花開いたのは2000年代前半に入ってからです。最近では、世界トップレベルの性能を示すデバイスにおいて、振動量子1粒に対応する量子揺らぎの検出・制御に成功したという報告もなされています。しかし、このような共振器オプトメカニクスの技術を極めて小さな構造である半導体ナノワイヤに適用するには一筋縄ではいきません。なぜならば、特殊な成長方法によって作製されるナノワイヤと質の良い光キャビティを同じチップ上に作製ことは容易で

なく、またミラーキャビティのように大きなキャビティを外部に設置したとしても、サイズの大きく異なる微小なナノワイヤに対して十分な光機械結合を生み出すことが難しいからです。

これに対して、私たちは微小な球状の光キャビティを用いた近接場オプトメカニクスという手法を世界で初めて半導体ナノワイヤに適用しました。この技術の鍵となる球状キャビティは、光ファイバの材料でもあるシリカガラスという透明なガラスを加工することで、半導体ナノワイヤとは独立に作製します。ちょうどガラス職人がガラスのコップや風鈴をつくるように、シリカ光ファイバの先端を熱して膨らませることで、数10 μm径の非常に小さな「ガラス玉」を作製することができます。このガラス玉に細線化した光ファイバを接触させると、光ファイバから漏れ入った光がガラス玉表面を何度も周回する「ウィスパリングギャラリーモード」と呼ばれるキャビティ光学モードが誘起されます。この際、図1(b)に示すように、全反射が生じるガラス玉の周壁部分で光が球の外側に

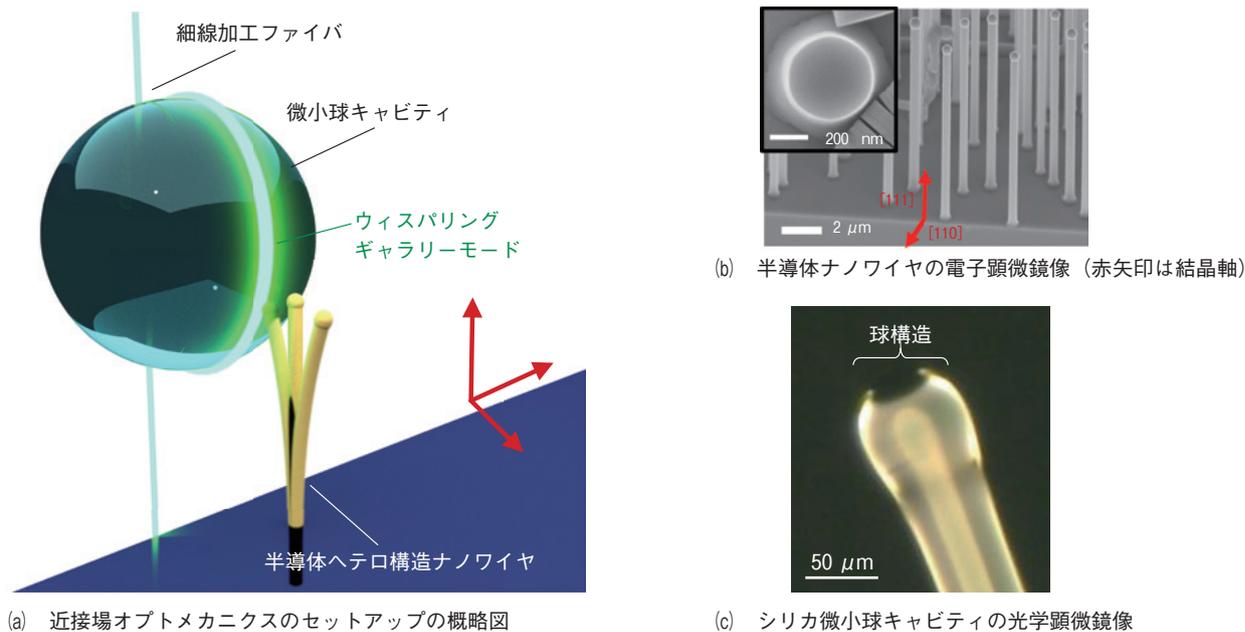


図2 実験で用いたセットアップとデバイス

染み出すエバネッセント場が生じます。このエバネッセント場をナノワイヤに近づけると、ナノワイヤの振動に応じてキャビティを周回する光の経路、すなわち位相が変化するため振動の検出が可能となります。また、ミラーキャビティの例と同様、この反作用としてナノワイヤに力が加わります。この光と機械の相互作用を活用することにより、光を用いたナノワイヤの振動制御も可能となります。光のエバネッセント場を用いた本手法により、光の波長よりも小さなナノワイヤの振動を高感度に検出・制御することが可能となるのです。

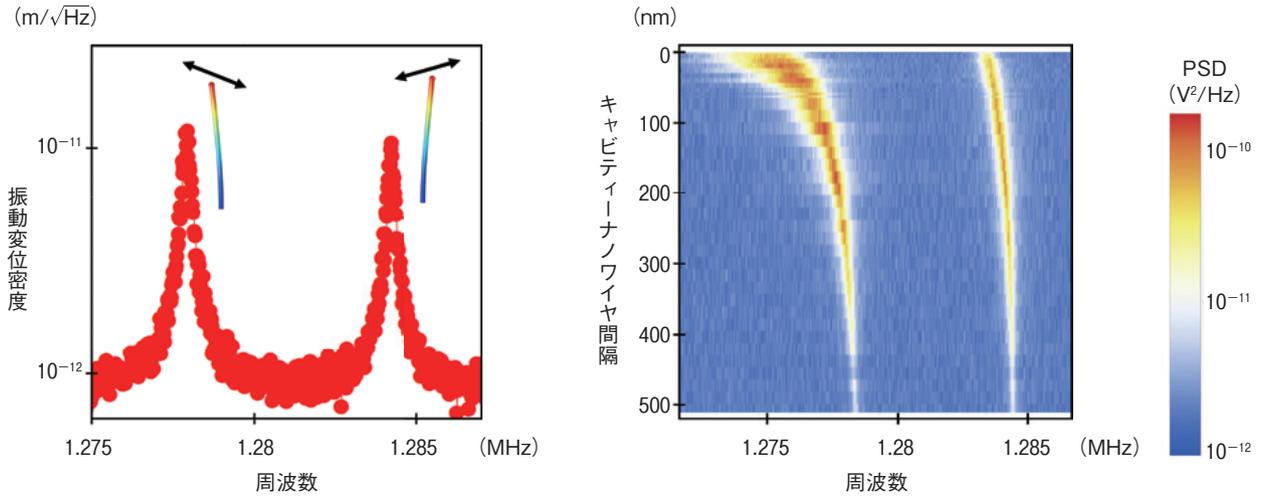
実験の概略を図2(a)に示します。測定にはInP基板上に多数成長されたInAs/InPヘテロ構造半導体ナノワイヤ(図2(b)、長さ14 μm 、直径500 nm)の1つを用います。また、光ファイバ先端を放電加工した40 μm 径のガラス玉を光キャビティとして用います(図2(c))。ガラス玉に1 μm 程度

にまで細線化した通信波長光ファイバをコンタクトさせ、ウィスパーリングギャラリモードを誘起します。このモードのエバネッセント場をナノワイヤに近接させることにより、 1.8×10^5 のQ値を有する光共鳴を観測しました。Q値とは、キャビティにどれだけ強く光を閉じ込めることができるかを示すQualityの指標であり、 10^5 という値は高Q値に分類される閉じ込めの強い光共鳴を指しています。

半導体ナノワイヤの高感度変位測定と振動特性制御

私たちは、ナノワイヤの振動に伴う光の位相変化を鋭敏に読み出すため、ホモダイン光干渉計と呼ばれる測定系を構築しました。この干渉計の利点は、光パワーを検出する通常の検出方法とは異なり、光の位相変化を高感度に読み取れる点にあります。この干渉計出力信号に対してスペクトル測定を行うと、1 MHz近傍に2つのピーク

が観測されました(図3(a))。これらは、ナノワイヤの縦・横2方向の振動モードの熱揺らぎに対応しています。熱揺らぎとは、ナノワイヤが環境温度によりランダムに運動する熱的な振動のことであり、温度が高いほど大きくなります。本実験で用いたナノワイヤの室温における熱揺らぎは100 pm程度($\sim 1 \times 10^{-11} \text{ m/Hz}^{0.5}$ ~ 原子1個の大きさと同程度)であり、本測定系で検出可能な最小変位量(図3(a)のフロアレベルに相当)は10 pm程度であることが分かりました。この最小検出可能変位は2.8ケルビンの温度環境にナノワイヤを置いた際期待される熱揺らぎの大きさに相当しています。これはすなわち、約-270°Cという絶対零度近くの極低温環境でもナノワイヤの熱揺らぎが検出可能であることを示しています。そのような極低温環境では、半導体ナノワイヤに閉じ込められた電子が量子力学的な性質を示します。したがって、このような環境でナ



(a) 半導体ナノワイヤの振動変位スペクトル密度 (挿入図はしなり運動を示す)

(b) 光キャビティと半導体ナノワイヤの間隔を制御した際のパワースペクトル密度 (PSD)

図3 半導体ナノワイヤの高感度変位測定と振動特性制御の結果

ノワイヤの機械的自由度を引き出すことが可能となれば、ハイブリッド量子デバイス化へ向けて大きく前進します。

一方、振動の検出のみならず、振動を積極的に制御する技術の開発も重要となります。微小ガラス球を用いた本手法は、ナノワイヤの振動検出と同時に振動を光で制御することも可能とします。これは、光ピンセットにも応用されている光勾配力と同じ原理で、光電場の密度が低いほうから高いほうへ物体に力が働きます。この力は、キャビティとナノワイヤの近接距離が小さくなるほど増加し、振動周波数の変化と線幅の増大を引き起こします (図3 (b))。また、詳細は割愛しますが、この力を用いてナノワイヤの振動軸を回転させることにも私たちは成功しています。このように、キャビティの強い光勾配力を用いることで、ナノワイヤの振動特性を精密に制御できることを明らかにしました。

今後の展開

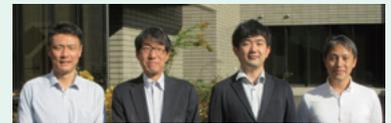
今回紹介した技術は、光波長よりもサイズの小さな半導体ナノワイヤの微小振動を高感度に検出・制御することを可能にします。その検出感度は光キャビティのQ値向上でさらに高まることが期待できます。前述の実験で用いた光キャビティのQ値は 10^5 の程度でしたが、より精度良く加工することにより 10^7 以上のQ値を得ることも十分に可能です。そのような高Q値キャビティを用いれば、半導体ナノワイヤの熱揺らぎのみならず、さらに2桁小さな量子力学的揺らぎを検出できるレベルにまで振動検出感度を引き上げることも可能となることが理論予測されています。これを実験的に実現するにはまだまだ課題が残っていますが、今後も挑戦を続け、ハイブリッド量子デバイスへ向けた半導体ナノワイヤの研究を進めていきます。

参考文献

(1) F. R. Braakman and M. Poggio : "Force sensing with nanowire cantile-

vers," *Nanotechnology*, Vol. 30, No. 33, May 2019.

- (2) G. Kurizki, P. Bertet, Y. Kubo, K. Molmer, D. Petrosyan, P. Rabl, and J. Schmiedmayer: "Quantum technologies with hybrid systems," *PNAS*, Vol. 112, No. 3, pp. 3866-3873, March 2015.
- (3) M. Asano, G. Zhang, T. Tawara, H. Yamaguchi, and H. Okamoto : "Near-field cavity optomechanical coupling in a compound semiconductor nanowire," *Commun. Phys.*, Vol. 3, No. 230, Dec. 2020.



(左から) 章 国強 / 山口 浩司 / 浅野 元紀 / 岡本 創

皆さんの身の回りにはあふれている「振動」ですが、その究極的に小さな領域ではまだまだ解明されていない現象がたくさんあります。小さな「ガラス玉」を覗いて広がる振動の物理の奥深さと、その応用技術の重要性をお伝えできれば幸いです。

◆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
 ナノメカニクス研究グループ
 TEL 046-240-3825
 FAX 046-240-4317
 E-mail motoki.asano.gm@hco.ntt.co.jp

インクジェット技術を用いた 架橋ナノワイヤ電気機械素子の作製

半導体ナノワイヤは次世代の電気・光デバイス用材料として注目され、近年精力的に研究が進められています。細長いナノワイヤを架橋構造にすると、それ自体の機械振動を利用した電気機械素子として機能し、高感度センサなどへの応用が期待されています。本稿では身近なインクジェット技術を用いることによって、そのような機械振動素子を手軽に効率良く、かつ資源の無駄を極力抑えて作製できることを解説します。

ささき さとし たての こうた
佐々木 智 舘野 功太
おかもと はじめ やまくち ひろし
岡本 創 山口 浩司

NTT 物性科学基礎研究所

インクジェットプリンタ

インクジェットプリンタは家庭やオフィスでPCから紙類に印刷するのに用いられる身近な家電製品です。一方、産業的にもさまざまな局面で利用されており、例えばペットボトルのキャップに年月日などの文字を印字するのにインクジェットプリンタが使われています。プリンタヘッドが印刷対象物と非接触なので、紙のような平坦なものだけでなくペットボトルキャップのように立体的で凹凸のあるものにも印字ができます。通常のインクジェットプリンタにおけるインク吐出機構としては、圧力でインクを押し出すピエゾ方式や、ヒータによる加熱でインクを押し出すサーマル方式が2大方式となっています。家庭用のインクジェットプリンタから吐出される液滴の最小サイズは約1 pLで、空気中を飛翔する液滴の直径は10 μm程度といわれていますが、紙などの印刷対象物に液滴が到達してから乾燥するまでに若干広がるので、実際の最小印字

分解能としては数10 μm程度となります。

実はインクジェットプリンタは文字や絵を印刷するだけでなく、プリント基板のような電子回路を直接「印刷」することもできます。インクジェット手法はマスクレスかつオンデマンドに金属電極などの材料を配置可能であることから、フォトリソグラフィのような従来のトップダウン手法がなじみにくいソフトマテリアルへの微細構造形成にも適用でき、生体に貼り付け可能なフレキシブルエレクトロニクスデバイス等へも応用されつつあります。従来のリフトオフ法でプリント基板の金属パターンを形成する際には、面積的

には全体の極一部のみ電極・配線として基板に残して他の大部分はレジストとともに除去してしまうので大量の材料が無駄になってしまいますが、インクジェットでは必要量の材料のみを必要な個所にオンデマンドに配置できるので、昨今重要視される省資源化という観点からも有利といえます。

半導体ナノワイヤを用いた 機械振動素子

私たちの研究グループは主にμm領域のサイズの微細機械振動素子を研究してきましたが、さらに小さいnm領域の断面サイズを有する機械振動素子材料として半導体ナノワイヤに着目

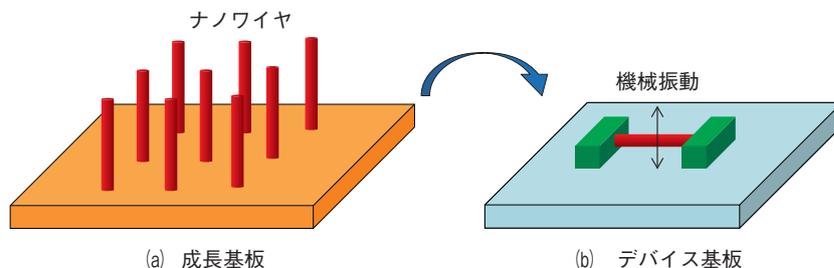


図1 基板上に成長したナノワイヤと横型機械振動素子の模式図

しました。ナノワイヤは図1(a)に模式的に示すように半導体基板に対して一定の結晶方位に沿った角度で成長したヒゲ状の結晶で、典型的なサイズとしては直径数100 nm、長さ10 μm 程度です。ナノワイヤが基板から縦方向に生えたままの状態ではレーザーやトランジスタなどのデバイスに加工することも可能ですが、ここではより精密な電氣的制御を行うため、図1(b)のように別のデバイス基板に必要な数だけナノワイヤを移し、両端に電極を有する横型の両持ち梁構造を作製することとしました。なお半導体材料としては、表面に電子がたまりやすく電氣的接触のとりやすいインジウムヒ素 (InAs) を採用しています。

さて、ここで無数のナノワイヤが生えている成長基板から機械振動素子用の別の基板にどのようにナノワイヤを移すかを考えます。もっとも原始的な方法はナノワイヤの生えた成長基板をそのまま、あるいは綿棒などにいったんナノワイヤをこすり取ってデバイス基板に押し付けて機械的に転写する方法です。この方法はデバイス基板のどこにナノワイヤが転写されるかは全くの偶然頼りとなります。ナノワイヤの場所に合わせて電極を後付けする作製方法ならば、どこかに使えるナノワイヤは見つかるでしょうが、後で説明するように、私たちは架橋構造用に準備した溝の上に橋渡しされた状態でナノワイヤを置く必要があるため、このような偶然に頼る方法を用いるわけにはいきません。また、たまたま所望の位置にナノワイヤが転写された場合でも、それ以外の大多数のナノワイヤは使わ

れずに無駄になってしまいます。このような非効率や無駄を避けるには、転写すべきナノワイヤを光学顕微鏡等でリアルタイム観察しながらデバイス基板上の所定の位置に着地させる手法が必要となります。昨今はグラフェンなどの薄膜の薄片をハンドリングするために、レジスト等の樹脂膜に一時的に吸着させて別の基板に転写する方法がよく用いられています。この手法をナノワイヤの転写に適用することもできますが、私たちはより効率的に転写作業を行うためインクジェットプリンタを用いる方法を開発しました。ただし、使用したのは前述した家庭用インクジェットプリンタよりも1000分の1程度の極微小液滴の吐出が可能な研究用のハイスペックな装置です⁽¹⁾。また吐出機構は前述した2種とは別の静電的な仕組みとなっています。外観は家庭用インクジェットプリンタよりは大柄になるもののデスクトップサイズで、常温常圧下で比較的簡便に作業が行えます。

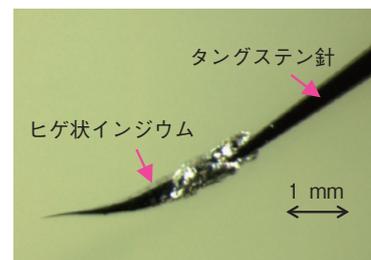
インクジェットによるナノワイヤ機械振動素子の作製

図2(a)は実際のインクジェット装置 (SIJ社製) の主要部分の写真で、手前の観察用カメラの奥に見える赤い筒状の部品の下に吐出ノズルがあり、電氣的にXYZ3軸精密制御できるようになっています。また独自に補助マニピュレータを追加しています。これは図2(b)の拡大写真に示すようにタングステン針の先に細いヒゲ状のインジウム (先端径数 μm) を付着させたもので、いったんデバイス基板上にインクジェット射出されたナノワイヤの位置を微調整するために用います⁽²⁾。

実際の転写作業においては、ナノワイヤをブチルカルビトールという揮発しにくい溶液中に分散させたものを「インク」としてインクジェット装置に充填します。このとき成長基板内の数ミリ角程度の微小領域からナノワイヤを先の細いブラシなどでブチルカルビトール溶液に払い落としてやれば、十分な本数のナノワイヤが分散されま



(a) インクジェット装置中心部



(b) 補助マニピュレータ先端部

図2 インクジェット装置とマニピュレータの写真

す。図3にナノワイヤを分散させたブチルカルビトール溶液をインクジェット吐出している模式図と、実際の転写作業中の光学顕微鏡写真を示します。斜め方向から観察した低倍率光学顕微鏡写真中に黒っぽく見えている数カ所の楕円形部分がインクジェット吐出されたブチルカルビトールの液滴です。ここでは長さ10 μm程度のナノワイヤを転写するために、比較的口径の大きなノズルを用いているため本装置としてはかなり大きなサイズ（直径50 μm弱）の液滴を吐出しています。図3(c)の高倍率光学顕微鏡写真が示すように左右2組の微細電極群がシリコン基板上にあらかじめ形成されており、各電極群をねらって液滴をインクジェット吐出しています。ブチルカルビトールの蒸発が進んで液滴がなくなりかけていますが、まだナノワイヤは完全には基板に固定されていません。図3(c)の左の写真を見ると、ちょうど各液滴に1本ずつナノワイヤが含まれるようにナノワイヤ分散液の濃度が調節されていますが、元の液滴サイズが大きいこともあり、まだ電極の上にはナノワイヤが乗っていません。この後、ヒゲ状インジウムの補助マニピュレータでナノワイヤの位置を調整したのが図3(c)の右写真で、各ナノワイヤが電極の真上に直交するように配置されています。このとき、液滴ごととナノワイヤを動かすか、ナノワイヤと基板の間に多少なりとも溶液が残った状態で動かしていますので、ナノワイヤに無理な力が加わることはありません。また、直接マニピュレータの先端がナノワイヤに触れてもインジウムは

柔らかい金属なので、ナノワイヤにダメージを与えることはないと考えています。このように補助マニピュレータを使用することにより、最終的には1 μm程度の精度でナノワイヤの位置決めを行うことが可能です。

前述したインクジェット装置によるナノワイヤ転写を用いた、電気機械振動素子の作製フローを図4に示します。まずシリコン基板上の酸化膜にドライエッチングで溝を掘り、電気機械制御用のバックゲート金属を溝の中に

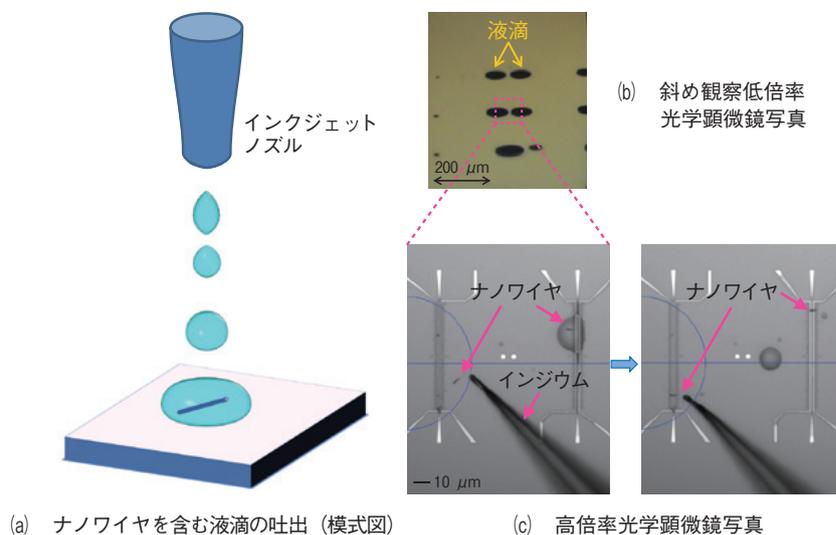


図3 インクジェット装置によるナノワイヤ転写の様子

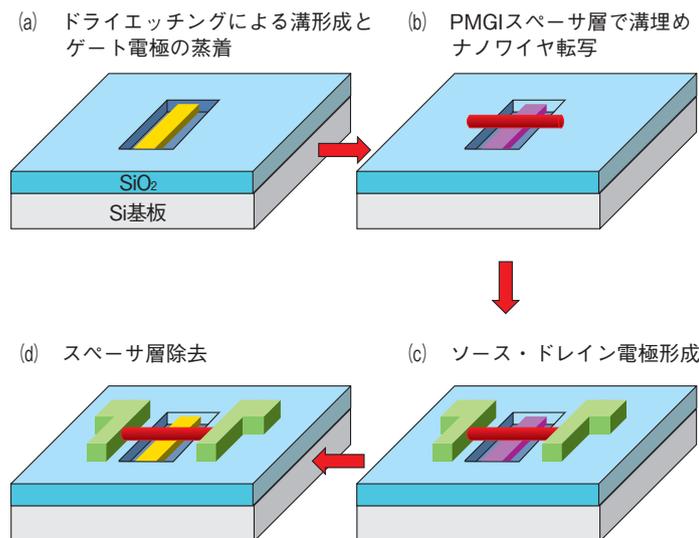


図4 電気機械振動素子の作製手順

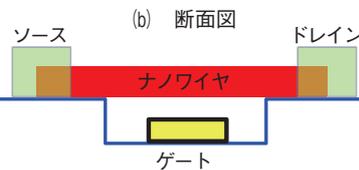
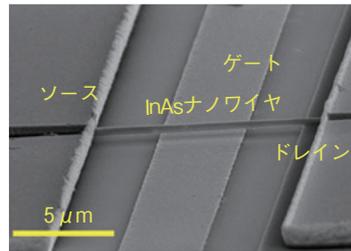
蒸着しておきます。溝の深さとゲート金属の厚みの差が最終的にナノワイヤとゲートの間隔（約300 nm）となります。ここにそのままナノワイヤを転写すると、後のリフトオフ工程でナノワイヤが下に引っ張られて金属ゲート表面に接触してしまうので、あらかじめPMGIという樹脂のスペーサ層を覆っておき、その上にナノワイヤをインクジェット転写します。電気的測定を行うためのソース・ドレイン電極をリソグラフィとリフトオフ法で形成した後、気相中の等方的オゾンクリーニング法によってスペーサ層を除去すると、架橋ナノワイヤ素子が完成します。

図5 (a)に完成した架橋ナノワイヤ機械振動素子の走査電子顕微鏡 (SEM) 写真と、図5 (b)に断面模式図を示します。振動する架橋部分のナノワイヤの長さは10 μm で、300 nmのギャップを介して静電的にナノワイヤと結合しているバックゲートの幅は4 μm となっています。ゲート電極に高周波電圧を印加して架橋部分に静電的な力を及ぼしつつ、ソース・ドレイン電極間に流れる電流をモニタすることによって検出した機械振動の信号を図5 (c)に示します。12.9 MHz付近にローレンツ型の共鳴振動ピークが観測されており、架橋ナノワイヤの長さや直径から計算される共鳴周波数とも近い値となっていることから、きちんと架橋電気機械素子が実現できていることが分かります⁽³⁾。

今後の展開

半導体ナノワイヤの典型的なサイズである直径100 nm、長さ10 μm とい

(a) 完成デバイスのSEM写真



(c) 室温での機械振動信号

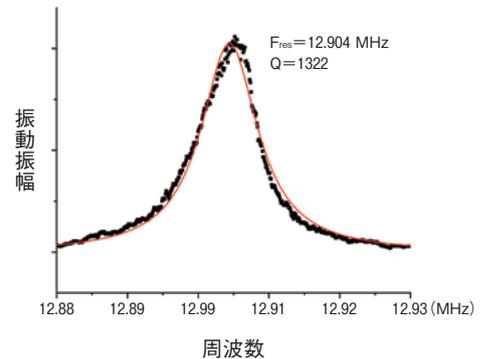


図5 完成したナノワイヤ電気機械素子の外観と機械振動特性

うのは、室温・常圧下において光学顕微鏡でリアルタイム観察しつつミニピュレーション可能な最小サイズに近いのではないのでしょうか。インクジェットプリンタ自体は μm 領域の技術ですが、nm領域の直径を有するナノワイヤを介して、前者から後者へ橋渡ししているともみなせます。その結果、より高い共振周波数領域へ応用範囲を広げることが可能となり、また、梁構造が軽くなることによってナノワイヤに吸着した単一分子を検出するなど、高感度センサへの応用も期待できます。

参考文献

- (1) 村田：“微細パターン直描を可能にするスーパインクジェット印刷技術の開発,” 応用物理, Vol.81, No.5, pp.386-390, 2012.
- (2) K. Flöhr, M. Liebmann, K. Sladek, H. Y. Günel, R. Frielinghaus, F. Haas, C. Meyer, H. Hardtdegen, T. Schäpers, D. Grützmacher, and M. Morgenstern: “Manipulating InAs nanowires with submicrometer precision,” Rev. Sci. Instr., Vol. 82, p.113705, 2011.
- (3) W. Tomita, S. Sasaki, K. Tateno, H. Okamoto, and H. Yamaguchi: “Novel Fabrication Technique of Suspended Nanowire Devices for Nanomechanical

Applications,” Phys. Status Solidi B, p.1900401, 2019.



(左から) 岡本 創 / 館野 功太 / 佐々木 智 / 山口 浩司

インクジェットプリンタは身近な家電製品ですが、最先端のデバイス作製にも応用可能な技術であり、かつ省資源化・環境保護にも寄与し得ることをお伝えできれば幸いです。

◆問い合わせ先

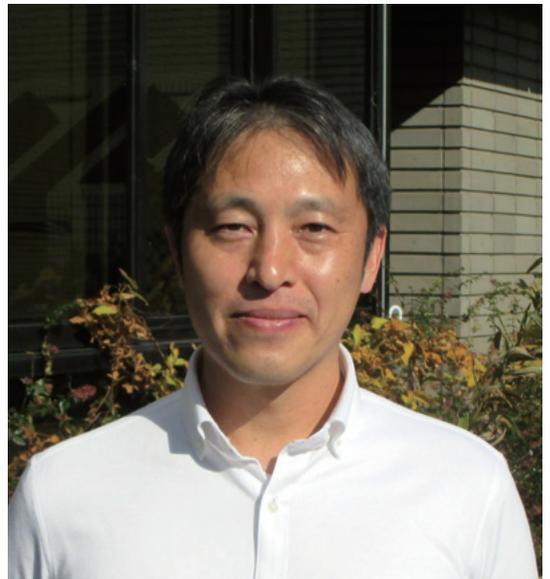
NTT物性科学基礎研究所
フロンティア機能物性研究所
ナノメカニクス研究グループ
TEL 046-240-3465
FAX 046-240-4718
E-mail satoshi.sasaki.cf@hco.ntt.co.jp

主役登場

物体の小さな振動を利用する

岡本 創

NTT 物性科学基礎研究所
フロンティア機能物性研究部
ナノメカニクス研究グループ
特別研究員 グループリーダー



私たちの周囲にあるさまざまな物体は、その材質や形状で決まる固有の周波数で振動します。その振動の大きさは外から与える力の大きさに依存しますが、あらわに外力を与えなくても、周囲環境の温度により、目には見えない程度の小さな振動が起こります。このような物体の振動を積極的に活用することができれば、例えば検体の付着などによる振動の変化を利用した高感度センサや、振動（弾性波）に情報を担わせて転送する信号処理利用など、さまざまな役に立つ応用の可能性が広がります。このような試みは“ナノメカニクス”と呼ばれる研究領域において近年取り組みが活発化しています。私たちのグループでも、NTTの有する高度な結晶成長技術や微細加工技術を武器に、微小な振動子を用いたナノメカニクス研究を積極的に展開しています。

私たちのグループでは、そのような微小な振動子を「光」や「電気」あるいは「磁気」を用いて自在に制御したり、振動の情報を「光」や「電気」あるいは「磁気」に転写して読み取る技術を用いています。このような技術を応用すると、小さな「振動」を利用して光や電気、磁気の応答を制御することも可能となり、オプティクスやエレクトロニクス、マグノニクスに関する素子を機械的自由度で操ることのできる新しい機能素子が実現します。機械的な「振動」はジュール発熱を生じないことから、このようなアプローチは環境に優しい省エネ素子の創出という観点で特に期待

されます。また、私たちのグループでは、振動・光・電気、あるいは、振動・電気・磁気など、振動系とその他2系を融合したハイブリッド化の取り組みも積極的に進めています。そのようなハイブリッド系の構築は、振動を介した高効率な光電変換や超高感度な電荷・スピン検出など、素子のさらなる高機能化や高性能化を可能とします。また、多系のハイブリッドによって現れる新たな物理現象の解明など、基礎研究としての意義も大きく存在します。

物体の微小な振動を取り扱うナノメカニクス分野はオプティクス分野やエレクトロニクス分野と比べて発展が遅れていました。それは、光子（フォトン）や電子（エレクトロン）と比べて振動量子（フォノン）の取り扱いが困難であったためですが、近年の飛躍的な技術革新により、最近ではフォノン単体を検出・操作することも可能となってきています。これからは今まで以上に振動を利用したさまざまな素子や新規応用が世に示される時代となるでしょう。ナノメカニクス、あるいはもっと言うならば“フォノニクス”の時代が到来するでしょう。私たちが取り扱うナノメカニカル素子の振動だけでなく、皆さんにより馴染みのある“音”や“熱”も振動（フォノン）によるものです。音や熱を積極的に利用した機能素子が現れる時代もそれほど遠くないかもしれません。振動の“波”にいかにかうまく乗るかが私たち研究者に問われています。

挑戦する 研究者たち CHALLENGERS



中島 和秀

NTT アクセスサービスシステム研究所
上席特別研究員

研究者にはゴール はない。満足したら 終わりだと思っ のが健全

年々増加するデータ通信容量に対応するため、将来的にデータ伝送容量を100倍から1000倍以上に増大させる技術が求められています。これに対応するために、世界的にマルチコア光ファイバの研究が進められている中で、現在の光ファイバの100倍以上の伝送容量と世界最高の空間利用効率を有するマルチコア光ファイバを実現し、主要国際会議においてトップスコアの評価を獲得した中島和秀上席特別研究員に研究活動の進捗と世界初に臨む研究者の姿勢について伺いました。



光通信基盤の持続的な発展を支え、 「つなぐ」光媒体技術の研究開発

手掛けていらっしゃる研究概要、活動等について教えていただけますでしょうか。

私は、あらゆるヒト・モノ・コトをつなぐ光通信基盤の持続的な発展を支える、光媒体技術の研究開発を手掛けています。コアネットワーク、海底ネットワークにおいてさらなるトラフィック増大が予想されており、既存のシングルモード光ファイバでは伝送容量の限界を迎えるため、大容量化が必要になってきます。この大容量化は、複数のレー

ザ光を多重化して伝送する方法と、1本の光ファイバの中に光の通り道であるコアを複数設ける方法を組み合わせることで実現します。私たちは、関連グループと緊密に連携しながら、1本の光ファイバに複数のコアを設ける、空間分割多重光ファイバ（マルチコア光ファイバ）に関して、空間チャンネル数の拡大・高密度化、空間分割多重（SDM）光増幅技術と伝送媒体内における光制御技術の融合、さらには導入に向けて空間分割多重光ファイバの特性を最大限発揮する革新的なケーブル化技術の研究開発に取り組んでいます（図1）。

さて、これまでネットワークの高速・大容量化のために

光ファイバを開発してきましたが、通信以外にもその活用領域があります。光ファイバは曲げにより屈折率が変化するという特徴がありますが、音や振動による極微小な屈折率変化のため、散乱光の振幅・位相が変化します。この性質を利用して、光ファイバケーブルを社会へ張り巡らせたセンサとしての活用が考えられます。光ファイバをセンサとして活用する、光ファイバ環境モニタリング技術は、電力・ガス・水道・鉄道等インフラの設備管理・劣化予測や、河川や地盤情報による災害状況把握や被災予測、交通量や渋滞予測、気象などの都市情報等、さまざまな社会課題の解決を実現するものとして期待されており、こうした新しい価値創造についても光媒体技術の視点からテーマの1つとして取り組んでいます。

そして、私はライフワークとして光ファイバ技術の国際標準化に関する活動をしています。光通信インフラは一度導入すると、容易に変更・更改することはできません。このため、光通信インフラの研究開発においては、既存技術

との整合性を考慮した新たな技術の開発・導入が不可欠です。これは世界的に共通な課題であり、さらに、世界中に張り巡らされた光ファイバによるネットワークが相互につながるためにも、国際標準化が重要になります。そこで、私は、ITU-T (International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector) の議論にも参画し、2009年からは課題検討グループの議長(ラポータ)を務め、光ファイバ技術に関する国際標準化の議論をリードしてきました。

いずれも社会に大きく貢献する研究ですね。具体的にどのレベルまで研究は進んでいるのでしょうか。

約10年、世界のトレンドとなっている研究分野であるマルチコア光ファイバで、私たちは世界をリードする成果を上げています。

2017年には直径250 μm 以下の光ファイバ断面に6モード(チャンネル) 伝搬可能なコアを19コア配置することでファイ

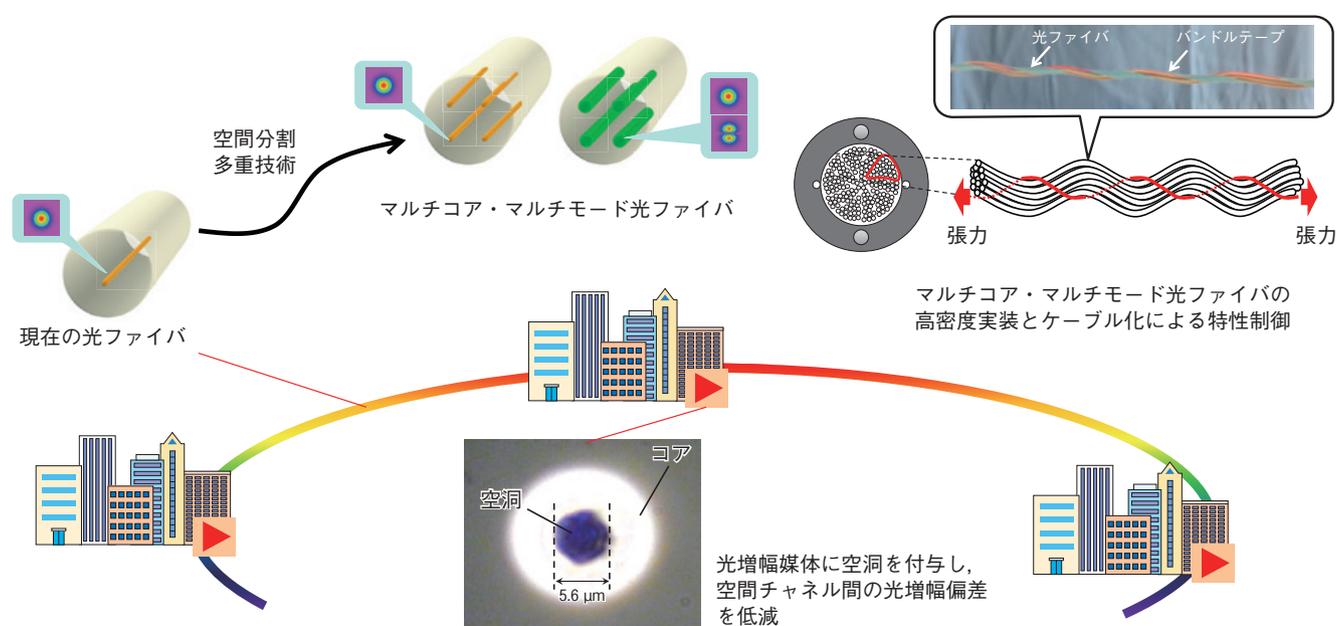


図1 空間分割多重伝送の実現に向けた光媒体研究



ファイバ1本当たり114の空間チャンネルを配置し、既存光ファイバと同等の機械的信頼性を実現する世界トップクラスの超大容量伝送光ファイバを実現することに成功しました。そして、2018年には10モード・12コアの光ファイバを設計・試作し、空間多重数と空間利用効率（単位断面積当りの空間多重度）の双方で既存光ファイバの100倍以上のポテンシャルを有する世界最高の高密度空間分割多重光ファイバを実現しました（図2）。コアの数を多くすると光ファイバの直径が小さくなり、前述の直径250 μmは既存の光ファイバのほぼ倍の太さであり、製造等の効率が低くなります。そこで、私たちは既存の光ファイバと同じ細さで容量を増やすことを追究してきました。量産性や接続性など実用化に向けたさらなる検討等は必要ではあるものの、現状の通信設備や装置との親和性に優れ、短距離から1万km級の長距離伝送にも適用可能なマルチコア光ファイバの研究成果も報告させていただき、2019年にはOECC (Optoelectronics and Communications Conference) の論文賞等を受賞しました。

今後は、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) に向けて、2025年を目途に既存光ファイバと同等の特性を有するコアを4個多重したマルチコア光ファイバ

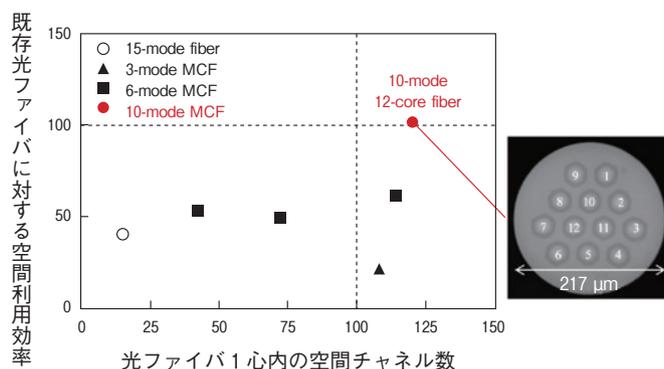
技術の確立をめざすとともに、2030年にはマルチモードの併用や、高度化された光伝送技術との組合せで既存光ファイバの125倍の伝送容量を実現したいと考えています。さらに将来的には、私たちが継続的に議論を重ねてきた空孔構造光ファイバ技術との融合により、究極の大容量伝送光ファイバを実現することも検討していきたいと考えています。



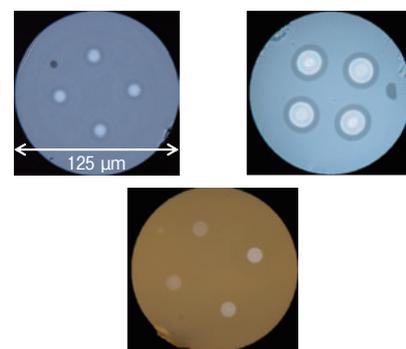
研究要素は「肌感覚」にある

研究者として心掛けてきたことを教えてください。

私がとても重要であると考え大切にしてきたことは、論文や学会発表等さまざまな情報のソースにアプローチして気になったことを探すことです。しかし、コロナ禍により学会等において顔を合わせて議論する機会が少なく、休憩時間等の立ち話の機会も減りましたから、メールでのやり取りで刺激を受けています。そして、これらを通して他者の研究活動や着眼点、また、論文に大いに刺激をいただいています。ただ、残念なことにオンラインの学会や会議では、ついPCの脇や周辺にある目先の仕



世界最高の空間多重数（12コア×10モード＝120）のマルチコア・マルチモード光ファイバ



既存光ファイバと同じ細さのマルチコア光ファイバ
既存光ファイバと同等の伝送特性で
短距離から1万km伝送まで対応

図2 マルチコア・マルチモード光ファイバの検討例

事に一瞬気を奪われ、大切な刺激を逸してしまうことがあります。やはり、オンサイトの直接的な活動がいいですね。

そして、研究者にとって大切な能力として、何をねらい、検討するかを見極める力があります。私はこの力を養うために新しいことを意識し、少しずつでも挑戦することを心掛けてきました。また、余裕がないと新しい発想は生まれません。一見無駄に見えることでも少しはやってみる、やれるゆとりを意識してきました。

こうした教訓からも、「手を出して触る」ことは、研究者にとって最大のメリットであると実感します。この「肌感覚」はとても重要で、ちょっとした違和感、不思議だと感じたことに研究要素や発見があるからです。

私は入社して28年、光ファイバー筋に仕事を行ってきました。現在、使用されている光ファイバは非常に優れていて良くできたデザインで、ある意味で技術は確立したものとなっており、これ以上は追究しなくても良いだろうと考えられた時代も経験しました。それでも、私は長年の経験と「肌感覚」による勘から、将来的には限界が来ると考え、大容量化を追究するに至ったのです。そしてそれが現実のものとなりました。

28年の研究活動において意識されてきたことをお聞かせください。

私は通信としての光ファイバ技術にこだわり続けてきましたが、研究活動において光ファイバの技術を別の何かに活かす等のバイ・プロダクティブな発想は意識してきました。ちょっとした気付きやひらめき力は意識することでだんだんと身についてきます。NTTのOBで、私の国際標準化活動の大先輩に「目の前を通り過ぎる後ろ髪をつかめるようになれ」と言われたことがあります。ダヴィンチの言葉で「幸運の女神には前髪しかない」という言葉がありますが、大先輩は「後ろ髪」という言葉で教えてくださいました。「後ろ髪にすがりついて接点をつくっていく」と。この言葉には常に何かを考えるのではなく、

何となく頭の片隅に意識を置いておくというニュアンスを感じました。

仲間との話にもよく出るのですが、新しいイメージやアイデアは食事や入浴の最中といった意外なときに浮かぶものです。頭の片隅に置いておくことで日常のふとした瞬間のひらめき、これも先ほどお話しした無駄を省き過ぎない余裕から何かが生まれるという話につながっているように感じます。特に実験をしているときはこれが生きてきますから、実験中に気になったことは回り道だと思わずに、時間を見つけてやってみるのが良いと思います。これをないがしろにすると研究自体が先細りしていくようにも感じます。そして、虫の目、鳥の目、魚の目で研究活動を眺めていきたいですね。私たちはグループで取り組んでいるので、鳥の目の役割はある程度年を重ねた研究者に任せて、若手は虫の目で一生懸命に追究するのも良いでしょう。

さて、私は恩師や指導者に「技術ベースで提案することは自由」と教えていただきました。部下だから進言してはいけない、というような発想はいけない、むしろ提案ベースで議論してほしいと言われて育ってきましたから、私も若手にはぜひこの言葉を意識してほしいと思っています。私も属しているグループでエキスパート・リーダ等のコメントなどを聞きながら、一生懸命考える努力をしましたし、議論を積み重ねてきたことが大いに役立ちましたから、ぜひ、提案ベースを心掛けてください。



チームの一員であるという主体性を強く意識する

先輩や仲間とのこうした会話はチームでの研究活動ならではのですね。

チームで研究をする大きな利点はメンバーのさまざまなコメントが聴けることにあります。ただ、チームにおける課題分担が曖昧になってしまうこともあり、これは避けなけ



ればなりません。例えば、論文の学会投稿の担当は誰か等が明確になっていないと、主体的にかかわらない、かかわれないことがあります。この主体性はチームの一員として若い研究者の方に大切にしていきたい心構えの1つです。計算でも実験でも出てきた結果や数字を鵜呑みにしないでください。それをどういう目線で検討するかにオリジナリティがあり、主体性が発揮されますから強く意識していただきたいと思います。

また、オリジナリティを追究し、主体性を持った研究者となるために重要なのは関心や興味を持つことだと私は考えています。漠然と「先輩に言われたから実験しました」では、そこには面白みや関心が存在していないように思いませんか？ 研究者に求められるのは言われた仕事をするのではなく、結果に対してどう手を加えるか、加工するか、何が出てくるかという面白みを見出すことで、それが一番重要なのではないかと思います。

私が若かったころ、実験のグループリーダーに「上下左右、いろいろな方向から見ろ」と、報告書をよく突き返されたものです。解釈することは結構難しいことなのですが、それでもさまざまな方向から眺めて解釈していくと、意外な発見があります。とはいえ、いまだに私も何だか分からないままに進めるときもありますから、若い研究者の気持ちも分かります。また、皆さんと同じように上からNOと言われてショックを受けた経験もありますから、私たち上席もなるべくNOとは言わないように努力しています。10回やって1回うまくいったらラッキーだと思って臨んでください。

若い研究者の皆さんは、先輩のこうした励ましに支えられているんですね。

研究者は組織に属していても、自分なりの夢や方向性を語れるかということはとても重要だと考えています。私は情報をあまねく普及させるという電電公社のミッションに憧れてNTTに入社しましたから、光ファイバという媒体

を使って情報を届ける意義はとても重要であると考えていますし、利用していただく方々に大きなインパクトを与えたいと考えています。こうした自分なりの考えや方向性をしっかりと持ってほしいと考えます。

そして、繰り返しになりますが、ぜひ提案ベースを強く意識して研究活動をしてください。提案することで面白みも湧いてきます。否定されたとしても、その理由を追究するのも研究の醍醐味だと考えます。加えて、実験に限らず、その領域において手掛けているテーマに一番詳しいのは手を動かして、汗をかいている自分であると自負していただけたらと思います。

28年間の研究者人生において、FTTH (Fiber To The Home) 拡大時に私たちが検討した曲げに強い光ファイバを部分的にでもネットワークに活用してもらえました。残念ながら、先輩方が今のネットワークに使われている光ファイバを開発して以来、それを凌駕する新たな光ファイバの大規模導入はありませんが、部分的であっても社会に貢献できたことは本当に嬉しかった記憶があります。この経験は興味本位の研究ではなく、社会の役に立つ研究をするように私を変えてくれました。加えて、通信以外にも使えるのではないかとバイ・プロダクトの感覚も養ってくれました。IOWN構想が発表され、世の中の関心もAIやIoT (Internet of Things) 等ICTやその周辺に向いてきているからこそ、こういった発想を持ついいチャンスなのではないかと思います。

研究者にはおそらくゴールはありません。満足したら終わりなのではないでしょうか。研究は一生続くと思うことが健全ではないでしょうか。今後も、研究開発と国際標準化の両輪で、光ファイバネットワークの持続的な発展を支え、あらゆるヒト・モノ・コトをつなぐ光ファイバ技術の実現をめざして邁進していきたいと思っています。

挑戦する 研究開発者たち CHALLENGERS



藤井 雅雄

NTTデータ
技術革新統括本部
データベーステクニカルリード

シンプルなコードに こだわるという美学。 最後の番人として 「中身まで分かる 人」でありたい

AIやIoT、FinTechなどのアプリケーションやサービスが多様化する昨今、データ基盤としてデータベースが重要視されています。さまざまな分野で導入が進むオープンソースソフトウェアによるDBMS、PostgreSQLのコミュニティでコミットとして活躍し、開発においてバグの修正やパッチのレビュー、世界中の技術者への働きかけを実施し、社員教育にも携わるNTTデータ 技術革新統括本部 データベーステクニカルリード藤井雅雄氏に研究開発の概要と研究開発者としての姿勢について伺いました。



お客さまの選択肢を増やすためトレンドを意識する

手掛けている研究開発について教えてください。

私が手掛けている研究開発は、①PostgreSQL as a Service、②PostgreSQLの性能向上・機能改善、③PostgreSQLにおけるグローバルトランザクションの実現です。PostgreSQLはオープンソースソフトウェア(OSS)のDBMS(DataBase Management System)です。

PostgreSQL as a Serviceは、NTTデータのクラウド

基盤上などでPostgreSQLのマネージドサービスを構築し、PaaS(Platform as a Service)として提供することです(図1)。オンプレミス(ローカルなサーバ)での構築ですとお客さまごとにPostgreSQLのインストールやバックアップなどを一から検討して構築する必要がありますが、これをクラウド基盤上にPaaSとして構築することで、お客さまは簡単にPostgreSQLを利用できるようになり、バックアップも自動的に定期取得され、監視も行われます。

現在、世界的なトレンドとして商用DBMSからの移行というかたちでPostgreSQLの導入が進んでおり、従来



はOSSの利用が少なかった、社会インフラとしての基幹系システムにおいてもPostgreSQLの採用が進んでいます。社会インフラシステムの場合は特に、万が一のトラブル時には迅速に解析・対応できるように整えておく必要があります。そこで、性能情報の収集機能が重要になります。そこで、PostgreSQLの性能向上・機能改善として、メモリの使用状況を確認するための機能やトランザクションログに関する情報などの性能情報収集機能を開発して、PostgreSQLに機能追加しています。

PostgreSQLにおけるグローバルトランザクションの実現については、グローバルトランザクションに必要な、複数のデータベースインスタンス（メモリ構造とプロセス群で構成される仕組み）をまたがるトランザクションの実行結果に一貫性を持たせるAtomic Commit、および複数のインスタンスをまたがるトランザクション実行の観測結果に一貫性を持たせるAtomic VisibilityをPostgreSQL上で実現することで、OSS開発コミュニティへ提案し、採用されることをめざしています（図2）。グローバルトランザクションとは、ユーザがDBMSを操作する際に使用する複数のインスタンスの中で、複数操作を1つのトランザクションとして実現するメカニズムです。PostgreSQLにおけるトランザクション処理能力を増大させるために、複数のインスタンスを連動させることができますが、インスタンスをまたがるトランザクション処理の一貫性が必要になり、それを実現するための手段がこの

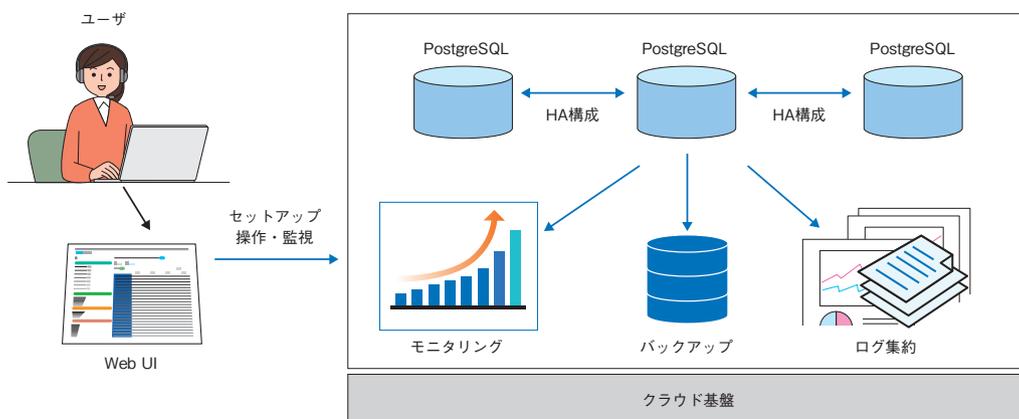


図1 PostgreSQL as a Service

テーマです。

新しい取り組みの中での課題を教えてください。

PostgreSQL as a Serviceは、コンテナ仮想化ソフトウェアを管理・自動化するためのOSSのKubernetes上に構築することを検討しています。Kubernetes上でのPostgreSQL as a Serviceの実現には、従来のオンプレミス上のPostgreSQL環境では使われてなかったさまざまなオープン製品の組み合わせが必要になり、最適な組み合わせの検証を行っています。これらのオープン製品について、知見をためて使いこなせるようにならない点が課題の1つです。さらに、Kubernetes関連は技術の進歩が早いので、その継続的なキャッチアップも重要な課題です。

グローバルトランザクションについては、PostgreSQLコミュニティ内で機能追加の合意をまだ得られておらず、今後どう開発・展開していくのかを再検討する必要があります。

使い捨ての「おもちゃ」は作りたくない

研究開発において大切にしていってほしいことを教えてください。

これは個人的なモットーとも重なりますが、研究開発において「おもちゃ」は作りたくないと思っています。「おもちゃ」とは、お客さまに使っていただいたけれど、1年後には製品として存在しないものとなりサポートもない状態で、お客さまからすれば梯子を外されたような状況を生み出してしまうことです。

こうした思いから、自らの研究開発成果については、長期的なサポートやメンテナンスのエコシステムが確立されたPostgreSQLなどのOSSに可能な限り取り込み、自分たちだけではなくコミュニティとも連携しながら、お客さまに安心して最後まで使ってもらえるように考えています。そして、成果を世に送り出して終わりではなく、お客さまにお使いいただいてフィードバックを受け、継続的により良いものにしていきたくと考えています。その意味では、お客さまにご利用いただいてからが本番だと思っています。

また、研究開発成果について、途中で投げ出さない、何が起きても最終的に自分たちが責任を持ってトラブル対応するなどの“覚悟”を持つことも必要です。その“覚悟”を決める判断基準の1つは、成果についてソースコードレベルで裏側まで理解していることです。システム（ソフトウェア）にブラックボックスの部分があると、トラブル発生時にその部分について責任を持った対応ができないことがあります。もちろん、どの研究開発も裏の裏まで熟知する必要はありませんし、ブラックボックスを組み合わせて新しいものをつくり出すこともあると思います。ただ、データベースのような基盤レイヤにおいては裏の裏まで熟知していることが重要なポイントで、データベースの研究開発者としてはこの責任感を持っていると思います。

私たちはデータベースでトラブル発生時の最後の番人的な立場ともいえます。番人の姿勢については同僚とも話していますし、新人や若手にも番人として「中身まで分かる人」になってほしいと伝えています。また、若手

にはPostgreSQLのパッチやプログラムを書いてコミュニティに投稿してもらっています。このタスクを続けていくと自動的に中身を知ることになりますから、彼らの「中身まで分かる」番人としての実力も養われていると思います。

課題やテーマを探すときに大切にしていってほしいことを教えてくださいませんか。

PostgreSQLの性能向上・機能改善については、実際にPostgreSQLを使ってくださっているお客さまやプロジェクトからニーズをしっかりと伺うことを大切にしています。ただ、お話を伺うだけではなかなか見つけられない課題があるので、私は実際に技術支援等で現場に入り、当事者として課題やニーズを確認し、新しいテーマも見つけられたらいいという心構えで活動しています。

現在は、技術支援の割合が少し減ってしまいましたが、少し前まではおおむね3分の1から半分程度の時間は現場に赴いて技術支援をしながら、残りの時間を使って研究開発をしていました。現場で課題を見つけては研究開発でそれを解決し、その解決した成果を現場へフィードバックし、さらに技術支援先からフィードバックをいただいて研究開発につなげるという、とても良いループができました。

また、現場に赴くとキャッチできる情報量が違います。思いもなかった使われ方をしていることもあれば、技術者目線で当たり前の動作も、実際にお使いになっているお客さまの運用方法の観点からみると理解できないこともあり、お客さまの本当の「お困りごと」が具体的に

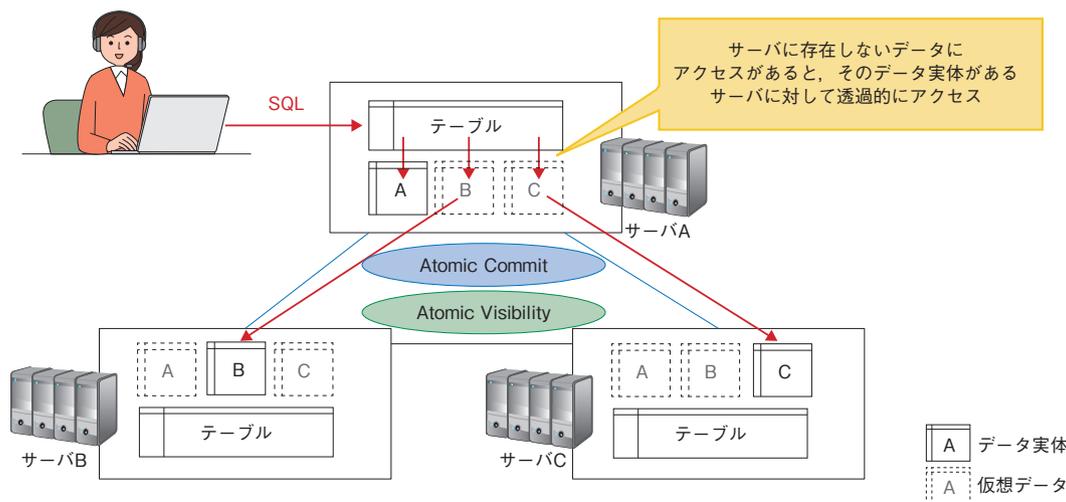


図2 グローバルトランザクション



分かることがあります。現場では異なる観点でさまざまなフィードバックをいただけますから現場に赴くことは大切です。ただ、私1人でできることには限界がありますから、メンバや部下に現場へ入ってもらいニーズを吸い上げています。それでも人手が足りていませんから、サイクルを回せる人材を増やしていきたいと思います。



一番大切なのは「面白い」こと

研究開発者としての自信を持たたのは、入社して何年目くらいでしたか。

入社18年目を迎えて、すでに古株という感覚があります。そんな私が若いころと比較して、お客さまが求めていることをより広い視野でとらえられるようになった、お客さまの立場で技術を眺めることができるようになった、そして引き出しが増えたことを通して、自らの成長を実感しています。

また、自信を持てるようになった大きなターニングポイントはPostgreSQLの本体の中に、データベースの更新内容を複製する、レプリケーションという機能を入れたことでした。当時、レプリケーション機能はPostgreSQLにはありませんでしたが、コミュニティに働きかけて入れることができました。PostgreSQL本体に機能を取り込めるように、プログラムを一からつくっては捨てることを2年ほど繰り返して、やっとの思いで入れることができました。そして、全世界の人に使っていただき、さまざま人から感謝されるまでに至りました。コミュニティでは技術的な正しさがすべてであり、それにより物事が進んでいくからこそ、基準も明瞭で議論にも納得感があるため、この過程を通して、技術者として成長できたと思います。途中で、紆余曲折があっても技術的な正しさはいつでもモノサシなので、この点において海外の技術者からも、さまざまな視点に気付かせてもらえ、どんな議論も納得できることが多く、自らの糧となりました。

これらの経験を通して、私はつくっているものに対する美学やこだわりを持つことが大切だと思っています。

美学やこだわりによって成果が変わることもあり、深いレベルで能力を発揮することにつながると思って臨んでいます。私の一番の美学・こだわりはロジック・コードのシンプルさです。他の研究開発者がつくったコードもしっかりと読んで、トラブルの可能性を予見してプログラミング・コーディングをします。複雑すぎて自分しか知らないようなコードでは、サポートできる技術者が自分だけといった状況になってしまい、逆にお客さまに迷惑をかけることになりますから、多くの技術者がサポートできるようにするという意味でもシンプルさは大切です。

若い研究開発者の皆さんに一言お願いいたします。

オープンソースのコミュニティや社外のミートアップ等、さまざまな場へ積極的に出て行って、成果へのフィードバックをもらおうと良いです。さまざまなバックグラウンドの技術者やユーザから意見をいただくことで見識が広がります。今の若い研究開発者の皆さんの中には、すでにコミュニティでの開発や社外での講演に臨んでいる方もいて、また海外技術者との英語でのやり取りも臆していない様子が見受けられ、すごいなと感心しています。

どうしても外に出て行く最初の一步が踏み出せない人は、思い切って一度やってみましょう。実はそこまで気を張ることでもなかったと分かるものです。最初の一步はそのことに慣れている経験者と一緒に踏み出すことをお勧めします。もし、PostgreSQLであれば、私に直接聞いていただいてもかまいません。実際にTwitterで「改造したいけれどどうしたらいいか」等と直接連絡をいただくこともありますから、皆さんも遠慮せずに連絡してください。

研究開発者には新しい技術やトレンドに対するアンテナの高さは大切です。私が入社した当時と比較して、研究開発のスピードはどんどん速くなっています。最先端の技術を追って、そこに対して自分なりの付加価値を付けることで、さらなる新しい最新技術として成果を出すことができます。そして何よりも、研究開発において一番大切なのは「面白い」ことです。PostgreSQLのコミュニティでは50歳代後半の技術者がいらっしゃるのですが、その方はトップの開発者で、技術力の高さは世界的にも知られています。かつて日本では技術者の定年は35歳だといわれていた時期もありましたが、そんな世界はもう終わりました。永遠に技術者としてコードを書いて仕事をできるのが今の時代ですから、私もその中心に身を置いていきたいと思っています。

明日のトップランナー

NTTアクセスサービスシステム研究所・NTT未来ねっと研究所

村上友規 特別研究員

「インテリジェント空間形成技術」を実現する インテリジェント反射板制御および無線センシングの研究

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 時代に向け、これまでの「与えられた伝送空間」から「つくる伝送空間」へのパラダイムシフトとなることが期待されている「インテリジェント空間形成技術」。今回は、その技術の土台となる2つの技術について、村上友規特別研究員にお話を伺いました。

◆PROFILE：2008年日本電信電話株式会社入社(修士卒)。NTT未来ねっと研究所配属。2015年NTTアクセスサービスシステム研究所へ異動、博士号取得(早稲田大学)、IEEE AP-S Japan chapter Young Engineer Award受賞。2020年電波功績賞 総務大臣表彰受賞、NTT未来ねっと研究所兼任。



「インテリジェント空間形成技術」 を支える2つの技術

◆「インテリジェント空間形成技術」とはどのような技術なのでしょう。

これまでの無線技術の研究は、与えられた無線伝送空間においていかに高速な通信を成立させるか、といったものが一般的でした。これに対し、「インテリジェント空間形成技術」は、周囲から無線伝送空間そのものを変化させ、電波の進行方向や強度を制御することにより、通信品質や通信速度の最大化を図るといったコンセプトの研究です。

皆さんが利用しているスマートフォンを例にとると、これまでは端末や基地局を進化させることで、基地局から端末等へ固定的に飛んでいる電波を利用してより高速な通信を行うことをめざしてきました。対して提案するインテリジェント空間形成技術では、街自体の電波環境をリアルタイムで把握し、空間に散りばめられたデバイスによって動的に電波の進行方向等を変化させることにより、これまで電波が届かなかった場所にも届かせるなど、より良いインターネットインフラや通信環境を提供することが可能となります。データ通信量が増加し、ヒトだけではなくモノも通信を行うようなIoT (Internet of Things)、そしてIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) の時代になると、通信の重要性はますます高まります。そこで、通信環境が変わっても高品質で「つながる」世の中をめざし、インテリジェント空間形成技術の確立をメインミッションとしたグループを立ち上げました。

インテリジェント空間の形成には、例えば中継局で電波を受けて信号処理をかけるなどさまざまな方法がありますが、今回は私が携わっている「インテリジェント反射板制御」および「無線センシング」の2つの要素技術を紹介します。

◆インテリジェント反射板制御とはどのような技術なのでしょう。

インテリジェント反射板 (RIS: Reconfigurable Intelligent Surfaces) は、電波の電気的特性を変化させる特殊素材を使用した反射板で、各素子を電子的にコントロールすることにより反射角や透過率といった反射特性を変化させることができます。鏡で光を反射する場合には入射角と反射角とは等しくなりますが、インテリジェント反射板では任意に反射角度を制御し、反射する電波の方向を変えることができます。

例えば、障害物の影になり従来の反射板では電波が届かなかったところにも電波が届かせることができます。また、特定の地点にフォーカスさせて通信品質を向上することもできます。その他、そのまま透過させて背後に送ること、吸収してどこにも届かないようにすること、散乱させて広域に届けることなども可能です(図)。

私たちは、このインテリジェント反射板を制御する技術について研究を行っています。実際に5G (第5世代移動通信システム) の電波に対するインテリジェント反射板の効果についてNTTドコモと共同で実験を行っており、2021年11月に報道発表を行いました⁽¹⁾。

現在は、さらなる通信品質の改善を目的として、複数のインテリジェント反射板の協調制御技術に注力して研究開発を行っています。

◆無線センシングについて教えてください。

インテリジェント空間の形成には、実空間がどのような形状で、どのような電波環境にあるかを把握する、つまり「センシング」する技術が不可欠となります。センシングで得られた情報や過去に収集したビッグデータを可視化し、機械学習で解析したうえで、空間を変えるインテリジェント反射板などにフィードバックするわけです。

私は2020年度からNTT未来ねっと研究所を兼任しており、こちらではカメラなどのさまざまな媒体を融合させたセンシングによる空間把握についての研究を行っています。その中でも、無線センシングは特殊な装置や専用の装置を使用することで比較的容易に実現できますが、私たちの研究では低コストでの実現と、既存の無線装置を使ってさまざまな情報を得ることをめざしました。無線を通信ではなく、非通信に利用するところがポイントです。無線の電波の状態から、例えば端末の位置情報、人の有無やその密度、そしてドアが開いているか閉まっているかなどの情報を収集することができます。

実際に会議室内にWi-Fiルータを配置し、事前に人のいる状態を学習したうえで測定を行ったところ、約95%という高精度で検知することができました。IOWN時代に向けて、無線システムを通信以外の分野にも展開することで新たな市場を開拓できるの

ではないかと期待しています。

「インテリジェント空間形成技術」により、パラダイムシフトが起こる

◆今後の研究の方向性について教えてください。

インテリジェント反射板制御については、現在は1つの環境として、室内のみで評価しています。今後は屋外に展開し、実際の環境においてどのような効果があるのかを検証したいと考えています。移動物が少ない室内に比べ、屋外では車両などの電波に影響を与える移動物が多く、環境変動も多いため、制御は難しいものになると想定しています。

また、現在は1枚の反射板についての実験を行っていますが、複数枚の反射板を使った場合についても検証したいと考えています。複数の反射板からそれぞれ情報を取得し、個別に制御するためには制御信号をどうするかというところから考えなくてはなりません。課題は山ほどありますが、通信品質などにおいてより大きな効果は必ず得られると考えています。

さらに、実際の基地局に実装するなど、開発面にも着手したいですね。将来的には、インテリジェント反射板を各所に配置し協同制御を行うことで、高品質で通信が途切れない環境を提供で

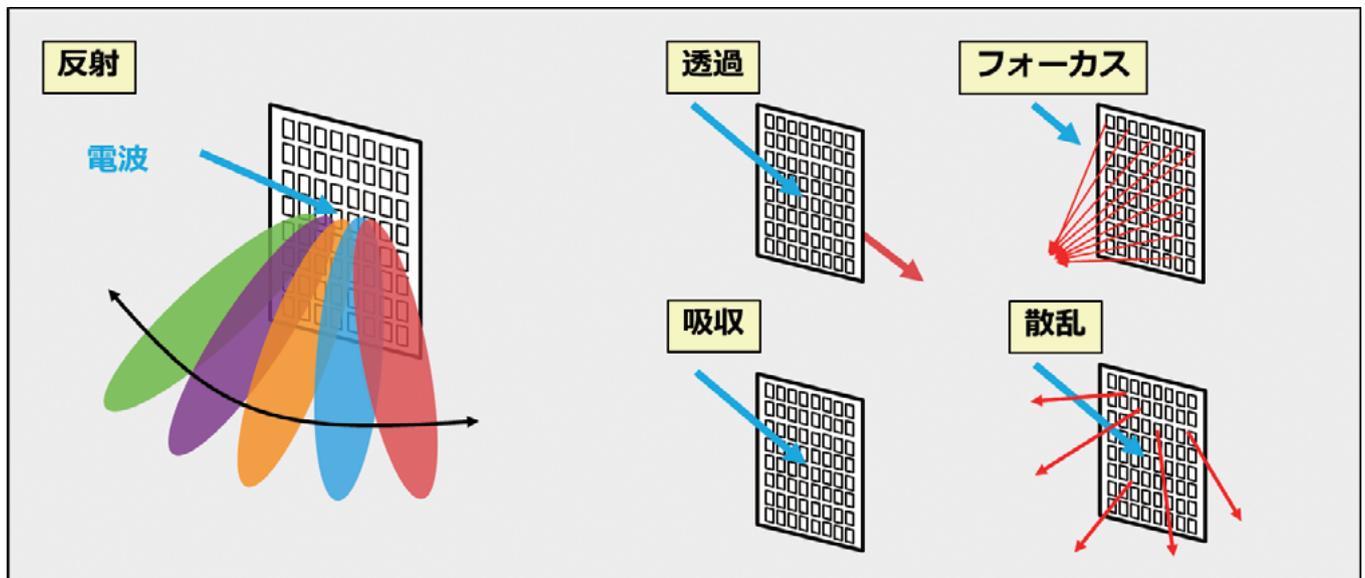


図 インテリジェント反射板の働き

きるのではないかと期待しています。

無線センシングについては実装への道筋ができていて、既存の基地局にセンシングの機能を入れるところまで検討が進んでいます。新たなものをつくると、その導入障壁がありますが、既存のものを利用する場合にはそれがないため、比較的早期に検証が可能で、数年以内にユースケースを確保してアピールすることにより、近い将来、「センシング機能はあって当たり前だよ」といわれる世界にしていきたいと思っています。

◆「インテリジェント空間形成技術」により、どのようなことが可能となるのでしょうか。

IOWN時代には、ますますサービスやアプリケーションの多様化が進み、無線ネットワークに対する要求条件も、高速化だけでなく高信頼性、低遅延など多岐にわたることでしょう。インテリジェント空間形成技術が実現すれば、データ転送速度の向上、通信エリアの拡大、遅延の軽減、パケットロスの減少など、さまざまな効果が表れてくるでしょう。まさに「与えられた無線伝送空間」から「つくる無線伝送空間」へのパラダイムシフトです。発展性は非常に広いのではないかと思います。

現在、環境によっては回線がつながりにくい、タイムラグが生じるなどの不満を感じることがありますが、将来的にはそうした不満はなくなり、空間やアプリケーションに縛られずに自由に無線通信を活用できる時代になると思います。すべてのお客さまに良いものを提供できる土台のような技術になっていくのではないのでしょうか。



(今回はリモートにてインタビューを実施しました)

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

NTTアクセスサービスシステム研究所は、新しい技術を創出することはもちろんですが、その後、それを具体的な製品やサービスとして世の中に提供していくという事業化の部分もかなり重要視しています。自分の子どもに、「これはお父さんがつくったんだよ」と紹介できればうれしいですし、やりがいもありますね。

外部との連携に関していえば、無線センシングの技術を共同研究できたという点が大きかったと思います。当初、私たちには無線通信の技術はありましたが、センシングに関する知識やノウハウは不十分でした。そこで異分野の方とコラボレーションし、私たちの開発した無線センシングの装置を使っていただいて、いろいろな技術を同時並行で研究開発していただくという取り組みを進めました。市販の機器をベースとして測定できる仕組みをつくったため、多くの共同研究先とコラボレーションでき、結果として本技術領域を大幅に拡大させることができました。

私たちと同じ通信系ではなく、異なる分野の方と共同研究を行ったほうが新たなものが生まれる可能性や効果は高いと考えています。情報処理や農業といった分野、素材メーカーや重工業メーカーなど、これまでの共同研究先は多岐にわたります。今後もさまざまなところとコラボレーションしていきたいですね。例えば玩具の場合、無線を簡易的に使ったラジコンカーなどはありますが、最新の無線技術を活用した製品はそれほどないのではないのでしょうか。コスト面で課題はあるかもしれませんが、もっと面白いモノが作れるのではないかと思います。

これから企業で研究に従事する方々には、企業ならではの研究開発を意識してほしいと思います。大学ではある特定の分野に「尖った」研究をアカデミックに突き詰めていることと思いますが、企業では実際にモノを提供し、社会にどう貢献していくか、ということを重視する必要がありますね。

将来のビジネスパートナーとなる企業の方には、一緒に研究・開発を行うことで、私たちのIOWNに向けた基礎技術を活用していただきたいと考えています。新しい製品やサービスをつくり出すために私たちが汗をかきますので、ぜひご協力をお願いいたします。

■参考文献

- (1) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2021/11/12/211112b.html>



ドコモ・テクノロジー株式会社 移動通信関連の研究開発を 通じて培った強みを活かし お客さまの期待にこたえる

ドコモ・テクノロジーは、移動通信のネットワークから端末、アプリケーション・ソリューションまで、NTTドコモと一体となって研究開発を行っている。2021年8月に会社設立20周年を迎え、オープンでインテリジェントなRAN（O-RAN）の実現に向けた取り組み、そしてモバイル系と固定系が融合していく中でIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）を視野に入れ、お客さまへ対応していくためのNTTグループ内の連携への思いを中村寛社長に伺った。



ドコモ・テクノロジー 中村寛社長

NTTドコモと一体となって、移動通信のネットワーク・オペレーションシステム・端末・アプリケーション・ソリューションを開発

◆設立の背景と目的、事業概要について教えてください。

ドコモ・テクノロジーは、2001年8月1日にNTTアドバンステクノロジーとドコモエンジニアリングの2社を母体として設立され、2021年に20周年を迎えました。当時は、NTTドコモが1999年にiモードをサービス開始し、2001年に3G（第3世代移動通信システム）をサービス開始するころでした。3Gでは新方式のネットワークやグローバル化に向けた新たな展開、iモードをきっかけとしたアプリケーション分野の強化等、研究開発における将来的な拡大・強化の必要性が増してきており、これに対応していくために、NTTドコモの開発力を強化することを目的としてドコモ・テクノロジーが設立されました。

当社は社名にある通りテクノロジーの会社です。NTTドコモと当社は、移動通信システムを一体として開発しています。具体例としては、一部の通信装置ではNTTドコモが要求条件や仕様の検討を行い当社が試験を実施するなど、開発工程を分担しています。また端末アプリケーションの一部やネットワークのオペレーションシステム、各種ツール類は開発工程の大部分を当社が担当しています。

◆実際にどのような分野の開発を行っているのでしょうか。

NTTドコモと一体で開発を行っているので、NTTドコモが扱う分野とほとんど同じです。具体的には、移動通信用基地局等の無線ネットワーク、移動するモバイル端末の位置情報管理や通信制御を行うコアネットワーク、

通信情報を転送するIP転送ネットワーク、これらのネットワークを運用するためのオペレーションシステム、さらにはスマートフォンのアプリケーションやソリューションなど、移動通信に関するほとんどすべての分野に及んでいます。

移動通信分野では、2020年にサービスを開始した5G（第5世代移動通信システム）において、5G用基地局と4G（第4世代移動通信システム）用基地局を同時に利用するNSA（Non Stand Alone）と呼ばれる方式を開発し、ユーザが4G/5Gをシームレスに利用することを可能としました。さらに、多様なニーズに対応していくために5Gに特化したSA（Stand Alone）方式を開発し、NTTドコモは2021年にサービス開始しました。

一方アプリケーションやソリューション分野では、ターミナル駅や繁華街の人出の状況を把握する「モバイル空間統計」の開発を手掛け、コロナ禍においてテレビニュース等で広く利用されています。また、ドローンを用いた基地局点検ソリューションにおける操縦者向けアプリの開発、農業IoTソリューション「畑アシスト」の開発（図1）、そして、XR向けコンテンツ作成技術の実証実験等を行っています（図2）。

移動通信技術の強みを軸に、NTTグループ連携により幅広い価値を生み出す

◆開発の動向や注力している技術について教えてください。

移動通信は2000年からの20年間でiモードやスマートフォンに代表されるコンシューマ利用が進み、今や生活になく

畑アシスト



図1 畑アシストの概要

てはならない「生活基盤」となりました。今後は、コンシューマ利用に加えてさまざまな業界がDX（デジタルトランスフォーメーション）を進めるために通信は「社会基盤」に進化すると考えています。当社は、設立以来NTTドコモとともに蓄積してきた移動通信の技術力をさらに深化させつつ、NTTグループ各社と連携して移動固定融合など新たな価値を創造し、IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想の実現に貢献していきます。また、サービスやソリューションにおいて、当社が備える技術領域を広げる方向にも進化していきます。

技術を深化させる方向として、ネットワーク設備投資の比率がもっとも大きな無線基地局のオープン化とインテリジェント化を進めるO-RAN（Open Radio Access Network）は注力している分野の1つです。無線基地局のオープン化は、世界のオペレータが設備投資の効率化や柔軟なネットワーク構築のために注目しています。

異なる装置ベンダの基地局装置を自由に組み合わせるには、装置間の相互接続性を実現しなければなりません。ベンダは自社製品の囲い込みを志向するため基地局のオープン化には消極的です。オペレータのオープン化への強い意志とそれを実現する技術力がなければ実現しません。NTTドコモと当社は一体となってこの困難に立ち向かい、

撮影の例



3Dコンテンツの例

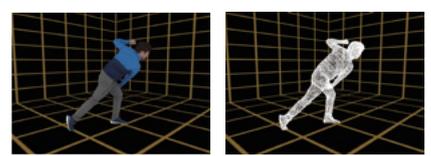


図2 XR向けコンテンツ作成技術

世界に先駆けてNTTドコモの4Gでは異なる装置ベンダの基地局装置間の相互接続を実現し、5Gではサービス開始当初からオープンなRANを実現しています。NTTドコモはその実力を買われてO-RAN Allianceの発足にあたり設立メンバーの1社になりO-RANを推進しています。現在、当社はO-RAN仕様に基づく基地局装置の相互接続性試験などにおいて技術力を発揮しています。

また、技術領域を広げる方向としては、オープンクラウド、モバイル空間統計、XR等の拡大に取り組んでいきます。5Gのサービス開始とともにスマートライフ領域の重要性が高まっていますが、拡大した技術領域を強みとして、新たな生活価値・ライフスタイルの創出を実現するためのサービス開発、アプリケーション開発、さらには法人向けのソリューション開発に貢献していきます。

◆今後の展望についてお聞かせください。

お客さまは移動と固定を融合したさまざまなソリューションを期待されています。当社が持つ移動通信の強みと、NTTグループのさまざまな会社が持つそれぞれの得意分野を連携・融合させることにより、これまで以上に多くの分野、ソリューションにおいて、多様化・高度化するお客さまのご期待にこたえていくことができると考えています。

当社はドコモグループで研究開発を担っている会社ですが、すでにいくつかこうしたグループ連携も進めており、その中でも連携の重要性を共通認識として持つことができました。こうした経験をベースに、今後さらに「連携」「協業」を拡大していきたいと考えています。

O-RANによるオープン化にマルチベンダシステムの相互接続実績をベースに貢献

無線ネットワーク事業部
無線装置開発部 担当部長
太多 勇二 さん



◆担当されている業務について教えてください。

無線装置開発部では、NTTドコモのRANを構成する基地局子局（RU）、分散ノード（DU）、集約ノード（CU）等の各装置の評価を行っています。

移動通信システムでは、3GPP（Third Generation Partnership Project）やO-RAN Allianceといった国際標準化団体により標準仕様が作成されており、その仕様に準拠した装置類でネットワークを構成することで、グローバルにエンド・ツー・エンドの通信が可能となります。NTTドコモのネットワークを構築するにあたり、導入される装置類の機能緒元、性能等が標準仕様およびNTTドコモの要求条件に準拠しているか、ネットワークを構成する装置として正常に動作するかという点の検証・評価を行っています。実際の評価においては、装置単体の検証のほか、装置どうしを接続してネットワークを構成することでシステム全体としての検証、さらにはお客さまにサービスを提供するネットワークであることから、大容量に対する性能や長期間安定といった検証も行っています。

NTTドコモのRANは世界に先駆けて4Gから異なるベンダ間の相互接続を実現していました。相互接続性を担保するために、異なるベンダ装置間の数多い組合せの検証を行っています。また、こうしたRANの周辺分野である、エリア設計、ネットワークから得られる大量のデータの解析ツールの開発等も行っています。

こうした検証は、NTTドコモがお客さまに安心・安全・安定したサービスを提供するために入念に行う必要があり、私たちはその最後の砦としての使命感をもって業務にあ

たっています。

◆ご苦労されている点を伺えますか。

大きく2点あります。1点目は3GPPやO-RAN Alliance等では、例えば4Gや5Gといったメジャーな仕様はある程度の期間をもって検討・リリースされるので、開発期間の中でフォローしていくことになるのですが、その間のマイナーな変更は逐次行われているので、それをフォローしていかなければなりません。内容を解釈することも難しいのですが、これについては、会合に参加しているメンバーから情報を逐次入手・フォローし、必要なものをネットワークに反映しています。

もう1つは、相互接続に関するものです。標準仕様に準拠している同じベンダの装置どうしでも相互接続試験を行うと、メインストリームの接続手順のところはそれなりに正しく動作していることが確認できるのですが、メインストリームから少しでも外れると装置相互間でなかなか正しい動作をしません。仕様に明記されていない部分や仕様の解釈の相違による部分等、その原因は非常に多岐にわたります。同じベンダの装置どうしであってもなかなか正しくつながらないので、マルチベンダとなるとさらに難しくなることは容易に想像できると思います。相互接続でネットワークを構築してもトラブルの発生があってはならないので、試験を1つずつ慎重に進めながら結果を装置仕様にフィードバックしていくとともに、ノウハウを蓄積して試験の効率化、品質の向上に活かしています。

◆今後の展望について教えてください。

O-RANに準拠した装置間の相互接続については、世界各国の通信事業者・ベンダ等の当事者ばかりではなく、政府も注目しています。日本においても総務省を中心に、国家プロジェクトとして「基地局用機器間の相互運用性の確保・検証技術」の研究を通じて、将来のOTIC（Open Test and Integration Center）設立の可能性を視野に研究を進めており、当社もNTTドコモとともにそのプロジェクトに参画しています。

NTTドコモのRANでは、テストベッドにおけるマルチベンダ間の相互接続試験や、10年以上にわたる実フィールドにおけるマルチベンダシステムの利用実績があり、オープン化でめざすRANの相互接続に関する多くの知見が蓄積されています。これを活かしてOTIC設立後は相互接続試験の実施担当として、オープン化の推進に貢献していきたいと思っています。

ドコモ・テクノロジー ア・ラ・カルト

■得体の知れないウイルスへ立ち向かう

1時間前のある地点の人口を10分単位で提示できるモバイル空間統計のリアルタイム版を2020年1月にリリースしました。商業施設の商圈分析等へ展開しようとした矢先にコロナ禍になり、新型コロナウイルス感染症拡大防止策の検討・検証のため、急遽ターミナル駅や繁華街の人出の状況の把握に活用いただくことになりました。ウイルスの特徴に関する情報が少ないという行政の課題に対して、私たちの統計がどのように役立てられるか試行錯誤し、改善を重ね、現在のレポートのかたちに収束しました(図3)。得体の知れないウイルスとその患者への対応に奔走している医療関係者はヒーロー的な存在であり、それと時々刻々と発生する要求条件の変更に対応している自身の姿を重ね合わせ、社会貢献している実感をモチベーションとして、たび重なる変更にもこたえることができました。



図3 新型コロナウイルス感染症対策特設サイト

■技術者の使命

「モバイル空間統計」は新型コロナウイルス関連ばかりではなく、イベント等における来訪者数推計や、高速道路の渋滞予測等、さまざまな分野で利用されるようになってきました。このため、システム障害等によりサービス停止することによる社会への影響が大きくなってきました。障害復旧は、サービス運用の技術者の能力が大きく発揮される局面です。技術者にとっては活躍の場ではあるのですが、そもそも障害は発生してはならないものです。今後はより安定的にサービス提供できるよう、システム障害を未然に防ぐことに取り組んでいきたいと考えています。

データ流通とDXにて実現する「日本版Smart Society」 ——未来の可能性と選択肢が開かれた社会をめざして

私たちが取り組む社会課題は、「分かってはいるが、どのように解いたら良いかが分からない“社会課題解決力がない”という課題」です。デジタルツインコンピューティング（DTC）技術なども用いた民意の可視化・シミュレーションを用い、「リスク評価から合意形成に至るプロセス確立」「人々の行動変容を促す新たな仕掛け」「センターB（企業）・G（国、自治体）を巻き込んだ新たな課題解決サービス創出」への道筋をつけ、より良い社会の実現をめざしています。

取り組む社会課題とめざす世界

日本は、人口減・高齢化などの社会課題先進国であり、このままのなりゆきでは“変われず立ちすくむ社会”となってしまう未来も多分にあるかと想像されます。そこで、社会課題解決、なりゆきの未来回避には、経済価値と社会価値を両立するCSV（Creating Shared Value）が必須であると改めて考え、日本における10年後の未来を見据えた、「日本版スマートソサエティ」を構想しました。SDGs（持続可能な開発目標）達成にも貢献する“未来の可能性と選択肢が開かれた社会”を導出すべく、DTC技術なども活用し、個人のデータ主権を保護しながらもサイレントマジョリティを含む市民の声を引き出し、民意を反映した意思決定をするための信頼ある「課題解決を支えるプラットフォーム」の構築、センターB*とともに最適解・平衡解、ビジネスモデルを見出すことをめざしています。

現在はその第一歩として、甚大な経済損失、改善余地がある「気象災害」をまず取り組むべきテーマ・ユースケースとし、DTC技術を活用したシミュレーション基盤の開発構築、防災減災につながる行動変容を促す仕組みの検討を進めています。

課題解決を支えるプラットフォーム

前述にて課題解決力という言葉をお伝えしましたが、社会課題解決力とは、①情報やリテラシーの獲得、②意見の発信と議論の発生、③リスクの評価、④倫理観に基づく意思決定、⑤アクションと包括的な連携、のループと考えており、市民、自治体、企業、NGOなど、実世界と同じよ

うに、いろいろな方々が、このプラットフォーム上に集まり、この①～⑤のループを共に考え回すことで、社会課題解決を実現することをめざしています（図1）。実空間でも理論上は実現不可能ですが、昨今のコロナ禍による感染リスクや、また日々多忙な現状をかながみますと、実空間における大規模シミュレーションなどの実施はコスト的にも非現実的であり、サイバー空間上のほうが、より実現性が高いと考えています。

気象災害を例にとると、気象災害による損失の現状・原因・課題は、具体的な備えがなく有事に対応不能、災害の恐怖体験がなく危機感が低い、サイレントマジョリティを含む一般市民の声が埋没、などが挙げられます。それらの解決などをめざし、まずは、DTC技術を活用した想定被災エリア（避難対象エリア）の再現、当該エリアにおける被災シミュレーション（体験・行動）、ワークショップ（振り返り・気付き）などを通じた本プラットフォームの有効性PoC（Proof of Concept）を実施中であり、目標として掲げています。最適解・平衡解を導出し、社会・経済損失を減らすことに寄与できるかを検証中です。

本プラットフォームの成功要因

本プラットフォームのKSF（Key Success Factor）は、図2に示すように、①生活者を集め惹きつける、②シミュレーションによる民意の収集と可視化、③アクションによる最適・平衡化および行動変容、④価値の循環、のポジティブスパイラルです。特に重要な内容、センターピンは、②の民意の収集と可視化です。集まった生活者がいる状況下（例：大規模な気象災害シナリオ）にてどのように判断し行動するか、刻々と変わる状況変化の中でのシミュレーションが主眼です。どちらを選ぶかという選択肢だけでなく、中庸的な判断や行動なども含め、これまであまり把握することができなかったサイレントマジョリティも含

* センターB・G：当社提供のプラットフォームを活用し、サービスを展開する企業・事業者（センターB）や、国・自治体（センターG）などを指します。

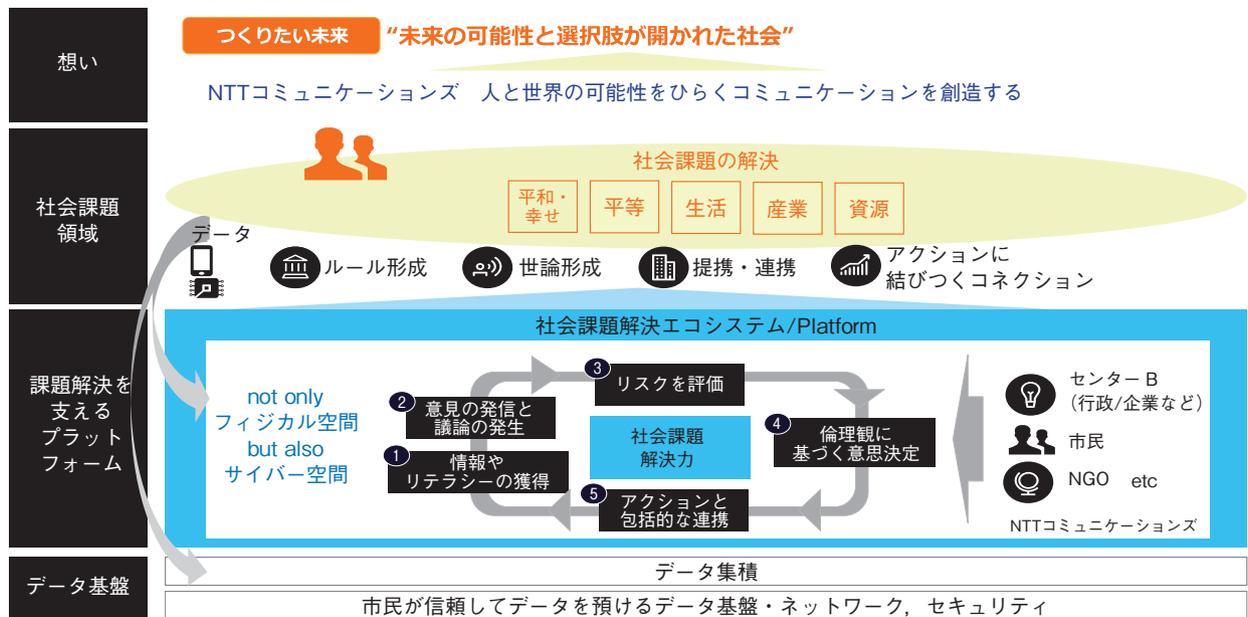


図1 課題解決を支えるプラットフォーム

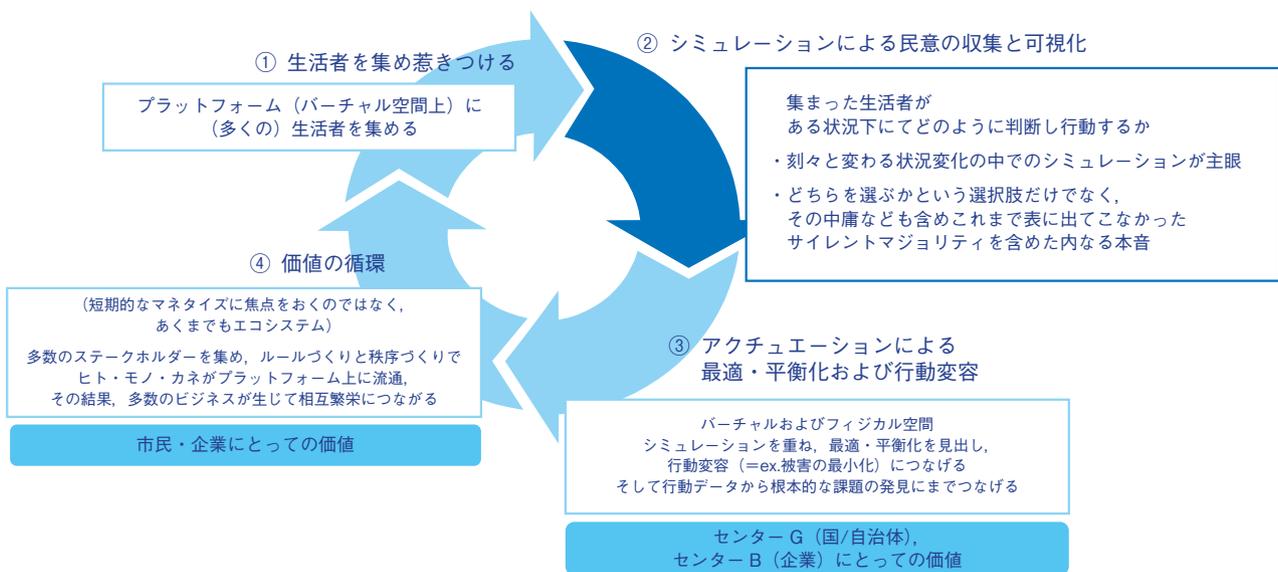


図2 本プラットフォームがめざすポジティブスパイラル

めた (すべての) 人々の内なる本音に迫りたいと検討を進めています。

前述しました4つのKSFのポジティブスパイラル実現においては、図3に示すような、各ステークホルダーから

見える領域 (本プラットフォームにおける水面上・水面下など) における仕掛けが重要であり、一般市民/参加者・センターB・センターGなど各ステークホルダーから見える部分や魅力も異なる点に留意が必要です。参加者におい

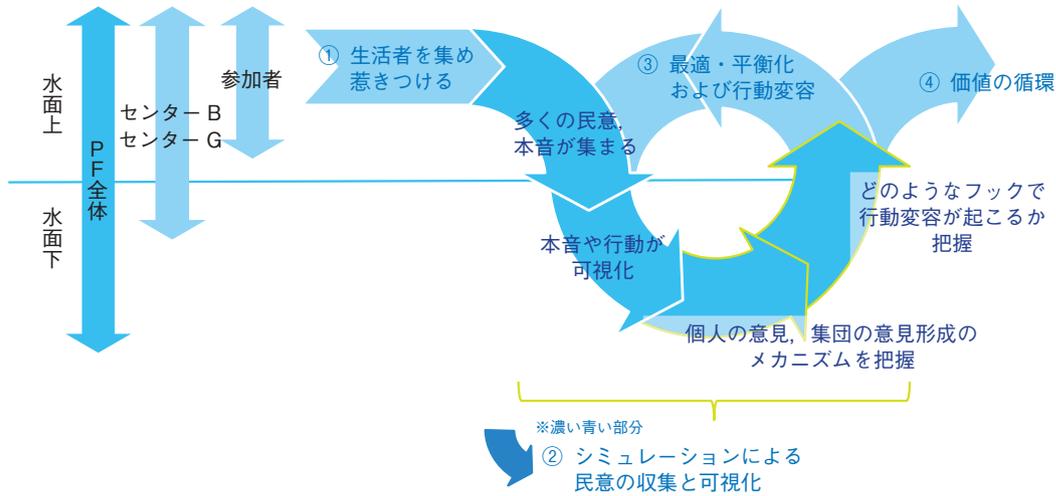


図3 ポジティブスパイラルを実現する仕掛け



図4 画面イメージ

では、本プラットフォーム水面下の情報は見えないが、心理的安全性が保護、意見も反映され匿名性担保が重要であり、センターB・センターGにおいては、マーケティング・政策評価・リソースアロケーションなどに必要な判断材料を、本プラットフォーム水面下からの統計情報にて把握可

能なことが利活用判断のポイントとなります。また、民意の可視化をさらに分解・深掘りすると、人間心理・行動原理と、行動変容を促すフックなどになるかと考えています。人間心理・行動原理とは、「人間はこのように動く」というファクト情報を導出し、人間心理を押さえることで、意



図5 現地調査・ワークショップの様相

意識変容や行動変容を促すフックにつなげることであり、行動変容を促すフックとは、人間心理を基に、意識変容や行動変容につながるフックを把握することです。これら仕掛けや・要素を押さえ活用することで、本プラットフォームの求心力を維持し高めたいと考えています。

本プラットフォームの開発状況

本プラットフォームの開発については、まずは、選定したエリアならびに気象災害（大規模な気象災害シナリオ）をDTC技術などの利活用にて再現し、参加している個人が実世界と同様に、モノを手に取り、情報を確認し、自由に動き回ることができる仕組み（DTC技術を活用したシミュレーション基盤）の実現と、そこでの被災体験（DTC技術を活用した避難訓練を通じて実感したこと）などの共有や課題解決に向けたディスカッションを行うワークショップの実施など、一歩ずつ具現化を始めています。

またこれら取り組みを通じて得られた、DTC技術を活用したシミュレーション基盤上での活動履歴（判断・行動の履歴）や、ワークショップにおけるディスカッション内容、参加者への個別インタビューやアンケート結果などを、前述の成功要因・ポジティブスパイラルの要素などに基づき分析検証し、次の開発へのフィードバックや本構想における仮説のさらなる具体化（ピボット含む）を進めています。

参考までに、本プラットフォームの画面イメージを図4に、また、現地調査やワークショップの様相を図5に示します。図4は、実際の参加者が操作する、DTC技術を活用したシミュレーション基盤の画面（シナリオ視聴含む動きのある画面）より、その一瞬（一コマ）を切り取った

ものになります。

今後の本格開発においては、前述ワークショップも包含するかたちにて、サイバー空間上における参加者どうしの連絡・検討・協調作業や、さらにセンターBやGも参加しての防災減災の取り組みなども反映できるものにしていきたいと考えています。

本構想のさらなる具現化に向けて

今後も本構想実現・事業化に向けて、デジタルツインコンピューティング技術を活用したシミュレーション基盤の本格開発、行動把握・行動変容を促すPoC、同志・パートナー企業の方々がチャレンジしたいと共感できるCSVビジネスモデルの具体化、民意が反映される仕組み・ルール形成などの機運醸成・アドボカシーに向けた発信などを引き続き行っていく予定です。

特に、ビジョン・構想などに共感いただく同志方々との協業による具現化は是非とも進めたく考えています。ご賛同いただける方がいましたら、本プロジェクトまでお気軽にお声掛けください。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーションズ
イノベーションセンター プロデュース部門
日本版 Smart Society プロジェクト
E-mail ic-csv@ntt.com