

特集:UOsaka ICT Innovation

- 2 社会と一体となり社会変革を先導する大学
大阪大学 統括理事/副学長 金田 安史
- 4 情報通信技術を活用した大学活動の高度化
大阪大学 理事/副学長 尾上 孝雄
- 6 住民と共に創る未来型インフラ:大阪大学FICCTの挑戦
大阪大学先導的学際研究機構 中村 昌平
- 10 データ駆動型大学を目指す大阪大学を支えるD3センター発足へ
大阪大学D3センター 降旗 大介
- 14 実世界と情報通信の融合に向けて
大阪大学D3センター 下西 英之
- 18 B5G 時代の都市デジタルツイン
大阪大学大学院情報科学研究科 山口 弘純
- 22 サブテラヘルツ無線通信の研究
東京大学大学院理学系研究科 永妻 忠夫
- 26 こころを持ったAI、CiNet Brainの開発を目指して
大阪大学大学院生命機能研究科 北澤 茂
- 30 生体や脳に学ぶ情報通信技術
大阪大学大学院情報科学研究科 村田 正幸

Close-up

- 34 電磁気学の不思議探検 第4講
唐沢 好男
- 38 時をかける! 広がる時空標準研究(6)
国立研究開発法人情報通信研究機構 蜂須 英和、NEMITZ Nils

放送歴史 / 通信史書

- 42 通信七賢人
三原 種昭
- 44 YOKOSUKA 電波歴史館
株式会社横須賀リサーチパーク無線歴史展示室 太田 現一郎

デジタルな法律相談ちゃんねる

- 48 1番の存在理由
弁護士 杉本 隼与

各界だより

- 50 総務省、REEA ほか

【表紙の写真】

最左上から最右下5つ:
 ・大阪大学の精神的源流である瀧塾の創始者「緒方洪庵 石碑(大阪市中央区北浜)」
 ・中山池と大阪大学会館(豊中キャンパス)
 ・産学官連携を司る大阪大学共創機構での打ち合わせ風景
 ・箕面キャンパス(外国学研究講義棟(左青色建物)と大阪大学外国学図書館(右茶色建物))
 ・吹田キャンパスにある銀杏オブジェ(校章の元になったもの)
 左下:
 ・大阪大学吹田キャンパス正門
 右上:
 ・吹田キャンパス上空写真
 (画像掲載協力:大阪大学)

社会と一体となり社会変革を先導する大学

～ 世界の社会的諸問題を解決し、新価値創造にチャレンジする ～

大阪大学は、新たな知と人材等を導入して社会の閉塞感を打破し、社会システム改革を通じて「いのち」と「くらし」を守るための強靱で持続可能な未来社会を創造する教育研究を推進している。

大阪大学 統括理事 / 副学長
共創機構副機構長 金田 安史



吹田キャンパス上空写真



金田安史統括理事

はじめに

個々人が幸福で心身ともに満ち足りた状態にあるだけでなく、生きがいを育む社会の実現にむけ社会寿命を延伸する。そのために大阪大学は、目指すべき未来社会の実現に必要な大学改革として、総合知による新価値創造の促進を実施し、研究分野では、自由な発想が芽吹く環境で新たな社会の創造に資する基礎研究の推進、教育分野では、未来社会を切り拓く人材の育成、経営面では、マネジメントシステムの変革に取り組んでいる。

また、研究成果の社会実装の、主要な軸として大学の研究成果を活用したスタートアップの創出、いわゆる研究開発事業化のためのインキュベーションを実施している。

これらの取り組みを自己改革で行い、「社会の中の大学」として多様なコミュニティとの共創活動を展開し、目指す社会を実現するための課題探索・解決を図ることによって、社会変革を先導していきたいと考えている。

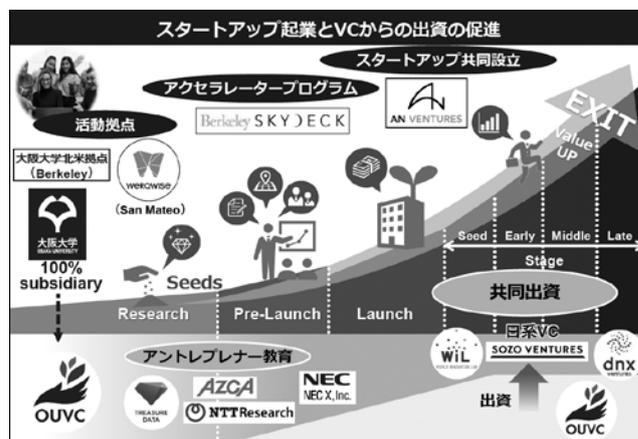
大阪大学における産学官連携活動

研究開発及びその後の社会実装においては、産業界等社会との共創が不可欠であり、大阪大学では組織（企業）対組織（大学）の大型共同研究を“Industry on Campus”で実施中である。企業の研究組織を大阪大学内に誘致する共同研究講座・協働研究所制度は、本気の共同研究をオンキャンパスで行うものであり、双方の研究者が共同研究に専念し講座を運営・多方面な産学協働活動拠点を形成及び基礎から実用化まで一貫として研究を実施し、これら共同研究講座・協働研究

所が学内に100以上存在し、国内最大規模である。また、民間企業からの研究資金等受入額（115億4,419万円 2022年度実績）も国内大学で2番目に大きい。

産業界との共同研究と同じく注力しているのがベンチャー企業の創出であり、大阪大学では、研究成果を社会実装するための大学発ベンチャー企業を252社（2023年度実績）創出している。2014年には大阪大学100%子会社として、大阪大学ベンチャーキャピタル（株）（OUVC）を創設し、OUVCファンドから、これまで52社（2024年3月末）に対して出資を実行した。OUVCファンドには、1号ファンド（約125億円、2015年設立）及び2号ファンド（約107億円、2021年設立）が存在し、そのうち2号ファンドは、大阪大学発ベンチャーに限らず他の国立大学発ベンチャーにも出資可能で、神戸大学や広島大学等の大学発ベンチャーへの投資を行っており、我が国全体の研究成果の社会実装にも貢献している。

また、大阪大学100%子会社として2022年に大阪



大学フォーサイト(株)を創設した。同社は、民間企業等に対し、大阪大学の知見・教養等を活用しつつ、コンサルタント事業及び人材育成事業（フォーサイトアカデミー）を実施している。

大阪大学においてこれらの産学官連携活動が活性化しているのは、2018年に本学が社会との共創の好循環に向けて整備した共創機構の役割が大きい。私が副機構長を務めるこの共創機構では、キャンパス内に分室を設け、機構のスタッフが教育研究現場（研究室、部局産学連携担当部署）を訪問し、研究シーズの権利化を早期に図るためのドアノック活動を行っている。また、新たな社会的価値の創出に必要な課題探索・課題解決のプラットフォームとして異分野の産学官の連携による次世代社会価値創造事業などの活動を行うなど、産学官共創（共同研究、知的財産及びベンチャー育成等）、地域共創及びファンドレイジング活動等も進めており、社会と大学がその「知と力」を合わせて新たな価値を「共創」する活動に取り組んでいる。

共創機構の新たな取り組みとしては、本年4月、機構内にグローバルマネジメントオフィスを新設し、より一層の共同研究プロジェクト等のグローバル展開・大型化を目指し、研究成果のビジネスデベロップメント（新規事業開発）を強力に推進している。

今後は、一層の社会変革を促進していくため、更に共創機構を強化しつつ、大学の枠を越え、キャンパス周辺及び大阪市内にも進出しサイエンスヒルズ（大阪版シリコンバレー）を創設する。サイエンスヒルズでは、関係自治体とも連携し、大学発ベンチャー及び関係企業等、様々なステークホルダーも巻き込んだ研究・共創の場とし、国内外から優秀な人材を迎い入れ、多様な知が交わり、活気と創造性の富むコミュニティの形成を行う。

その他、共創機構の一大学に閉じない取り組みとして、産学共創に関する他大学との連携を推進しており、我が国の学術研究ネットワークの構築や研究、産学共創人材の連携に貢献している。特に、地域中核・特色ある研究大学である金沢大学や岡山大学との間で共同研究案件の創設等について定期的な連絡会を実施しており、関西圏だけではなく、他の地域の大学とも連携強化を図っている。

むすび

以上で述べた大阪大学の産学官連携活動のベースは、大阪帝国大学の設立（1931年）の際、「大阪にも帝国大学を」と、大阪の政官、経済界がこぞって国に



働きかけ、市民や有志も設立のために寄付や支援を行い、設立に至ったという歴史にある。「地元大阪と市民の力によってつくられた大学」という特色を有しており、昔から関西地域（特に大阪）の産業界等とのシームレスな関係を構築していた。

今日の大学には、経済成長を支えることがより一層求められている。最近の大阪大学の産学官連携の実績は、我々の様々な試みが功を奏したものかもしれないが、バブル崩壊後、民間企業における研究開発の実施体力が著しく減退し、社会がその役割を大学に求めた結果によるものであるとも言える。

経済成長を促進するための重要な方策の一つは、ユニークな研究から優れたシーズを生み出し新たな社会価値創造を目指していくこと。もう一つはそこから社会のイノベーションを起す人材を育てること。我が国も国を挙げてスタートアップ創出を目指している。欧米の例に見られるように、大学、企業及び金融等が近接に集まるスタートアップのエコシステムが必要であり、東京への一極集中がますます加速していくなか、社会システム自体を変革することが急務である。東京にはリソースが集中している反面、社会システム変革を興すには規模が巨大である。一方、関西は大阪、京都、神戸と多様なアカデミアがあるという強みがある。物理的に近接した関係性を大阪府下につくり、社会の様々なステークホルダーとの共創活動を通じて研究成果やアイデアの実証の場としながら社会システム変革に繋げ、それを海外にも展開し地球規模の課題の解決に貢献していく。これが“地域に生き世界に伸びる”という大阪大学のモットーの実現である。今後も社会背景は益々複雑になっていくが、私は、深刻な社会課題の解決に果敢に取り組むため、大阪大学が持つ多様な知を総合知につなげて、社会変革をリードする大学としたい。

情報通信技術を活用した大学活動の高度化

～「データ駆動型大学」の実現に向けて～

大阪大学 理事 / 副学長
(研究、情報推進、図書館担当)
尾上 孝雄

はじめに

大学の活動は教育、研究、産学連携、社会連携、国際連携など多岐にわたっている。大阪大学は研究型総合大学としてこれらの全ての活動を拡大活発化し、社会の中で重要な役割を果たすことが要請されている。

活動規模の拡大は、そこに投入される人的・金銭的リソース量に応じて得られることが容易に想定できるが、知の集積地・発信地たる大学では、より効果的な活動を展開し、最大限の効果が得られるよう取り組んでいくべきである。

ここで重要となるのはデータの利活用である。“Data is the New Oil”と言われて久しいが、大学の活動こそデータに基づいて実施し、今後の社会生活を転換するための範とすることで、大学が社会の負託に応えることが可能となる。即ち、大阪大学は、データ駆動型社会の実現を、「データ駆動型大学」として自ら先導することを目指して行く。これらの観点で行っているさまざまな活動の詳細については、後述の各紹介記事に譲るが、以下では情報通信技術を活用した大学活動全体の概要について述べる。

大阪大学の研究活動がめざすもの

大阪大学には、3,000人を超える研究者が在籍しているが、個々の研究者が知的好奇心に基づいた基礎研究を実施することは、研究型総合大学として学術の進展を牽引するために必要不可欠である。一方で、自身の研究が如何に（広義の）社会に関係するか絶えず意識することが社会を変革し、生きがいを育む社会を創

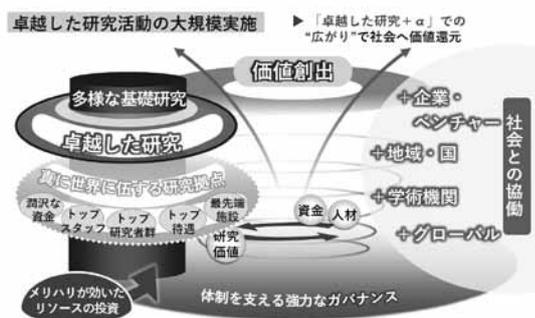
造するためには求められる。これらの研究活動は社会のさまざまな組織と密に連携して実施することを目指している。

大阪大学では研究活動に情報通信技術を活かすさまざまな活動を遂行している。

2016年4月に設置したデータビリティフロンティア機構では、「データビリティ」、すなわち、「利用可能な超大量データを将来にわたって持続可能な形で、しかも責任をもって活用すること」による新たな科学の方法を探求し、人工知能をはじめとする高度な情報関連技術を駆使し、生命科学、医歯薬学、理工学、人文科学等の科学技術・学術の新たな地平を切り拓き、さらには社会的、公共的、経済的価値の創造を促進するための学際研究を推進してきている。特に、2018年度文部科学省 Society 5.0 実現化研究拠点支援事業として採択されたライフデザイン・イノベーション研究拠点 iLDi (<https://www.ildi.ids.osaka-u.ac.jp/>) は、パーソナル・ライフ・レコード (Personal Life Records: PLR) の活用を通じて、身体・心の健康、社会的健康、環境の健康を軸に QOL の向上をデザインし、ワクワクする未来社会の構築を目指して事業に取り組んでいる。データビリティフロンティア機構は、同じく情報系研究者が集うサイバーメディアセンターと統合して、2024年10月より D3 センターとしてデータ駆動型大学の活動を支える研究組織として活動している。

国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) と共同で 2011 年に設置した脳情報通信融合研究センター CiNet は、脳機能研究を深化させ、それらを応用して脳科学に基づく新しい技術体系の構築を目指しており、文部科学省所管の国立大学内に総務省所管の研究開発法人が研究棟を建設するという当時画期的な手法で 2013 年 4 月に完成した研究棟に両組織から研究者や学生が集って活動している。

上述の iLDi と CiNet、さらに石黒浩教授のサイバネティック・アバター研究は、その研究成果をできるだけ早く社会に還元し、さらにユーザとなる一般市民の方々のご意見をフィードバックして研究に活かすた



大阪大学がめざす研究活動



大阪大学みらい創発 hive

め、2024年9月に開業したうめきた2期地区グラングリーン大阪内に活動拠点である「大阪大学みらい創発hive」を設置し社会に見える活動を行っている。

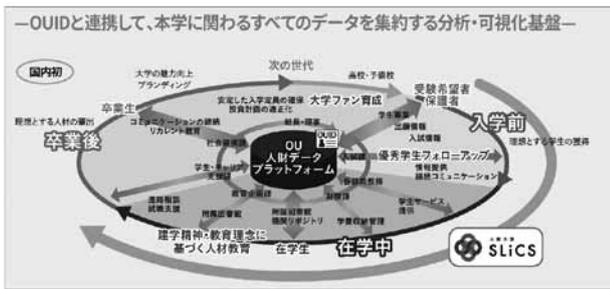
大阪大学が世界に誇る世界最先端研究機構の研究

拠点である、量子情報・量子生命研究センター QIQB (<https://qiqb.osaka-u.ac.jp/>) では、国産量子コンピュータ3号機を設置するとともに、量子ソフトウェア研究拠点として、ハードウェアからミドルウェア、プラットフォーム、アプリケーションまで、量子コンピュータの利活用に係る研究にフルスタックで取り組んでいる。また、文部科学省世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)に選定されている、ヒューマン・メタバース疾患研究拠点 WPI-PRIME (<https://prime.osaka-u.ac.jp/>) では、「ヒューマン・オルガノイド生命医科学」と「情報・数理科学」を世界で初めて融合する研究領域を創成し、個別化予防法や疾患の根治的治療法の開発を目指している。

OU DX とその先へ

「データ駆動型大学」を目指すためには、研究活動に限ることなくさまざまな大学活動の変革が必要となる。大阪大学では、2022年4月より、OU DX 推進室を設置し、産業界での経験が長い実務家教員を採用して、デジタル・トランスフォーメーションを精力的に進めている。

OU DX の中核は、産官学のさまざまなサービスと連携する日本の大学初のデジタル ID (OU ID) を駆使し、教育・研究のみに捉われず、大学に関連する全ての活動をサイバー空間上のデジタルツインでサポートすることにある。教職員や学生といった大学構成員のみならず、卒業生や連携プログラムを受講する小中高生、共同研究企業や関連機関、近隣住民など、大阪大学に係る全てのステークホルダーに対しても ID を付



OU ID と OU 人財プラットフォーム

与し、大学での活動に安心して関わることを可能としている。

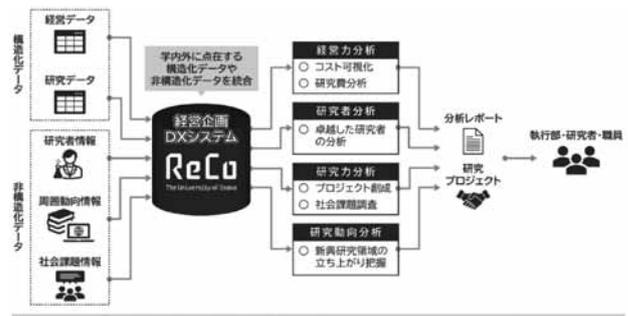
OU ID に基づき、OU 人財プラットフォームを構成し、スチューデント・ライフサイクルサポートセンター SLiCS (<https://slics.osaka-u.ac.jp/>) で、入学前から卒業後まで、一貫して支援する仕組みを構築している。

研究実施 DX in Research については、サイバーメディアセンターのスーパーコンピュータ群である計算基盤と接続した研究データ管理集約基盤 ONION を構築している。ONION を、コアファシリティ構築支援事業における研究機器のリモート化・スマート化、オープンサイエンス加速化事業での研究マネジメント統括システムとも相互接続連携させることにより、研究企画、実験実施から論文執筆、成果公開まで、研究者を一貫して支援する環境が提供できる。

大学経営に各種活動データを活用する試みとして、大阪大学では、経営企画オフィスで自主開発した経営企画 DX システム “ReCo” をさまざまな意思決定に活用している。ReCo は、研究者の定量的分析に留まることなく、若手研究者間の連携や社会課題解決に貢献する分野横断型の研究プロジェクトの創成にも活用されるなど、大阪大学の研究力強化を加速するうえで必要不可欠なツールとなっている。

おわりに

本稿では、情報通信技術を活用した大阪大学のさまざまな活動の高度化について概要を紹介した。これらの試みは、大学執行陣、情報系研究者、URA (University Research Administrator) を始めとするアドミニストレータ、大学活動を変革したいという強い意思を持った職員など、多くの関係者が精力的に取り組んできた賜物である。大阪大学が「データ駆動型大学」をいち早く実現し、国内外の全ての大学のモデルとなり、最先端の知見を活用して社会変革を先導できるよう、引き続き取組みを継続・加速化していきたい。



データを踏まえた意思決定 (Data-informed decision making)

経営企画 DX システム “ReCo”

住民と共に創る未来型インフラ：大阪大学 FICCT の挑戦

～ 産学官連携による地域課題解決と持続可能な社会を目指して～

未来型知的インフラ創造に向けて地域課題に向き合いながら最先端の科学技術を活用した持続可能な社会の実現を目指しています。大阪大学 FICCT のプロジェクトをご紹介します。



大阪大学先導的学際研究機構
住民と育む未来型知的インフラ創造部門
副プロジェクトリーダー 中村 昌平

住民と育む未来型知的インフラ創造拠点

我々、住民と育む未来型知的インフラ創造拠点 (Futuristic and Intellectual Co-Creation Town の頭文字をとって通称 FICCT) [1] は、2021 年 JST 共創の場形成支援プログラム (COI-NEXT) に採択され、2023 年 4 月に大阪大学に先導的学際研究機構に新設された共創拠点です。大阪大学を中心として、企業や地方自治体・市民等の多様なステークホルダーを巻き込んだ産学官共創により、SDGs に基づく未来のありたい社会像を地域拠点ビジョンとして掲げ、その実現のため「バックキャストによるイノベーションに資する研究開発」とそれを支える「自立的・持続的な拠点形成が可能な産学官共創システムの構築」をパッケージで推進しています。2024 年 9 月現在では、大学 10 組織、自治体 7 組織、民間企業等 30 組織から 250 名以上が参画し、コンパクトな府域の中に、大都市エリアから郊外エリア、山間部エリア、港湾エリアなどの

多様なエリアが存在する大阪府を中心として気鋭の若手研究者がリアルな社会課題に向き合い、世界最先端の科学技術を活用した解決策をモデルケースとして国内外に展開することを目標としています (図 1)。本稿では、本拠点で取り組んでいる研究開発プロジェクトと産学官共創システム構築のための取り組みをご紹介します。

研究プロジェクト紹介

本拠点では、20 を越える研究者が様々な未来型知的インフラに関する研究を行っています。本項では拠点の特徴的な研究プロジェクトを 3 つ紹介します。

① 埋設水道管老朽化対策

日本各地で、老朽化した水道管の破損や漏水事故が問題となっており、効率的な維持管理が求められてい



図 1 大阪の地域課題を対象とした研究課題



図2 埋設水道管のアクティブセンシング

ます。特に埋設された水道管は目視による点検が難しく、非破壊検査技術の導入が急務です。本研究プロジェクトでは、埋設管路用自律型リスク把握センサシステムの研究開発を進めています。大阪市水道局と連携し、マンホール下のバルブや消火口など、地表からアクセスできる付帯物と水道管の連成振動を利用した診断システムを開発しています。このシステムは、動電型スピーカで振動を与え、その応答をIoT振動センサで計測することで、水道管の腐食や劣化を検知する仕組みです（図2）。^{くじま}柴島浄水場（大阪市東淀川区）でのフィールド実証や化学メーカーとの樹脂製管診断技術の研究も進行中で、安定した水供給の確保と水道事業者の経営改善が期待されています。この技術により、水道インフラの維持管理が効率化され、社会的にも大きな貢献を目指しています。

② 共創型地域交通の開発

地域交通は、高齢化や人口減少に伴い、交通手段の減少やアクセスの悪化が深刻化しています。特にバス交通では、運転手の成り手も限定的となり住民の移動手段が制限され、日常生活に影響を及ぼしています。こうした課題に対処するため、本研究プロジェクトでは住民主体の共創型地域交通システムの開発を進めています（図3）。行政や業者に依存せず、住民が主体となって課題解決に取り組むことで、地域に合った交

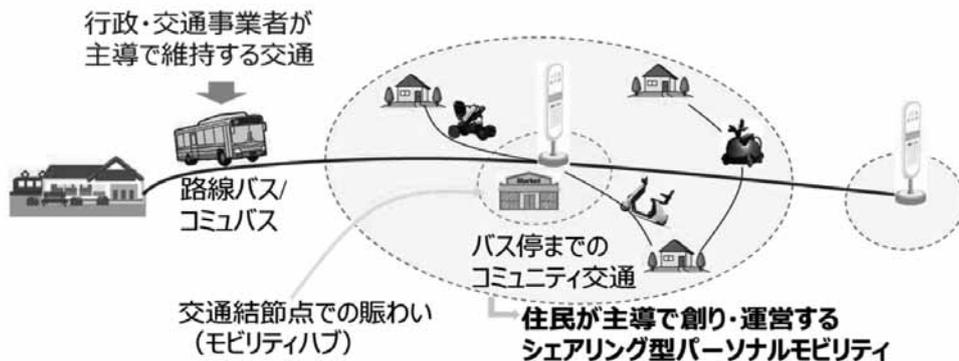


図3 共創型地域交通のイメージ図

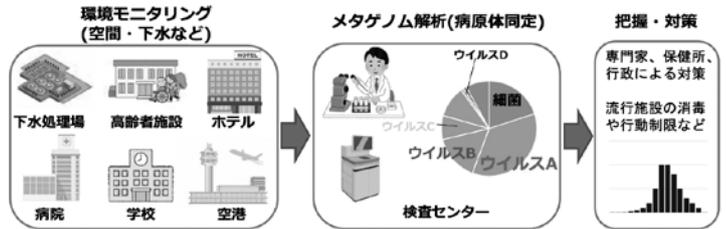


図4 次世代感染症サーベイランスシステムの流れ

通手段を確立し、持続可能性を確保して住民の幸福度を向上させることを目指しています。さらに、社会インパクト評価を通じて、住民参加型のインフラ管理への意識改革を促進し、地域交通と都市インフラの共創を推進するシステムを構築しています。

③ 次世代感染症サーベイランスシステム

感染症の早期発見と拡大防止を目的として、メタゲノム解析を用いた次世代感染症サーベイランスシステムを開発しています（図4）。従来のPCR検査や抗原検査と異なり、このシステムは、下水や空気などの環境サンプルから病原体を検出し、未知の病原体や共感染も網羅的に同定できる可能性があります。これにより、感染拡大の予兆を捉え、早期の対策が可能となります。本研究プロジェクトは、保健所や自治体と連携し、学校や高齢者施設や下水処理場などの様々な公共施設で得られた環境サンプルをもとに感染拡大の予防策として地域社会全体で感染症に対処するための基盤として構築を進めています。

産学官共創システム構築に向けた地域密着型インキュベーション拠点

現代社会において、産学官連携によるイノベーション



図5 地域密着型インキュベーション拠点 SeekS × pot 外観

ンの促進は、技術の研究開発のみならず、社会課題の解決にも大きな影響を与えるものとして注目されています。本項では、産学官共創システムの実現を目指した「地域密着型インキュベーション拠点」に焦点を当て、その活動内容と意義について紹介します。

まず、産学官共創システム構築の柱とすべく、「地域密着型インキュベーション拠点」として SeekS × pot を 2023 年 11 月に天満橋駅直結の京阪シティモール内に設置しました [3] (図5)。この拠点は、スタートアップ企業や地方自治体との連携を基盤に、地域の特性を生かしたオープンイノベーションを活性化し、持続可能なエコシステムを構築することを目指しています。さらに活動を通じて、社会的課題に対応する技術やサービスの開発が促進され、地域経済の活性化に貢献することも目指しています。

地域密着型インキュベーション拠点をノードとしたオープンイノベーションのポイントとして、「1 → 100 ブースト」が挙げられます。研究者の先端研究開発を 0 → 1 とした時に、その 1 の成果を実社会に橋渡しするために必要な機能を現場志向で整備した「1 → 100 ブースト」が自律的・自立的・持続的なイノベーションエコシステムにとって重要です。具体的には、①多様な資金調達手段の確保、②継続的な開発テーマ掘り起こし、③事業デザイン～実装までの支援枠組み、④自治体との早期連携強化の仕組みの4つの取り組みを行っています。

①多様な資金調達手段の確保では、通常大学発スタートアップが調達を行う大学系ベンチャーキャピタルに限らず、クラウドファンディングの枠組みや拠点連携企業とのCVC(コーポレート・ベンチャー・キャピタル)の立ち上げを検討し、幅広い資金源を活用

してスタートアップ企業を支援する体制が整えられています。

②継続的な開発テーマ掘り起こしでは、拠点連携企業との協働により、継続的に研究開発・事業開発イベントを企画しています。具体的には、大阪大学の若手研究者のプラットフォームである SAKIGAKE クラブとの協働により、研究者と企業の相互交流を深めています。

③事業デザイン～実装までの支援枠組みでは、伴走支援の機能創出と強化を行っています。また、スタートアップ支援を強化するため、EIR (Entrepreneur-in-Residence) 的な人材の活用を行い、研究者の研究シーズを社会実装に結びつける起業支援を行っています。具体的には事業デザインやファイナンスの支援が提供されています。2025年までに、EIR人材をさらに増加させ、起業支援のプラットフォームとしての機能強化を図っています。

④自治体との早期連携強化の仕組みでは、自治体と早期に連携し、地域の課題に対応するための支援策のために、「インフラマネジメントに関するアンケート調査」を実施し、1741の基礎自治体を対象に、先端技術の実装における課題や危機管理に関する情報を収集しています。この調査結果を基に、支援策を拡充していく予定です。

このように、地域密着型インキュベーション拠点を中心に、自治体や企業と連携した共創エコシステムをさらに拡大し、各地でのスタートアップ支援や技術実装の促進を加速していきます。

地域課題解決に向けたリビングラボの取り組み

本拠点が推進する「共創ラボ [4]」は、地域社会と共に課題を解決する「リビングラボ」のアプローチを通じ、社会課題と技術革新を融合させたオープンイノベーション活動を展開しています。「リビングラボ」とは、住民を中心として、大学、企業、自治体が連携し、地域の実生活を基盤に研究活動を行い、新たな技術やサービスを実験・実証する場であり、現場に即した解決策を生み出すプロセスです(図6)。この手法により、研究開発と社会のニーズを結びつけ、住民が直面する現実的な問題に応じた柔軟なイノベーションが可能になります。



図6 共創ラボでの産学官連携ステークホルダーの対話の様子

共創ラボの活動では、大阪府茨木市山手台地域^{*1}や大阪市住之江区咲洲地域^{*2}などを具体的なフィールドとして、異なる地域が抱える課題に対して、リビングラボ活用した取り組みを進めています。

山手台は、バブル期には憧れの閑静な住宅地であったものの、少子高齢化の進展により、バス便の減少と高齢ドライバーの免許返納が進み交通手段の不足やそれに伴う医療施設へのアクセスの課題が生じています。解決策のひとつとして、地域住民・自治体・大学が協力し、バス停までのアクセスの改善のための実証実験や医療施設に頼らないための住民同士の未病予防のための活動が行われています。また、地域コミュニティの維持と再生に向けた課題も顕在化しており、お祭りを代表とした多世代が交流する取り組みの設計や実施を行っています。

一方、咲洲は、山手台と同様に住宅エリアでは少子高齢化が進む一方でスポーツメーカーのミズノ社や総合レンタル業の西尾レントオール社など企業の新規研究所の設置が進むエリアがある珍しい地域です。立地する企業と地域住民の共創を課題として活動を行っています。企業の研究所を地域社会と共有し、住民との協力による防災対策や新しい地域開発プロジェクトが期待されており、企業の持つリソースを活用しながら地域社会全体の発展を目指しています。

共創ラボを通じて、住民・大学・自治体・企業が実際の課題に即して協働し、現場からイノベーションを創出する取り組みが進行中です。オープンイノベーションの場として機能する共創ラボでは、技術開発だけでなく、地域の持続可能な発展を視野に入れた社会的価値の創造を視野に入れた取り組みとしています。さらに、共創ラボは国内に留まらず、国際的な連携も積極的に推進しています。例えば、海外のリビングラ

ボや研究機関との協力を通じて、地域課題に対するグローバルな視点を取り入れつつ、新たなソリューションを模索しています。この国際的な取り組みは、地域ごとの特性に合わせた解決策が地域固有のものかそれともグローバルに展開可能なものなのかを検証できます。この検証作業を通じてリビングラボのアプローチ自体の研究開発も行っていきます。

まとめと今後の展望

本稿では大阪大学 COI-NEXT 住民と育む未来型知的インフラ創造拠点の主な研究プロジェクトと産学官共創システム構築に向けた取り組みを紹介しました。今後老朽化していく日本の社会インフラの維持管理・更新に向けて研究開発とその社会実装加速していきたいと考えています。本稿を読んでこれらの活動にご興味のある方はぜひ拠点事務局までご連絡いただければ幸いです。

<参考リンク>

- [1] 大阪大学 FICCT拠点 WEBサイト: <https://miraiinfra.otri.osaka-u.ac.jp/>
- [2] JST共創の場形成支援プログラム(COI-NEXT) WEBサイト: <https://www.jst.go.jp/pf/platform/>
- [3] SeekSX pot WEBサイト: <https://seekspot.jp/>
- [4] 共創ラボ WEBサイト: <https://共創ラボ.jp/>

*1 大阪府茨木市山手台地域

茨木市山手台は、大阪府北部に位置し、1970年代に丘陵地帯を活かした大規模住宅開発が行われました。静かで自然に囲まれた環境を特徴として人気を集めました。現在は少子高齢化が進みいわゆるオールドニュータウンとなっています。住宅地周辺には、彩都や万博記念公園なども近く、歴史的施設が豊富です。近年周辺に安威川ダムが建設され、ダム周辺に設置されたダムパークなど自然を生かしたレクリエーション施設が整備され、地域住民の交流や観光資源として期待されています。

*2 大阪府大阪市住之江区咲洲地域

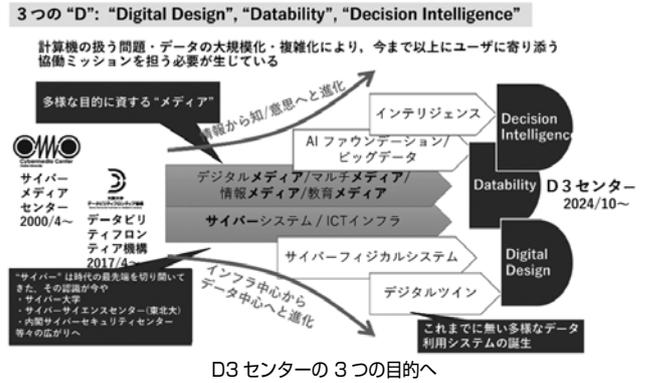
住之江区咲洲は、1980年代のバブル期に大阪湾の埋立地として開発された人工島です。大阪南港とも呼ばれるこのエリアは、インテックス大阪やATC(アジア太平洋トレードセンター)などの大規模な展示・商業施設と大阪府咲洲庁舎(さきしまコスモタワー)などのオフィスビルが立ち並びビジネスエリアと住居エリアが混在しています。2025年に予定されている大阪・関西万博会場である夢洲に隣接しており、万博に関連する都市開発が進行中です。

データ駆動型大学を目指す 大阪大学を支えるD3センター発足へ

～ 研究、教育と大学運営に ICT をさらに活用してより良い大学へ ～

2024年10月1日に、「データ駆動型大学」を目指す大阪大学の支援ミッションを行うべく、サイバーメディアセンターとデータビリティフロンティア機構が合流してD3センターとして発足いたしました。本稿ではそのD3センターおよび情報推進本部、情報セキュリティ本部、OUDX推進室等によるICTへの取り組みを紹介します。

大阪大学 D3 センター
センター長 降旗 大介



D3 センターの発足にあたって

大阪大学は、教育、研究、経営にDX（デジタルトランスフォーメーション）を用いてデータを活用し、さまざまな社会課題を解決する「データ駆動型大学」を目指しています。この取り組みを推進するため、情報基盤を支えている「サイバーメディアセンター」（以降、CMC）と、データビリティによる新たな科学手法、すなわちデータによる研究DXを探求する「データビリティフロンティア機構」（以降、IDS）とを核とした新しい組織「D3センター」（以下、本センター）を2024年10月1日に創設しました。

この“D3”にはセンター設立の目的を示す「Digital design（情報をデータ化・使えるように）」、「Datability（高度かつ膨大なデータを解析・使いやすく）」、「Decision intelligence（様々な意思決定を支援する）」の3つの思い・キーワードの頭文字が埋め込まれており、想定するミッションを表しています。これらは、これまでにCMCとIDSが担ってきたミッションをより発展させ、静から動へ、インフラ中心からデータ中心へと大学の支援業務を進化させるものです（冒頭の図）。まず、データの活用にはそもそも適切な、なるべく膨大なデータ（ビッグデータ）の収集ないしは生成が必要になります。それが Digital design です。そして、得たビッグデータを解析する必要があります。これが Datability です。また、データを解析して得られた情報を活かさねばなりません。これが Decision intelligence になります。これらのすべてのプロセスが有効に機能し、かつ、滑らかに繋がることではじめて「データ駆動」が完成するとわれわれは考えています。

これらのミッションを実現するために、2000年4月創設で「サイバー」の名にふさわしくスーパーコンピューティングやICTインフラの基盤などにおいて時代の最先端を切り拓いてきたCMCと、2016年4月創設の「データビリティ」の名を体現する、身の回りの社会生活から最先端科学まで広範な分野で生成されるビッグデータの利用促進を担ってきたIDSと、このふたつの組織を合従して連携する、15の研究部門、約70名の研究者を擁する組織として本センターを創設するに至ったものです。

そしてこの目的を達成するために、3つのキーワードにまたがる3つの主要なミッション「データ生成・収集、データ解析、データ活用」を担うミッションコアを中心とし、その下部に6つのサブコアを設けて両組織の部門を再編成します（図1）。中心にはデータ駆動コア統括コーディネーターを配置し、センターの活動を牽引する機能を持たせます。

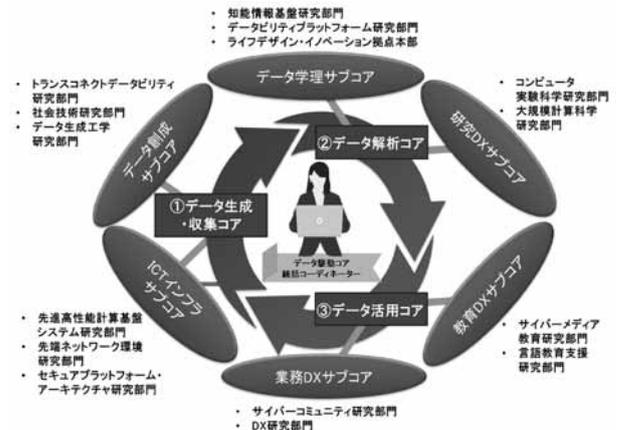


図1 データ駆動のための組織構成

これらのミッションコアの役割は次の通りです。

- ①データ生成・収集コア（データ創成サブコア、ICT インフラサブコア）：データ生成による社会実装推進およびデータ収集
- ②データ解析コア（データ学理サブコア、研究 DX サブコア）：データの解析および研究適用による新たな学理の創出と研究 DX の推進
- ③データ活用コア（教育 DX サブコア、業務 DX サブコア）：データ活用による教育 DX および業務 DX の推進

ミッションコアが連携しデータの生成から活用まで一貫したスムーズな流れを作り出すようにし、データが生まれて解析され、意思決定に役立つ、という大学のデータ駆動をわれわれは推進します。

大阪大学のデータ駆動支援ミッションを支える情報基盤

ミッションを実現するためのハードウェア、インフラストラクチャー等の各種実体と、それらを活かすためのソフトウェア的な活動業務が本センターにはあります。紹介しましょう。

まずは大阪大学の誇るスーパーコンピュータです。図2は2021年5月から稼働開始したクラウド連動型高性能計算（HPC：High Performance Computing）・高性能データ分析（HPDA：High Performance Data Analysis）用の「SQUID（Supercomputer for Quest to Unsolved Interdisciplinary Datascience）」という名前のスーパーコンピュータで（英単語 Squid はイカのことです）、汎用 CPU ノード群、GPU ノード群、ベクトルノード群、大容量ストレージから構成され、16.591 PFLOPS（Peta Floating-point Operations Per Seconds, 1 秒間に 10^{15} 回の計算ができること）の総理論演算性能を安定的に提供できます。数値計算、科学シミュレーションといった従来の HPC 分野に加え、近年急速に需要が拡大しつつある機械学習、ディープラーニング、ビッグデータ解析といったキーワードに代表される HPDA 分野の多様な計算ニーズを収容します。



図2 スーパーコンピュータ SQUID



図3 スーパーコンピュータ OCTOPUS

図3は2017年12月に稼働を開始した、「OCTOPUS（Osaka university Cybermedia cenTer Over-Petascale Universal Supercomputer）」という名称の総理論演算性能 1.463 PFLOPS を有するスーパーコンピュータです。OCTOPUS はスカラー型コンピュータであり（SQUID に比して）プログラミングの容易さ等のユーザビリティを優先した作りとなっており、稼働期間中の利用率が大変に高い、とても評判の良いシステムになります（なお2024年3月末からリプレースのために稼働停止中ですが、現在次世代システムを調達中です）。

そして本センターのもつ特徴的なシステムとして ONION（Osaka university Next-generation Infrastructure for Open research and open InnovatioN）があります。これは SQUID と連携しつつ他からも各種規格で接続できるデータ集約基盤で、利用者環境とスーパーコンピュータ間のデータ移動等が簡単になります。スーパーコンピュータのアカウントを持たない学外の共同研究者の方と計算結果を共有したり、スマートフォンからデータ操作したりなどの柔軟な利用方法が可能なシステムです（図4）。「データ駆動」ミッションの基礎インフラとして期待しているシステムです。

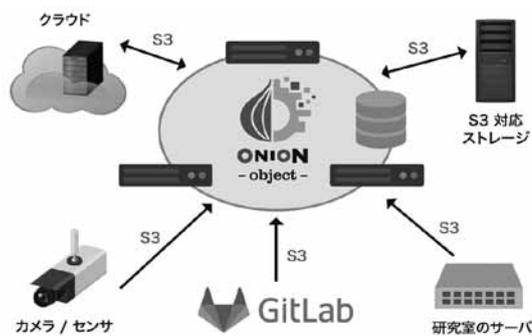


図4 多様な接続が可能なデータ集約基盤 ONION



図5 データ活用社会創成プラットフォームのスパコン mdx

そして画期的なスーパーコンピュータが「データ活用社会創成プラットフォーム mdx」（図5）です。広範な分野共通のプラットフォームとして分野を超えたデータ科学や情報科学の知見、様々なデータやソフトウェアなどを連携したデータ活用を目的としたものです。高性能計算機と大容量ストレージを備え、国立情報学研究所が運用する SINET と連携して広域からのデータ収集機能とデータ集積・処理機能を全国の大学・公的研究機関に

提供、さらにコミュニティを形成して分野・セクタを横断したハブとなるものです。具体的には大学の情報基盤センター等をはじめとする 11 組織からなるデータ活用社会創成プラットフォーム協働事業体が運用し、仮想マシンによって各資源が提供されるという大きな特徴を持ちます。その実システムは東京大学に mdxI が、大阪大学 D3 センターに mdxII が設置されています。

次に、キャンパスネットワークの ODINS (Osaka Daigaku Information Network System, 図 6) を紹介しましょう。1986 年に稼働を始め、当初は低速専用線で構築していたキャンパス通信網も、ATM、FDDI、ETHERNET 等のテクノロジーを取り入れ常に進化しています。近年ではブロードバンド自体に対応したギガビットイーサネット網整備、キャンパス無線 LAN システム、セキュリティ対策及び安定運用を主眼に置いた 2008 年の第 5 期 ODINS の後、セキュリティ対策の高度化等をはかった第 6 期 ODINS を 2013 年に整備するなど歴史を重ねており、現在は第 9 期 ODINS となっております。外部接続は SINET との接続を用いており、キャンパスネットワークとしては学内ルーティング、学内 VLAN 網整備、IP アドレスおよびドメイン名 (osaka-u.ac.jp) 交付業務、キャンパス無線 LAN、有線 LAN 認証、イントラネットワークの提供を行っており、また、セキュリティサービスとしてファイアウォール、ネットワーク侵入防止 / ネットワーク侵入検知、ウイルスチェック、メールフィルタリング、学内サーバの監査などを行っています。その他、ネットワークに関するコンサルティング、ビジターアカウント発行、国際無線 LAN ローミング基盤サービス (eduroam) 対応等々、活動は多岐にわたります。

大阪大学の ICT セキュリティに関しては、総長直

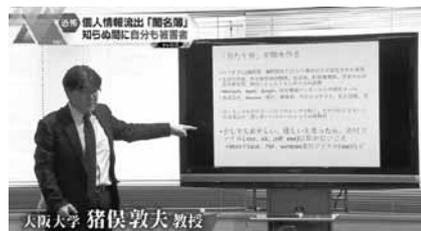


図 7 最高情報セキュリティ責任者 猪俣教授

属の最高情報セキュリティ責任者 (CISO: 猪俣教授、D3 センター兼務) のもと、情報セキュリティ本部がその業務を担って

おり、D3 センターの教員と兼務の形で (図 7) スタッフが稠密な連携をはかっています。情報セキュリティ対策室に OU-CSIRT (Osaka University Computer

Security Incident Response Team) が大阪大学の情報セキュリティインシデントに対処する体制として設置されており、この OU-CSIRT は、本学において発生した情報セキュリティインシデントに対し、その状況を確認し、緊急措置の実施、復旧に係る指示または勧告、そして各種の報告と情報共有を責務としています。

そして、本センターの活動として大変重要な、学際共創研究活動を紹介します。この活動は IDS の活動を引き継いだもので、新たな科学の方法を探求し、これまでの科学技術・学術分野の枠にとらわれない未踏の地平を切り拓くべく、データ駆動型の学際共創研究を推進するという目的をもちます。企画室が基盤となり、常に学内の 20 以上の他部局研究者と本機構の専任・兼任研究者との研究マッチングを進め連携の強化を図り、学際共創研究の発掘・支援を行う仕組みです (図 8)。独創的な共創研究活動を支援するため、平成 29 年度からは「IDS 学際共創プロジェクト」として独自の研究活動費配分も実施しました。令和 4 年度からは、共創研究シーズの掘り起こしを加速するべく全学を対象に研究課題を公募し、意欲的かつ挑戦的なテーマの共創研究提案の応募をうけ、審査を経て採択・実施をしています。この活動はまさにデータ活用コアのミッションの中核をなすもので、本センターの活動の一つの柱です。

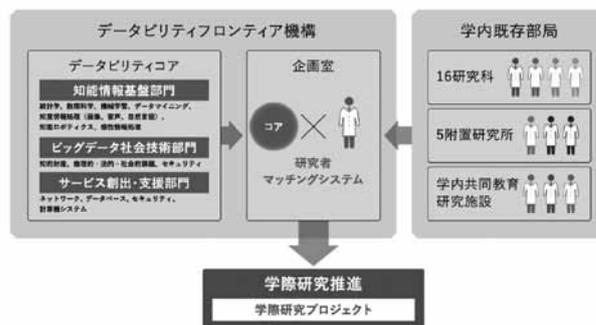


図 8 学際共創研究活動のためのマッチングシステム

その他の全学への ICT 支援活動

他にも全学の様々な ICT 支援業務を担っていますのでその一部を紹介しましょう。

まずは情報処理教育環境や e-learning システムの運用、コンテンツ作成等による利用者支援 (図 9) です。VMWare の Virtual Desktop Infrastructure (VDI) を用いて情報教育システムの維持、管理を行っています。情報教育システムの同時接続は 800 以上のライセンスを維持しており、教室外からも本センター提供の

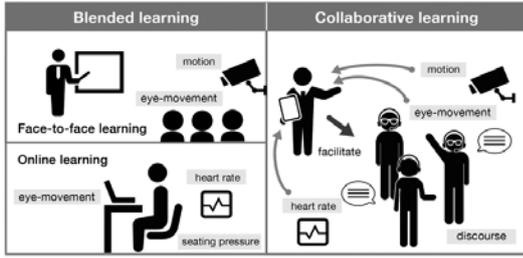


図9 大学教育を支える ICT 環境

端末システムと同等のサービスを利用できます（持ち込み PC の利用：BYOD, Bring Your Own Device）。その際の円滑な接続、安定した環境稼働を確保すべく OS イメージ調整を定期的に行っています。また、e-Learning コンテンツについては、「INFOSS 情報倫理」、「情報倫理デジタルビデオ小品集」、「キーワードで学ぶ最新情報トピック」「MS Office 自学自習ソフトウェアナレロー」等を整備し、全教職員・学生が利用できます。

また、複言語教育活動が本センターの特色ある活動として挙げられます（図 10）。これは、アクティブ・ラーニング教室や学習場のデザイン指針のひとつである評価システム（Learning Space Rating System）からみて多くの評価項目で高い評価を得られるであろう、本センターの PLS（Playful Learning Studio）教室を中心に行っているものです。ノート PC・タブレットを備え、可動式什器、複数モニター等を用いることでプレゼンテーションや協働学習、創造的な学習を行えます。



図 10 教育環境の最新評価法に対応した言語教育教室

この魅力的な学習環境は学生間の協働・共創を生み、ICT 活用による学習環境の一つのモデルケースとして重要な位置づけをもつものです。

また、スーパーコンピューティングに関するユーザ支援活動も本センターの特徴です。年に 20 回以上の利用者向け講習会・セミナーをはじめ、高度計算を必要とする数学・物理学の研究者向けセミナーである



夏の電腦甲子園 参加者募集

スーパーコンピュータを駆使した高校生のプログラミング大会

今年の本選には大阪大学のスーパーコンピュータ SQUAD を使用し、オンラインで開催します。

主催：大阪大学 理化学研究所、東京科学大学（旧東京工業大学）、理化学研究所のいずれかのスーパーコンピュータを用いる大変贅沢なものです。課題は科学技術分野から最先端の話題をわかりやすくしたもので、実用的でもある実践的なものです。ほぼ 4 日間をかけて課題プログラムを作成しその正確さ・速度を評価するのですが、作成されたプログラムには優れたものも多く、ICT 専門家である主催・共催・協賛組織の審査員もしばしば驚愕します。

このように本センターは多種多様な ICT に関するミッション・活動を行っており、本邦の学術、教育、業務に関して積極的に活動していく組織です。大型計算機センター発足からみれば 60 年以上の歴史ある組織であり、その組織としてのありようと活動の両方において、社会的要請を常に謙虚に受け止め、柔軟に対応して変化していくこともまたミッションとしています。

みなさまには今後とも、より一層のご支援を賜りますよう、よろしくお願いいたします。

図 11 高校生向けプログラミングコンテスト「スパコン」

「セミナーシリーズ 物理学・応用数学の数値計算最前線」活動などがあります。さらに興味深い活動として、本センター、東京科学大学（旧東京工業大学）の学術国際情報センター、そして理化学研究所の計算科学研究センターが主催、情報処理学会と電子情報通信学会の情報・システムソサイエティが共催で毎年 8 月に開催するスーパーコン（SuperCon）があります（図 11）。これは 1995 年に始まった高校生向けプログラミングコンテストで、大阪大学、東京科学大学（旧東京工業大学）、理化学研究所のいずれかのスーパーコンピュータを用いる大変贅沢なものです。課題は科学技術分野から最先端の話題をわかりやすくしたもので、実用的でもある実践的なものです。ほぼ 4 日間をかけて課題プログラムを作成しその正確さ・速度を評価するのですが、作成されたプログラムには優れたものも多く、ICT 専門家である主催・共催・協賛組織の審査員もしばしば驚愕します。

このように本センターは多種多様な ICT に関するミッション・活動を行っており、本邦の学術、教育、業務に関して積極的に活動していく組織です。大型計算機センター発足からみれば 60 年以上の歴史ある組織であり、その組織としてのありようと活動の両方において、社会的要請を常に謙虚に受け止め、柔軟に対応して変化していくこともまたミッションとしています。

みなさまには今後とも、より一層のご支援を賜りますよう、よろしくお願いいたします。

実世界と情報通信の融合に向けて

～デジタルツインによる実世界と ICT 技術の共進化～

Beyond 5G/6G のような ICT 技術の進化と、高度な CPS (サイバーフィジカルシステム) による実世界の発展が、デジタルツインを媒介として共進化することについて考える。

大阪大学 D3 センター
教授 下西 英之

はじめに

共進化とは、生物学の用語であって、二つの異種の生物が相互に関係し、ともに進化する現象である。技術においても、高度な CPS (サイバーフィジカルシステム) による実世界の発展と、Beyond 5G/6G のような ICT 技術の進化が、デジタルツインを媒介として共進化することについて考えたい。

次世代の Beyond 5G/6G 時代では、人とロボットの協働や自動運転社会に向けた高度な CPS の実現が期待されている。例えば、人とロボットが同一空間内で協働することができる協働ロボットが普及し、2027 年には 30% のロボットが協働ロボットとなると予測されている。このような高度な CPS においては、ロボットやドローン、自動車など様々な移動体が人々の生活の中に入ってくるため極めて高いレベルの安全性が求められる。他方、安全性一辺倒でロボットと人の活動空間を完全に分離したりロボットを極めて低速で動作させたりしては、CPS による実世界の発展は大きく阻害される。

このような高度な CPS を実現するためには、実世界を認識し制御する AI/ML (Artificial Intelligence / Machine Learning) 技術、これを大規模かつ低消費電力で計算するコンピューティング技術、実世界から大量の情報を収集する通信技術、特に切れずに安定して使える無線通信技術などの進化が不可欠である。すなわち実世界での課題解決の進展は、これら ICT 技術の進化によって律速され方向づけられるともいえる。また、ICT 技術の進化も、ただ半導体の微細化や大量の電力消費に頼るのではなく、実世界で起きていることと連動して効率よく ICT 資源を活用してい



当研究室のデジタルモデル

くことも必要である。そのための媒介としてデジタルツインに期待したい。デジタルツインを用いて実世界と仮想世界を高度に融合し、CPS による実世界のデジタル化や制御とあわせて、ICT システムそのものの設計・制御の高度化を目指していく。

デジタルツイン

デジタルツインは、自動車、ジェットエンジン、人、ビルや町並みなど実世界に存在する様々な“もの”を、仮想世界上で再現し、実世界との相互作用を実現するものである。工場、航空、コネクテッドカー、スマートシティー、スマートビルなどにおける様々な ICT システム、特に高度な CPS を実現する上での重要な技術として期待されている。また、対象となる“もの”は必ずしも物理的な物体だけでなく、人間の感情・感覚、空間内の電波の伝わり方、その場のコンテキストなど実体のない様々なものまで想定されている。

デジタルツインを用いて高度な CPS を実現し、そしてその効率と安全性を両立するためには、いかに高精度にデジタルツインを構築するかが一つの鍵となる。しかしながら、カメラや様々なセンサー情報を用いて実世界のデジタル情報を得る際、またそれらを用いてロボットを制御する際、計測 / 認識 / 推定 / 制御等に含まれる誤差を取り除くことは現実的には不可能であり、これを前提としたロバスト性が求められる。そこで、デジタルツインを確率的に表現し、それをもとに実世界をロバストに制御するための枠組みとして、確率的デジタルツインを提案している [3]。

実世界のデジタルツインとネットワークのデジタルツイン

Beyond 5G/6G のような ICT 技術の進化と、高度な CPS による実世界の発展を、デジタルツインを媒介として結びつけるため、図1のような Beyond 5G アーキテクチャが提案されている [4]。これは、著者らが Beyond 5G 推進コンソーシアムの白書分科会にて、将来の技術の方向性として議論し、提案したものである [5]。ここで、「Real-world Digital Twin」は実際の社会やサービスを構成する人やロボットなどのオブジェクト、建物内や町などの 3次元空間に対するデジタルツインであり、「Network Digital Twin」はネットワーク資源やコンピューティング資源を含む Beyond 5G インフラ、さらには無線電波伝搬環境などのデジタルツインである。

このような2つのデジタルツインは、独立したものではなく相互に連携するものであり、共進化の関係にあるともいえる。Real-world Digital Twin の構築・制御のためには、遍在するセンサー等の機器を用いて膨大なデータを収集して現実世界を仮想世界に投影すること、また膨大なデータを分析・判断した上で仮想世界から現実世界に作用することが求められる。Network Digital Twin は、Beyond 5G インフラの状態を把握するだけでなく現実世界の状況を見据えた上で提供するサービスを最適化することが求められる。

図2の上では、前記の確率的デジタルツインをヒューマン・ロボット・コラボレーションに適用した例であり、自律型ロボットや自動運転等において実世界の状況を確率的に理解し（障害物を中心としたグラデーションが確率分布を示す）、リスクセンシティブにロボット等を制御することで、安全性と効率を両立

するものである。さらに、図2の下では、実世界の確率的デジタルツイン（ここでは人の存在の確率分布を人を中心としたグラデーションで示す）と、ネットワークの確率的デジタルツイン（ここでは電波強度の確率分布をアンテナを中心としたグラデーションで示す）との両方を用いてロボットの制御を行う。同時に、これら両方のデジタルツインを用いて無線ビームフォーミングやネットワークスライスへの帯域割り当ての最適化なども行う。

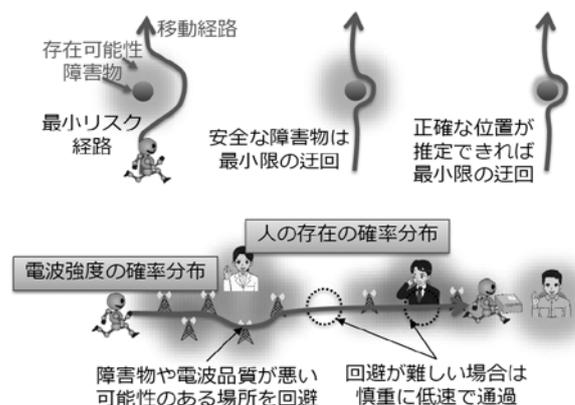


図2 確率的デジタルツインを用いて実世界とネットワークインフラを協調的に制御

研究室での研究例

❖ 複数カメラを用いた確率的な三次元トラッキング手法の提案 [6]

三次元空間における人やロボットの位置のトラッキングを行うため、向きの異なる複数のカメラを用い、三次元空間を確率空間と捉えることで確率的な位置推定を行う。この際課題となる同一物体識別は、“マルコフ確率場 (Markov Random Field : MRF)” を用いた分類問題として処理する。そしてここから得られる推定位置の確率分布により、逐次的なベイズ推定 (Bayesian inference) を用いたトラッキングを実現する (図3)。

❖ 時空間ガウス過程回帰を用いた動的環境における環境計測ロボットの制御 [7]

工場やオフィスなどで、温湿度や CO₂ 濃度、電波強度などをリアルタイムに把握するため、移動ロボットによって観測情報の収集を行う。本研究では、観測対象地点の時間方向・空間方向の関係性を定義した時空間ガウス過程回帰モデルを導入し、現在から将来までの各時刻・各地点の観測対象情報の不確実性が最も小さくなるような観測経路を求めて移動と観測を繰り返す手法を提案した (図4)。

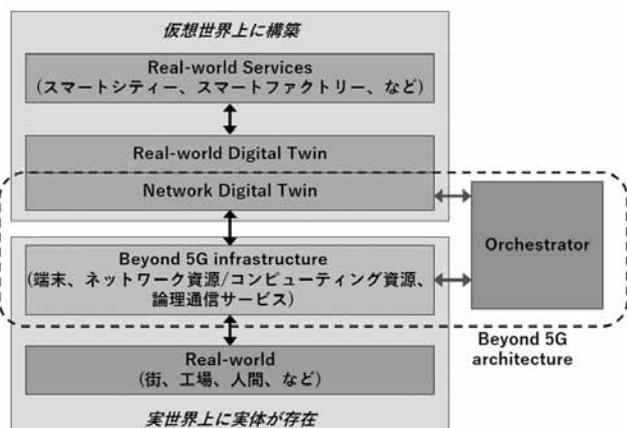


図1 Beyond 5G アーキテクチャ (文献 [5] 図 6.2-1 をもとに再構成)

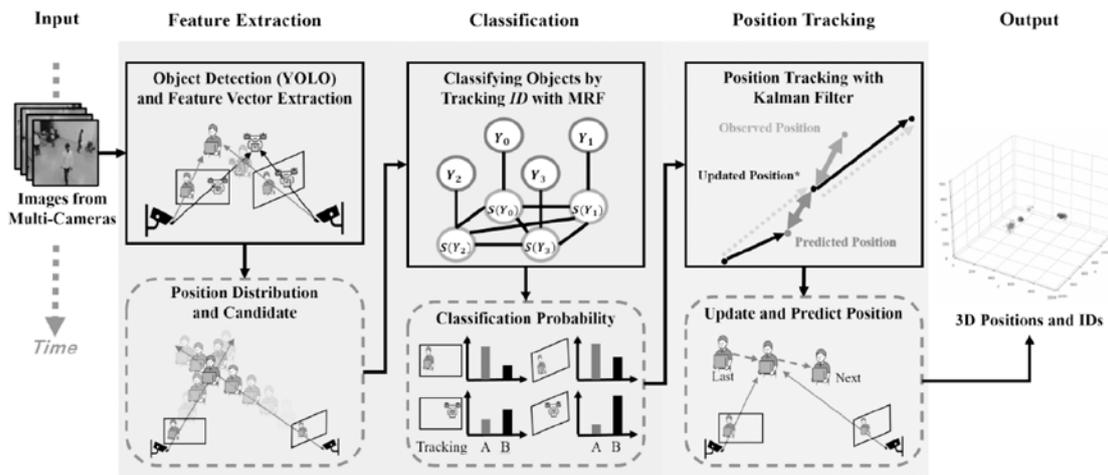


図3 複数カメラを用いた三次元トラッキング

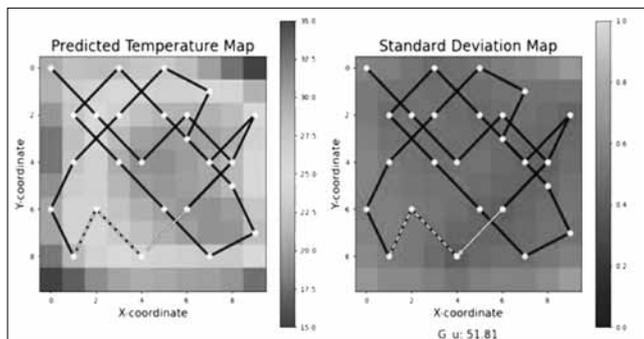


図4 環境計測ロボットの移動軌跡と推定結果

❖ ローカル 5G 環境におけるミリ波通信電波状況の確率的推測 [8]

無線通信の信頼性を向上させるために、無線通信品質の推測精度の向上だけでなく、不安定な電波環境を考慮して推測誤差を許容する設計も重要となる。そのため、受信電波強度のマップを確率分布として推測する手法を提案し、推測誤差を分散の形で可視化した(図5)。また、確率的な推測結果を用いて、誤差によるマージンを考慮したロバストな基地局設計に活用できることを示した。

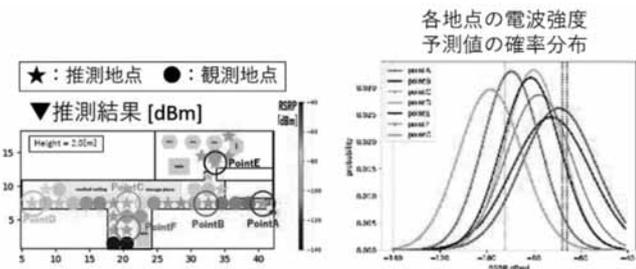


図5 ミリ波無線通信環境の確率的な推測結果 (左:各地点の受信電波強度の期待値、右:その確率分布)

❖ ドローン遠隔操作支援のための三次元電波状況の可視化手法 [9]

ドローンは点検や物流などの幅広い分野で使用されているが、電波などの肉眼では確認できない障害が原因で事故が起こることがある。この問題に対し、ドローンカメラ映像に電波状況を可視化することで電波状況が悪い地点を避けることができる。しかし、二次元的に可視化すると電波状況の情報量が不足し、三次元的に可視化すると操作の邪魔になるという問題がある。本研究では情報量が異なるユーザーインターフェースを実装し比較実験を行った結果、(b)の等値線表示が最も危険回避と視認性に優れていることがわかった(図6)。



図6 電波環境可視化ユーザーインターフェース

今後に向けて

AI/ML の発展に伴い今後ますますデータの重要性が高まると共に、本稿で述べたような実世界と情報通信技術の融合に向けて様々なデジタルツイン（これも重要なデータの形態である）を構築し管理していくことの重要性が高まっている。そして様々な種類のデータを横断的に活用していくことで、新しい領域の研究が生まれてくることが期待される。

このようなデータ駆動型の研究開発を進めていく中で、以下のように、我々は大学キャンパスの“場”としての可能性に注目している。大学キャンパスをデジタルツイン化し、リビングラボとして様々な研究開発のための活用を目指す（図7）。

- 教育、研究、道路・建物、商店・レストラン、保育園、病院など社会の縮図

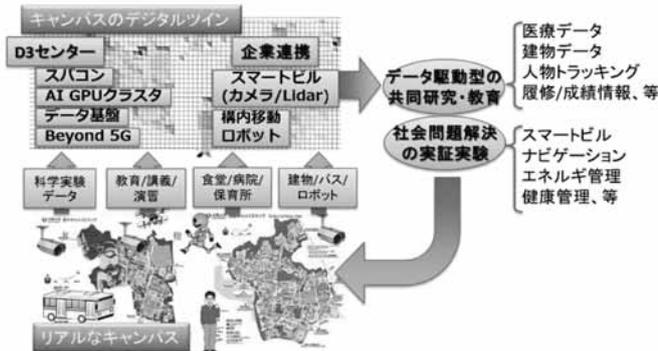


図7 データ駆動型大学に向けて推進するキャンパスリビングラボ

- 学生や地域住民、病院利用者等が生活する場
- 産・官・学が連携して新しい技術を生み出す場

大阪大学はデータ駆動型大学を目指し、2024年10月1日に「D3センター」(Center for Digital design, Datability, and Decision intelligence) を創設した。我々の研究室も D3 センターの一員として基盤整備やデータ駆動型の研究を推進していく。

まとめ

本稿では、Beyond 5G 時代の高度な CPS を実現するための技術として、確率的デジタルツインについて紹介した。

<参考文献>

[1]G. Michael and V. John. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems, Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, Springer, Cham, 2017.
 [2]A. Fuller, et. al., "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," in IEEE Access, vol. 8, 2020.
 [3]H. Shimonishi, et. al., "Probabilistic Representation and Its Application of Digital-Twin of Spatio-Temporal Real-World Towards Trustable Cyber-Physical Interactions", IEEE Network, 2024
 [4]H. Shimonishi, et. al., "Digital-Twin for and by Beyond 5G", in Beyond 5G White Paper Supplementary Volume on "E2E Architecture", Beyond 5G Promotion Consortium White Paper Subcommittee, 2024.
 [5]Beyond 5G推進コンソーシアム白書分科会, Beyond 5Gホワイトペーパー ~ 2030年代へのメッセージ~ 第3版, 第6章技術トレンド, 2024年
 [6]Shusuke Matsuda, et. al., "Multi-Camera 3D Position Estimation using Conditional Random Field", 11th Workshop on Assistive Computer Vision and Robotics, 2023
 [7]Gao Tian, et. al., "Informative Path Planning in Dynamic Environments Using Spatio-Temporal Gaussian Process Regression", 信学技報 vol. 123, no. 431, CQ2023-80, 2024.
 [8]Daiki Kodama, et. al., "Enhancing Indoor Millimeter Radio Communication: A Probabilistic Approach to RSS Map Estimation", in Proceedings of IEEE CCNC, 2024.
 [9]長原匠海, 他, "ドローン遠隔操作支援のための三次元電波状況の可視化手法", 信学技報 vol. 123, no. 433, MVE2023-64, 2024.

大阪大学 D3 センター先端ネットワーク環境研究部門
 大阪大学大学院情報科学研究科 情報ネットワーク学専攻 ユビキタスネットワーク講座
 (下西研究室) <https://www.ane.cmc.osaka-u.ac.jp/>

教授 1 名、特任教授 1 名、准教授 1 名、特任准教授 1 名、特任助教 1 名、秘書 1 名、博士後期課程学生 2 名、修士学生 12 名、学部生 5 名の計 25 名の体制で、超高速ネットワーク Beyond 5G/6G 基盤技術、デジタルツイン、ネットワーク利用、学内ネットワーク ODINS (Osaka Daigaku Information Network System) の運用支援に関する教育と研究に取り組んでいます。

下西研究室では新たな社会“Society 5.0”の実現に向けて「デジタルツイン基盤」「確率的デジタルツイン構築」「デジタルツイン応用」の3つのテーマで研究を進めています。

「デジタルツイン基盤」研究では Beyond 5G/6G 通信のためにシステム最適化技術として、無線電波状況の推定技術や分散型の AI におけるエッジクラウドシステム最適化技術の研究を推進しています。「確率的デジタルツイン構築」に向けては、3次元の実世界をデジタルツインとして構築することを目的に、機械学習やグラフィカルモデルを用いて多数の物体のリアルタイムトラッキングを行う技術などの研究を行っています。「デジタルツイン応用」ではメタバース空間の構築や共有、AR デバイスによって人間の行動に反映する技術の研究の研究開発を進めています。



本人は後列左から5番目

B5G 時代の都市デジタルツイン

現実世界における人や車両・環境を仮想空間上に模倣して再現するスマートシティデジタルツイン技術を紹介し、B5G を活用した新たなプロジェクトと今後の動向を述べる。

大阪大学大学院情報科学研究科教授
(兼) 理化学研究所 計算科学研究センター チームリーダー
山口 弘純



大阪市の車両流を再現した都市デジタルツイン

はじめに

最近、「デジタルツイン」という言葉が多様な場面で使用されるようになってきている。デジタルツインとは、現実世界の物体や環境を仮想空間で再現し、現実世界では難しい性能試験や将来予測を仮想空間のリアルなモデルを通じて行う技術の総称である。もともとは製造業において、機械の設計製造や性能改良、故障予測などへの活用が想定されていたが、近年では、人間の身体的・生理的な動きや機能を再現し疾病予測などに活用するバイオデジタルツイン、筆者の研究室が開発している人間の軌跡把握と予測技術「ひとなび」などのヒューマンデジタルツイン、気象現象の予測で用いられる地球気候デジタルツイン、現場に到達することが困難な宇宙空間における宇宙デジタルツインなど、多岐にわたる分野におけるデジタル化 (Digital Transformation, DX) のキーコンセプトとして期待されている。

現実空間と仮想空間の連携に関しては、「サイバーフィジカルシステム (Cyber-Physical System, 略称 CPS)」という概念が知られており、2016 年の第 5 期科学技術基本計画で謳われている Society 5.0 では、CPS を基盤として人々の幸福や社会の高度化に寄与

する新たな価値を創造することを目指している。CPS は、実世界と仮想世界を「カップリング」し、現実世界でのセンシングデータを仮想世界へ集約し、仮想世界でデータ解析を行うとともに、有益な解析や予測を行うことができれば現実世界へそれをフィードバックする一連のループを構成し、社会課題の解決を図る。デジタルツインはセンシング、エッジコンピューティング、Beyond 5G、機械学習などに代表される様々な要素技術を前提とする点で CPS と共通するが、デジタルツインでは対象とする物体や機械、システム等の機能全体の仮想化やリアルタイムシミュレーションといった新しい概念を含む点で異なるといえる。

近年デジタルツインが特に注目を集める理由として、以下があると考えている。

- ① センシング技術の高度化：高性能センサの小型化・低価格化により、これまで困難だった詳細な実世界データ取得が可能になった。特に光学・電波センシングの進化は著しく、新たな活用事例を生みだしている。
- ② シミュレーションの高速化：スパコンやエンド端末の高機能化が物理事象や振舞いのシミュレーションの高速化に寄与している。AI により複雑なシミュレーション計算を代替し高速化するサロゲートモデル^{*1}も注目を集めている。
- ③ 3次元可視化技術の進化：AI 需要により GPU の性能向上が図られ、3次元可視化エンジンの性能やユーザビリティが向上している。
- ④ AI によるデータ需要の増加：機械学習は一般に大量の学習データを必要とし、データハングリーといわれる。現実世界を模倣した仮想世界ではデータを自由に生成でき、AI の学習やチューニングに活用できる。

筆者が主宰する大阪大学・情報科学研究科のモバイ

^{*1}サロゲートモデルは、従来の物理計算モデルをニューラルネットワークで代替しより高速に結果を出力する AI モデル。



図1 CPS とデジタルツイン

ルコンピューティング講座、および理化学研究所・計算科学研究センターの大規模デジタルツイン研究チームでは、都市の主たる構成要素である人や車両の行動や振舞いをセンシング・モデル化し、スマートコミュニティ、スマートビルディング、高度交通システムなどのデジタルツイン化を図る技術を開発している。本稿ではそれらを紹介し、最近取り組んでいる統合型センシング・通信技術 (ISAC) の研究開発も紹介する。

人間行動・交通のデジタルツイン

① コミュニティのデジタルツイン

コロナ禍を機にコミュニケーションの重要性が改めて認識され、高齢者の孤立や家族間の分断を防ぐ試みの重要性が増しているが、自然な空間共有を情報通信技術で実現できれば、物理的距離を埋めて人と人とのつながりを構築・維持できる。今後の Beyond 5G 通信や 6G 通信による高速無線ネットワークのメリットを活かした実用化が望まれる分野である。

我々は、個人の生活空間を直接センシングし、適切なプライバシー制御のもとでそれを仮想空間に再現し、共有することでコミュニケーションを促進する技術の設計開発を情報通信研究機構 (NICT) の委託研究として実施している。同技術では、深度カメラや LiDAR、RGB カメラを組み合わせて空間を立体センシングし、得られた 3 次元点群データを遠隔の家族や知人、あるいはコミュニティに送り届ける。3 次元点群はモノや人ごとに分離され、どのモノや人を誰にどのような品質で見せてよいかを細かく制御することで、自身のパーソナル空間情報を安心して提供できる点が特長である。

図 2 は 2023 年 11 月～12 月の 11 日間に大阪駅前前の展示施設で実施したデモの様子である。ソロキャンプに出掛けた人が、家のリビングで寛ぐ知人や家族と仮想空間を共有し、離れた場所でも程よいコミュニケーションをとれるといったシナリオである。センシングした 3 次元点群データは相手側に 3 次元データとして表示され、VR ゴーグルなどを通じて自由な視点で見ることができる。自分側の空間も同時にセンシングされ、仮想空間上で双方の空間がリアルタイムに重畳される。これによりあたかも一緒にキャンプをしているかのような空間共有感や臨場感も味わえる。プライバシー保護のため、人やモノの色情報を削除し単色の点群に変えたり消し去ることも自由にできる。この最新のデジタルツインによる未来の空間共有を述べ 333 名に体験してもらった。なお、3 次元空間データは無圧縮

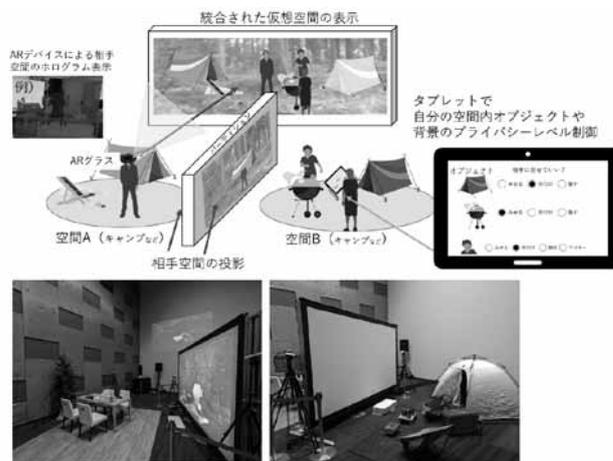


図 2 空間共有デジタルツインのデモの様子

で 360Mbps 程度の通信帯域を要するが、人やモノの重要度や移動頻度に応じた適応的圧縮技術を開発し、4G (LTE) 環境でも十分低遅延 (200ms 程度) でデジタルツインを実現できている。

② 大学キャンパスのデジタルツイン

我々は、大阪大学箕面キャンパスにおける人流のデジタルツイン化に取り組んでいる。大阪大学で文部科学省 Society 5.0 実現化研究拠点支援事業およびダイキン工業株式会社との共同研究を通じ、大阪府箕面市の北大阪急行箕面船場阪大前駅すぐのキャンパスビル 1 階から 6 階にかけて、70 台以上の LiDAR を廊下や公共スペースに設定し (図 3)、リアルタイムで仮想空間に人流を再現するデジタルツイン技術を開発している。本技術は我々の研究グループが開発してきた「ひとたび」とよばれるトラッキングシステムを基本としている。

図 4 は同キャンパスビルの複数フロアを移動する人々をこのひとたびの技術で捉え、リアルタイムに可視化した例である。LiDAR は物体の様々な表面点までの距離を cm オーダーで正確にリアルタイム測距できるため、その中から人間だけを認識し、その移動軌跡をリアルタイムに処理・導出して可視化している。

このデジタルツインは、リアルタイムに匿名の人々の位置や移動を再現するだけでなく、現実世界と仮想

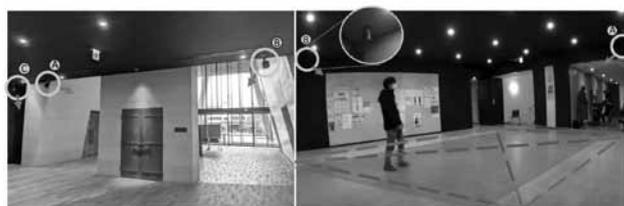


図 3 LiDAR の設置例

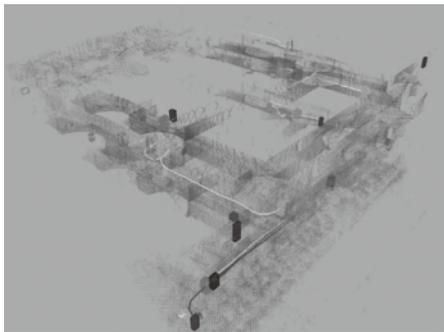


図4 キャンパスの歩行者人流の可視化

世界のカップリングに関する新しい概念を導入している。具体的には、現実世界を移動する人々が本技術で仮想空間にその行動を再現される際、自身の持つスマートフォンと仮想空間で再現された匿名人物との紐づけを行うことで、仮想空間上で自己位置を用いたアプリケーションを実現するものである。これにより知人や学生・教員が仮想空間内でコミュニケーションしたり、ナビゲーションすることを可能にし、よりきめ細かな空調制御やインセンティブによる食堂混雑回避など多くの新しいサービスも創り出せる。現実世界と仮想世界の新しいインタラクションを促進すると期待される。

③ 車両デジタルツイン

より大規模な都市環境のデジタルツインについても研究を行っている。ここでは、ある区域（地域や都市区画）の一部の道路における車両通行をその道路脇に設置した路側カメラで捉え、AI解析で得られる車両の通行パターンを解析しシミュレーションと組み合わせることで、区域全体の車両の行動を再現するアプローチについて紹介する。兵庫県豊岡市の出石地区を対象に、同市を観光で訪れる観光客で混雑する道路状況を再現し、駐車場の分散や適切な誘導のための基礎データを構成することを目的とした実証も行い、そのデジタルツインを構成している。

図5に対象地区の道路ネットワークをモデル化した様子を示す。この地区において、図6に示すように域内7道路と4駐車場にカメラを設置し、車両検知と車両トラッキングを適用することでカメラの視野範囲の車両の移動方向と通過台数、および駐車場の入退場が把握できる。これらのデータと道路ネットワークを組み合わせ、可能性のある移動経路を推定し、シミュレーションで再現する。

図7はシミュレーションで再現された車両流と実際の車両の写真を並べたものである。これは地域中心部

の道路渋滞を捉えたものであるが、シミュレーションでもその混雑が再現されていることが見て取れる。



図5 出石地区の道路ネットワーク

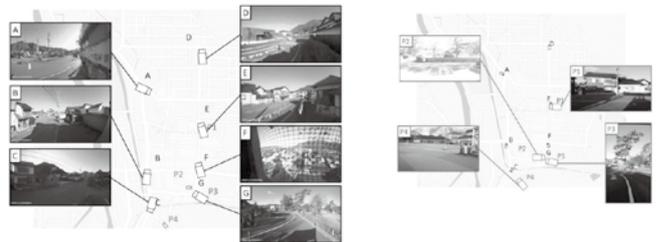


図6 カメラによる車両センシング



図7 現実空間の渋滞と仮想空間での再現

人や車両のデジタルツインにおける課題

今後、5Gや6Gにおける電波効率の向上が図られることで、大容量の動画像や点群を扱う人や車両のセンシングによるデジタルツインの技術的な実現性が高まると期待される。車両デジタルツインの有望な応用先として自動運転があげられており、今後は路側機やインフラと車両が通信するV2I (Vehicle-to-Infrastructure) により、車両の位置や速度情報を把握することで自動運転車両のスムーズで安全な制御を支援することが考えられている。一方で、車載機器

を有さない車両を把握するため、カメラ、レーダー、LiDAR などによる物体センシング機能を備えたインフラ型のセンシングも重要となる。国交省は車載・インフラ協調型（路車協調型）の自動運転支援を目指し、交差点センサの技術仕様策定などを目指しているが、これらの普及には膨大なコストが想定される。

B5G における統合型センシング・通信技術

これに対し我々は、情報通信研究機構（NICT）の「革新的情報通信技術研究開発委託研究」を受託し、B5G において近年注目を集めている統合型センシング・通信技術（ISAC）を活用するプロジェクト（Integrated Sensing and Communication におけるエッジモバイルコア統合型制御方式の研究開発、代表：内山彰准教授）を開始している。KDDI 総合研究所との協働プロジェクトであり、主に車両を対象に、通信用の電波やその通信インフラを車両の速度や存在検知に活用し、いわゆる一石二鳥を目指す新技術を開発することを目指している。

B5G では、高周波数や広帯域幅の利用が可能のため、ISAC は注目を集めている。ISAC はレーダーなどの無線センシングと無線通信を同一基地局で実現することでハードウェアコストの削減と新たなサービスの創出、センシング結果のフィードバックによる通信品質を可能とする。特に、都市デジタルツインにおいて、遍く整備された通信インフラを利用したセンシングが実現できればコスト面でのメリットは大きい。現在、ITU、3GPP、IEEE など通信のみならずセンシングに関連する標準化も進められており、期待の大きい技術である。

これに対し本プロジェクトでは、電波伝搬効果を考慮したセンシングと通信の適応制御方式を開発す

（要素技術・シーズ087）Integrated Sensing and Communicationにおけるエッジモバイルコア統合型制御方式の研究開発

研究概要：Beyond 5G (B5G) で注目されるIntegrated Sensing and Communication (ISAC) において、通信とセンシング双方の性能要求を考慮した周波数資源の時空間的な割り当てやセンシングの制御方式を開発するとともに、エッジモバイルコアでのISACストリームデータ計算基盤の設計および制御方式の開発を行う。また、大阪大学に整備されているNICT B5Gテストベッドなどを利用してISACアプリケーションを開発し、実証実験による有効性検証を行う。

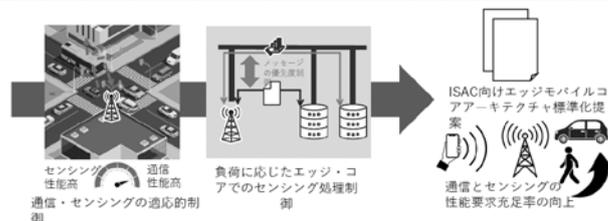


図 8 ISAC プロジェクトの概要

る（図 8）。複数送信機からの電波干渉やマルチパスなどを考慮したセンシングモデルを考案し、近似アルゴリズムなどを用いて、アプリケーションに応じた通信性能およびセンシング性能を達成するための通信用電波、センシング用電波の時空間割り当てを適切に制御する。また、コアネットワークやエッジノードでの ISAC 制御処理用の資源配置最適化技術を開発し、センシングの計算処理を効率よく行うためのエッジ計算基盤を導入する。シミュレーションおよび実証実験により ISAC 向け実証環境の構築と検証を行うことを目指している。実証実験では大阪大学に整備されているローカル 5G テストベッドや NICT が整備している B5G モバイル環境テストベッドを活用しながら技術効果进行评估する。

おわりに

本稿では特に人や車両のセンシングによる都市デジタルツインの実現技術を紹介し、B5G における電波活用を目指した ISAC プロジェクトについて紹介した。

大阪大学大学院情報科学研究科 モバイルコンピューティング講座（山口研究室）

人や車両・環境を捉えるセンシングによる行動院式や状況理解技術を中心に、サイバーフィジカルシステムやデジタルツインの実現技術を実施。
<https://mc.net.ist.osaka-u.ac.jp/ja/>

理化学研究所 計算科学研究センター 大規模デジタルツイン研究チーム（兼務）

「富岳」を活用した大規模デジタルツイン計算基盤を実現するための研究開発を実施。
https://www.riken.jp/research/labs/r-ccs/largesc_digitaltwin/



研究室の新人歓迎 BBQ の様子
 (2024 年 5 月撮影、一番右で立っているのが筆者)

サブテラヘルツ無線通信の研究

～ 性能限界に挑戦 ～

テラヘルツ無線通信の研究に着手して四半世紀近くになる。本稿では大阪大学での最後の3年間で取り組んだ挑戦的研究について紹介する。

東京大学大学院理学系研究科
(大阪大学大学院基礎工学研究科・産業科学研究所 (2024年9月まで))
永妻 忠夫 (大阪大学名誉教授)



早春の深夜、大学の無人の廊下を使った無線伝送実験

はじめに

我が国では、2020年より第5世代移動通信システム「5G」のサービスが始まった。現在、次の世代となる「Beyond 5G/6G」に向けた研究開発が、2030年代の商用化を目指して、世界中で活発化している。「Beyond 5G/6G」で目指している性能指標のひとつである「高速・大容量」化は、「5G」の10倍から100倍、すなわち、100Gbit/s～1Tbit/sもの伝送速度である [1-3]。これを実現するための有効な手段のひとつとして、広い周波数帯域を確保できる100GHz～300GHz (サブテラヘルツ) の電波の利用が期待されている。さらに高速化のためには、周波数利用効率の高い多値変調方式を用いることが有効である。

ところで、筆者は、2024年3月に大阪大学を定年退職し17年間にわたり主宰してきた研究室を閉じた。これまで本誌には、テラヘルツ波を用いた無線通信の話題を2度寄稿させていただいた [2, 3]。本稿で紹介する内容は、その集大成として、研究室を閉じるまでのおよそ3年にわたって行った研究で、超多値変調によって世界最高の伝送速度の実現を目指したものである。

多値化のブレークスルーへの挑戦

筆者は、国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究、Beyond 5G 研究開発促進事業機能実現型プログラムにおける一般課題「超低雑音信号発生技術に基づく300GHz帯多値無線通信に関する研究開発」に、2021年度 (後半) より約3年間にわたり代表研究者として取り組んだ。

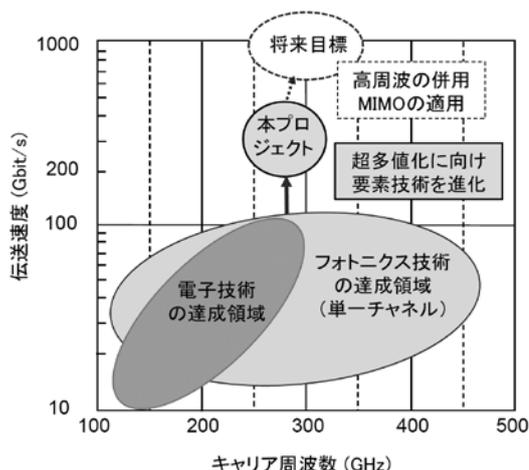


図1 研究開発の目標

図1は、テラヘルツ波を利用した無線通信技術の2021年当時の状況 (キャリア周波数と単一チャネル当たりの伝送速度の関係) と本研究開発の目標を示したものである。マイクロ波と光波と境界領域に位置するテラヘルツ波の無線通信応用の研究開発では、電子技術に基づく送受信システムと、レーザ、光変調器、フォトダイオードといったフォトニクス技術を活用した送受信システムの2通りのアプローチがしのぎを削っている。これまで後者が先行し、やがて電子技術が追いつくという流れの中、両者ともおよそ200GHz～400GHzの周波数帯を利用し多値変調技術 (後述) を導入することによって、単一チャネルで100Gbit/s内外の伝送速度が達成されていた。

筆者の研究室では、フォトニクス技術を活用した送受信技術に軸足を置き、主に300GHz帯と600GHz

帯の通信応用の研究開発に取り組んできた。そこで、本委託研究のプロジェクトでは、フォトニクス技術を活用したアプローチにおいて超多値化を阻む限界の打破に挑戦し、最終的に、300GHz帯で伝送速度200 Gbit/sで伝送距離200mを達成することを目標とした。より具体的には、サブテラヘルツ信号源の低雑音化、送信器の高出力化、受信器の高感度化のための要素技術を開発するとともに、高利得アンテナを用いた「ニアフィールド（近傍界）」領域（フレネル領域とも呼ぶ）無線伝送技術を開発した。

多値化を阻む要因

キャリア周波数信号（搬送波）の振幅、位相、周波数を、情報信号に応じて不連続に変化させることをデジタル変調と呼び、一つの状態が続いている時間帯をシンボルと呼ぶ。また、単位時間あたりに変化するシンボルの数をシンボルレート（単位はBaud）と呼ぶ。多値変調とは、1つのシンボルに多くのビットを割り当てて、1回の変調で多くの値を表現できるようにするものである。例えば、16QAM（Quadrature Amplitude Modulation: QAM）とは、1つのシンボルで4bitの情報（ $16=2^4$ ）を送ることのできる変調方式である。シンボルレートとビット数を掛けたものが、ビットレート（単位はbit/s）に対応する。

このデジタル多値変調（送信側）ならびに復調（受信側）の正確さを視覚的かつ定量的に表現する手段として、図2に示すような「コンスタレーション」という図面が用いられる。デジタル変調による情報信号点を2次元の複素平面上に表現した図で、横軸を搬送波と同じ位相の軸（I軸と呼ぶ）、縦軸を搬送波と直交する位相の軸（Q軸と呼ぶ）としている。ひとつのシンボルで0か1のどちらか1bitを送る場合を、BPSK（Binary Phase-Shift Keying）と呼ぶ。ある時点のシンボルでの信号点は、コンスタレーション上に配置された2点の内のどちらか1点に存在する（図2(a)）。これに対し、QPSK（Quadrature Phase-Shift Keying）では、一度に2bitの信号を送ることができ、コンスタレーション上で信号点が4つ存在する（図2(b)）。図2(c)が、上述の16QAMのコンスタレーションであり、4bitの情報が合計16個の等間隔にならんだ信号点群により表現されている。

送信時と受信時にコンスタレーションが変化しないことが理想であるが、実際は、送受信器を構成する回路の雑音、非線形性、非対称性などが原因で信号点の位置がずれ、各信号点を正しく判別できなくなる。す

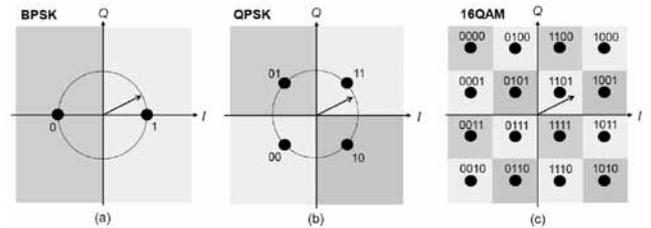


図2 コンスタレーションダイアグラムによる多値変調の表現法

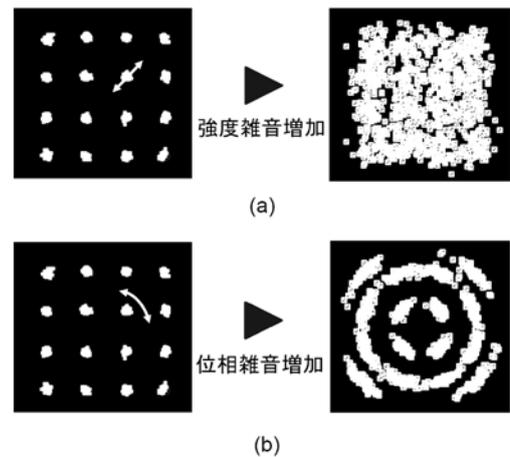


図3 キャリア信号発生器の強度雑音と位相雑音がコンスタレーションに及ぼす影響

なわち、ビット誤りが生じる。図3は、キャリア信号（送信側）あるいは局部発振器信号（受信側）の強度雑音や位相雑音が増加した場合のコンスタレーションの劣化を示したものである。そこで、本研究プロジェクトでは、多値化を極限まで追求するうえで、その根源となるサブテラヘルツ信号源の超低雑音化に挑戦した。

フォトニクス技術を用いたサブテラヘルツ信号の生成

マイクロ波発振器では、通常、高いQ値（ $10^5 \sim 10^6$ ）を持った水晶を誘電体共振器として使い発振周波数を安定化している。これに対し、光ファイバによる共振器のQ値は3桁以上高い（ $\sim 10^9$ ）。そこで異なる2つの波長（周波数）のレーザー光を光ファイバ共振器にロックさせ、このレーザー光をフォトダイオードで光電変換すると、2つの波長（周波数）差に対応した、極めて高安定の高周波信号を生成することができる。この原理を利用したサブテラヘルツ信号発生器が図4に示す「ブリルアン発振器」である [4]。同図では、2光波の周波数差を300GHzに設定することで300GHzの信号を発生している。詳細は、文献 [4] をご覧い

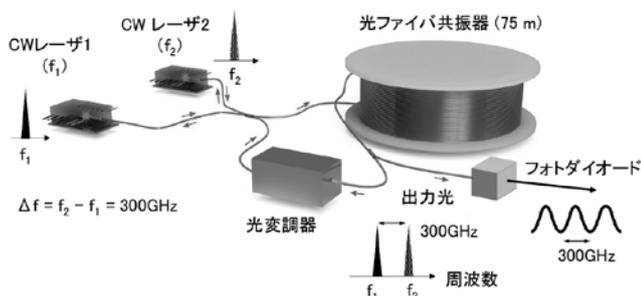


図4 フォトニクス技術を用いたサブテラヘルツ信号発生(ブリルアン共振器)

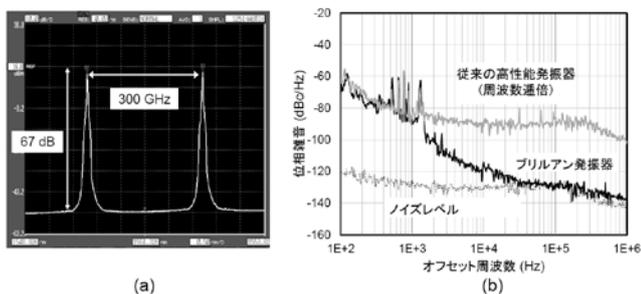


図5 ブリルアン共振器の光スペクトラム(a)と位相雑音特性(b)

ただきたい。

最も重要な結果は、他に追従を許さない優れた振雑音性能と位相雑音性能である(図5)。光信号のCN(キャリア対雑音比)は67dBに達し、位相雑音は、従来の最高性能シンセサイザと周波数通倍器を用いた場合よりも30~40dB低い。

無線伝送実験

上述の超低雑音発信器を送信器(キャリア周波数 f_{RF})と受信器(局部発振器周波数 f_{LO})の双方に用いたヘテロダイン検波システムのブロック図を図6に示す。復調は、リアルタイムオシロスコープに内蔵されているオンライン・デジタル信号処理を用いた。また、図7は、このシステムを用い、大学の廊下(110m)を利用して214m伝送を行った様子である。送受信器を廊下の片方の端に配置し、反対側に反射鏡をおいて、200m以上の伝送距離を確保した。2台のブリルアン共振器は、廊下の中央の実験室内に置き、そこから光ファイバケーブル(100m長)を使って送信器および受信器のフォトダイオードまで光信号を導いた。

214m伝送に用いたアンテナは、利得60dBiのカセグレンアンテナ(開口径:520mm)である。遠方界の距離 d は、 $d=2D^2/\lambda$ (D :アンテナ開口径、 λ :波長)で与えられ、周波数275GHzにおいて開口径520mm

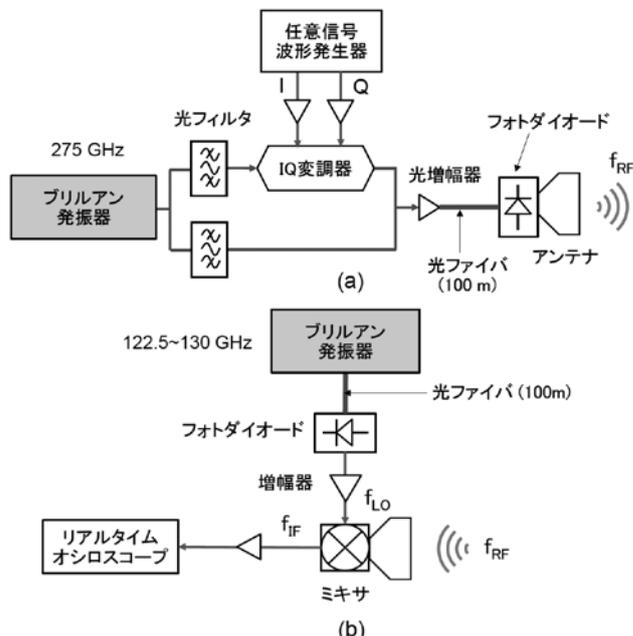


図6 フォトニクス技術に基づく低雑音信号発生器を送受信に用いた300GHz帯無線通信システム(a)送信器、(b)受信器



図7 214m伝送実験の様子

のアンテナを用いた場合、 d は約500mとなる。従って、214mの伝送距離では近傍界(フレネル領域と呼ぶ)となり、受信電力の距離依存性が大幅に緩和された効率の高い伝送が可能となる[5,6]。

図8および図9(a)は、伝送後のコンスタレーションである。図8において、Back-to-back(近距離)で252Gbit/s(64QAM)、214m伝送で220Gbit/s(32QAM)もの伝送速度(単一チャネルでの世界最高値)が得られた。図9の256QAM変調では、256ポイントの信号点が明瞭に観測できている。これは、40dBを超える受信SNが得られていることから妥当な結果である。300GHz帯無線通信において、256QAM変調で100Gbit/sを超える性能(120Gbit/s)を達成することができたのは、超低雑音信号源を送受信器に用いた本研究が初めてである。

	32QAM	64QAM
B to B (15 mm)	235 Gbit/s (47 Gbaud) EVM: 11.1% BER: 1.7×10^{-3}	252 Gbit/s (42 Gbaud) EVM: 11.1% BER: 3.22×10^{-3}
214 m	220 Gbit/s (44 Gbaud) EVM: 12.29% BER: 3.75×10^{-3}	180 Gbit/s (30 Gbaud) EVM: 8.66% BER: 3.44×10^{-3}

図8 32QAM および 64QAM 変調時の最大伝送速度 (Back-to-back と 214m 伝送)

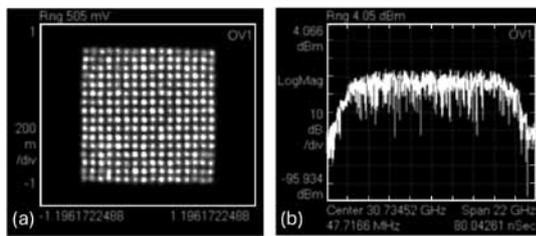


図9 256QAM (120Gbit/s) のコンスタレーションと受信信号の SN

むすび

本稿で紹介した研究プロジェクトでは、サブテラヘルツ信号発生器の低雑音化だけでなく、送受信用半導体デバイスの高性能化についても挑戦し、フォトダイオード出力の一桁向上、受信器用ミキサ感度の一桁向上を達成している [7]。ぜひ、新たに開発した半導体デバイスや諸技術を、テラヘルツ無線通信やセンシングの研究開発、さらには基礎科学の分野で役立てていただければと思っている。

振り返ると、200Gbit/s、200m 伝送を高品質で実現するという目標を研究計画書で公言したものの、波乱万丈で緊張感に包まれた3年間であった。ゴールにたどり着いたのは、研究室を閉める、およそひと月前のことだった。

2007年4月に大阪大学の教員として着任する5か月前の12月、私は、採用面接の場で、尋ねられたことをよく覚えている。当時企業の研究者であった私に、「大学では、企業と違い、研究を行うのは素人の学生である。企業でやっていたような研究はできないと思うが、大学でどのように研究を進めようと考えているか」という問いかけだった。しかし、今私は、学生の皆さんが、それが誤解だったこと、杞憂だったことを証明してくれたと思っている。20代前半から30歳に

なるまでの若者には、計り知れないエネルギーがある。挑戦的な研究を通して人間本来の成長欲求が刺激を受け、社会人として旅立った後も、高いモチベーションを維持し続け、自身の周りに存在する、様々な限界に挑戦して欲しいと願っている。

さて話は変わるが、本稿で紹介したプロジェクトと並行して3年余にわたり挑戦した、テラヘルツ波応用に関するもうひとつの研究テーマがある。NEDOポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業「ポスト5G半導体のための高速通信対応高密度3D実装技術の研究開発」において、「高周波パッケージ導波路コネクタ技術開発」というテーマで、300GHz帯を使ったインターコネクタ(有線通信)の研究を担当した[8]。大阪大学では、産業科学研究所のフレキシブル3D実装協働研究所(菅沼克昭所長)が実装技術を主導し、そのご縁で、2024年9月まで産業科学研究所に籍を置かせていただいた。ミリ波、テラヘルツ波の応用は、このような通信分野に加えて、レーダやセンシングへの応用が極めて有望である。今後、通信とセンシングが融合した形で産業化が進んでいくものと期待される。すなわち、同じ周波数帯の電波を共存させて活用する時代になるであろう。総務省をはじめ、電波行政に携わる方々の益々のご指導とご支援をお願いしたい。

謝辞

本稿で述べた成果は、NICT委託研究 Beyond 5G 研究開発促進事業機能実現型プログラム一般課題 (JPJ012368C-00901) により得られたものである。本プロジェクトにおいて多大な貢献をいただいた大阪大学の前川慶介氏、Weijie Gao氏と大学院生の皆さん、大竹秀幸氏をはじめとするIMRA AMERICA社の関係各位、三尾克典氏、湯本潤司氏、伊藤弘氏ほか東京大学の関係各位、加藤加利氏ほか九州大学の関係各位に心より感謝の意を表する。

<参考文献>

- [1] 永妻忠夫, “フォトニクス技術を用いた超広帯域テラヘルツ通信,” 電子情報通信学会誌, vol.106, no. 6, pp. 470-478, 2023.
- [2] 永妻忠夫, “テラヘルツ波の情報通信への応用,” 電波技術協会報, 2014.1, no. 296, pp. 40-43, 2014.
- [3] 永妻忠夫, “テラヘルツ無線技術の最近の進展,” 電波技術協会報, 2020.11, no. 337, pp. 10-13, 2020.
- [4] B. Heffernan, J. Greenberg, T. Hori, T. Tanigawa, A. Rolland, “Brillouin laser-driven terahertz oscillator up to 3 THz with femtosecond-level timing jitter,” Nature Photonics, in printing, 2024.
- [5] 唐沢好男, “電波研究の玉手箱 第1講 フリスの伝達公式への温故知新,” 電波技術協会報, 2020.7, no. 335, pp. 40-43, 2020.
- [6] T. Nagatsuma and K. Maekawa, “Single-carrier over 200-Gbit/s and 200-m transmission in 300-GHz band,” 2024 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2024.
- [7] T. Nagatsuma, W. Gao, Y. Kawamoto, T. Ohara, H. Ito, T. Ishibashi, “Si- and SiC-based integration platforms for generation, transmission, and detection of THz signals,” 2024 Intern. Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP 2024), Tu2.1, 2024.
- [8] D. Ichikawa, Y. Kawamoto, M. Tanaka, S. Murakami, W. Gao, M. Fujita, and T. Nagatsuma, “Terahertz silicon waveguide interconnections for on-chip communications,” 2024 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2024.

こころを持った AI、 CiNet Brain の開発を目指して

脳情報通信融合研究センター (CiNet) は脳と情報通信の融合研究を旗印とする世界に例のない研究センターである。大阪大学と情報通信研究機構が協力して運営していることも大きな特徴である。その最終目標は、「こころ」を持った AI、CiNet Brain 4.0 の開発である。



吹田キャンパスの CiNet
最先端の脳活動計測装置 (MRI スキャナー 4 基と MEG など) を備える
脳と情報通信の融合研究拠点として 2013 年に整備された (<https://cinet.jp/japanese/>)

大阪大学大学院生命機能研究科 / 医学系研究科・教授
大阪大学 / 情報通信研究機構 脳情報通信融合研究センター・センター長
北澤 茂

情報理論は意味を捨てた

情報理論を創始した Shannon の原典 [1] の冒頭は大変興味深い。Shannon は言う。

「しばしばメッセージは意味を持っている。つまり、それらは物理的な対象物、あるいは概念的なラベルと何らかのシステムに基づいて関連している。しかし、これらの意味的な側面は、工学的な問題において重要ではない。重要なのは、実際のメッセージが可能なメッセージの集合の中から選ばれた一つである、ということだ。」メッセージの番号だけを問題にして、意味は敢えて無視する、という宣言とともに情報理論はスタートした。

情報通信技術の歴史は信号の符号化と復号化の工夫の歴史

情報通信ではメッセージの意味はまずは捨象されて、無機的な「信号」とみなされる。これを通信の伝送路の性質に合わせて変換する。これが符号化である。送信された符号を受け取った受信側では、符号を元通りの信号に戻す。これが復号化、である。限られた伝送路の容量の中で、できるだけ正確に信号を伝えるにはどうすればよいのか。そのための符号化と復号化の技術が工夫され磨かれてきた (図 1 上段)。アナログ放送のラジオであれば、音波の波形はマイクで電気信号に変換されたのち、高周波の搬送波の振幅 (AM) や周波数 (FM) の変化に変調 (符号化) される。この電波が受信機で復号化されて音に戻る。FM 放送の方が AM 放送より音がきれいなのは、ノイズの影響

を受けにくい符号化だからだ。デジタル信号はもっとノイズに強いので、符号化のビット数を上げさえすれば、さらにきれいな音が伝達される。

fMRI 法で脳を符号化器として用いる

さて、脳も信号を符号化する。目、耳、皮膚、鼻、舌、前庭器官から入力される視覚、聴覚、触覚、嗅覚、味覚、平衡感覚の信号は、末梢神経といくつかの神経核を経て、大脳皮質の広範な領域の活動を引き起こす。神経細胞 (ニューロン) は全か無か、つまり 1 か 0 か、の活動電位を生じるから、全体として莫大な次元数の符号化器とみなすことができる。しかし、ヒトの場合、ニューロン一つ一つの活動を記録するには限界がある。

そこで用いられるのが、小川誠二博士が発見した BOLD (Blood Oxygenation Level Dependent) 信号を使った機能的磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging, fMRI 法) である [2]。この方法は脳活動に伴って活動領域に酸素を含んだ新鮮血が流れ込み MRI 信号が増強されることを利用している。そのため、時間分解能は秒のオーダーである。一方、空間分解能は、初期には 3mm 角程度、最近では 1mm 角程度まで向上している。脳の容積を 1.3 リットルとすると、この装置を使えば、全脳の活動を 130 万個程度の小領域 (ボクセル) に分解して 1 秒ごとに符号化できることになる。1 ボクセルにはおよそ 1 万個のニューロンが含まれているので、ニューロンの局所集団活動を時間平均した信号と考えて差支えない。

因みに、小川博士は CiNet のアドバイザーを務め

てくださっている。そのおかげもあり、CiNetには研究専用のMRIが4台も装備されている（冒頭の図）。

さて、130万ボクセルの「符号」から何を「復号」するのか、それが問題である（図1中段）。

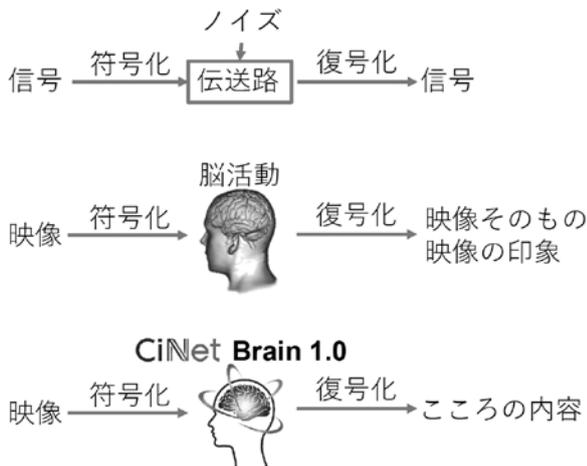


図1 CiNet Brain 1.0

上：古典的な情報通信理論ではできるだけ正確に速く大量の信号を送ることを目的として、伝送路の性質に合わせた符号化と復号化を工夫した。

中：fMRIで計測した脳活動を「符号」として用いる研究が発展した。

下：大量の脳活動データを使って脳活動を推定する符号化モデル(CiNet Brain 1.0)の開発に成功した。これを使えば、映像を見た人が抱く印象(こころの内容)の推定が可能になる。すでに商用展開が行われ200社以上の利用実績を誇る。

見せた画像を復号化する

脳のfMRI信号から、そのヒトが何を見ていたかを世界にさきがけて再現して見せたのが、神谷之康博士のチームである[3]。2005年の研究では、後頭葉の低次視覚野の領域のfMRI信号から、実験参加者が見ていた縞模様の方角(傾き)を当ててみせた。2013年からCiNetで活躍している西本伸志博士は、2011年に、留学先のGallant博士のラボで、脳活動から見ている動画を再現(復号化)して、大きな反響を呼んだ[4]。

画像につけたラベルを復号化する

さらにGallant博士のグループは映像につけた名詞や動詞のラベルを復号化することに成功した[5,6]。映像のラベルはShannonが言う「概念のカテゴリー」なので情報理論が一度捨象した情報の意味を回復する試みとみなすこともできる。

西田と西本はさらにこれを発展させて、テレビコ

マーシャル(CM)の映像につけられた「説明文」を推定することに成功した[7]。たとえば、京都の旅を勧めるCMの「説明文」は「二人の女性が京都観光しているようだ。伝統的な街並みがとても美しい。週末の旅行のようだ。私も行ってみたい。」となっている。説明文を書いたのは46名の一般人なので、説明文にはCMを見たときの一般人の印象が反映されている。単なる名詞や動作だけでなく、「伝統的な」とか「美しい」という性質や状態、さらには「私も行ってみたい」という意欲も表現されていることに注目されたい。このCMの目的は視聴者に京都の街並みと旅行の魅力伝えて、旅行したいという気持ちを喚起することだから、得られた「説明文」はCMの製作者にとってまさに狙い通りの内容といえるだろう。西田と西本はfMRI脳活動からCMを見た人が抱く印象や気持ちを表現する言葉を推定することに成功した[7]。

CMを評価するためにfMRIに入るのは大変だ

CMを評価するためにこのシステムを使うには、数名の参加者にMRIスキャナーの中でCMを見てもらい、脳活動を計測する必要がある。しかし、これでは労力の節約にはならない。印象を言葉で答えてもらう方がずっと楽だ。そこで発想を転換した。MRIに入ってもらわなくても、標準的な人の脳活動を推定できないだろうか。幸い、CiNetには動画視聴時の脳活動データが大量に蓄積されていた。これを活用して、動画を見せたときのfMRI脳活動データを推定するモデルを作り上げた[8]。これがCiNet Brain 1.0の誕生である(図1下段)。このシステムさえあれば、CMを見たときの標準的なfMRI脳活動を推定し、推定された脳活動からCMの「印象」を復号化することが可能となる。CiNet Brain 1.0があれば従来のモニター評価は不要になる。

fMRIの脳活動には心の内容も反映されている

「fMRIで計測した脳活動」を介して印象を復号化するのは、何やら面倒に見えるだろう。そんな面倒な中間表現を省いて、映像から映像のラベルを一気に推定するモデルを機械学習で作ってしまえばよいではないか、と思われるかもしれない。しかし、実は深い意義があるのだ。

実際に畳み込み神経回路(Convolutional Neural Network, CNN)で映像から「説明文」を推定する機械学習モデルを作成したところ、その性能はCiNet

Brain 経由の2段階変換に及ばなかった [8]。数万次元の fMRI 信号で符号化した脳活動には、単純な物理的な刺激の情報だけでなく、そこから私たちの心が感じ取っている世界の質感・意味・内容が豊富に含まれている。我々の心の内容が反映されているからこそ、適切な変換（復号化）を施せば時には本人が気づきもしない心の内側まで読み出すことができるのである。

CiNet Brain 1.0 はすでに社会実装されている

CiNet Brain 1.0 は実は NTT データ株式会社との共同研究によって生み出された。NTT データの側では NeuroAI という名前が付けられていて、商用展開が進んでいる。すでに CM 評価を始めとして 200 社以上の利用実績がある (nttdata-neuroai.com)。

CiNet Brain 2.0 では時間分解能を向上させて五感を持たせる

先述の通り、CiNet Brain 1.0 が立脚する fMRI 法の時間分解能はせいぜい 1 秒である。15 秒の CM 全体の印象評価としては十分な性能を発揮するものの、ロボットの運動制御ができるかと言えば、心もとない。CiNet Brain 2.0 では fMRI 信号だけでなく時間分解能に優れた脳磁図計 (Magnetoencephalography, MEG) や、成瀬らが開発しているポータブル脳波計 (冒頭の図, Electroencephalography, EEG) のデータも取り込んで、時間分解能を向上させる。すでに、MEG を利用して、脳波の 7 割のパワーを占める 10Hz の α 波に関する研究が進んでいる。例えば、天野らは、脳の中では別の場所で処理される「動き」と「形」の情報 α 波の 1 周期ごと (0.1 秒ごと) に矛盾が生じないように調整を受けていることを示した [9]。10Hz の α 波は脳の情報処理を同期させるクロックとして機能している可能性がある。

さらに視覚と聴覚に限られていた入力を、触覚・味覚・嗅覚を含む 5 感へと拡張させる。これまで視聴覚に比べると研究が少ないヒトの味覚や嗅覚に関する研究も進んでいる。最近黄田らのグループは、磁場の強度が 7T (病院にある MRI は 1.5T または 3T。磁場強度に比例して信号がきれいになる。) である高感度・最新鋭の MRI を活用して「言語情報」が同じ匂い物質に対する嗅覚皮質の応答を変えることを示して注目を集めた [10]。これらの基礎研究の成果を 2.0 へのバージョンアップに惜しみなく投入する。

CiNet Brain 3.0 では運動制御を実現する

実は CiNet は運動機能の研究でも世界レベルにある。運動学習に必要な誤差信号に関する研究成果は世界標準の神経科学の教科書 Principles of Neural Science 第 6 版 (2020) に図入りで掲載されている [11]。最近羽倉らは、練習の成果を本番でも発揮するには、本番と同じような不確実な状況で練習すべきであることを示して、日本心理学会国際賞を受賞した [12]。内藤らのグループは老化とともに衰える身体能力を回復するための画期的な訓練法を開発している [13]。鈴木らのグループは硬膜外電極で記録した皮質脳波 (Electrocorticography, ECoG, 冒頭の図) を使って外部機器を制御する Brain Machine Interface (BMI) の開発研究を行っている [14]。実用化された暁には、運動障害に苦しむ人たちの福音になる技術開発である。ヒトは、静かにテレビ番組を視聴するだけの存在ではない。運動してなんぼの動物である。CiNet Brain 3.0 には身体の運動制御機能を獲得させる。

CiNet Brain 4.0 = こころを持つ究極の脳型 AI

CiNet Brain 4.0 にはヒトと同様の「こころ」を持たせたい。ヒトの心については心理学の長い研究の蓄積があり、その守備範囲はまことに広い。CiNet のメンバーは時間知覚 [15]、社会性 [16]、顔認知 [17, 18]、などの多岐にわたる研究テーマについて、心理学的なアプローチと脳活動計測や計算論的手法を融合させた高度な研究を展開している。CiNet Brain 4.0 にはこれら一つ一つの「こころ」の機能を定義して、搭載していく。

情報最大化学習で脳型 AI に「こころ」を創発させる

しかし、無数とも思える「こころ」の機能を、一つ一つ搭載していくのではキリがない。一網打尽にする方法はないだろうか。

私たちが生まれてから「物心」がつくまでの発達のプロセスにヒントがあるに違いない。生まれたばかりの赤ん坊は文字通り「無心」に世界を眺めて、手足を動かして、泣いたり笑ったり、お乳を飲んだりしている。それが、いつの間にか、寝返りを打って、ハイハイして、立ち上がり、1 歳前後で「パパ」「ママ」などと言い始める。言葉も 1 語文が 2 語文、3 語文になり、3 歳にもなって生意気な口を利くころには「物心」が

ついている。100万枚のフラッシュカードで「ラベル」を教え込まなくても、心は勝手に育つのだ。

AIも同じだろう。脳によく似た人工神経回路を用意して、ヒトによく似た身体を与えて、家族に囲まれて過ごしていれば、自然と「こころ」を獲得するのではないか [19]。

今を時めく ChatGPT にも使われている Transformer は水平方向に延びる「注意」のメカニズムを備えた画期的な脳型 AI である [20]。その言語能力の高さは周知の通りである。実は Transformer には画像を入力することもできる。この場合は画像に対して注意を向ける [21]。この Transformer の注意をヒトが視線を向ける場所と比較して見たところ、通常の教師付学習で画像分類を学習した Transformer の注意はヒトとは随分異なっていた。一方、Facebook の Caron ら [22] が開発した DINO (Distillation with no label) 法と呼ばれる自律学習法で、画像から得られる情報量を最大化するような自律学習をさせると、ヒトにそっくりの場所に注意を向けるようになった。「顔」という概念を一切教えていないのに、ひとりでヒトの顔ばかり見るように「育つ」のだ [23]。ヒトの脳に似たハードウェアを持つ脳型 AI に、ヒトの発達過程と同じ「自律的」な学習をさせると「こころ」が創発する可能性は十分にある (図 2)。

CiNet Brain 4.0 開発の意義

フランス生まれの哲学者デカルトは、「こころは脳に宿る」と喝破した [24]。しかし、どのように宿るのかについては「後で述べる」と言い残したままである。脳型 AI にこころを宿らせようとする CiNet Brain 4.0 の開発は「こころが脳に宿る」とは何を意味するのか、その本質に現代的な回答を与える可能性がある。

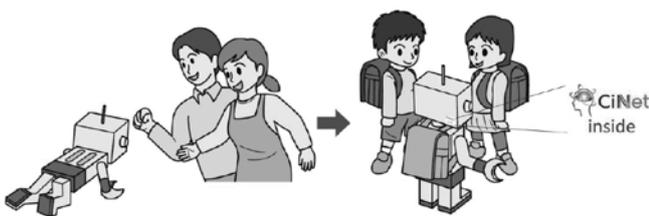


図 2 CiNet Brain 4.0

12層に限定した脳型 AI に身体を持たせ、できるだけヒトの生後発達に近い環境で自律学習させることで、ヒトに似た「こころ」を創発させる。ヒトに似た「こころ」と身体を持った脳型 AI は、安心・安全な AI としてヒトの日常生活に違和感なく入り込むことができるだろう。

また、CiNet Brain 4.0 の開発はヒト脳のサイズに限定して進める。現在の ChatGPT4 は数百層の巨大モデルだが、ヒトの脳は高々 12 層なので、12 層の脳型 AI にヒトのこころの機能を創発させる (図 2)。ChatGPT4 の 1/100 のサイズに小型化することで、圧倒的な省エネを実現する。また、数百層の AI に比べると能力も人並みにとどまるだろうが、実は、その「人並み」であることが安心につながる。いずれ発達するヒト型ロボットの頭には「CiNet inside」のシールが貼られている、そんな未来を実現させたい。

<参考文献>

- [1] Shannon, C.E. A Mathematical Theory of Communication Bell System Technical Journal 27, 379-423, 623-656 (1948).
- [2] Ogawa, S., Lee, T.M., Kay, A.R., et al. Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation Proc Natl Acad Sci U S A 87, 9868-9872 (1990).
- [3] Kamitani, Y. & Tong, F. Decoding the visual and subjective contents of the human brain Nat Neurosci 8, 679-685 (2005).
- [4] Nishimoto, S., Vu, A.T., Naselaris, T., et al. Reconstructing visual experiences from brain activity evoked by natural movies Curr Biol 21, 1641-1646 (2011).
- [5] Huth, A.G., Nishimoto, S., Vu, A.T., et al. A continuous semantic space describes the representation of thousands of object and action categories across the human brain Neuron 76, 1210-1224 (2012).
- [6] Huth, A.G., Lee, T., Nishimoto, S., et al. Decoding the Semantic Content of Natural Movies from Human Brain Activity Front Syst Neurosci 10, 81 (2016).
- [7] Nishida, S. & Nishimoto, S. Decoding naturalistic experiences from human brain activity via distributed representations of words Neuroimage 180, 232-242 (2018).
- [8] Nishida, S., Blanc, A., Maeda, N., et al. Brain-mediated Transfer Learning of Convolutional Neural Networks. in Thirty-Fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence 5281-5288 (2020).
- [9] Minami, S. & Amano, K. Illusory Jitter Perceived at the Frequency of Alpha Oscillations Curr Biol 27, 2344-2351 e2344 (2017).
- [10] Okumura, T., Kida, I., Yokoi, A., et al. Semantic context-dependent neural representations of odors in the human piriform cortex revealed by 7T MRI Hum Brain Mapp 45, e26681 (2024).
- [11] Inoue, M., Uchimura, M. & Kitazawa, S. Error Signals in Motor Cortices Drive Adaptation in Reaching Neuron 90, 1114-1126 (2016).
- [12] Ogasa, K., Yokoi, A., Okazawa, G., et al. Decision uncertainty as a context for motor memory Nat Hum Behav 8, 1738-1751 (2024).
- [13] Nakano, H., Tang, Y., Morita, T., et al. Theoretical proposal for restoration of hand motor function based on plasticity of motor-cortical interhemispheric interaction and its developmental rule Front Neurol 15, 1408324 (2024).
- [14] Kaiju, T., Inou, T., Hirata, M., et al. High-density mapping of primate digit representations with a 1152-channel microECoG array J Neural Eng 18 (2021).
- [15] Hayashi, M.J. & Ivry, R.B. Duration Selectivity in Right Parietal Cortex Reflects the Subjective Experience of Time J Neurosci 40, 7749-7758 (2020).
- [16] Tanaka, T., Yamamoto, T. & Haruno, M. Brain response patterns to economic inequity predict present and future depression indices Nat Hum Behav 1, 748-756 (2017).
- [17] Ota, C. & Nakano, T. Self-Face Activates the Dopamine Reward Pathway without Awareness Cereb Cortex 31, 4420-4426 (2021).
- [18] 中野珠実. 顔に取り憑かれた脳 (講談社, 東京, 2023).
- [19] 北澤茂. 医師・医学生のための人工知能入門 (中外医学社, 東京, 2020).
- [20] Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., et al. Attention Is All You Need. in NIPS 2017 (2017).
- [21] Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., et al. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale arXiv:2010.11929 (2020).
- [22] Caron, M., Touvron, H., Misra, I., et al. Emerging Properties in Self-Supervised Vision Transformers. in ICCV 9650-9660 (Montreal, 2021).
- [23] Yamamoto, T. & Kitazawa, S. Vision transformers mimic human attention through self-supervised learning but not through supervised learning. in Neuroscience 2024 PSTR245.222/U249 (Chicago, 2024).
- [24] Descartes, R. Treatise of Man (Prometheus Books, New York, 1662).

生体や脳に学ぶ情報通信技術

～ ゆらぎ原理からゆらぎ制御、ゆらぎ学習へ～

生体や脳は優れた環境適応性を持つ。地球上の生物はこれまで37億年の間、大小さまざまな環境の変動のなか変動に適応し生存し続けてきた。ここでは、そのような生物、特に人の脳の優れた特性に学ぶ情報通信技術について紹介する。

大阪大学大学院情報科学研究科
 情報通信研究機構／大阪大学 脳情報通信融合研究センター
 村田 正幸



研究の背景

本稿では、これまで取り組んできた「生体や脳に学ぶ情報通信技術」を紹介する。インターネットや移動体通信ネットワークは、情報通信技術の発展による高速化や大容量化に支えられ、今や水道や電気と同じように、日々の生活や社会活動、経済活動になくてはならない社会インフラになっている。しかし、ネットワーク障害は絶えず発生している。総務省から毎年公表されている「事故発生状況」[1]（通信サービス停止の継続時間や影響のあった利用者数の規模によって「事故」（＝障害）の程度が定義されている）を見ても、「重大な事故」は近年減少傾向にあるが、それより軽微な事故は毎年、数千、数万の規模で発生しており増加傾向にある。障害の原因として、単独の通信機器故障はわかりやすいが、ネットワークが大規模化し相互接続されるようになって、連鎖故障等、障害の影響が相互に及ぼし合う状況も生まれている。さらに、近年の通信機器のホワイトボックス化やネットワークのソフトウェア化によって、原因の特定はさらに難しくなっている。このような状況で誤動作のないソフトウェアを作ることは難しい。一言で言えば、「デバグの難しさ」である。さまざまな状況を予測して動作検証しなければいけないが、その予測自体が難しい。

障害があっても動作し続けるトラスタブルなネットワーク（信頼に値するネットワーク）をどのように実現するか、それが本稿で紹介する研究のきっかけであり、そのために生体や脳の動作原理に学ぶというアプローチをとった。冒頭に述べたように、生物はこれまでも環境変動に耐えて生存し続けてきた。予測困難な環境変動に対しても適応性を持つ生体に学んで情報通信システム的设计原理を見出したい、というのが出発

点である。

なお、予測の可能性から困難性、さらに不可能性の3つの段階を考えると、予測不能な状況が発生した場合に、故障があっても必ず動作し続けるシステムを作るとするのは少し無理がある。しかし、人の脳を考えると、まったく予測できなかった状況に対して最初是对応できなくとも、対策を学習していくことは可能である。それが後述する、人脳に学ぶ情報処理技術である。

以下、情報ネットワークを対象とした環境変動に適応的に動作する「ゆらぎ制御」と、それを拡張して従来の機械学習技術に比して飛躍的な計算時間短縮と省エネを実現する「ゆらぎ学習」について紹介する [3]。いずれも、時間変動のある環境に対して適応的に動作して解発見を行うという点が共通する。

脳や生体の環境適応性：ゆらぎ原理

生体は、分子レベルから細胞・個体レベルに至る階層構造を持ち、動的かつ複雑システムである。このようなシステムを決定論的手法、例えば、起こり得る状況をあらかじめすべて列挙してそれぞれに対する対応策をプリプログラムすることによって、厳密に制御しているとは考えにくい。これは先述のデバグと同じである。生体はこのような厳密さを追求するのではなく、生来的に持つゆらぎやノイズを遮断せず積極的に利用して高次元システムを制御するシステムであると、大阪大学の研究者グループは考えた [1]。そして、このような生体システムの「ゆらぎ原理」を、分子レベルから細胞や脳の研究成果によって一般化した「ゆらぎ方程式」として定式化した。

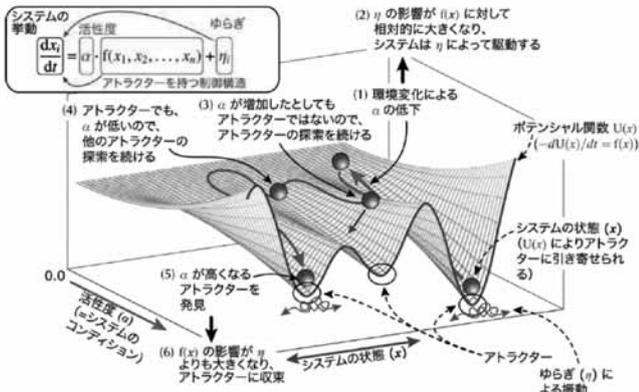


図1 ゆらぎ方程式による解探索

$$\frac{d}{dt} \underset{\text{システムの状態}}{\underline{x}} = \underset{\text{状態の「良さ」}}{\alpha} \cdot \underset{\text{アトラクタを}}{f(\underline{x})} + \underset{\text{自発ゆらぎ}}{\eta}$$

持つ制御構造

システム状態 x に対して、関数 $f(x)$ はポテンシャル関数 $U(x)$ に対して $f(x) = -dU(x)/dt$ の関係があり、アトラクタを複数持つ制御構造を表す。特徴的なのは、 α によって環境変化に応じて現在のポテンシャルが変調され、 η との組み合わせで、ゆらぎによるアトラクタの選択を実現している点である。

ゆらぎ方程式は、次のように働く (図1)。システムの構造が複雑な場合や環境が変動する場合、正確に $f(x)$ を定めることは難しい。 $f(x)$ が局所解に陥る可能性もある。ゆらぎ方程式では、 α は現在のシステム状態の「良さ」を表し、 α が小さいときはノイズ η が支配的になって局所解を乗り越えて広く探索する。真の解 (アトラクタの内のひとつ) に近づくと α が大きくなっていき、その近傍での探索が行われる。 $f(x)$ をどう設計するかは問題依存であるが、極論すればどのような形でも構わない。もちろん、その場合には探索効率は悪くなるが、現時点の α を用いることによって真の解に到達できることがポイントである。いったん最適解が得られれば、それを元に $f(x)$ を更新する、すなわち「学習」も可能になる。これは、人を含む生物の場合には遺伝的な淘汰によって過去に経験した環境に適応可能な $f(x)$ を持っている と解釈することも可能である。また、1 個体の場合には発達と見ることも可能である。

環境変動に適応動作する制御：ゆらぎ制御

対象となる人工システムが小規模であれば、そのモデル記述が可能で、制御目的も明確に定まる。そのた

め、決定論的制御で対応可能である。しかし、人工システムは今、ますます大規模複雑化し、決定論的制御による制御可能な範囲を超え、さらに外的・内的環境の変化が複雑に関係する高次元なシステムになっている。その代表例が情報ネットワークである。従来の、例えば、第3層経路制御や第2層スライス構成制御では、現時点のユーザ通信量を与え、ユーザ性能を最大化するための最適化問題として定式化し、ネットワーク資源割当量を決定する決定論的制御が一般的である。しかし、ネットワークはそもそもユーザ利用の予測が困難な開放系であり、ユーザが発生する通信量が固定的に与えられるという仮定そのものが成り立ち得ない。たとえ、そのような仮定を認めたとしても、ネットワークの大規模化により、最適解を求めようとすれば膨大な計算資源を必要とする。通常、経路制御や帯域割当制御等のネットワーク制御問題において厳密解を得ようとすれば、ノード数 N に対して N^3 あるいは N^4 に比例した計算量が必要になる。

そこで、ゆらぎ原理をネットワーク制御に適用した「ゆらぎ制御」を考案し、ゆらぎ制御の理論的展開からネットワーク制御応用まで取り組んできた。ゆらぎ方程式を以下のように読み替える。

$$\frac{d}{dt} \underset{\text{ネットワークの}}{\underline{x}} = \underset{\text{スループット}}{\alpha} \cdot \underset{\text{ネットワークの}}{f(\underline{x})} + \underset{\text{ノイズ}}{\eta}$$

状態 等の品質 制御構造

ノイズはゆらぎ原理では自発的ゆらぎと解釈されるが、応用の観点からはノイズを意図的に加えることによって局所最適解からの脱出を担う。

実証研究についても、情報通信研究機構 (以下、NICT) の受託研究開発「脳や生体の動作原理に基づく光通信ネットワーク制御基盤に関する研究開発」(2012年~2014年)等において、キャリア企業との共同により、環境変動に適応する光通信ネットワークの仮想ネットワーク (スライス) 制御を対象に実施した。アトラクタをノイズ駆動によって探索することにより、環境変動があった場合にも即時に適応し、現時点において最適なスライス構成を求めるものである (図2)。対象規模にも依存するが、シミュレーション実験によって例えば1,000台ノードのネットワークにおいて全体最適化手法に比して制御時間を1/1,000以下に短縮できることを明らかにした。また、実機を用いた実証研究においても、小規模実験ではあるがその効果を確認し、多重障害であっても数分で復旧可能であることを確認している。

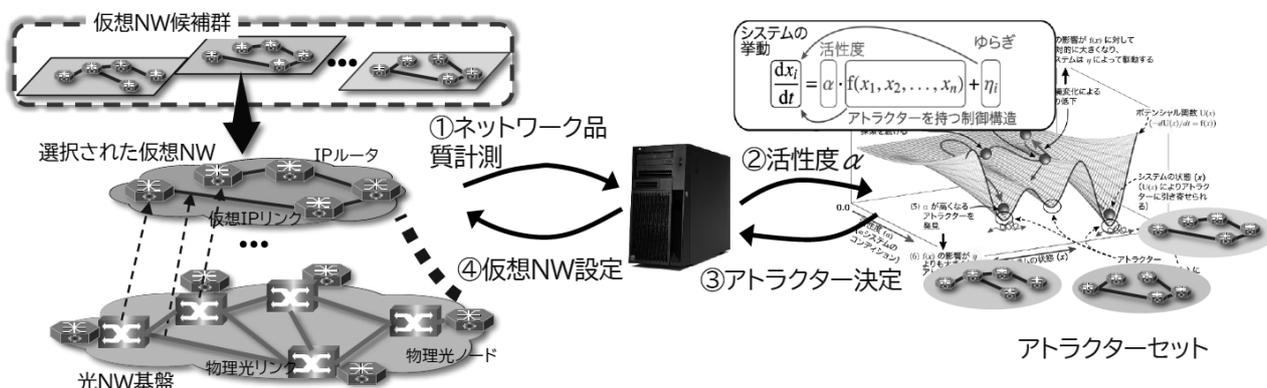


図2 ゆらぎ制御による仮想ネットワーク選択

新しい脳型機械学習：ゆらぎ学習

機械学習、特に深層学習は1980年代の神経回路を応用した技術であるが、近年、計算処理技術の飛躍的発展により、深層学習を中心に様々な手法が研究開発され、深層学習やさらに最近では生成AI等、特に画像認識や自然言語処理の分野で大きな成果を挙げ、産業応用も盛んになされている。そのためには大量データによる学習が必要であるが、適用分野によっては学習のための大量のデータを準備すること自体が困難であることも多い。

機械学習の適用先としてネットワークを考えた場合、ネットワーク環境の内的・外的変動があった場合には過去のデータと学習結果が使えなくなるという根本的な問題があり、継続的に利用するためには再学習も必要になる。深層学習の分野においてもこれらの問題解決手法がさまざまに試みられているが、神経回路網に倣う機械学習技術というその成り立ちにおいて解決困難な問題も多い。そのため、ノイズを含んだ知覚情報を巧みに処理して短時間で意思決定を行う脳の情報処理機構に再び学ぼうとした。

それが、最新の脳科学における環境認知や識別の理論に基づいた推論と意思決定モデル（冒頭の図）に基づいた「ゆらぎ学習」である。既存の脳の認知モデルである Bayesian Attractor Model [4] をベースに、ゆらぎ制御を拡張した（図3）。ゆらぎ学習は、①脳の知覚情報処理に学び、知覚情報すなわちセンシングデータに対する雑音耐性を有する、②アトラクタの事前準備により大量データを用いた学習を必要とせず、アトラクタへの引込により短時間で確信度による意志決定が可能である、③短時間処理が可能なので実時間フィードバック制御も可能になる、といった特徴を有する。

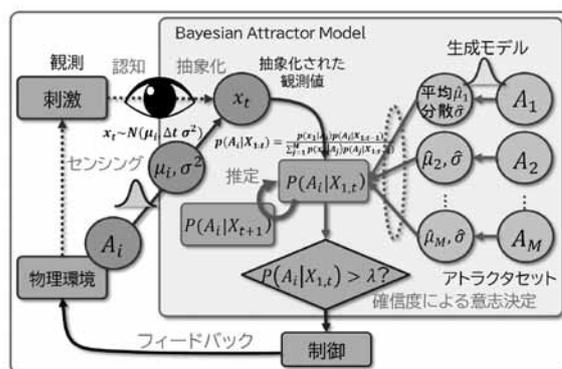


図3 ゆらぎ学習の計算モデル

NICTの受託研究開発により、キャリア企業との共同で、実世界の変動に適應するスライス再構成制御の研究開発を実施した後、総務省委託研究開発「人間の脳の認知メカニズムに倣った脳型認知分類技術の研究開発」（2017～2019年度）では、医学や脳科学の研究者との共同により実施した。ゆらぎ学習の高度化として、アトラクタ選択後に優れた結果を得られた場合、それを新規アトラクタとして自動生成する、ある種の発達機能の研究に取り組んだ他、同プロジェクト参画の研究者により、ゆらぎ学習の統合失調症診断応用において40人程度の眼球運動特徴の学習量で80%以上の診断精度が達成できることが示された。これは一般的な深層学習に比して、精度は同程度を維持しながら、3桁程度のデータ量削減を達成するものである。さらに、総務省委託研究開発「脳の仕組みに倣った省エネ型の人工知能関連技術の開発・実証事業」（2021～2023年度）においては、特にゆらぎ学習の省エネ効果に着目した実証研究として、電炉制御への応用等を推進した。実用化のために、現在も電炉を有する企業への展開を図っているところである。

残された課題

解決すべき課題はまだ数多い。以下、2つ紹介するが、いずれもゆらぎ学習の拡張によって解決可能であると考えている。

脳の認知機能として「Fast & Slow」「システム1/システム2」と呼ばれるものがある。危険に繋がるような状況判断はごく短時間で行い、その後、じっくり考える、といった2段階の認知である。情報通信技術への応用を考えれば、急激な環境変化に対してはシステム1を模擬し、大域判断が必要な変化に対してはシステム2のメカニズムを模擬して時間をかけて処理すればよい、ということになる。これは合理的にも思えるが、一方で、素早い判断のために、いわゆる認知バイアスに繋がることも知られている。人脳は、当然万能ではない。脳機能に学ぶ情報通信技術を実現するためには、このような脳の限界もよく理解しておく必要がある。

AIの実現という観点からは、例えば、サイバネティクス・アバターのように仮想世界上に、人と同じように振る舞い行動するアバターを実現するという手法もあるが、一方で、実世界の人の活動を支援するAIの実現も不可欠である。現状のAIは、大量データの学習によって「多数の」「平均的な」解答を提供しているに過ぎない。しかし、人はさまざまな活動において多様である。人の活動を支援し協働するAIを実現するためには、脳の限界だけでなく人の多様性を理解する必要がある。これによって初めて、「人に寄り添うAI」が実現できると考えている。

おわりに

これまで、主として進化生物学や脳科学に学ぶ情報通信技術に取り組んできた。いわゆる融合研究である。しかし、例えば、脳科学における新しい発見も、少なくとも機能レベルにおいて工学応用を考えると当たり前のよう感じることも少なからずある。しかし、そのような発見に至る過程において研究者のさまざまな試行錯誤があり、知見が蓄積されている。ある専門分野で長年研究を続けていると、発想の固定化がどうしても生じる。「(過去の自分の経験に基づいた)この問題はこうすれば解ける」という固定化である。まったく異なるアプローチ、扱う分野を拡げていくために、発想の転換を促すきっかけになるのが異分野の研究者との交流で、それが融合研究の本質かも知れないと感じている。

<参考文献>

- [1]総務省 電気通信役務の事故発生状況
https://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/net_anzen/jiko/result.html
- [2]柳田敏雄, 四方哲也, 石黒浩, 村田正幸, “生体ゆらぎに学ぶ知的人工物と情報システム,” 応用物理学会誌, vol. 78, Aug. 2009.
- [3]M. Murata and K. Leibnitz (Eds.), Fluctuation-Induced Network Control and Learning - Applying the Yuragi Principle of Brain and Biological Systems -, Springer, March 2021.
- [4]S. Bitzer, et al., “A Bayesian Attractor Model for Perceptual Decision Making,” PLoS Comput. Biol., vol. 11, no. 8, p. e1004442, Aug. 2015.

大阪大学大学院情報科学研究科 先進ネットワークアーキテクチャ講座 (村田研究室)

<https://www-mura.ist.osaka-u.ac.jp/>

村田研究室は1999年にネットワークアーキテクチャの研究に取り組む研究室として生まれました。最近では、本稿で紹介した脳や生体に学ぶ情報システム以外にも、Beyond 5G/6G技術やそれを活用した技術としてCPSやデジタルツインの研究にも取り組んでいます。また、脳機能自体の研究も始めています。例えば、デジタルウェルビーイングに関連する研究では、ウェアラブルセンサーやEEGを用いて取得した生体情報から人の心理状態を推定した結果によって環境制御を行い、人が心地よく過ごせる空間の実現に取り組んでいます。



2024年4月コロナ禍明け
久しぶりに花見を再開しました。



2024年3月コロナ禍明け久しぶりに研究室の謝恩会を再開しました。
(筆者：後列左から4人目)

編集後記

■「気分変えようとしてるんじゃない! (東京女子)。そやなあ…(大阪男子)。(二人の間の重い空気の車内でも)御堂筋はこんな日も一車線しか動かない(ドリカム/大阪LOVER)」。食い倒れの町、商人の町、そしてモノは定価で買わないという派手な虎系のおばちゃんたち。大阪の“ほんまもん”を見る目は現実的で鋭い。NHK朝ドラ「ちりとてちん(2007年後期)」でも、スランプに陥ったヒロインに(きつねうどんでも)食べないと元気が出ないと声をかけるシーンがある。見かけのカッコ良さよりもまずは食べる事が大事!東京のカレシが目の前に居ても、“鉄板”を目の前にロン毛を一つにまとめて“コナモン”に一点集中特化する友人の大阪女史を思い出す。

江戸は八百八町、大坂は八百八橋。縦横する水路運河とともに、壁ではなく橋をも築き向こう岸の人との往来と交流を盛んに紅灯緑酒、百花繚乱(百家争鳴?)如く市井の有様を現在のしかるべき国の指導者にも示したいほどのエネルギーをこの町には内在している。ところで、谷崎潤一郎の「細雪」では、船場から芦屋に移る際、四姉妹はそれを「都落ち」と言う。「河はいくつもこの街流れ、恋や夢のかけらみんな海に流していく(上田正樹/悲しい色やね)」のように、実はそれぞれの“ため息”までも包み込むやさしい水辺の都かもしれない。京都の方も大阪を「他府県」と親しみを込める。

「2025大阪・関西万博」で世界が注目する大阪だ。首都圏を中心とする東日本は、東京らしさを求める文化圏であるが、関西は、個性強い国が隣接する欧州のようだと元祖ジャパングダイバシティと評する神戸の友人がおる。奈良・京都の古都歴史文化を肌で感じながらも世界を意識した研究開発、経済振興を大阪大学がコアに更にもっと!期待したい。(大阪に米国大統領がおる?梅田。京都に近いと上梅田?“杉のお山”)

■猛暑に疲れた身体を癒しに、秋の3連休は初キャンプに行きました。シュラフ、椅子は必須!昼間は暑いくらいだけど夜は3~4度まで冷えるので寒さ対策を!焚き火は化繊のアウトターはNG、木綿か穴ぼこ空いてもいい洋服でね!テントサウナもあるので水着とお着換えポンチョとかあるよ~、飲み物、特にアルコールは好きなだけ持参!などといわれ、あつという間に大荷物。キャンプってとにかく荷物が多いですね…。

キャンプ場に行く前には、天竜川沿いに広がる街並みと中央アルプスが観える絶景ポイント「福島てっぺん公園」(兵庫県下伊那郡豊丘村)へ!展望台には竹ぼうきが置いてあり、ぼうきにまたがってジャンプをして、空を飛んでいるような映え写真を撮る場所なのです。もちろんしっかり飛んできました(笑)。

その後、^{あぶかわ}虻川渓谷にある直径約7m、日本最大級のポットホールを見に「大明神淵」へ。ポットホール近くまで行くには川沿いの岩壁の鎖と金属のステップの、まるで宙に浮いているような道をアスレチック的につたい歩き。ステップは間隔も広めで損傷もありドキドキしましたが、ここはかなり楽しめました♪キャンプ場にあるテントサウナでは、この虻川の上流に飛び込みましたが心臓が止まるかと思うほど水温が低く最高でした(笑)。

夕食は腕に自信のある面々がじゃんじゃん料理を作ってくれて、私は食べる&飲む専門(笑)。焚き火の炎を見つめ、自然と一体になった贅沢な時間を過ごしました。考えるより感じる時間って大切だなあと実感。非日常の時間を過ごすことで心のフル充電完了です。帰りには「まぼろしのお米」とも呼ばれている愛知県の「ミネアサヒ」を手に入れたので、お腹もフル充電できそうです♪(みんな)

2024 11
No.361

電波技術協会報

No.361 / 2024年11月10日発行
発行 一般財団法人 電波技術協会
発行人 宮崎 徹郎
編集 FORN 編集担当(杉山 博、松浦 美恵)
本部
〒215-0004 川崎市麻生区万福寺 1-2-3 アーシビル 9F
TEL 044-965-1200 FAX 044-965-1222
新百合ヶ丘事業所
〒215-0004 川崎市麻生区万福寺 1-12-6 京野ビル
TEL 044-951-0111 FAX 044-951-0201

ホームページアドレス <https://reea.or.jp/>
印刷所 株式会社真興社
禁無断転載

フォルン
Future
Of
Radio
Network
FORN

送付先変更のご連絡やお寄せいただくご意見・ご感想は、下記の弊協会HPの「お問い合わせ」ページ、またはFAXにてお知らせください。

URL : <https://reea.or.jp/contact/>
FAX : 044-965-1222

・お詫びと訂正
2024年9月号(No.360)のP.30において、当紙面とは関係のない「リード文」掲載がありました。この場をお借りして、ご執筆者及び関係者の方にはお詫び申し上げます。


Radio Engineering &
Electronics Association