

NTT 技術ジャーナル

8 AUGUST
2022
Vol.34 No.8

特集

人と社会のWell-beingを可能にする 研究開発の取り組み

いま 未来
変化する現在, 持続する未来

トップインタビュー

島田 明
NTT代表取締役社長

グループ企業探訪

e-Craft

from NTTコミュニケーションズ

社会課題を解決するビジネス創出へ.OPEN HUBの挑戦



NTT 技術ジャーナル

8 AUGUST
2022
Vol. 34 No. 8

CONTENTS

4 トップインタビュー

新しいものはすべて「人」から生まれる。
サービスやプロダクトの原点は「人」である
島田 明
NTT代表取締役社長



8 特集

人と社会のWell-beingを 可能にする研究開発の 取り組み

- 10 Well-beingなデジタル・リアル融合社会に向けた取り組み
- 14 Social Well-being：個人の自律と集団の調和を利他的に共存できるつながり
- 18 生涯健康をサポートするWell-being健康科学
——心身のリズムを可視化し、自分なりに整える
- 21 人デジタルツイン×Well-being
- 24 人々のWell-beingの理解と向上をめざした
人間情報科学研究
- 29 主役登場 赤堀 渉
NTT社会情報研究所



30 特集

いま 変化する現在, 持続する未来

- 32 変化する^{いま}現在に^{あす}適応し, 持続する未来を切り拓くコミュニケーション科学
——人・社会・環境との調和と共生をもたらす技術の創出
- 36 あなたの声を「すぐそば」品質で聴くAI
——遠くからでも近接マイク品質で混ざった音を聞き分ける革新的音響処理技術
- 41 モバイルセンシングを活用したパーソナル心臓モデリング
- 45 デジタルツインでモビリティ群を賢く制御する
——分散深層学習がもたらす未来の可能性
- 50 対称性に基づく解析学と幾何学による数論と量子相互作用
- 57 主役登場 小林 明美
NTTコミュニケーション科学基礎研究所



58 挑戦する研究者たち

塚田 信吾

NTT物性科学基礎研究所 フェロー
医学と情報通信の橋渡しにより、
発作による突然の不幸を減らしたい。
抜きん出た研究者に共通するのはグッド・
コミュニケーターである



63 挑戦する研究開発者たち

増田 昌史

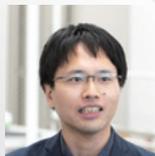
NTTドコモ 無線アクセス開発部
開発戦略 担当部長
グローバルな視点, コミュニケーション
力, そして好奇心で研究開発に臨む



68 明日のトップランナー

新島 有信

NTT人間情報研究所 特別研究員
電気刺激による効率的な運動学習で
人間の可能性を拓ける
筋肉インタフェース技術



71 グループ企業探訪

株式会社e-Craft

趣味の活動をきっかけに、
プログラミング教育ビジネスを展開



74 from NTTコミュニケーションズ

社会課題を解決するビジネス創出へ。
OPEN HUBの挑戦

Webサイト オリジナル記事の紹介 78

9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。

View from the Top



NTT代表取締役社長

島田 明

PROFILE :

1981年日本電信電話公社に入社。2007年NTT経営企画部門担当部長、2011年NTT東日本取締役、2012年NTT取締役総務部門長、2015年NTT常務取締役、2018年NTT代表取締役副社長を経て、2022年6月より現職。

新しいものはすべて

「人」から生まれる。

サービスやプロダクトの原点は

「人」である

人材（People）を中核に据え、求められる能力を、サービス能力、技術能力、インテリジェンスとするNTTグループ。約90の国と地域で働く33万人の全社員が、お客さま、株主、地域、コミュニティ、社員など、あらゆるステークホルダーにとって価値ある存在として、オープン、グローバル、イノベティブな新たなNTTへの自己変革を加速させています。2022年6月に就任した島田明代表取締役社長に、就任会見で発表された指針の詳細とトップとしての心得を伺いました。

変革に取り組み、
お客さまに新たな体験と
感動をお届けします

ご就任おめでとうございます。記者会見や取材と連日お忙しいことと思います。まずは、NTTの企業像について、ビジョンをお聞かせいただけますでしょうか。

就任会見でもお話をさせていただきましたが、まずは現在の事業環境を踏まえ「CX（Customer Expe-

rience）をEX（Employee Experience）で創造する」ことに取り組みます。

世界各国の33万人のグループ全社員が、お客さまにフォーカスし、お客さまの新しい経験や新しい感動を創造していかなければなりません。そのため、経営陣は、これを遂行する全社員がワクワク感をもって働ける環境を整えていく必要があります。

私たちの事業はインフラ事業から始まり、現在ではソリューションや

アプリケーションなども含め、さまざまな事業を展開しています。お客さまにとってはつながるのが当たり前前の通信であり、空気のようになかなか目にとまりにくいものではありませんが、社員がその仕事の重要性をよく理解して、日々、新しい技術や仕組みを導入し、日夜、安定的につなぐために懸命に保守点検をしています。私はこの日々の着実な努力がNTTの強みであると実感しています。

私はNTTの生み出すサービスやプ



ロダクトのすべての原点は「人」だと考えています。サービスもプロダクトも自然発生的に生まれてくるのではなく、研究開発を担う社員、保守点検を担当する社員、コールセンターやショップでお客さまの対応をする社員等が、お客さまにご満足いただけるよう自らに課せられたミッションにおいて創意工夫をしながら努めることで生まれる、つまり「人」が生み出しているのです。

社員の皆さんの充実度が高まることで生まれるサービスやプロダクトに期待が高まりますね。

当然のことながら、私たちには競争事業者がいます。努力しても、お客さまを満足させることができなければ、ほかの企業に取って代わられてしまいます。そうならないためにも私たちの提供しているサービス、プロダクトによってお客さまが満足していらっしゃるかを常に確認する必要があります。常にお客さまの視点に立って、わずかであっても改善できることは改善する努力をしなければなりません。

一方で、新しいサービス、プロダクトによってお客さまを感動させることも必要であり、少し先を見据えたサービスも提供していけるように

努めていきたいと考えています。そして、現状に満足することなく、変化する世の中にこたえるべく、新しいものを生み出すチャレンジをしていくことが大切です。

こうした努力を支える土台づくりや、努力する社員に報いることで士気を高めるためにも、努力して新たなスキルを獲得する社員を評価し、社員全体の専門性を高める仕組みづくりや働き方改革にも努めていきたいと考えています。

さて、リモート勤務について就任会見でお伝えしましたが、すでに、新型コロナウイルス感染症のパンデミックによって多くの社員がリモート勤務を経験し、実施しています。社員アンケートでは、通勤の負担が軽減され、子育てをしている社員の満足度が向上していることが分かるなど、働き方に対する一定の効果は確認できました。

リモート勤務は、社員の仕事の内容、経験やスキル、生活環境はさまざまであることから社員の意思により実施するものです。とはいえ、仕事は1人でしているわけではなくチームで臨んでいるものが多くあります。状況に合わせてリモートと出社のハイブリッドで日々の業務に臨んでほしいと考えています。ただ、新入社員等は仕事を覚えることが重要なので、

そのためにも出社して上司や仲間からの指導を受ける中で人間関係を築くことを心掛けてほしいと思います。

IOWNで電力使用量を削減し、カーボンニュートラルをめざす

社会貢献はNTTの代名詞とも知られています。これからさらに注力する取り組みを教えてください。

サステナブルな社会を創造するためさまざまな取り組みを展開していますが、特にエネルギー問題は重要な社会課題と考えており、それに対応するために、NTTグループは2040年にカーボンニュートラルをめざします。

インターネットやスマートフォン等の普及により、世の中の通信量は増加の一途をたどる中で、現在、私たちの情報通信事業では日本の商用消費電力の1%近くを消費しており、温室効果ガス排出量もその多くが電力消費に由来しています。

こうした背景から、私たちは、カーボンニュートラルの目標を日本政府の目標よりも10年前倒しで設定しました。「2040年に実現」という宣言は全社員、総力を挙げて取り組むという決意表明と考えてほしいと思います。これを実現するのがIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) のオール光化による低消費電力化と再生可能エネルギーの開発です。

社会貢献と並んで、NTTの研究開発も社会から大いに期待されていると思います。IOWN構想はじめ、R&Dではさまざまな研究活動をしていらっしゃると思いますが、世界をけん引する、あるいはユニークな成果をお聞かせいただけますでしょうか。

代表的な例としてはIOWNの光電融合技術です。現在、伝送路や各装置の間を結ぶ配線には光ファイバが利用されていますが、それをさらに進めて装置内の各回路基板間、基板上のチップ等の各パーツ間、そして究極はチップ内の配線まで電気ではなく光で対応する技術です。これにより、低消費電力化や処理の高速化

が実現します。時間のかかる話でもあり、まずは2025年までには基板間の光化を実現するつもりです。

さらに、皆さんにもなじみのあるAI(人工知能)や量子コンピュータ等、世界に誇るさまざまな研究成果を上げていますが、その中でユニークな成果といえば、昨年の世界的なスポーツイベントにおいて、日本女子ソフトボールの金メダルに貢献したスポーツ科学分野の研究です。世界大会での金メダルをめざして「脳を鍛えて、ソフトボールで勝つ」を実現するべく、対戦相手の投手の球質分析や、それに応じた変化球を投げられるピッチングマシンに投手の映像を組み合わせたバッティング練習システムを強化合宿で活用し、学術的な研究と並行して、実践的に取り組みました。

他に、多くの成果をNTT R&D フォーラムにおいて紹介しているのですが、現状は年に一度の開催で、招待制でもあり限られた方々にしか

成果を披露していません。さらに、研究成果なので、世の中に普及しているものではないため、一般の方々にとっては理解するのが難しいかもしれません。このため、私たちの研究成果をやさしく、分かりやすく解説して、さらに社会に発信していく必要があると考えています。NTTの技術力を改めて知ってもらうために、例えば、私が研究所を訪ねて、各分野の専門家、研究者と話をしながらビデオに収めて配信しようかと検討しているところです。

米国で「情は人の為ならず」を実感

入社されてから社長に就任されるまでどのような道のりを歩んでこられたのでしょうか。現在のお立場を目標にされていたのですか。

私の年代の人は、新たに社会人となる多くの方が頂点をめざして企業

に入社されたのではないのでしょうか。とはいえ、熱い志はあっても現実味はないと思います。事実、私もそうでした。

私は1981年に電電公社に入社して、最初は電話局で営業から始めて、局外保守、局内保守など1年間の研修を経て、データ通信の部署における研修といった具合に、当時の主な業務を経験しました。

その後、本社計画局で収支計画の担当、幕張電報電話局の営業係長、経済企画庁(当時)への出向、本社人事企画係長、東海支社労働部企画課長などを経て、1995年にロンドンのNTTヨーロッパへ赴任しました。

当時はNTTが国際通信に進出するというタイミングでその準備にあたっていたのです。最初の国際回線は東京とロンドンの間で、当時のさくら銀行(現・三井住友銀行)のデータ通信回線が1997年9月18日に開通したのです。これがNTTにとって初のグローバルネットワーク事業です。売上ほぼゼロからスタートしたグローバルビジネスが今や2兆円超に成長したことを思うと、グローバルビジネスに最初からかかわってきた者としては感慨深いですね。私が現在のポジションに至るまでには国内外、グループ内の約13の企業で勤務しました。引越しも13回です。

40年あまりの職業人生は決して良いことばかりではなく、大変だと思ったこともありました。例えば、買収した米国の企業が、ITバブルの崩壊で経営危機に瀕し、立て直しのために合理化を図らなくてはならない状況になったときのことです。当時、現地で勤務していたのですが、合理化方針に関しての意見がトップと合わなかったことから、日本の本社サイドから提案してもらいました。その後、原案を創ったことがばれて、トップとの関係が悪化してしまいました。仕事がやりにくくなったのですが、致し方ありません。

それからは日本へのプロダクトのOEM供給などで売上を伸ばすことに取り組み、いくつかの事業部長の信頼を獲得していき、徐々に仕事がやりやすくなっていったことを思い出





します。

会社を100%買収したとしても、親会社の意見を100%聞いてくれるわけではないということやコミュニケーションの難しさを痛感するとともに、「情は人の為ならず」を実感できた経験です。

大変なご経験まで包み隠さずお話しくださりありがとうございます。こうしたご経験に裏打ちされたトップとしての信条をお聞かせいただけますか。

こうした経験からも多くの人がか

かわる組織体は、「人」がプラスの方向に向かえるように、コミュニケーションを整えていくことが非常に重要だと思っています。NTTグループ33万人の社員とともに歩むリーダーとして、私は「人」を大切にしたいのです。リーダー1人では何もできません。会社という存在の魅力は「組織」であること、複数の人間が存在することです。組織であれば、かわり合うことによって1人では乗り越えられないものを乗り越えられるのです。

その組織を、新しいアイデアを生み出せるように活性化するのがリーダーの役割で、そのためにはトップが偉そうに肩肘張って「私は社長だ」なんて態度ではダメです。それでは誰も話したがりません。自然体で、誰もが話しやすい存在でありたいと思います。

そして、上に立つ者にとっては「見出す」ことも仕事です。社内にはさまざまなアイデアを持っている人がいて、うまく見出されてないことがあるかもしれません。そのような人を見出すことが大切です。加えて、全く違う組織やスキルを持つ人をうまく組み合わせて新しいイノベーションを起こす、このような変革をしていくのもリーダーの仕事だと思っています。

(インタビュー：外川智恵/撮影：大野真也)

※インタビューは距離を取りながら、アクリル板越しに行いました。

インタビューを終えて

全世界に900社以上、33万人の社員を抱え、世界中にICTサービスを提供するグローバル企業のトップとなられた島田社長。就任されたばかりでお忙しいはずなのに、インタビュー会場に到着されたときにはそんなそぶりは全く見えません。しかも、毎朝5時半には起きてウォーキングをし、公園や神社仏閣の静けさを楽しんでいるというのです。「すがすがしい気持ちになりますよね」と、微笑んで、頭の中を空っぽにする時間をつくっているとおっしゃいます。ところが、そんな貴重な時間でさえ、記者に待ち伏せをされることもあるそうですが、「私とは視点が違うから話すこと自体が勉強になります」と、島田社長はプラスに受け止めていらっしゃいました。

インタビューの間も終始穏やかに、時折、チャーミングな笑顔を見せて、話しやすい雰囲気も自ら醸してくださる島田社長。スタッフも私も、「自然体」「優しい」「人思い」という印象を持ったにもかかわらず、ご自身の自己分析では「話し方がゆっくりだから優しく見えるのではないのでしょうか？」とのこと。実はイライラすることも多いとのことですが、就任会見で掲げられた「CXをEXから」という言葉に代表されるように、表情や言葉の端々に人を重んじる姿勢が溢れておられました。イライラと表現されたご心情は「変革への熱意」という言葉で置き換えられると確信したひと時でした。



特集

人と社会のWell-beingを 可能にする 研究開発の取り組み

NTTでは、デジタルとリアル融合が進むこれからの世界において、すべての“ひと”が身体・心・精神の健康という両面が満たされた、Well-beingな情報化社会の実現に向けた研究開発を進めている。本特集では、人と社会、デジタルとリアル、体と心・精神の健康といった、さまざまな切り口でのWell-being実現に向けた取り組みを紹介する。

Well-being

分散型社会

健康科学

Self-as-We

情 動

Well-being of people and

Well-beingなデジタル・リアル融合社会に向けた取り組み 10

情報通信技術の発展に伴う社会のデジタル化を振り返り、今この時代に求められるWell-beingなデジタル・リアル融合社会とはどのようなものか、また、そのために行っているNTT研究所の取り組みを紹介する。

Social Well-being : 個人の自律と集団の調和を利他的に共存できるつながり 14

デジタル・リアル融合の分散型社会において、個人の自律と集団の調和の利他的な共存を可能にするSocial Well-beingのコンセプトと、人文・社会科学的知見と技術的基盤に資する4つの取り組みを紹介する。

生涯健康をサポートするWell-being健康科学 ——心身のリズムを可視化し、自分なりに整える 18

生涯健康で過ごせるWell-being社会の実現をめざし、基本的な生活習慣（食事・運動・睡眠）における個人の日常データを可視化し、自分なりに心身のリズムを自己調節するWell-being健康科学研究について紹介する。

人デジタルツイン×Well-being 21

人の外面だけでなく価値観や思考など内面まで再現する、人デジタルツインのグランドチャレンジ「Another Me」「感性コミュニケーション」におけるWell-beingに向けた取り組みを紹介する。

人々のWell-beingの理解と向上をめざした人間情報科学研究 24

現在NTTコミュニケーション科学基礎研究所が進めている、情動を基点としたWell-beingの理解と実現に関する研究について紹介する。

主役登場 赤堀 渉（NTT社会情報研究所） 29

Well-beingのための情報通信技術のデザインをめざして

society

Well-beingなデジタル・リアル融合社会に向けた取り組み

本稿では、情報通信技術の発展に伴う社会のデジタル化を振り返ったうえで、今この時代に求められるWell-beingなデジタル・リアル融合社会とはどのようなものか、そして、そのために行っているNTT研究所の取り組みを紹介します。

すずき かつひこ みやもと まさる
鈴木 勝彦^{†1} 宮本 勝^{†2}

NTT社会情報研究所 所長^{†1}

NTT社会情報研究所^{†2}

Well-beingと社会のデジタル化

■積分的主観としてのWell-being

昨今、Well-beingという概念に注目が集まっています。Well-beingとは、「Well=よい」と「being=状態、あり方」が組み合わされた言葉で、心身ともに満たされた状態を指します⁽¹⁾。このWell-beingを阻害するコロナ禍は、Well-beingの重要性を高めた大きな要因と考えられます。

図1では、横軸に時間をとって、縦

軸で、良い - 悪い状態を模式的にグラフで表現しています。これが示すように、人生には、良いときもあれば、悪いときもあります。私たちは、Well-beingとは、しきい値を超えて悪い状態を治療することでも、その時々 of 快楽のことでもなく、過去から現在に至る苦労や悩みも踏まえた積分的主観だと考えています。

■急速な社会のデジタル化とWell-being

Well-beingに対して情報通信分野

でなすべきことを見出すために、社会のデジタル化のWell-beingへの影響に関する現状をみていきます。そのため、NTTの前身の日本電信電話公社（電電公社）が発足した1952年から現在に至るまでの社会のデジタル化を振り返ります（図2）。

まず、電電公社発足後の1950年代から1980年代は、徐々に固定電話が普及していった時代です。離れた誰かと話したいと思ったら、電話のある家や部屋まで移動し、従量課金の電話料金を気にしながら電話をしていた時代です。この時期の高度経済成長に、生産性向上という観点で大きく寄与したと考えられます。

次に、1996年のインターネット接続サービスの開始、2001年の光ファイバ導入による固定網のブロードバンド化に加え、1987年の携帯電話サービス開始、1999年のiモード開始により、1990年代半ばから2000年代にかけて、携帯網も含め、いつでも、どこでもつながる通信環境が整備されてきました。ただし、コンテンツも不足してい

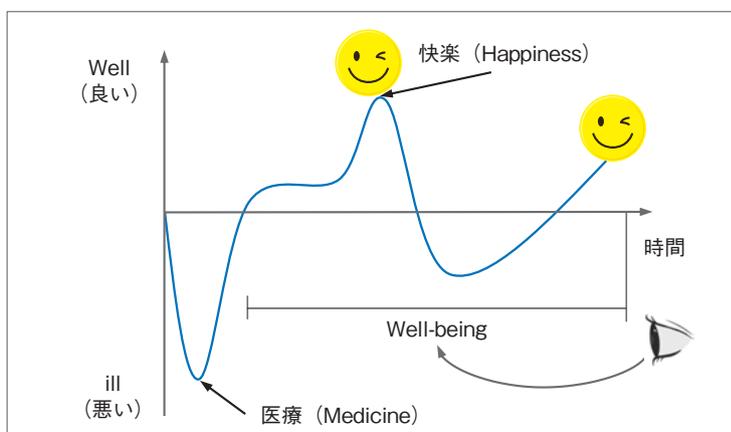


図1 積分的主観としてのWell-being

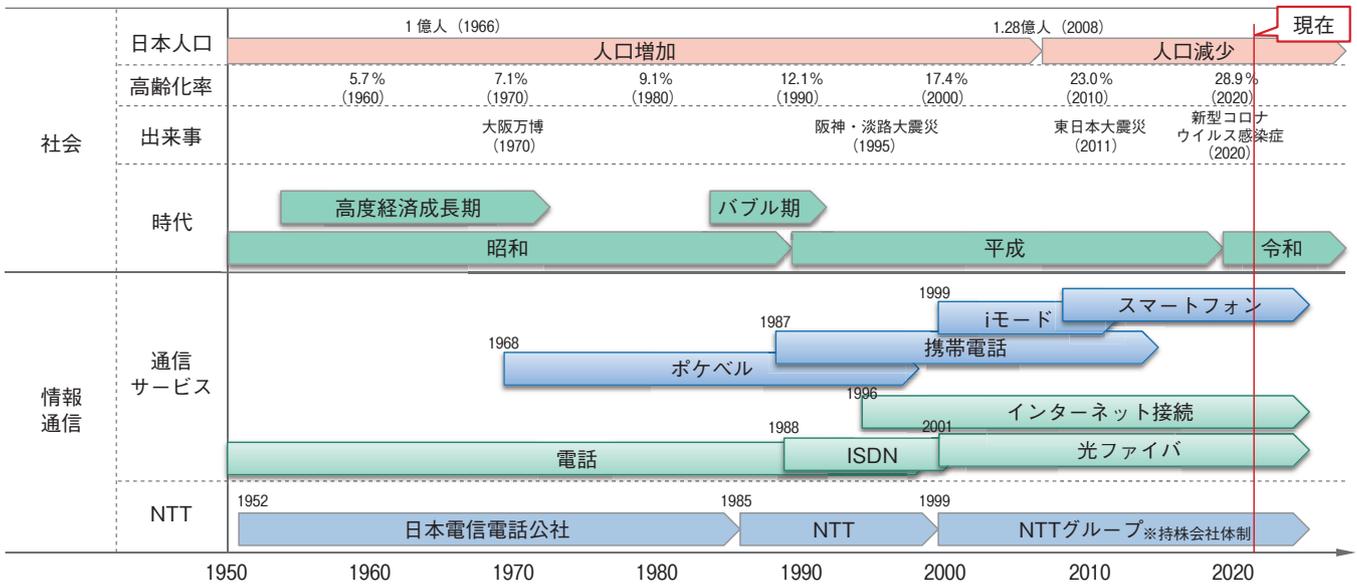


図2 社会のデジタル化の変遷

ましたので、必要なときのみ、いつでもどこでもつながる時代だったと認識しています。

そして、2007年のiPhone発売、2008年のAndroid端末の発売を契機としたスマートフォンと、SNSの普及により、誰もが常にネットワークにつながる時代になりました。また、2020年の新型コロナウイルスの蔓延により、一挙にテレワークが普及したことも大きな変化です。

ここで私たちが強く認識すべきは、まず、現在のような常にデジタル空間につながる時代は、人類の長い歴史の中でまだ10年程度しか経っていないということです。長時間、常にデジタル空間につながるという変化は、長期間の経験に基づく積分的主観であるWell-beingに大きな影響を与えていると考えられます。

さらに、この間に高度経済成長期を経て、人口が増加していましたが、2008年をピークに人口が減少し始め、

少子高齢化が急速に進みました。右肩上がりの経済成長を前提にした社会ではなく、経済合理性ではない、新たな豊かさが求められるよう社会が構造的に変化しており、Well-beingに注目が集まっています。

■ Well-being 研究に求められること

前述の現状を踏まえ、私たちが取り組むべきWell-being研究に求められることを、以下3点に分けて説明します。

(1) 学際性

まずは、研究の学際性です。Well-beingを、何かしら計測、分析、介入するという工学的アプローチに加えて、対象となる人間や社会の課題を深く理解するための心理学、哲学、倫理、法律、医学等も含めた学際的な研究が必要です。そのためには、幅広い分野の専門家のいるNTT研究所の関係者が連携することに加えて、大学の有識者との連携が必須です。

(2) デジタル化による可能性の追求次に、デジタル化がWell-beingに大きく影響を与えることを踏まえ、その可能性を追求するような研究が必要です。情報通信により、距離の克服、パーソナライズ、多様なつながりが可能となり、これによる新たな暮らし方、働き方、学び方などの開拓が期待できます。

(3) デジタル化による阻害要因の排除

さらに、デジタル化により、Well-beingを阻害する要因を特定し、それを抑制するための研究が必要です。プライバシーに配慮して、監視社会にならないようにすること。フェイクニュースや誹謗中傷により、格差や分断が広がること。デジタル化の負の側面にも注意を払い、対策を検討する必要があります。

Well-beingの重層構造

前述のWell-being研究に求められ

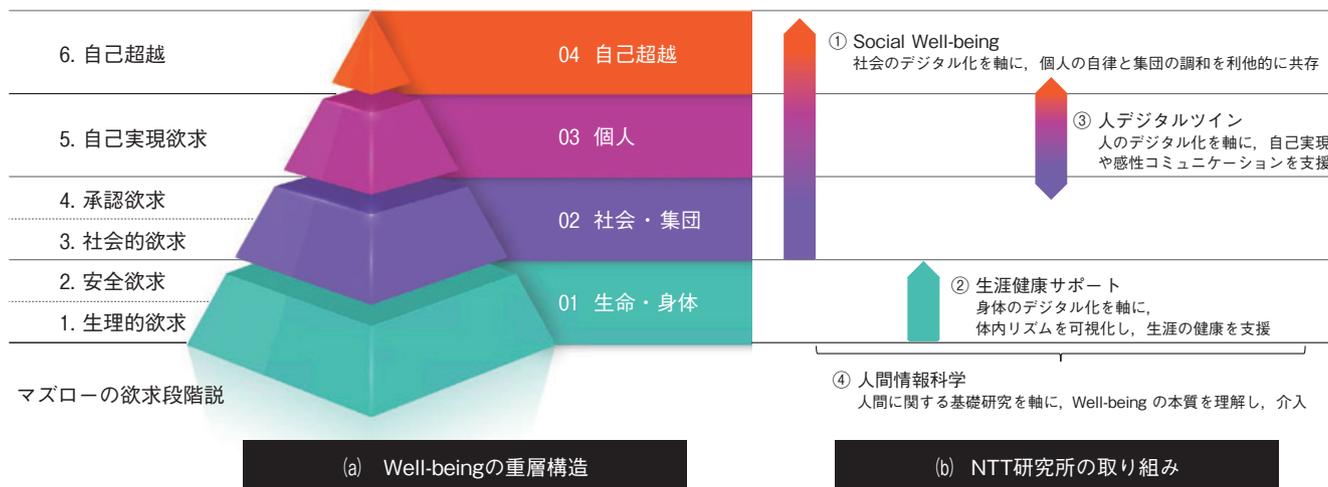


図3 Well-beingの重層構造とNTT研究所の取り組み

ることを考慮し、私たちNTT研究所のWell-being研究の取り組みを説明する前に、Well-beingが非常に広範な概念であるため、これを分類し、構造化したWell-beingの重層構造について説明します(図3(a))。この構造は、広井良典⁽²⁾が米国の心理学者のアブラハム・マズローの欲求段階説を応用し、幸せの重層構造として説明したものを筆者なりに拡張したのですが、広井が、主に公共政策や民間企業の役割、若い世代の社会貢献意識について論じているのに対して、本稿では、特にWell-beingの重層構造と情報通信のかかわりについて説明します。

Well-beingの分類学は、さまざまなものが提案されており、マズローの欲求段階説にも批判があるのは認識していますが、本稿では、初見の方でもWell-beingに関するさまざまな取り組み全体を俯瞰できることと分かりやすさを優先し、この分類学を採用します。

■生命・身体

もっとも基本的な部分が生命・身体にかかわるWell-beingであり、生命

の危険がなく、身体的に健康であるということです。近年では、歩数や心拍数などのバイタルデータをスマートウォッチ等でセンシングし、分析し、フィードバックするようなサービスが展開されています。今後、身体の状態をより詳細に把握できるデバイスが普及することが想定されます。人間の身体は、医学等の分野で多く解明されており、人によらず汎用的な領域と位置付けられます。

■社会・集団

次の段階が、顔の見える集団や不特定多数の社会とのかかわりを通じたWell-beingです。情報通信の発展は、物理的に離れた人との対話を可能にすることで、より多くの人といつでもどこでもつながることを可能にしました。一方で、つながり続けることによるSNS疲れや誹謗中傷やフェイクニュースによる分断などの弊害も起きています。

■個人

三層目は、多様な価値観を持つ個人が、自由で自律的に活動し、自分のやりたいことを実現することによる

Well-beingです。情報通信は、多様な選択肢や個人としての情報発信手段を提供することで、この個人のWell-beingの可能性を開きました。この層のWell-beingは、多様で主観的なものと位置付けられます。

■自己超越

マズローは、晩年、それまで提唱してきた欲求の最終段階の自己実現の次に自己超越という層があると主張しています。これまでの3層は、基本的に自分のWell-beingについてですが、その自己を超越し、自分ではない他者(この他者は、必ずしも人だけではなく、自然や地球等のモノも対象)のためを思うことや、そのために行動することによるWell-beingです。社会のデジタル化が進むことで中央集権的なプラットフォームが、自分たちのビジネスに都合がいいように情報をコントロールすることで、格差や分断を産み出しているといわれていますが、それを超えるためにも、自己超越を大事にするような哲学をプラットフォームのガバナンスに組み込む必要があるのではないのでしょうか。

Well-beingに関するNTT研究所の取り組み

本特集で紹介するNTT研究所のWell-beingに関する4つの取り組みについて、めざす方向性とWell-beingの重層構造における位置付けを説明します(図3(b))。

■ Social Well-being

社会的つながりは、Well-beingにもっとも大きな影響を与える要素と考えていますが、特に日本では、会社や学校という集団でうまくやることが、個人としてやりたいことを犠牲にしてしまうというように、集団と個人が二項対立化してしまう傾向があるのではないかと考えています。この課題解決のため、個人の自律と集団の調和が、利他的に共存できる状態をSocial Well-beingと定義し、これを研究しています。

この分野は、社会のデジタル化を軸にし、Well-beingの重層構造では、社会・集団、個人、自己超越までがスコープです(図3(b)①)。

■ 生涯健康サポート

Well-beingのもっとも基本的な部分である生涯健康で過ごせる社会をめざし、基本的な生活習慣(食事・運動・睡眠)における個人の日常データを可視化し、自分なりに心身のリズムを自己調節するWell-being健康科学について研究しています。

この分野は身体デジタル化を軸にし、Well-beingの重層構造の生命・身体層に位置付けられます(図3(b)②)。

■ 人デジタルツイン

人の外面だけでなく価値観や思考など内面まで再現する人デジタルツイン

技術を研究しており、これが人を模したAI(人工知能)やロボットが人類を脅かすディストピアではなく、Well-beingに貢献する未来のために、学際的な視点から技術のあり方を検討しています。また、デジタル空間での気持ちまで伝わる感性コミュニケーションについても研究しています。

この分野は、人のデジタル化を軸にし、Well-beingの重層構造では、個人を中心に、社会・集団、自己超越までをスコープにしています(図3(b)③)。

■ 人間情報科学

人々のWell-beingは多様であり、個人の心身の状態や価値観、さらには他者との関係性など多くの要因がかかわってかたちづくれます。この多様なWell-beingを包括的にとらえ、背後に存在する人間の情報処理メカニズムを理解し、そのメカニズムに働きかける介入法を研究しています。

この分野は、人間に関する基礎的な研究を軸にし、Well-beingの重層構造の各層を包括的に支える領域と位置付けられます(図3(b)④)。

今後の展望

人類は、石器時代から多くの道具をつくり、生活を便利にし、発展してきました。しかし、注意すべきは、人間が必要とってつくった道具が、逆に人間の生活を規定し、かたちづくってしまう可能性があることです。情報通信は、現代では欠かすことのできない重要な道具であり、生活に欠かせないインフラであるため、Well-beingに良くも悪くも大きな影響を与えます。今後、Well-beingについて研究を進めていくうえでは、このことを肝に銘じ、私たちがWell-beingな社会に向

けて研究開発し、アウトプットしていくものによって、少なくとも社会を不幸せなものにするのではなく、Well-beingなものになっていくことを、想像力を働かせながら推進していきます。

■ 参考文献

- (1) 渡邊・ドミニク・安藤・坂倉・村田：“わたしたちのウェルビーイングをつくりあうために：その思想、実践、技術,” ビー・エヌ・エヌ新社, 2020.
- (2) <https://toyokeizai.net/articles/-/455642>



(左から) 鈴木 勝彦 / 宮本 勝

Well-beingというテーマは、情報通信の責任ある担い手であるNTTグループだからこそ注力すべき分野だと考えています。また、NTTグループ各社およびさまざまなパートナーの皆様とも1つになれるテーマだと考えています。

◆ 問い合わせ先

NTT社会情報研究所
企画担当
E-mail solab@hco.ntt.co.jp

Social Well-being：個人の自律と集団の調和を利他的に共存できるつながり

本稿では、デジタル・リアル融合の分散型社会において、個人の自律と集団の調和の利他的な共存を可能にするという Social Well-being のコンセプトと、人文・社会科学的知見と技術的基盤に資する 4 つの取り組みを紹介します。

みやもと 宮本	まさる 勝	なかじま 中嶋	よしあき 良彰
こが 古賀	ゆうそう 祐匠	にしかわ 西川	よしき 嘉樹
みやじま 宮島	あさみ 麻美	おりめ 折目	よしのり 吉範
こんの 今野	しゅんいち 俊一		

NTT 社会情報研究所

Social Well-being 研究概要

■課題認識

働くことに関する Well-being の国際比較調査⁽¹⁾によると、日本では、働くことをとおして「人のためになっている」と回答した人が世界116カ国中5位と多い一方、「働くことそのものに喜びや幸せを感じている」と回答した人が世界95位と極めて少ないという傾向があります。アンケート結果を鵜呑みにしてはいけませんが、集団（社会や職場）への貢献は実感しますが、個人としての幸せが犠牲になっている。

*1 フィルターバブル：アルゴリズムがネット利用者個人の検索履歴やクリック履歴を分析し学習することで、個々のユーザーにとっては望むと望まざるとにかかわらず見たい情報が優先的に表示され、利用者の観点に合わない情報からは隔離され、自身の考え方や価値観の「バブル（泡）」の中に孤立するという情報環境（令和元年版 情報通信白書より）。

*2 エコーチェンバー：ソーシャルメディアを利用する際、自分と似た興味関心を持つユーザーをフォローする結果、意見を SNS で発信すると自分と似た意見が返ってくるという状況を、閉じた小部屋で音が反響する物理現象に例えたもの（令和元年版 情報通信白書より）。

すなわち、個人と集団が二項対立になってしまっている傾向が示唆されます。

また、コロナ禍を起点にしたテレワークの急速な普及などの社会のデジタル化は、個人に新たな選択肢を提供しますが、フィルターバブル^{*1}やエコーチェンバー^{*2}により、この二項対立を助長する側面もあります。

さらに、人口減少や少子高齢化など社会環境が大きく変化する中、女性や高齢者の社会進出や雇用の流動化が求められていますが、雇用や昇進の慣行は中々変わらず、集団における役割や関係性が固定化されたまま限界を迎えつつあります。これは、職場に限らず、学校や家族などでも、同様の傾向がみられます。

■めざす方向性

そこで、本研究では、個人の自律と集団の調和を利他的に共存できるつながりを Social Well-being と定義し、これを可能にする社会をめざします。個人と集団の二項対立を超えるためには、自分（個人）を大事にすると同時に、自分を取り巻く人やモノも大事に

し、思いやる利他的な考え方が重要と考えます。

■取り組みの全体像

上記社会を可能にするため、哲学や社会学等の理論を踏まえたデザインの実践による人文・社会科学的知見と、デジタルとリアル空間の行動を支援し、行動変容を促す技術的基盤からなる“Social Well-being Network”の実現をめざして取り組んでおり、以降で紹介いたします（図1）。

人文・社会科学的知見に資する取り組み

■Well-being な社会を共創するデザインフレームワーク

Social Well-being Network の実現に向け、「Well-being デザインフレームワーク」の研究に取り組んでいます。Well-being デザインフレームワークとは、経済成長に代わる新たな価値基準としての Well-being に基づくサービスや社会の仕組みを、多様なパートナーと価値観を共有しながら共創するためのデザイン方法論です。人

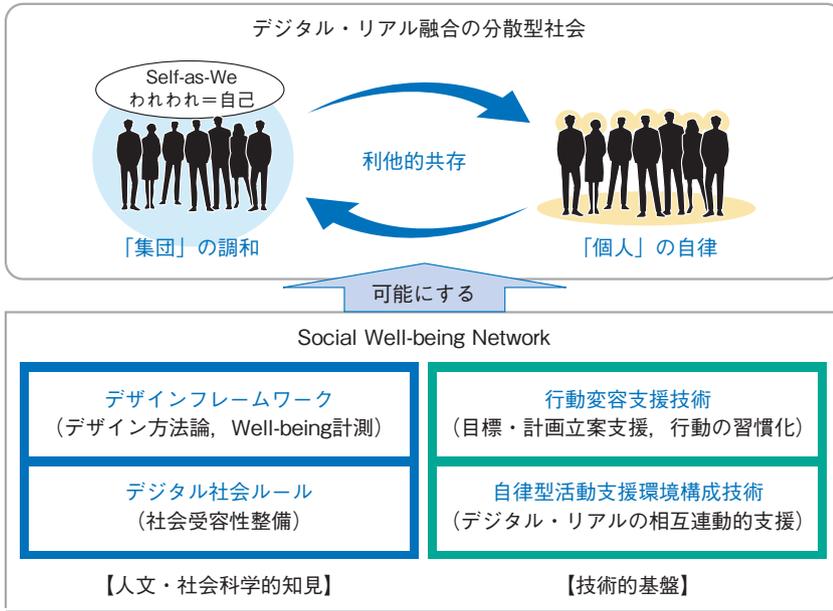


図1 Social Well-being 研究概要

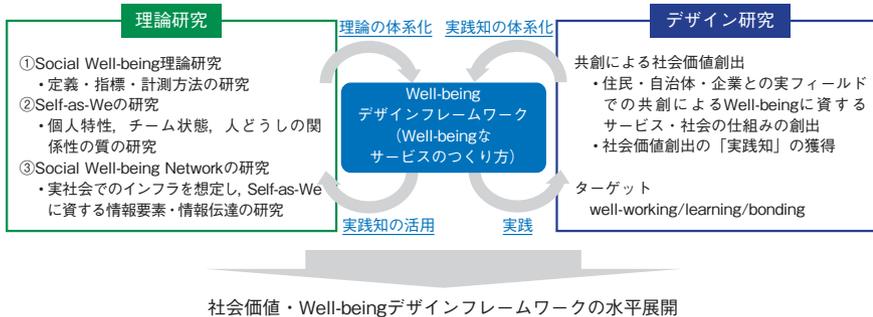


図2 デザインフレームワーク研究概要

い新たな社会の仕組みづくりに取り組んでいます。また、パートナーとの関係構築方法やアイデア創出のためのツールおよび実践プロセスの具体化を進めています。

Well-beingを支えるデジタル社会ルール

近年、コロナ禍のリモートワークにより「会社で仕事をする」という固定化された価値観が変化し、「ワークインライフ」という価値観が広く普及しましたが、Web会議システムにかかわる技術が、この価値観を現実的なものとしています。このように社会から求められる環境・状況に合わせたさまざまな技術やサービスが、新しい価値観を次々と生み出し、人々がさまざまな価値観を持つ複雑な社会に成りつつあります。一方で、急速に普及する技術やサービスが新たな問題を発生させる得る、負の側面もあります。例えば、リモートワークを想定した社内ルールが整備されておらず、一定の混乱が起きたと考えています。

とはいえ、このように社会やそれを構成する人々の多様な価値観がアップデートされる際に起き得るさまざまな問題をあらかじめ想定し、すべてルール化して対応することは困難です。そこで社会環境の変化や新しい技術・サービスの出現に合わせて、迅速にさまざまなステークホルダと合意形成を図りつつ、短期間で繰り返しルールをアップデート可能にすることが、来るべきデジタル社会やそれを構成する人々のWell-beingのために必要になると考え、私たちはスマートシティにおけるデータ利活用の合意形成を題材に研究に取り組んでいます。

スマートシティには多様な価値観を持った住民や来街者が存在します。そしてここではさまざまなセンシングによるデータ取得・蓄積・分析により、

文・社会科学的知見も活用したSelf-as-We⁽²⁾の考え方に基づく理論研究と実フィールドでのSocial Well-beingな社会のデザイン研究の両面から研究を推進しています。Well-beingデザインフレームワークを確立し、活用できる機会・人材を増やすことで、Social Well-beingな社会の実現に貢献することをめざしています(図2)。

(1) Self-as-Weの考え方にに基づく理論研究

京都大学の哲学者、出口康夫教授が提唱する東アジアの伝統思想を踏まえた全体論的自己観「われわれとしての自己(Self-as-We)」をベースに、個人特性や集団における人と人の関係性

の質(フェローシップ)に着目し、Social Well-beingの定義・指標化ならびに計測方法に関する研究に取り組んでいます。また、デジタル・リアル空間におけるSelf-as-Weを考慮した人と人のつながりの実現に向け、情報の構成要素・伝送方法についても研究しています。

(2) Social Well-beingな社会のデザイン研究

働く(Well-working)、学ぶ(Well-learning)、家族などのつながり(Well-bonding)の3領域に着目し、地域住民、自治体、地域企業などのパートナーとの実フィールドにおける共創により、既存の役割にとらわれな

新しい価値の提供や、より良い街づくりが可能になると期待されています。一方で、従来の法令やガイドラインでは想定していない、プライバシーの問題や権利利益の問題が発生する可能性があります。私たちは街を構成するステークホルダー間で衝突が起きることを想定し、街、企業、そして多様な価値観を持つ人々が、集団と個人のそれぞれのWell-beingを達成するために、データ利活用に関してどのように協調しながら、ルールを合意形成するべきか、その仕組みについて研究を進めています。

技術的基盤に資する取り組み

■持続的Well-beingに資する
内発的行動変容の支援技術

Well-beingの基礎条件である心身の健康の長期的な維持・向上をめざし、良い状態に向けた目標設定と行動の継続を支援する研究を行っています(図3)。人が表出する行動や対話を観測し、その人らしさを構成する個人特

性や状態を理解して、個々人に適した介入を行うことで、内発的動機付けによる行動変容を促す研究を進めています。

(1) ナラティブ型行動変容研究
——目標の設定

本研究では、ナラティブ(人の語り)に着目し、現状専門家が面談等で実施している、目標・行動計画立案を促すための個人理解や介入方法をモデル化し、その一部をシステムで実現することをめざしています(図3A)。現在は保健指導面談を題材に、実際の面談の分析や専門家レビューを行い、理解・介入プロセスのモデルを構築中です。内面の価値観に沿った介入でやる気を引き出し、行動につなげる人対人の説得戦略のモデルとして、健康指導領域で効果検証した後、他の領域への応用を検討していく予定です。

(2) 習慣変容研究——行動の継続・習慣化

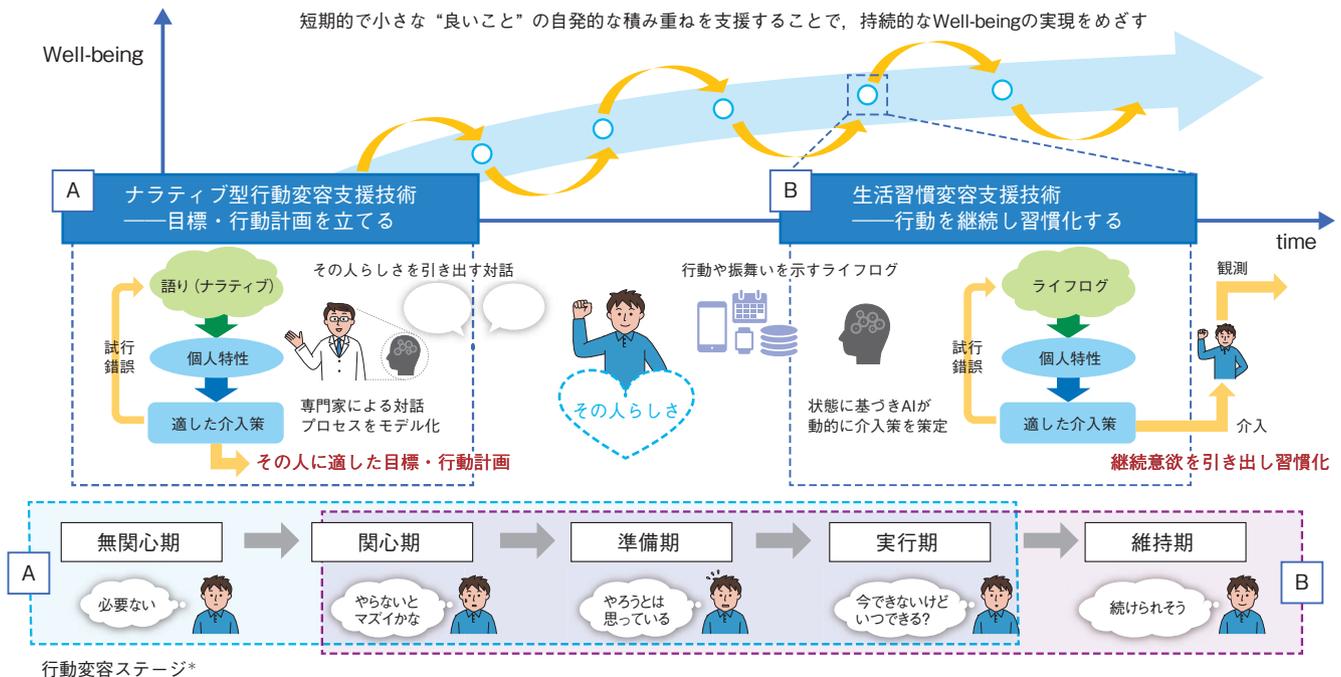
本研究では、ライフログから行動パターンをモデル化し、目標達成に向けた行動プランを適応的に提供すること

で、個々に合った生活リズム改善を支援することをめざしています(図3B)。現在は睡眠や運動の習慣改善支援のユースケースについて、介入効果を検証中です。習慣をセルフコントロールし、自己実現に向け挑戦できる社会に向け、さらなる応用展開を検討していきます。

■人々の多様な活動を自律的に
支援する環境構成技術「EASE」

Social Well-being Network実現に向けた技術的基盤として、デジタルとリアルの情報や機能を相互に連動させた活動支援によって、デジタルの恩恵を誰もが自身のリアルに反映し得る技術「EASE(Enhanced Autonomous Supportive Environment)」の研究を行っています(図4)。

人々はそれぞれが自律した自分(個人)でありながら、同時に会社や学校、家族や友人というさまざまな集団に属する自分でもあります。ところが、コロナ禍以降に社会で本格化したリモートワークは、人々を自宅の狭い部屋に



* 出典：「J. Prochaska and W. Velicer: “The Transtheoretical Model of Health Behavior Change,” 1997」を基に作成

図3 行動変容支援技術の概要

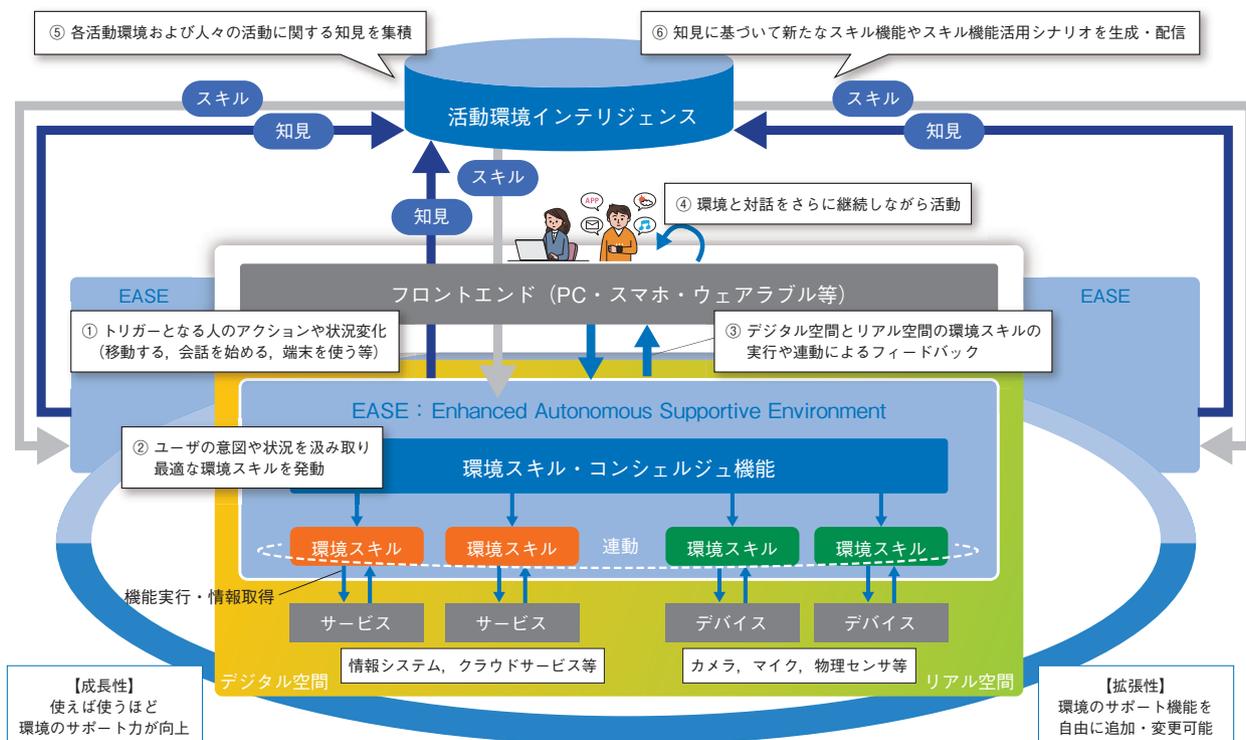


図4 人々を支援する基盤「EASE」

押し込め、従来のようなコミュニケーションは困難になりました。例えば「相手は今、話しかけていいだろうか」「どの手段でコミュニケーションすべきか」と、考えるべきことは増えました。ここに現状のデジタル技術の限界があり、これは「EASE」によって解決できる課題の1つです。「EASE」により多様なデジタル技術が人々に寄り添うことで、相手が物理的に隣にいらなくても、デジタル空間とリアル空間にまたがった円滑なコミュニケーションを実現できるようになります。

EASEは、「環境スキル」、「環境スキル・コンシェルジュ機能」および「活動環境インテリジェンス」によって構成されます。

「環境スキル」はデジタル空間からリアル空間にわたるさまざまなサービスおよびデバイスを利用するための人々のサポート機能群です。「環境スキル・コンシェルジュ機能」は環境スキルを適切に操作して人々を実際にサ

ポートするだけでなく、人々からのフィードバックを受けてサポート力を向上できます。「活動環境インテリジェンス」は離れた場所にいる人々の知見・状況等を共有し、個人と集団の双方にとって最適なサポートを提供可能にします。

これら3つが連動することで、例えば、遠方にいる人々のプレゼンス情報の提示、手元のカメラ・マイクの操作等が自律的に行われ、なおかつ、相手との関係性（同僚か、家族か、友人か等）を考慮した制御がなされ、Social Well-beingを技術的に支えていきます。

今後の展望

まずは、ワークインライフ、地域創生に注力し、社会価値創出の実践や、人文・社会科学系の有識者との連携を通じ、新たな知見、技術、事業共創モデルを共創していきます。

参考文献

(1) <https://www.persol-group.co.jp/news/2021>

0929_8855/
(2) <https://group.ntt.jp/nsi/deepdive-0/>



(上段左から) 宮本 勝 / 中嶋 良彰 / 古賀 祐匠 / 西川 嘉樹
(下段左から) 宮島 麻美 / 折目 吉範 / 今野 俊一

人は、社会的な生き物であり、1人では生きていけず、やはり誰かとかかわりながら生きていくのだと思います。かわる相手と“わたしたち”という関係になることが、Social Well-beingの第一歩だと考えています。

◆問い合わせ先

NTT社会情報研究所
Well-being研究プロジェクト
TEL 046-859-2201
E-mail solab-shaup-hosa@hco.ntt.co.jp

生涯健康をサポートする Well-being 健康科学 ——心身のリズムを可視化し、自分なりに整える

新型コロナウイルス感染症の拡大は、人々の日常生活や社会活動を一変しました。自分や家族の感染に対する不安、行動制限に伴うストレス、生活様式の変化などが、人々の心理面や身体面に大きな影響を与えています。本稿では、生涯健康で過ごせる Well-being 社会の実現をめざし、基本的な生活習慣（食事・運動・睡眠）における個人の日常データを可視化し、自分なりに心身のリズムを自己調節する Well-being 健康科学研究について紹介します。

なかしま
中島

ひろし
寛

せやま
瀬山

みちこ
倫子

たじま
田島

たくろう
卓郎

えぐち
江口

かな
佳那

NTT 物性科学基礎研究所

生涯健康社会へのサポート

Well-beingの基本要素の1つに、Physical Well-beingがあります。健康で心身の状態が良好に保たれることが大切で、それがベースにあって個人のQOL (Quality of Life) を高める価値観（共生・共感、持続性、幸福感、豊かさ）が広がっていくと考えられます。しかし、人類は新型コロナウイルス感染症のパンデミックを経験しており、現在、世界的にPhysical/MentalのWell-beingを著しく低下させている状況といえます。

NTTでは2020年11月に医療健康ビジョンを発表し⁽¹⁾、心身の状態の未来予測を通じて生涯健康をサポートし、ヒトのWell-beingライフを支える技術の獲得に取り組んでいます。日常生活の多種多様で膨大な生体データをセンシングし、人間の生理機能をモデリングする、さらに個人の特徴をとらえた未来予測シミュレーションを行うことができる「バイオデジタルツイン技術」の創出を進めています⁽²⁾。医療の

分野では、病気になってから治す対症療法から、病気にならないようケアする世界（予防医療）へとパラダイムシフトが進みつつあります。そこでNTTは、ヒトのパーソナルな生体データのデジタル写像を基に、高度な生体情報処理技術を駆使して、未知なる疾患リスクを事前に回避する、自然と健康行動を誘起して病気を予防する、自分らしく自立した生活を支援する、などの価値の創出をめざしています。

一方、リモートワークの促進などの社会変革の中で、職場ではない環境で仕事を行うために、心身への負担が増加している例も報告されています。運動量の低下や生活時間のみだれが生活習慣病の発症や悪化を招くことも懸念されています。健康を維持するためには、ある程度自分の行動を律し、規則正しい生活習慣を確立する「がまん」や「がんばり」を求められることが一般的です。そこで、私たちは早稲田大学との健康科学分野での以降の3つの内容の共同研究により、心身のリズムを見える化し、自分なりに無理なく自

動調節できる行動変容プロトコルの探求をめざしています。具体的には、Well-beingの基本要素となる生活習慣（食事・運動・睡眠）を時間軸ととらえ、個人の日常行動に伴う生体センシングデータを蓄積し、その特徴量を分析することで、個人のバイオリズム特性を明確化する手法の獲得を進めています。これにヒトの行動心理学、行動経済学に関する知見を組み合わせ、自発的に無理なく健康行動へ変容できるエビデンスの提示・指標化や、フィードバック手法の開発など、心身のリズムの自動調節を導く機構の確立に取り組んでいます。

体内リズムを食習慣の改善に活かす（時間栄養学の探求）

体のリズムを反映する1つの指標として、深部体温が注目されています。深部体温は、図1に示すように脳や臓器など体の核心部の温度を指し、これらの働きを守るため外の環境の影響を受けにくく、全身でもっとも高い温度に保たれています。深部体温は熱中症

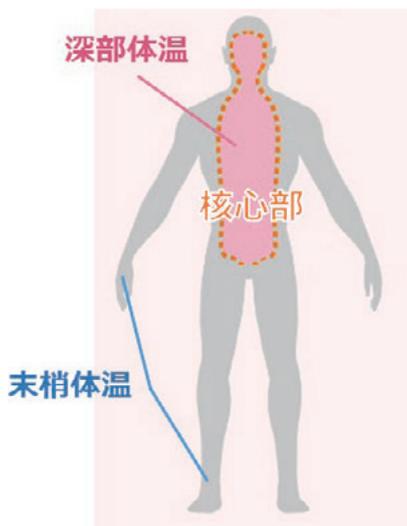


図1 核心部と深部体温

や感染症などの炎症反応の結果として上昇し、低体温症などの発症で下降するため、医療分野では重要なバイタルサインとして利用されています。一方で、深部体温は平熱の範囲内でも約1日周期に1℃程度の小さな変動があります。この深部体温の変動は、個々人の体内リズムと連動していることが知られています⁽³⁾。

深部体温の計測を基にした体内リズムの可視化に向けて、NTTでは1日のうちで1℃程度のわずかな深部体温の変動を見逃さない、高精度かつ体への負担が小さいウェアラブル型の深部体温センサの研究開発に取り組んでいます。手術などの医療現場においては、直腸、耳（鼓膜温度）などの臓器にプローブを直接挿入する測定方法が用いられており、測定時のヒトへの負担がかなり大きくなります。一方、NTTでは、図1の核心部から皮膚表面に向かって放熱される熱の流れを、体表面に貼り付けたセンサで測定し、深部体温を推定する仕組みを用いています⁽³⁾。体の熱の逃げ方は、風や気温などの外部環境やヒトの活動などによって変化しますが、NTTで開発中の深部体温センサは、ヒトが安静な状

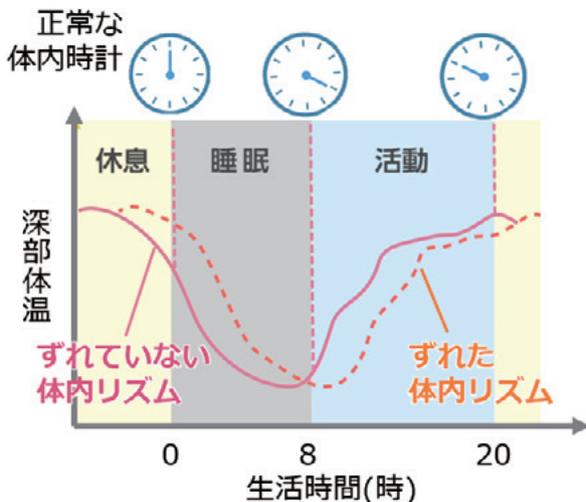


図2 深部体温測定で可視化される体内リズム

態において外部環境からの変動影響を抑える機能を備えています。

ここで、ヒトの体内リズムについてもう少し説明します。ヒトの体内リズムを生み出している中枢時計は、脳の視床下部にある視交叉上核への外界の光などの情報入力により調節されています。この中枢時計が、肝臓、腎臓、筋肉などのさまざまな臓器の抹消時計に影響を与えており、その結果、ヒトの体内リズムは代謝や睡眠・運動の質、疾患の発症など、私たちの体の状態と密接に関連していることが近年の研究から明らかとなっています。例えば、体内リズムからみて、昼よりも夜の時間帯において、食事での血糖値が上がりやすいことが知られています⁽⁴⁾。そこで、個人が自分の体内リズムを把握しながら、適したタイミングで、適した食事の内容を摂取することで、より健康的な食生活を実現できると期待されています（時間栄養学）。これはすなわち、体内時計を考慮に入れた栄養学を日常的に実施することで、個人が無理をせずに健康習慣を手につなぐことができます。この時間栄養学は、これまでの研究では主にマウスなどの夜行性動物で検証されてきまし

た。早稲田大学との共同研究では、NTTの深部体温センサを時間栄養学に適用し、昼行性であるヒトの体内リズムと健康的な食事との相関性についてエビデンスを獲得する取り組みを進めています。

体内リズムを可視化し、睡眠障害の改善に活かす

人々の生活習慣が多様化する現代社会においては、体内リズムと就寝・起床時刻をはじめとした生活時間との間でずれが生じやすく、睡眠の質と関連することが知られてきています。図2に示すように、体内リズムと生活時間にずれがない場合、前述した深部体温は睡眠の数時間前から下降し始め、睡眠後半からは上昇に転じます。しかし、不規則な生活などで体内リズムと生活時間での睡眠・覚醒タイミングとのずれが生じている場合、睡眠の質が悪化します。このような状態はソーシャルジェットラグと呼ばれ、時差ボケのような状態になります。これが続くと、寝付きが悪い・眠りが浅い・朝起きるのがつらい・日中眠くなるといった睡眠障害につながり、心身の健康および社会的活動に悪影響を及ぼします⁽⁵⁾。



図3 深部体温測定を用いたヘルスケアシステムの例

そこで、個人に応じた睡眠の質を自分で簡単に調節して改善するために、自分の体内リズムを把握しながら、無理なく睡眠のセルフマネジメントを行える手法の獲得が重要となってきます。この手法を活用すれば、例えば、図3に示すような個人に応じたヘルスケアシステムが構築できる可能性があります。

私たちは、NTTの深部体温センサから得られた体内リズムの知見が、どのように睡眠の質の改善に寄与するのか、というパイロット研究を進めています。具体的には、日常生活における長時間の深部体温の計測を行い、体温の日内変動データから得られる生体リズム評価に加え、睡眠評価用リストバンド、ストレスマーカー検査（唾液中コルチゾール、アミラーゼ）、ストレスチェック質問表によるデータの相関分析に取り組んでいます。深部体温センサが示す温度パターンとストレスマーカー濃度・ストレス指標との相関性を細かく追跡し、睡眠の質の判断方法や生活改善の指針獲得につなげることをめざしています。

リモートワーカーに対する オンライン健康衛生指導の効果検証

2020年以降、コロナ禍においてリモートワークが急速に普及しました。

しかし、在宅中心の生活による日中活動の減少や運動不足、睡眠・覚醒リズムのみだれは、生活習慣病やメンタルヘルスの不調にもかかわらず指摘されています。「よく動いた日は眠れる」「ちゃんと眠った日は疲れが取れる」などと言われるように、夜間睡眠と日中運動は密接に関連する生活習慣であることから、ニューノーマル時代においては、1人ひとりが睡眠・運動に対する意識・行動を自発的に変革し、健康に行動を継続する必要性が一層高まっていくと考えられます。

このような社会的背景にかんがみ、私たちは睡眠・運動を軸とした意識改革・行動変容に関する検討を開始しました。検討の第一歩として、日本睡眠学会専門医の協力の下、リモートワーカーを対象としたオンライン健康衛生教育セミナーを実施し、その効果を調査しています。この取り組みでは、アンケートで取得した睡眠・運動・勤務状況（出社勤務・在宅勤務）などに関する主観評価と、ウェアラブルデバイスなどで取得した活動量（歩数・消費カロリー）・体組成（体重・BMI）などに関する客観指標の両方を活用して、リモートワーカーの日常行動の変化を多角的にとらえます。それに加え、オンライン教育セミナーが日常行動にもたらす変化や、日中活動と夜間

睡眠の関係性を明らかにする試みを進めています。今後は、得られた知見を基に、日々の生活の中での意識や行動を無理なく、より良い方向に、かつ持続的に変化させる手法の検討や、日中活動・夜間睡眠の変化が生活習慣病の予防にもたらす波及効果の解明につなげていきたいと考えています。

参考文献

- (1) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2020/11/17/201117c.html>
- (2) 中島・林・後藤：“バイオデジタルツインが創造するデータ駆動型の医療健康支援,” NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 5, pp. 10-13, 2021.
- (3) 松永・田中・田島・瀬山：“体内リズムの可視化をめざしたウェアラブル深部体温センサ技術,” NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 5, pp. 22-26, 2021.
- (4) K. Kitamura, X. Zhu, W. Chen, and T. Nemoto: “Development of a new method for the noninvasive measurement of deep body temperature without a heater,” Med. Eng. Phys., Vol. 32, No. 1, pp. 1-6, Jan. 2010.
- (5) 橋本・本間・本間：“睡眠と生体リズム,” 日薬理誌, Vol. 129, No. 6, pp. 400-403, 2007.



(上段左から) 中島 寛/ 瀬山 倫子
(下段左から) 田島 卓郎/ 江口 佳那

健康で不安なく毎日をご過ごせることは、心身の Well-being の根幹です。自分の特性を上手に理解し、無理なく自己調節しながら、生涯健康をサポートする健康科学プロトコルを探求していきたいと考えています。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
バイオメディカル情報科学研究センター
TEL 046-240-3559
FAX 046-270-2364
E-mail brl-info@hco.ntt.co.jp

人デジタルツイン× Well-being

NTTでは、人の外面だけでなく価値観や思考など内面まで再現する人デジタルツイン技術を研究しています。人を模したAI（人工知能）やロボットが人類を脅かすディストピアはSFの世界の話ですが、人デジタルツイン技術が人や社会のWell-beingに貢献する未来を実現するには、学際的な幅広い視点から技術のあり方を検討し、取り組むべき社会課題を定めていく必要があります。本稿では、人デジタルツインのグランドチャレンジ「Another Me」「感性コミュニケーション」におけるWell-beingに向けた取り組みを紹介します。

ふかやま あつし
深山 篤

えいとく しんいちろう
永徳 真一郎

としま いわき
戸嶋 巖樹

おざわ しろう
小澤 史朗

NTTデジタルツインコンピューティング研究センタ

Well-beingな 人デジタルツインに向けて

デジタルツインとは、人や物体、環境などさまざまな物理的な対象に関して収集したデータに基づき、その対象をデジタル世界に存在する双子であるかのようにコンピュータ上に再現する技術のことです。NTTでは、都市や交通のデジタルツインに加え、人のデジタルツインの実現と応用に向けた研究開発にも取り組んでいます^{(1) (2)}。

私たちの考える人デジタルツインは、顔や体つき、声、動作などの外面だけでなく、性格、価値観、知識など内面も含めてその人をモデル化したものになります。このように聞くと、自分の内面を他人に覗き見られ悪用されたり、自分の存在がデジタルツインに取って代わられたりしてしまうのではないかと不安を感じるかもしれません。

そのような、誤った技術の発展による悪影響の可能性を排除し、Well-beingな人や社会に資する技術のあり方を追求するため、NTTでは人デジ

タルツイン技術の進むべき方向性として2つのグランドチャレンジ「Another Me」と「感性コミュニケーション」を設定しました⁽³⁾。両方に通じる考え方として、人デジタルツインは人を代替するものではなく、人の内面までの深い理解に基づき人と人のつながりを支援したり媒介したりすることで、自己実現に向けた個人の可能性を広げ、利他的共存により社会の連帯を強めるものとして位置付けています。

これは、私たちの共同研究パートナーである京都大学 出口康夫教授の提唱する「われわれ」としての自己（Self-as-We）にも通じる考え方です。Self-as-Weの考え方では、自己とは今ここで考えている存在としての「私」のことを指すのではなく、目的や行為を私と共有する人やそれを支える物まで含めた「われわれ」が自己そのものであると考えます。そう考えると、どういう目標に向かって行動しているのか、どのような活動をしているのかによって、私が属する「われわれ」=自己はさまざまに変化することにな

ります。人を深く理解した人デジタルツインが人と人をつなぐ橋渡しをすることで、新たな自己を発見し、外に向かって開かれた包摂的なより良い「われわれ」としての自己のあり方をめざすものといえます。

人デジタルツインのグランドチャレンジ「Another Me」は、自分のデジタルツインが「もう1人の自分」として自分に代わりさまざまな活動を行い（例：自分のアバターがサイバー空間で自律的に気の合う友達をつくる）、その結果を自分に実感を伴ってフィードバックすることで、自分自身の人生における機会を広げ自己実現など個人のWell-beingにつなげるというコンセプトです。

「感性コミュニケーション」は、それぞれの人の感性を理解し、ミスコミュニケーション（情報の受発信者の間の意図の食い違い）・ディスコミュニケーション（情報伝達自体が行われない状態）を埋めることで、相互に尊重し合える多様性に満ちた社会、さらには、人々の発想が混じり合う創造性

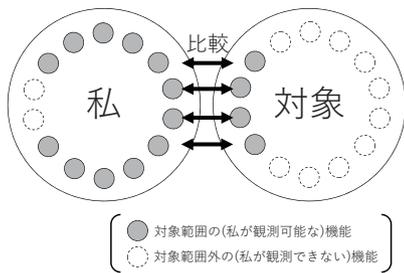


図1 Functional I：機能的な私の概念図

に満ちた社会の実現に向けて、社会・集団のWell-beingに寄与するものです。

以下では、Another Meと感性コミュニケーションの取り組みの中から、Well-beingに関する議論を紹介します。

Another Me：もう1人の自分のあり方

AI（人工知能）による画一的な人の拡張ではなく、人それぞれが持つ多様性を保ちながら、人の時間的・空間的な可能性の拡大を通してWell-beingを高める。それを実現し得る「Another Me：もう1人の自分」ですが、そのあり方によっては、人を置き換えてしまうことで（生身の）私が不要になり、私のかけがえのなさや尊厳のようなものを棄損する位置付けになってしまう可能性もあります。Well-beingを高め得るAnother Meとは、どのような位置付けであることが望ましいのでしょうか。この問いに対し、私たちは京都大学 出口康夫教授、大西琢朗特定准教授との共同研究をとおして哲学的観点からの考察を進めています。

Another Meの位置付けには大きく2つの軸があると考えています。1つは「Functional I：機能的な私」です（図1）。私とできる・できないことが類似していることでAnother Meに私を感じ、私とともに行為を行える存在となることです。もう1つは

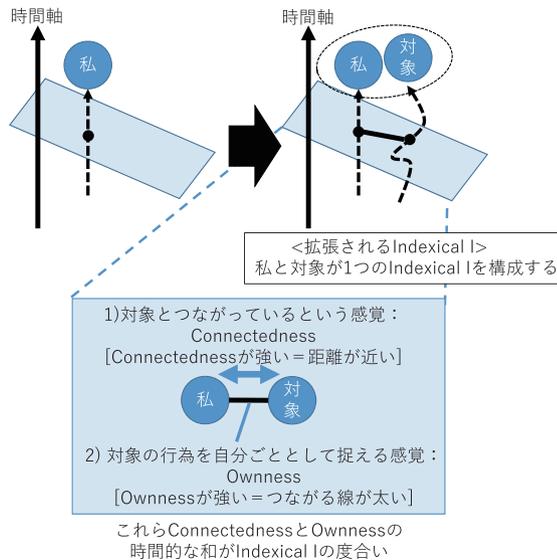


図2 Indexical I：指標的な私の概念図

「Indexical I：指標的な私」です（図2）。私の機能として表現できない、「今、ここにいる」ということによって表現される“私”としての指標です。その指標を出口教授の提唱する「Self-as-We」の考えで拡張し、私とAnother Meによる「われわれ」の中で共有し、「私とAnother Meによりともに行為や経験をなしている」という感覚によって、Another Meに私を感じ、私とともに行為を行える存在となります。Another Meとともに歩むことにおけるIndexical Iは、その構成がさらに2つの要素からなると考えています。1つは「Connectedness：つながりの強さ」と表せる、私や社会がAnother Meと時間・空間やその中での経験をともにすることで得られる感覚で、もう1つは「Ownness：自分ごと感」と表せる、私がなす行為がAnother Meに、また、その逆にAnother Meがなす行為が私に伝わることによって、私とAnother Meのお互いが相手を私のように感じられる感覚です。

Another Meが、私として人の時間的・空間的な可能性の拡大をとおし

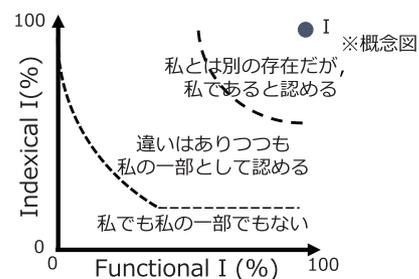


図3 Functional/Indexical Iの割合ごとのAnother Meのあり方

てWell-beingを高めるためには、Another Meに対し、このFunctional I, Indexical Iの両方の要素を技術的にもデザイン的にも高めていくことが重要であると考えています（図3）。

感性コミュニケーション技術が挑戦する2つのコミュニケーション課題

感性コミュニケーション技術が克服に挑戦する2つのコミュニケーション課題を図4に示します。図4(a)は、自分と相手の目的も背景も感性も異なるコミュニケーションシーンを表しています。そのような場合、そもそもコミュニケーションが成立せず、ディスプレイコミュニケーション状態になることが

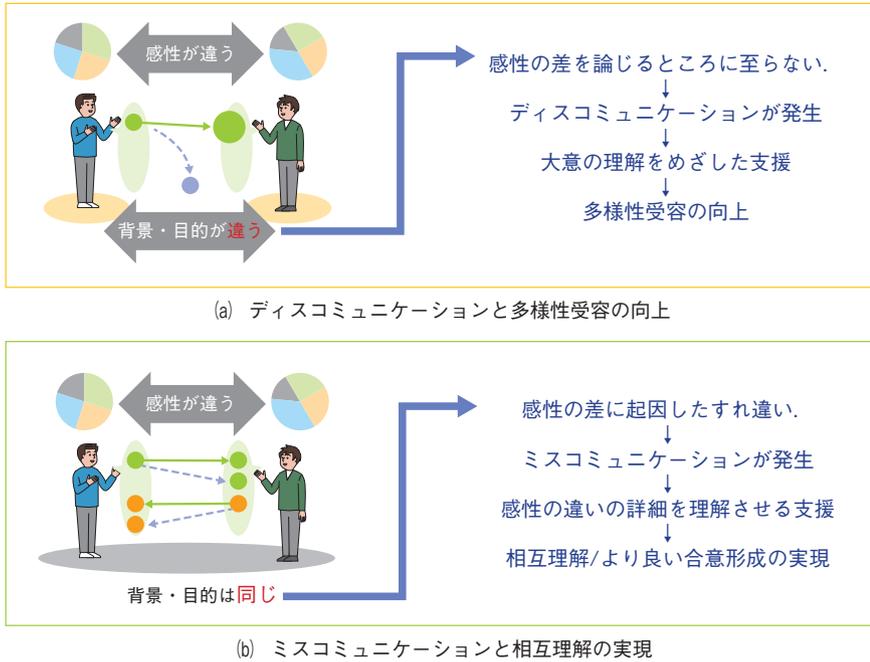


図4 感性コミュニケーションが挑戦する2つの課題と課題克服によってもたらされる効果

想定されます。このときの感性コミュニケーション技術の目的は、「大意の理解」となります。つまり、何かそこに自分とは異なる感性があることを曖昧でも伝えることをめざすということです。感性の詳細を理解するには至らずとも、そこに多様な感性が存在することを感知、認めることができれば、それは多様性の理解・受容を促進します。一方、図4(b)は、背景や目的が共通で感性が異なるシーンです。このようなことは日常にも多くあります。感性の差がミスコミュニケーションを生じさせ、誤解を生みます。逆に同じ目的で感性の異なる2者が感性を相互理解し、合意形成できたとすれば、より良い合意形成、ひいては創造性の高まりにつながります。

ディスコミュニケーションの克服と多様性受容の促進に向けた具体的な技術開発を進めるためのユースケースとして、職場における精神障がい者やマイノリティとされる方々のコミュニケーション支援に取り組んでいます。

特に、人それぞれが違う感性を持っている状況で職場の業務を進めると、思い込みや勘違いが発生し、それが原因で業務上の失敗をしてしまうことで、各自の活躍機会が制限されてしまうという問題をターゲットに支援システムのプロトタイプ構築を進めています。一方、ミスコミュニケーション、すなわち感性の違いを超えて創造性を高める取り組みとしては、研ぎ澄まされた感性を可視化し理解する取り組みとして、将棋やフォーミュラカーチームなどのプロフェッショナルを対象に微細な感性を個人間で変換する試みや、チーム全体のパフォーマンスを向上させるために異なる専門性を持ったメンバーどうしの対話や動きを分析する試みを始めています。ある分野において、その道を極めた人たちは、他者よりも感性を研ぎ澄ましています。将棋は環境による不安定要因がなく、近年のAIによって合意や結論の優秀さが客観評価できます。フォーミュラカーは、条件の同じ2台の車がチームとなって

いるため、条件が同じで、研ぎ澄まされた感性の持ち主である2名のドライバーがほぼ同じ環境から対話するので、発話を比較することができます。まだまだ始めたばかりですが、プロと呼ばれる人たちの感性を研究することも、新たな創造性の創出に向けて取り組んでいきます。

■参考文献

- (1) <https://journal.ntt.co.jp/article/5718>
- (2) https://www.rd.ntt/dtc/DTC_Whitepaper_jp_2_0_0.pdf
- (3) https://www.rd.ntt/research/JN202110_15612.html
- (4) <https://www.rd.ntt/research/DTC20210701.html>

(上段左から) 深山 篤 / 永徳 真一郎
(下段左から) 戸嶋 巖樹 / 小澤 史朗

デジタルツイン技術が将来の人や社会と調和しWell-beingに資するものとなるよう、社内外のさまざまな方と議論や協働を重ねながら技術開発を進めています。デジタルツイン技術の研究開発の進展にご注目ください。

◆問い合わせ先
NTTデジタルツインコンピューティング研究センター
E-mail dtc-office-ml@hco.ntt.co.jp

人々のWell-beingの理解と向上をめざした 人間情報科学研究

人々のWell-beingは多様であり、個人の心身の状態や価値観、さらには他者との関係性など多くの要因がかかわってかたちづくられます。私たちは、この多様なWell-beingを包括的にとらえ、背後に存在する人間の情報処理メカニズムを理解し、そのメカニズムに働きかける介入法を考え出すことで、人々のWell-beingの向上に貢献したいと考えています。本稿では、現在私たちが進める人の情動を基点としたWell-beingの理解と実現に関する研究を紹介します。

さいじょう	なおき	ふじの	まさひろ
西條	直樹	藤野	正寛
むらた	あいこ	おおいし	ゆうき
村田	藍子	大石	悠貴
わたなべ	じゅんじ		
渡邊	淳司		

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

人々のWell-beingと 人間情報科学研究

NTTコミュニケーション科学基礎研究所 人間情報研究部では、「ここまで伝わる」情報通信技術の実現をめざし、情報科学、心理学、神経科学という3つの切り口から、人間の脳や身体を対象として、感覚・情動・運動にかかわる情報処理メカニズムを研究しています。私たちは普段、目・耳・鼻・舌・皮膚といった感覚器官を通じて世界を感じとり、身体を動かしてその世界に働きかけています。この身体というインターフェースをとおして、私たちは相手のところを受け取ったり、相手のところに働きかけたりすることで、ところが伝わり合います。この「ところ」を伝え合う際にとりわけ重要で、しかも思いどおりにコントロールすることが難しいものが情動です。情動には、相手のところを受け取ったときに、無意識的に身体の反応として現れるもの（情動反応）と、その中で自覚・認知されたもの（情動認知＝感情）があ

り、それらが相互作用しながら、私たちの日常の知覚体験や行動を大きく修飾しています。

この情動は私たちのWell-beingにも深くかかわっています。Well-beingとは「生き生きとした状態」のことで、私たち自身がありありと感じているものです。この主観的な体験には、環境や相手から情報を受け取ったときに生じる情動反応や、その中で私たちが主体的に意識できる情動認知が組み込まれています。つまり、Well-beingは情動から多大な影響を受けているのです。そのため、人の情動のメカニズムを理解し、適切に対処することが、Well-beingの向上支援につながるものと考えています。

心身の状態を整える「情動制御法」 としてのマインドフルネス瞑想研究

日々変化する情動は時に私たちの生活を豊かにし、時に私たちを苦悩へと引きずり込みます。こうした情動変化とうまく付き合い、「生き生きとした状態」であることが個人のWell-

beingの基礎になります。しかし、めまぐるしく変化する環境、あふれる情報、多くの他者とのかかわりなど、ストレスの多い現代の社会生活においては、その実現が容易ではありません。そこで近年注目を集めているのがマインドフルネス瞑想です。現在、世界的にこの瞑想を社員のストレス低減や集中力・生産性向上の方法として導入する企業や、子どものストレス低減や感情とうまく付き合う方法として導入する学校も増えてきており、さらにはさまざまな瞑想アプリが開発されるなど、社会実装も急速に進んでいます。私たちはこのマインドフルネス瞑想の実践がもたらす生理・心理・神経メカニズムの研究を進めており、科学的知見に基づいた新たな介入法の確立をとおして人々のWell-beingの向上に貢献することをめざしています。

マインドフルネス瞑想がもたらす ストレス低減効果の生理基盤

「今この瞬間の経験を評価や判断することなくありのままに気づいている

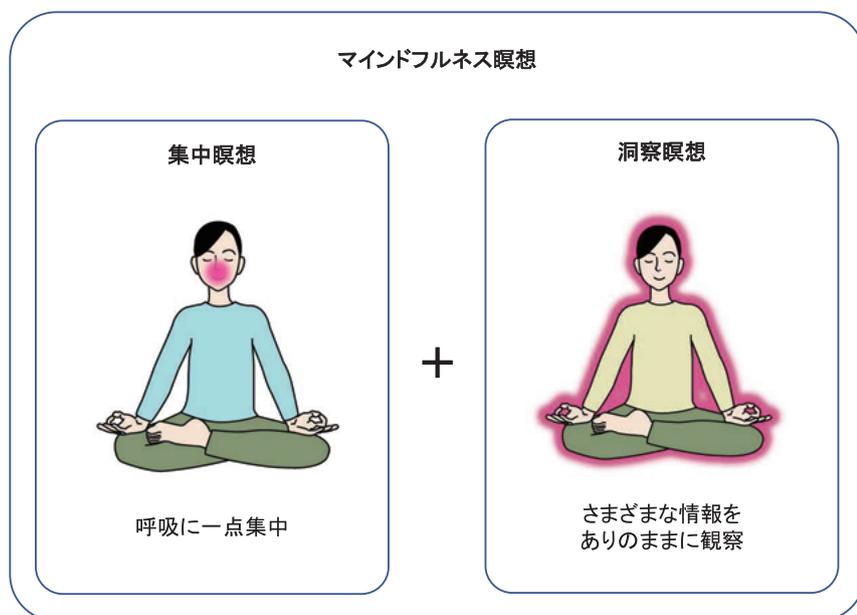


図1 マインドフルネス瞑想を構成する集中瞑想と洞察瞑想

状態」を「マインドフルネス」といいます。この状態を実現するための「マインドフルネス瞑想」は、呼吸など1つの対象に対する注意集中から始め、徐々にその範囲を広げてさまざまな感覚や感情や思考に気づき、かつそれらに振り回されないように注意や情動を制御するためのメンタルトレーニングです。近年多くの研究によって、この瞑想がストレスの低減やうつ病の再発予防、Well-beingの向上に効果があることが明らかになってきています。

しかし、これまでの研究では、マインドフルネス瞑想がストレスを低減する背後にある生理学的メカニズムは不明確なままでした。一般に、ストレスを測る指標として自律神経活動やストレスホルモン濃度が用いられますが、マインドフルネス瞑想がこれらの生理指標にもたらす効果に一貫性がなかったのです。そこで、私たちはマインドフルネス瞑想が1つの対象に注意を集中する「集中瞑想」と、さまざまな感

覚や感情や思考にありのままに気づいている「洞察瞑想」という2つの瞑想法を組み合わせたものであることに着目しました(図1)。過去の研究では、どちらか一方の瞑想法の効果が出ていたり、2つの瞑想法の効果混ざって出ていたりしたために、研究間に一貫性がなかったのではないかと考えました。

まず、私たちは瞑想未経験者でも集中瞑想や洞察瞑想を実践できる各30分のインストラクションを開発し、集中瞑想と洞察瞑想がもたらす生理学的なストレスレベルの変化を調べました。その結果、集中瞑想はリラックスの生理的基盤である副交感神経の活動を上昇させました(図2(a))。一方、洞察瞑想は覚醒の生理的基盤である交感神経の活動を上昇させ(図2(b))、同時にストレスの指標といわれるコルチゾールのレベルを低下させました(図2(c))。これらの結果を解釈すると、集中瞑想では、1つの対象に集中することで雑念が静まりリラックスできて

いた可能性が考えられます。一方、洞察瞑想では、逆にさまざまな感覚や感情や思考に気づいているような覚醒度が高い状態でありながら、それらにありのままに気づけているためにストレスが低下していた可能性が考えられます(図2(d))。このように、集中瞑想と洞察瞑想は互いに異なる生理メカニズムを起動して、それぞれ異なる方法でストレス軽減に寄与していることが示されました⁽¹⁾。

このような集中瞑想と洞察瞑想を効果的に組み合わせることで、自律神経活動やホルモンの変化などの個人の内部状態を適切にコントロールすることを通じて、私たちのWell-beingを自分自身で向上できる可能性がみえてきました。

人々のWell-beingの多様な要因を測る

人々のWell-beingは多様であり、個々人の身体や情動の状態だけで決まるものではありません。その人にとって大切なことや、その人が他者や環境とのかかわりをどのようにとらえているかなどによっても変化するものです。つまり、人々のWell-beingをより深く理解するためには、より多面的にとらえる必要があります。そこで私たちは、①主観的な心身の状態変化、②自分にとって満たされるべき価値(価値観)、③他者との関係性のとらえ方(自己観)、を計測する独自の手法を考案し、それぞれの妥当性の検証を進めています。

■心身の状態変化をとらえる直感的・身体的経験サンプリング手法

情動には身体的な情動反応と主観的な情動認知という側面があることか

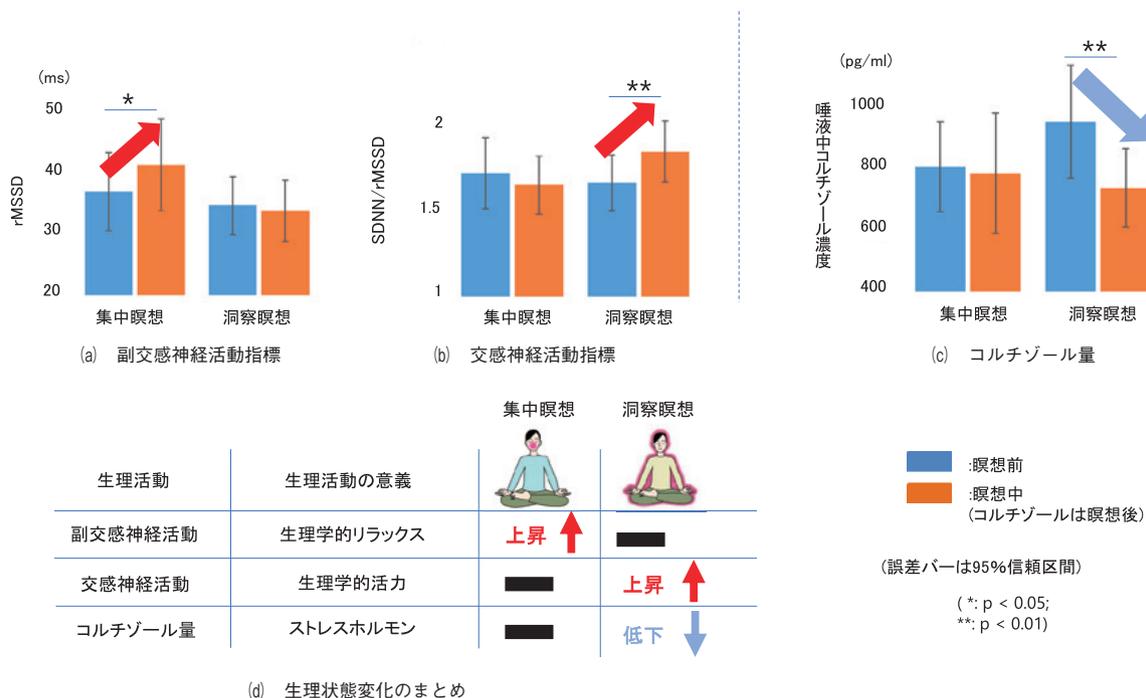


図2 マインドフルネス瞑想がもたらす生理状態変化

ら、個人の内部状態を知るためには、ホルモンや自律神経活動といった客観的な生体指標に加え、主観的な心的状態の変化を計測することも必要です。主観的な心身の状態の評価方法の1つに経験サンプリング法があります。これは人々の思考や感情、行動などをその事象が起こった瞬間またはその直後に回答し収集する方法ですが、1日に何回も記録するため、簡単かつ直感的に回答できる方法が望まれます。そこで私たちは、身体性を伴い、直感的かつ主観的な表現である感嘆詞やオノマトペを活用することを考案しました⁽²⁾。これは、1日の中で数回、その瞬間の気分を「わーい」や「しょんぼり」といった感性表現語で記録していく方法で、ユーザの負担が少ないかたちで、主観的で刻々と変化していく心的状態を調べることができます(図3(a))。

実際にこの手法を使って日々の心的

状態の変化とWell-beingの関係を調査したところ(16名×4週間の調査)、例えば、「いい1日だったな」(Well-beingが高い)と思う日には、瞬間的な喜びである「よっしゃあ」よりも、未来への期待である「うきうき」や、ポジティブな状態である「いきいき」「にこにこ」が多く記録されることなどが確認されました(図3(b))。

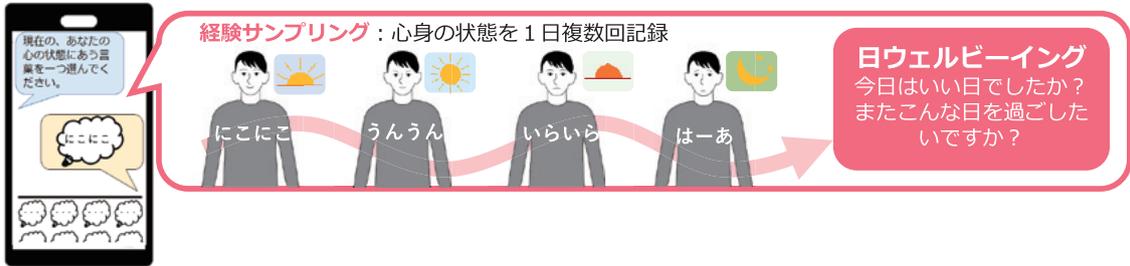
■価値観の可視化・共有ツール

自分にとっての大切なもの、心が満たされるものは人それぞれです。自分の価値観に改めて気づくこと、周りの人の価値観との共通点や相違点に気づいて、相互理解することは多様なWell-beingを尊重し実現する第一歩です。

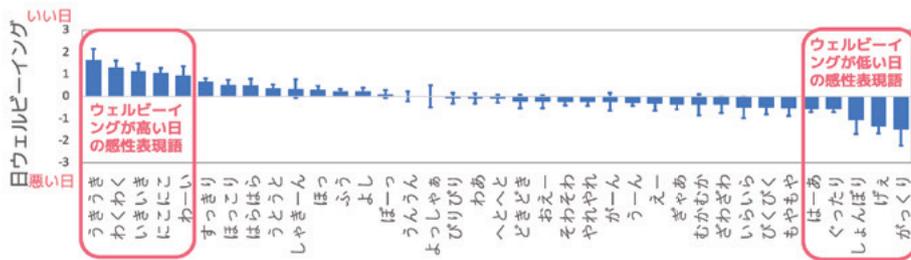
私たちは約1300名に「自分にとって大切なこと」を3つ挙げてもらうアンケート調査を実施し、そこで得た約3900の回答をカテゴリ化しました(図4(a))。その結果、自分に関すること

(I)、他者とのかわりに関すること(We)、地域や社会とのかわりに関すること(Society)、世界や自然とのつながりに関すること(Universe)に分類できることが分かりました⁽³⁾。この4つの分類の中で主要な要因を抽出し、27枚から成る「わたしたちのウェルビーイングカード」を作成しました⁽⁴⁾(図4(b))。このカードは、自分や周りの人がどんな価値観を持っているのかに気づくことを促進するツールとして利用できます。

実際に、小学生を対象にこのカードを活用し、自分のWell-beingにとって大切なことをグループの中で紹介し合い、グループ全員のWell-beingを実現する旅行プランを考えるワークショップを実施しました。参加者からは「他の子と同じところ、違うところがあってびっくりした」「他の人がいることで旅行の物語が無限に広がっ

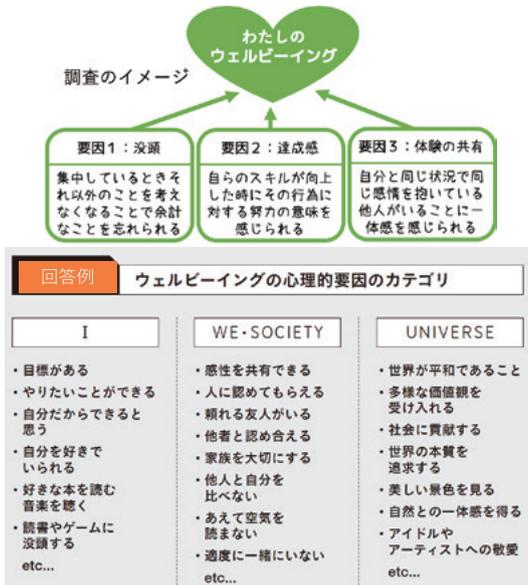


(a) 感性表現語をモバイル端末を用いて1日に複数回記録する手続きのイメージ



(b) 1日のウェルビーイングと感性表現語の関係性

図3 感性表現語を使った経験サンプリング手法



(a) 調査に基づいて自由記述をカテゴリ化

わたしたちのウェルビーイングカード



※カードの一部を抜粋

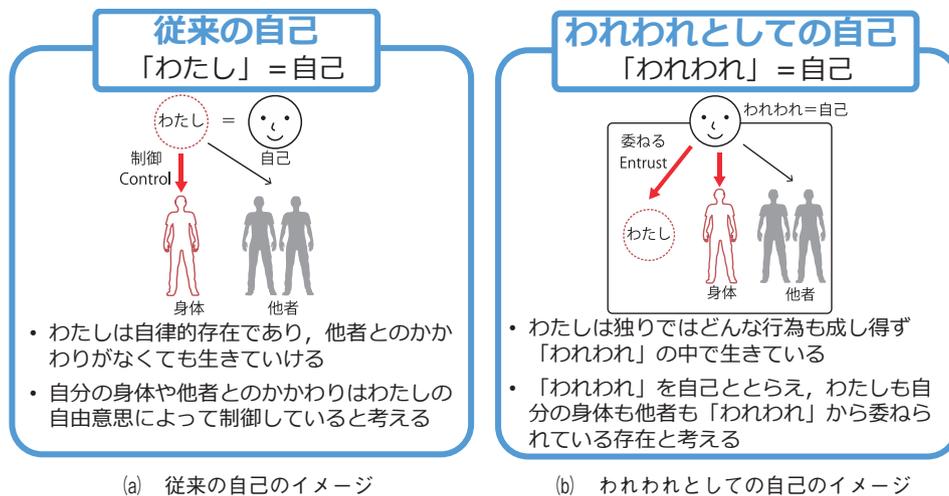
(b) カテゴリ化に基づいて27枚のカードを作成

図4 わたしたちのウェルビーイングカードの作成

た」といった感想があがるなど、価値観の多様性の相互認識が進んでいた様子がみられました。

■全体論的自己観 Self-as-we 尺度
自分と環境や他者との関係性のとらえ方、つまり「自己観」は文化や個人

によって異なることが指摘されています。私たちは京都大学の哲学者出口康夫教授との共同研究で、個人特性計測



(a) 従来の自己のイメージ

(b) われわれとしての自己のイメージ

図5 われわれとしての自己

に関する心理学の手法に基づいて、出口教授が提唱する「われわれとしての自己観 (Self-as-We)」を定量評価する「Self-as-We尺度」を開発しました⁽⁵⁾。

「わたし」は自律的存在であり、自己であるわたしが道具や環境を制御し、他者とのかわりがなくても「わたし」は存在可能であるととらえる自己観が一般的ですが、「われわれとしての自己観」は、他者や環境、道具を含むあらゆる物からなる「われわれ」全体を自己ととらえ、その中の「わたし」は、そのほかの人や物と同じく、「われわれ」から行為の一部を委ねられている存在とみなします (図5)。

つまり、「われわれ」の中の人や物は等しく仲間であり、尊重すべき存在であるというとらえ方でもあります。Self-as-We尺度は、このような環境や他者とのかわりとのとらえ方を、複数の項目から構成されるアンケートによって定量化する尺度です。

実際にこのSelf-as-We尺度を用いて、コロナ禍におけるメンタルヘルスと自己観の関係性を調査すると、「われわれとしての自己観」の度合いが強

い人ほど抑うつ傾向が低い、つまりメンタルヘルスが良好な状態であることが分かりました⁽⁶⁾。

おわりに

人々のWell-beingの向上に貢献するためには、その背後にある人の情動のメカニズムの理解に加え、多様なWell-beingを包括的にとらえて理解し、働きかけることが必要です。私たちはこれからも、心理学、神経科学、情報科学、哲学やデザインなど多様な視座から人々のWell-beingを理解するとともに向上に貢献することをめざす人間情報科学研究を進めていきます。

参考文献

- (1) Y. Ooishi, M. Fujino, V. Inoue, M. Nomura, and N. Kitagawa: "Differential Effects of Focused Attention and Open Monitoring Meditation on Autonomic Cardiac Modulation and Cortisol Secretion," *Frontiers in Physiology*, Vol. 12, No. 675899, July 2021.
- (2) 渡邊・村田: "ポジティブ・コンピューティングを自分事とするために: ウェルビーイングへの身体性からのアプローチ," *感性工学*, Vol. 18, No. 2, pp. 63-67, 2020.
- (3) 渡邊・ドミニク・安藤・坂倉・村田: "わたしたちのウェルビーイングをつくりあうために—その思想、実践、技術," *ピー・エヌ・エヌ* 新書, 2020.
- (4) <https://hyper.ntticc.or.jp/kids2021/ourwellbeingcards>

- (5) 渡邊・村田・高山・中谷・出口: "「われわれとしての自己」を評価する—Self-as-We尺度の開発—," *PROSPECTUS*, Vol. 20, pp. 1-14, 2020.
- (6) 村田・渡邊・出口: "新型コロナウイルス感染拡大下における抑うつ傾向と「われわれとしての自己」との関係," *PROSPECTUS*, No. 20, pp. 15-33, 2020.



(上段左から) 西条 直樹/ 藤野 正寛/ 村田 藍子

(下段左から) 大石 悠貴/ 渡邊 淳司

私たちはこれからも、人間情報科学の基礎研究をとらえて、人々の多様なWell-beingの理解と向上に貢献していきます。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
人間情報研究部
TEL 0774-93-5020
E-mail cs-liaison-ml@hco.ntt.co.jp

主役登場

Well-beingのための情報通信技術のデザインをめざして

赤堀 渉

NTT 社会情報研究所
研究員



Well-beingは、人と情報通信技術のより良いかかわり方を議論するうえで、近年注目されている概念の1つです。例えば、新型コロナウイルスの感染拡大による影響から、リモートワークが急速に普及しました。しかし、勤務形態の移行に伴う職場の同僚からのサポートの有無や仕事量の変化などが、従業員のWell-beingの悪化につながることが報告されています。このような背景から、現在、Well-beingに焦点を当てた情報通信技術のデザインが求められています。

私の所属するグループでは、Well-beingに焦点を当てた情報通信技術のデザインについて議論するだけでなく、「Well-beingとは何か。どのように測るか」という議論も行っています。この問いは長年議論されてきましたが、Well-beingが多様な側面を持つため、いまだに統一的な答えが出ていない難しい問いです。しかし、情報通信技術を研究開発している民間企業において、情報通信技術が人々や社会のWell-beingに及ぼす影響を深く考えることは、意義のあることだと私は考えています。

私はこれまで人々の支え合いの効果に関心を持ち、個人と集団の関係性に基づくWell-beingに焦点を当てて研究に取り組んできました。例えば、リモートワークが従業員のWell-beingに及ぼす影響を調査した研究では、リモートワーク時において、元々つながりのある同僚との関係性

は強いまま維持されるものの、対話や接触の機会が少ない同僚との関係性はより希薄になり、関係性の二極化がWell-beingの低下につながる可能性を発見しました。そして、この結果に基づき、つながりの弱い同僚との関係性を強化するための情報通信技術のデザイン指針について議論しました。ただし、人と情報通信技術のかかわり方はさまざま、その影響を評価する標準的な尺度が存在しないため、情報通信技術のデザイン指針を導き出すことは一般的に難しいことです。しかし、望ましいとされる結果を数量的に測定するような量的アプローチだけでなく、結果に至る過程を問うような探索的な特性を持つ質的アプローチも併せて行うことで、情報通信技術のデザイン指針を導いていくことに、私はやりがいを感じています。

Well-beingに関する研究は、主に心理学や社会学の分野において活発に議論されていますが、Well-beingのための情報通信技術のデザインをテーマにした研究はまだ多くありません。この要因として、例えば情報通信技術がユーザの持続的なWell-beingにもたらす影響を評価することの難しさが考えられます。今後は、こうした研究課題に向き合いながら、人々や社会のWell-beingに良い影響を与える情報通信技術をデザインできるように、着実に研究を進めていきたいと思っています。

特集

いま 変化する現在， あす 持続する未来

新型コロナウイルス感染症の流行によって我々の社会活動は大きく制限されることとなった。一方でAI・機械学習などの技術も日々進歩し、社会活動の持続に向けた活用が拡大している。さらに、情報科学、人間科学の基礎研究では、このような変化する現在に適応し、持続する未来を切り拓く、新たな展開が生まれている。本特集では、NTT コミュニケーション科学基礎研究所で実施している情報科学・人間科学の基礎研究について、最新の内容を非専門家にも理解できるようにかみ砕いて紹介する。

人工知能

音声強調

生体情報学

分散学習

数論

Communication Science

変化する現在に^{いま}適応し、持続する未来を^{あす}切り拓く

コミュニケーション科学

——人・社会・環境との調和と共生をもたらす技術の創出—— **32**

NTT コミュニケーション科学基礎研究所における最近の研究成果のいくつかと、今後の展望について紹介する。

あなたの声を「すぐそば」品質で聴くAI

——遠くからでも近接マイク品質で混ざった音を聞き分ける

革新的音響処理技術 **36**

複数の話者から離れたマイク（遠方マイク）で収録した音から、話者の近くのマイク（近接マイク）で収録したような高品質な音声を取り出す音声強調の最新技術を紹介する。

モバイルセンシングを活用したパーソナル心臓モデリング **41**

心臓の状態と働きをコンピュータ上に写し取ることの試みの中で開発した生体情報の計測技術と、計測した情報を活用するための新たな情報処理技術を紹介する。

デジタルツインでモビリティ群を賢く制御する

——分散深層学習がもたらす未来の可能性—— **45**

学習可能なデジタルツインを介して、交通網やデータセンタ網を賢く制御する研究プロジェクトについて紹介する。

対称性に基づく解析学と幾何学による数論と量子相互作用 **50**

量子光学におけるもっとも基本的な理論モデルとされる量子ラビ模型などを取り上げ、それらと現代数学、特に整数論とのかかわりを、対称性の観点からの研究経緯、今後の進め方について紹介する。

主役登場 小林 明美（NTT コミュニケーション科学基礎研究所） **57**

とっさに判断して動く脳のメカニズムの解明に向けて

変化する現在^{いま}に適應し，持続する未来^{あす}を切り拓く コミュニケーション科学

——人・社会・環境との調和と共生をもたらす技術の創出

NTT コミュニケーション科学基礎研究所（CS研）は，昨年創立30周年を迎えました。設立当初より，人と人および，人とコンピュータとの「ここまで伝わる」コミュニケーションの実現をめざして，人間と情報の本質に迫る基礎理論の構築と，社会に変革をもたらす革新技術の創出に取り組んできました。本稿では，CS研における最近の研究成果のいくつかと，今後の展望に向けた取り組みについて紹介します。

なや ふとし
納谷 太

NTTコミュニケーション科学基礎研究所 所長

はじめに

NTTコミュニケーション科学基礎研究所（CS研）は，1991年7月4日に京阪奈に設立されました。当初，国際電気通信基礎技術研究所（ATR）内に間借りし，機械学習および情報理論に関する2つの研究グループから開始したCS研は，現在，京阪奈と厚木の2拠点において約150名の所員が集う組織となりました。また，CS研の30年間のあゆみを振り返り，昨年のオープンハウスの開催に合わせて，設立当初からの主な研究成果などをまとめた創立30周年記念ウェブサイトを開設しています⁽¹⁾。

人と人とのコミュニケーションを理解することをミッションとして始まったCS研の研究は，「見る」「聞く」「話す」などに代表されるような，人と同等のコミュニケーション能力をコンピュータに持たせるメディア処理や，量子情報理論や機械学習・データ科学などを含む「人の能力に迫り

凌駕する研究」と，人のさまざまな感覚運動能力のメカニズムを追求する人間科学および，その中でも特にトップアスリートなどの優れた認知能力の解明をめざした多様脳科学などの「人を深く理解する研究」として発展してきました⁽²⁾。これらの研究は，この30年間にわたり，それぞれの年代における技術的な進歩や社会的なニーズを反映して変化し発展しつつも，「コミュニケーションの本質を理解する」というCS研設立当初からの研究理念が貫かれ，人や社会に寄り添う技術の創出に向けて脈々と継続されてきました。以降では，それぞれにおける最近の研究事例のいくつかを紹介します。

人の能力に迫り凌駕する

深層学習技術の登場により，「見る」「聞く」「話す」などのメディア処理に関するAI（人工知能）技術は格段に進歩し続けており，例えば画像認識のコンペティションなどにおいてはす

で人間の識別性能を超えたといわれています。しかし，一般的に深層学習で高い性能を得るためには，入力データとその正解ラベルをペアにした膨大な学習データが必要です。

一方で，人間は少ない情報しか得られない場合でも，これまでの経験からの類推や，欠けている情報を他の情報から補完することなどにより，柔軟で高度な推論を行えます。例えば，写真は三次元の空間情報を二次元画像としてとらえたものですが，人間はこれまでの経験に基づき，写真を見ただけで被写体の持つ形状や奥行きなどの三次元情報のある程度推測できます。

従来，このような能力をコンピュータで学習するには，写真として撮影された二次元画像に加えて，深度センサやステレオカメラなどの特殊な装置で計測した三次元情報を含むデータをペアとして大量に取得し用意する必要があります。これには膨大なコストを要します。このようなデータ取得上の課題を解決するため，CS研では，力



図 NTTコミュニケーション科学基礎研究所の研究領域

メラの持つ光学的な制約として、絞り
とボケの関係を考慮した新たな深層学
習技術「Aperture Rendering
GAN」⁽²⁾を提案しています。本技術
は、インターネット上にある公開画像
などの一般的な写真群（二次元情報）
のみから、奥行きやボケ効果といった
三次元情報を学習することができ、さ
らに、被写界深度を変えたボケ感の異
なる画像を新たに生成することを可能
にしています。

一方、人間は、パーティ会場など複
数の人が会話していたり、雑音や残響
のある環境の中で、聞きたい人の声に
集中して聞き分ける「選択的聴取」と
いう優れた「聞く」能力を持っていま
す。CS研では、これまで音声のみを
用いて聞きたい人の声を聞き分ける技
術SpeakerBeamを提案してきまし

たが、昨年、音声に加えて映像情報を
組み合わせることにより、人間のよう
に複数の手掛かりを活用して選択的聴
取を実現する「マルチモーダル
SpeakerBeam」⁽³⁾を提案しました。
本技術により、声質が似通った複数話
者が存在する場合には唇の動きを主な
手掛かりとし、逆に唇の映像が得られ
ない場合には音声を主な手掛かりとす
ることにより、頑健で高精度な話者音
声の分離を実現しています。本研究
は、音声に限らず、消防車のサイレン
や犬の鳴き声など、注目すべき音だけ
を聞き分けるユニバーサル音抽出技術
へと発展しつつあります。本特集にお
いては、離れた位置にあるマイクで収
録した音声から、話者の近くのマイク
で収録したような高品質の音声を抽出
する最新の音声強調技術⁽⁴⁾を紹介して

います。

CS研では、1990年代から人と自然
に会話する対話システムの研究を続け
てきました。当初は予約や検索などの
特定の目的に特化した対話システムの
研究が中心でしたが、最近では目的に
よらず広い話題を扱いながら、自然な
応答ができる雑談対話システムの研究
を進めています⁽⁵⁾。昨年は、京阪奈
CS研の所在する京都府精華町役場の
協力の下、窓口案内や観光案内などの
業務を行いつつ、雑談対話も楽しめる
AIの実証実験⁽⁶⁾を開始したほか、
Web等で収集した超大規模対話デー
タと深層学習を組み合わせた日本語最
大規模のTransformer対話モデルを
無償公開しました⁽⁷⁾。最近では、車を
運転中の車窓から見た画像や周辺情報
など、その場のコンテキストが時々

刻々変わるような状況を話題とし、ユーザとより一体感が感じられる対話システムを構築しています。さらに、対話相手の嗜好などを記憶し、対話内容の一貫性を保ちながら、より人に寄り添った対話を継続できるシステムの構築に向けた研究に取り組んでいます。

人に寄り添うという点では、機械学習の分野においても進展があります。例えば、融資承認や人材採用など、人を対象とした意思決定を機械学習によって行う場合、単純に予測精度のみを優先する従来の機械学習技術では、性別・人種・障がいなど、人間が持つ微細な特徴に関して不公平な予測になってしまう可能性があります。因果関係に基づく公平・高精度な機械学習⁽⁸⁾は、不公平さに関する事前知識を、特徴・予測結果間の因果関係（因果グラフ）としてモデル化することにより、個々人に対して公平かつ高精度な予測を実現しています。

また、本特集においては、機械学習の最先端の成果として、将来の自動運転社会を見据え、デジタルツインを用いたシグナルフリーモビリティの実現に向けた分散深層学習技術を紹介しています⁽⁹⁾。信号のない道路網において、個々の車どうしが通信して協調することにより、すべての車がぶつかることなく、かつ、全体の車の平均移動速度を向上させる新たな最適化技術です。

人を深く理解する

CS研では、人の感覚知覚運動メカニズムを探るうえで、脳の潜在機能が引き起こすさまざまな錯覚現象を手掛かりに研究を進めてきました。視覚や聴覚に関する錯覚を体験できるWebサイト、イリュージョンフォーラム⁽¹⁰⁾も公開しています。最新では、VR（Virtual Reality）を用いた錯覚提示実験により、壁が動く歩行速度が変化してしまう現象や、投手の投球動作が早くなると打者はボールの伸びを強く感じる現象など、視覚と運動の相互作用が引き起こす興味深い錯覚から脳の多様な潜在機能を明らかにした研究成果が得られています。

また、2021年10月には、静岡県立総合病院と人工内耳装用者の音声・言語認知の共同研究を開始しています⁽¹¹⁾。難聴児であっても、早期に人工内耳を装用することで健聴児と同程度の音声言語を獲得できることが実証されていますが、脳における音声知覚や言語発達のメカニズムは未解明のままです。医学と脳科学の両面からのアプローチにより、高齢者などの難聴者における聴覚機構の態様を明らかにし、音声知覚・言語発達の個人差の背後にあるメカニズムの解明とこれに基づく支援などの研究に取り組んでいます。

言語獲得に関する研究では、CS研は1999年に日本語約8万語の単語のなじみ度合いを7段階で評価した単

語親密度データベースを公開してきましたが、2021年には新たに出現した単語を加えた16万語以上について再調査した「令和版単語親密度データベース」をNTT印刷から提供を開始しています⁽¹²⁾。この単語親密度データベースを用いることにより、50個の単語を知っているか否かを答えることで、おおよその語彙数を推定する技術も構築しており、「令和版語彙数推定」としてインターネットから利用できるWebサイト⁽¹³⁾を公開しています。

人・社会・環境との調和と共生をもたらし技術の創出に向けて

CS研の研究は各分野の専門性を究めることで発展してきましたが、近年では相互の専門分野をまたいだ研究が増えつつあります。例えば、「見る」や「聞く」などの単一のモダリティに特化したメディア処理研究は、前述した音と映像を用いた話者特定などのように、複数のメディアを同時に扱うクロスモーダル情報処理へと発展してきています。人間科学の分野においても多感覚統合のメカニズム解明などに研究がシフトしつつあります。また、昨年は、CS研における脳科学・人間科学・メディア処理の知見と技術を総動員した研究成果である「投手シミュレータ」が、世界最大のスポーツイベントにおけるソフトボール日本代表の金メダル獲得に貢献し、新聞やテレビなどで「秘密兵器」として取り上げられまし

た⁽¹⁴⁾。本特集においては、モバイルセンシングとメディア処理、機械学習を組み合わせたパーソナル心臓モデリングの取り組みについて紹介しています⁽¹⁵⁾。

昨今の科学技術の進歩とコモディティ化はますます加速しています。さらに、新型コロナウイルス感染症のパンデミックや、地球規模の気候変動や自然災害の増大、国際紛争など社会情勢の変化により、日々の生活様式や価値観が激変しています。ますます複雑化・多様化する社会課題の解決には、分野内での研究を追求するだけでは限界があり、周辺分野の研究成果とのシナジーにより新たな価値を創造する研究や、異分野と融合した新たな学際分野を切り拓くことの重要性はますます高まっています。

一方、基礎研究においては、これまでとは抜本的に異なる、より長期的視野に立った研究アプローチも必要です。このような問題意識の下、現代数学の基礎理論を研究する組織「基礎数学研究センタ」を2021年10月にCS研内に設立しました⁽¹⁶⁾。基礎数学研究センタにおける取り組みの詳細については、本特集記事『対称性に基づく解析学と幾何学による数論と量子相互作用』⁽¹⁷⁾を参照ください。今後、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想実現に向けて、さまざまな分野で生まれる課題について、最新の現代数学手法を駆使しながらアプローチして解

決していくとともに、多様な価値観を持つ人と、社会、環境との調和と共生をもたらし、未来へと持続させていくコミュニケーション科学研究に取り組んでいきます。

■参考文献

- (1) <https://www.kecl.ntt.co.jp/30th/>
- (2) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2021/06/25/210625a.html>
- (3) Delcroix・落合・佐藤・大石・木下・中谷・荒木：“聞きたい人の声に耳を傾けるAI——深層学習に基づく音声の選択的聴取技術 SpeakerBeam,” NTT技術ジャーナル, Vol.33, No.7, pp.21-25, 2021.
- (4) 中谷・池下・加茂・木下・荒木・澤田：“あなたの声を「すぐそば」品質で聴くAI——遠くからでも近接マイク品質で混ざった音を聞き分ける革新的音響処理技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.34, No.8, pp.36-40, 2022.
- (5) 杉山・水上・有本・成松・千葉・中嶋：“機械が会話のパートナーになる日——大規模深層学習で拓く雑談対話システムの新境地,” NTT技術ジャーナル, Vol.33, No.7, pp.14-17, 2021.
- (6) <https://group.ntt.jp/topics/2021/11/12/ai-seika.html>
- (7) <https://group.ntt.jp/topics/2021/09/30/transformer.html>
- (8) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2021/06/01/210601b.html>
- (9) 丹羽：“デジタルツインでモビリティ群を賢く制御する——分散深層学習がもたらす未来の可能性,” NTT技術ジャーナル, Vol.34, No.8, pp.45-49, 2022.
- (10) <https://illusion-forum.ilab.ntt.co.jp/>
- (11) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2021/10/19/211019a.html>
- (12) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2020/06/03/200603a.html>
- (13) https://www.kecl.ntt.co.jp/icl/lirg/resources/goitokusei/vocabulary_test/php/login.php
- (14) https://www.rd.ntt/research/JN202112_16471.html
- (15) 柏野・渋谷・塚田：“モバイルセンシングを活用したパーソナル心臓モデリング,” NTT技術ジャーナル, Vol.34, No.8, pp.41-44, 2022.
- (16) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2021/10/01/211001a.html>
- (17) 若山：“対称性に基づく解析学と幾何学による数論と量子相互作用,” NTT技術ジャーナル, Vol.34, No.8, pp.50-56, 2022.



納谷 太

CS研は、人・社会・地球環境に自然な調和をもたらす「ここまで伝わる」コミュニケーションの実現に向けて、広く学際的な基礎研究に取り組むとともに、パートナーの皆様とのコラボレーションにより新たな価値創造に貢献していきます。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
企画担当
TEL 0774-93-5020
FAX 0774-93-5260
E-mail cs-liason-ml@hco.ntt.co.jp

あなたの声を「すぐそば」品質で聴くAI ——遠くからでも近接マイク品質で混ざった音を聞き分ける革新的音響処理技術

話者から離れたマイク（遠方マイク）で音声を収録すると、残響や他の話者の音声、背景雑音などが混在するため、音声は聞き取りにくくなり、音声認識などの性能も劣化します。本稿では、複数の遠方マイクで収録した音から、話者の近くのマイク（近接マイク）で収録したような高品質な音声を取り出す音声強調の最新技術を紹介します。残響抑圧、音源分離、雑音抑圧を全体最適かつ高速に実現する「統一モデル」、少数マイクで高品質な処理が可能な「スイッチ機構」、さらに、深層学習に基づく音声強調（SpeakerBeamなど）との連携について述べます。

なかに 中谷	ともひろ 智広	いけした 池下	りんたろう 林太郎
かも 加茂	なおゆき 直之	きのした 木下	けいすけ 慶介
あらき 荒木	しょうこ 章子	さわだ 澤田	ひろし 宏

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

はじめに

近年、スマートフォンによる音声認識やヘッドセットを用いたリモート会議など、話者の口元近くにおかれたマイク（近接マイク）で収録した高品質な音声に基づく音声アプリケーションが広く利用されています。一方、今後、AI（人工知能）が、より深く私たちの生活に溶け込み、身近（＝「すぐそば」）な存在になるためには、日常生活の中で、必ずしもマイクの「すぐそば」で話されていない音声をも同等の品質で扱えるようになることが求められます。しかし、話者から離れたマイク（遠方マイク）では、壁や天井からの反射である残響、複数の話者の音声、背景雑音などが混ざってしまうため、収録音声の品質は著しく劣化し、音声アプリケーションの性能も大きく低下します。この課題を解決するために、遠方マイクで収録した音から、近接マイクで収録したかのように高品質な各話者の音声を抽出する音声強調技術の研究を進めています。特に、本稿

では、単一マイクよりも高品質な処理が可能な複数マイクを用いる音声強調（複数マイク音声強調）の最新技術を紹介します。

近接マイク品質の実現のための課題

収録音から近接マイク品質の音声を抽出するには、残響抑圧、音源分離、雑音抑圧の3つの処理を行うことが必要です。残響抑圧により、遠くで響いている印象のぼやけた音声を、すぐ近くにいる印象のはっきりした音声に変えます。さらに、複数の音声や背景雑音が混在している場合は、音源分離や雑音抑圧により個々の音に分解します。これら3つの処理を同時に高精度に行うことで、近接マイク品質の1人ひとりの音声に分けることができます。

従来の複数マイク音声強調では、この残響抑圧、音源分離、雑音抑圧の各課題に対し、音が音源からマイクに伝播し混合する各過程（収録音の生成過程）を推定し、その逆変換を適用することで、各処理を実現していました（図

1 (a)）。具体的には、残響が壁や天井に反射してマイクに到達する過程、複数の音声が各方向から到来し混合する過程、雑音が全方向から到来し重畳する過程をそれぞれ推定し、各逆変換を行っていました。

例えば、世界で初めてNTTが実現した残響抑圧法WPE (Weighted Prediction Error)⁽¹⁾を用いれば、収録音中に雑音が含まれていない前提の下、どんな環境で収録されたかを知らなくても（すなわち、ブラインド処理で）収録音の残響過程を高精度に推定し、ほぼ完璧な残響抑圧を実現できていました。また、NTTをはじめ世界中で活発に研究が進められてきた独立成分分析^{(2), (3)}を用いれば、収録音中に残響が含まれていない前提の下、ブラインド処理により高精度な音源分離が実現できていました。

しかし、従来技術では、この3つの処理を同時に行えないという問題がありました。つまり、雑音、残響、複数音声が混在する収録音からその生成過程のすべてを同時に推定し、その全過

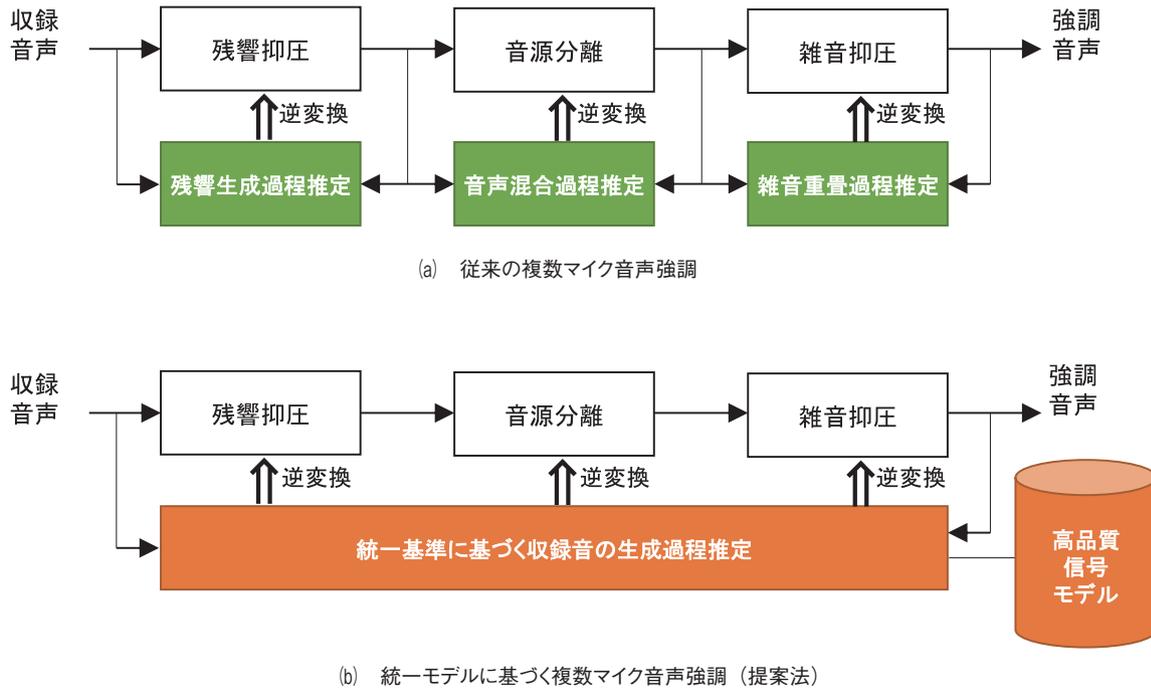


図1 複数マイク音声強調の従来法と提案法

程の逆変換を行うことはできませんでした。その結果、各処理を順番に適用するしかなく、例えば、最初の残響抑圧では、雑音が含まれていないという前提で処理されるため、高精度な処理はできませんでした。また、音源分離や雑音抑圧では、残響が完全に抑圧されているという前提で処理されるため、最善の処理性能を得ることはできませんでした。このため、全処理を組み合わせたいうでベストの性能を引き出すこと、すなわち、全体として最適な処理を行うことはできませんでした。

私たちの日常生活環境において遠方マイクを用いて収録した音声には、必ずといっていいほど、残響、複数音源、雑音のすべての問題がつきまといま

最適なかたちで実現することは、音響処理における重要な未解決課題でした。

残響抑圧、雑音抑圧、音源分離の統一モデル

これに対し、私たちは、3つの処理を全体最適なかたちで実現できる統一モデルを考案（世界初）しました^{(4),(5)}。統一モデルでは、まず、近接マイク品質の音声や雑音が満たすべき一般的な性質を数理的にモデル化します。そして、3つの処理を組み合わせた結果として得られる音がこの性質をもっともよく満たすようにするという「統一基準」に基づき各処理を最適化することで、全体最適な処理を実現します（図1(b)）。その結果、例えば、遠方マイクで収録した音声の認識性能を大幅に

改善できるようになりました（図2(a)～(c)）。

図3に、近接マイクで収録した2つの音声と雑音、およびそれらを遠方マイクで収録した音のスペクトrogramを示します。図から分かるように、近接マイクで収録した音声は、局所的な領域に音が集中するスパース（疎）な信号で、かつそれらが時間的に変化する非定常信号です。また、雑音は音がより広いエリアに広がったデンス（密）な定常信号です。これに対し、遠方マイクで収録した音声は、雑音、残響、複数音源が混ざったことで、近接マイクで収録した音声と比べると、よりデンスな非定常信号になるという特徴を持っています。

統一モデルでは、これらの音の特徴

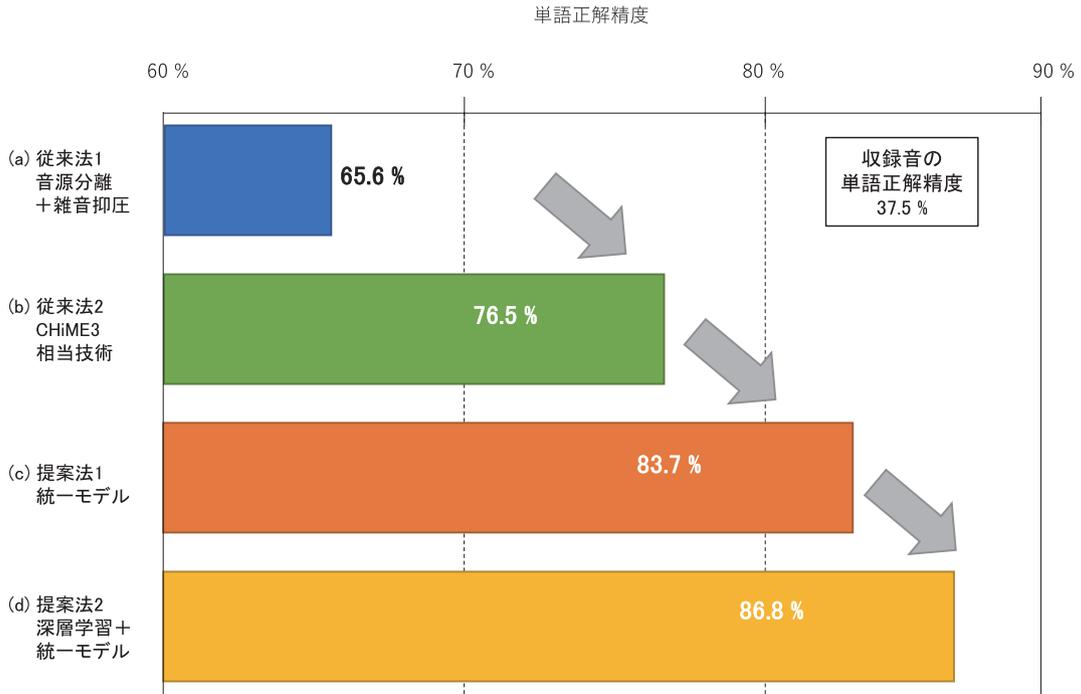
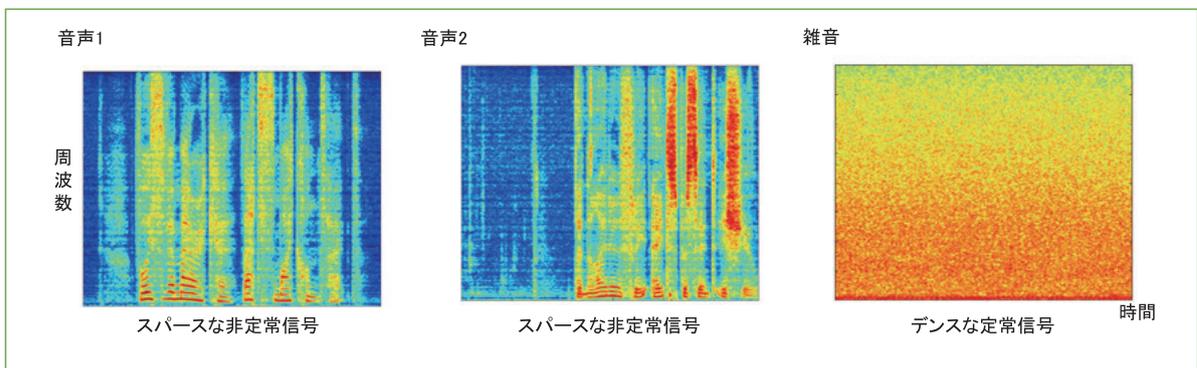


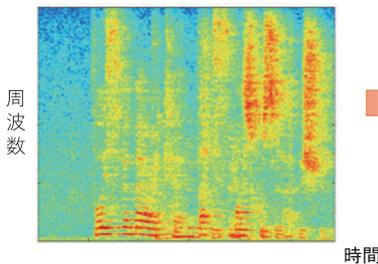
図2 複数マイク音声強調による認識率の改善

① 近接マイク品質の音



② 遠方マイクで収録した音

デンスな非正常信号



統一モデル:
最大限に上記の性質を
満たすように各処理を
制御

※各時間・周波数での音の強弱の特徴(赤:強い 青:弱い)

図3 近接マイクと遠方で収録した音のスペクトログラム

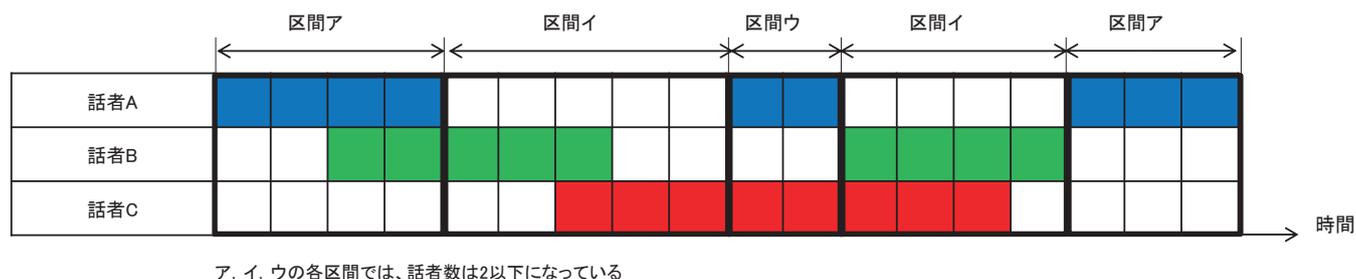


図4 3人の会話における各者発区間の例

の違いを利用します。すなわち、残響抑圧、音源分離、雑音抑圧を適用した結果の音が、近接マイク品質の音声や雑音の特徴を最大限に満たすように各処理を制御します。例えば、残響抑圧では、音源分離や雑音抑圧と組み合わせた結果の音をもっとも近接マイク品質を満たすように、残響の生成過程とその逆変換を推定し、適用します。音源分離や雑音抑圧も、同様に、他の処理と組み合わせた結果、もっとも近接マイク品質を満たすように音の生成過程とその逆変換を推定し、適用します。その結果、近接マイク品質を実現するという目的において、すべての処理を組み合わせたうえで、全体最適な処理が行えるようになりました。

統一モデルに基づく複数マイク音声強調の処理の高速化についても、これまでに、多くの成果が得られています^{(6), (7)}。例えば、図2の実験の処理（8本のマイクを用いて残響抑圧、音源分離、雑音抑圧の全体最適化）は、Linux計算機を用いて実時間以内で完了できるところまで高速化されています。また、残響が少ない環境で、背景雑音から1人の話者の音声をブラインド処理で抽出する問題に限定すれば、

組み込みデバイスを用いる場合でも、リアルタイム処理が可能な程度まで計算量を削減することができます。

少数マイクで高精度な推定を可能にするスイッチ機構

統一モデルを応用して、比較的少数のマイクでも高精度な推定を可能にする技術がスイッチ機構です^{(8), (9)}。従来、高精度な複数マイク音声強調を実現するためには、収録音に含まれる音源の数と比較して十分に多くのマイクを用いることが必要でした。これは、複数マイク音声強調を現実の問題に適用するのを難しくする課題でした。この課題を解決するために、スイッチ機構を導入することで、少数のマイクでも比較的高精度な処理が実現できるようになります。

スイッチ機構のアイデアを説明します。スイッチ機構では、収録音に多くの音源が含まれる場合でも、収録音を短い時間区間に分ければ、同時に音を発している音源の数を少なくできることに着目します。これを、図4を用いて説明します。図4は、横軸を時間にとって、3人の話者のそれぞれがいつ話していたかを各色付きの横バーで表

しています。これに対し、図で示した短時間区間に分けると、全体では3人の話者がいるにもかかわらず、各時間区間は2人しか話していないようにすることができます。そして、話者数が少なくなった短時間区間ごとに処理を切り替えて（スイッチして）複数マイク音声強調を適用することで、少数のマイクでも比較的高精度な処理が実現できるようになります。

統一モデルに基づく音声強調にスイッチ機構を導入する場合、上記の時間区間分けを含んだ処理の全体を最適化できるという特長があります。すなわち、短時間区間に分ける処理と、区間ごとに複数マイク音声強調を行う処理に対し、それらを組み合わせた結果得られる音声が高接マイク品質を最大限に満たすように、スイッチ機構と複数マイク音声強調の両方を同時に最適化することができます。

音響処理の基礎技術としての統一モデル

前述したように、統一モデルを用いることで、これまで試行錯誤的に組み合わせられてきた音声強調の3つの処理に対し、理論的にも実用的にも優れた

統合指針を与えることができます。また、スイッチ機構のように、より複雑な処理を組み合わせていくうえでも、統一モデルは、全体最適化を実現する仕組みを与えることができます。統一モデルは、今後、音響処理技術がさらに発展していく中で、その基礎を与える技術として広く利用されていくことが期待されます。

今後の発展：深層学習との最適な統合

複数マイク音声強調が発展していくうえで、音声強調のもう一つの重要なアプローチである深層学習との連携はととても大切です。深層学習では、SpeakerBeam⁽¹⁰⁾が実現した声の特徴に基づく選択的聴取や単一マイクによる音声強調など、複数マイク音声強調では困難な処理が実現できる一方で、残響があると処理音質が悪くなる、音声認識性能の改善は限定的であるなどの課題があります。これらの特徴は、複数マイク音声強調と相補的であり、どちらも欠くことができない技術です。例えば、複数マイク音声強調では、たくさんの音が混ざっているなかから目的話者のみを抽出することは困難ですが、深層学習の力を借りることでその課題を乗り越えることができます。一方、深層学習音声強調が推定した音声は、そのままでは音質が悪く、音声認識の性能もあまり改善できませんが、複数マイク音声強調を用いて近接マイク品質にすることで、複数マイク音声強調単体で処理する場合よりもさらに性能を向上させることができる

ようになります(図2(d))。今後、両者の最適な統合方法を構築することで、より高機能で高品質な音声処理が実現されていくと考えています。

参考文献

- (1) T. Nakatani, T. Yoshioka, K. Kinoshita, M. Miyoshi, and B. H. Juang: "Speech dereverberation based on variance-normalized delayed linear prediction," IEEE Trans. on Audio, Speech, and Language Processing, Vol. 18, No. 7, pp. 1717-1731, 2010.
- (2) N. Ono and S. Miyabe: "Auxiliary-function-based independent component analysis for super-Gaussian sources," Proc. of LVA/ICA 2010, pp. 165-172, Springer, St. Malo, France, Sept. 2010.
- (3) H. Sawada, S. Araki, and S. Makino: "Underdetermined convolutive blind source separation via frequency bin-wise clustering and permutation alignment," IEEE Trans. Audio, Speech, and Language Processing, Vol. 19, No. 3, pp. 516-527, 2011.
- (4) T. Nakatani, C. Boeddeker, K. Kinoshita, R. Ikeshita, M. Delcroix, and R. Haeb-Umbach: "Jointly optimal denoising, dereverberation, and source separation," IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, and Language Processing, Vol. 28, pp. 2267-2282, 2020.
- (5) R. Ikeshita and T. Nakatani: "Independent vector extraction for fast joint blind source separation and dereverberation," IEEE Signal Processing Letters, Vol. 28, pp. 972-976, 2021.
- (6) R. Ikeshita, T. Nakatani, and S. Araki: "Block coordinate descent algorithms for auxiliary-function-based independent vector extraction," IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 69, pp. 3252-3267, 2021.
- (7) T. Ueda, T. Nakatani, R. Ikeshita, K. Kinoshita, S. Araki, and S. Makino: "Low latency online source separation and noise reduction based on joint optimization with dereverberation," Proc. of EUSIPCO 2021, pp. 1000-1004, Dublin, Ireland, Aug. 2021.
- (8) R. Ikeshita, N. Kamo, and T. Nakatani: "Blind signal dereverberation based on mixture of weighted prediction error models," IEEE Signal Processing Letters, Vol. 28, pp. 399-403, 2021.
- (9) T. Nakatani, R. Ikeshita, K. Kinoshita, H. Sawada, N. Kamo, and S. Araki: "Switching independent vector analysis and its extension to blind and spatially guided convolutional beamforming algorithms," IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, and Language

Processing, Vol. 30, pp.1032-1047, 2022.

- (10) Delcroix・Zmolikova・木下・荒木・小川・中谷: "SpeakerBeam: 聞きたい人の声に耳を傾けるコンピュータ——深層学習に基づく音声の選択的聴取," NTT技術ジャーナル, Vol. 30, No. 9, pp. 12-15, 2018.



(上段左から) 中谷 智広 / 池下 林太郎 / 加茂 直之

(下段左から) 木下 慶介 / 荒木 章子 / 澤田 宏

私たちは、ロボットやコンピュータなどが人間と同様に私たちの会話を理解できるようにするための研究を進めています。複数マイク音声強調は、その重要な要素技術です。信号処理と深層学習を連携・発展させていくことで、未来のAIの耳を創造していきたい。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
メディア情報研究部
信号処理研究グループ
TEL 0774-93-5020
E-mail cs-liaison-ml@hco.ntt.co.jp

モバイルセンシングを活用した パーソナル心臓モデリング

デジタル技術を活用した，日常生活の中でのヘルスケアへの期待が高まっています。私たちはまず心臓に着目し，生体から生じる音や電気信号などを観測しながら，その人のその時々的心臓の状態と働きをコンピュータ上に写し取ることを試みています。本稿では，この試みの中で開発した生体情報の計測技術と，計測した情報を活用するための新たな情報処理技術を紹介します。

かしの
柏野

くにお
邦夫^{1, 2}

しぶえ
渋谷

りょうへい
遼平^{1, 2}

つかだ
塚田

しんご
信吾^{1, 2}

NTTコミュニケーション科学基礎研究所¹

NTT物性科学基礎研究所²

パーソナルな生体モデリング

センシング技術，通信技術，AI（人工知能）をはじめとする情報処理技術の進歩により，医療や健康の分野においても，場所や時間などの物理的制約が緩和されつつあります。すでにスマートウォッチなど装着型の機器を日常の健康管理に役立てている方も増えていますが，今後も日常生活の中での生体情報の活用が進むことで，病気になったときだけでなく，病気になる前から治療した後までの連続的なヘルスケアが可能になると考えられます。さらには，疾病ごとにパターン化された治療だけではなく，個人ごとに最適化されたヘルスケアへの期待も高まっています。これらをめざした研究開発や実用化の取り組みは，今世界中でさかんに行われています。

NTTでも，バイオデジタルツインと呼ぶシミュレータにより心身の状態の未来を予測することで，リスクのコントロールやWell-beingの向上を支援しようという「医療健康ビジョン」

を掲げています⁽¹⁾。バイオデジタルツインは，個人ごとに，その心身の全体にわたって，分子や細胞のレベルから臓器どうしのつながり，さらにはその人の暮らす環境のレベルまで，多様な情報を取り込み，それらのつながりをネットワークで表現した計算モデルです。本稿で述べるパーソナル心臓モデリングは，個々人の心臓の働きや状態を測定して，その人の心臓を，さまざまな想定でのシミュレーションが行えるようなかたちで計算機上に表現することを意味していますが，これはまさに，バイオデジタルツインを具体的に実現していくための取り組みの1つといえます。

私たちの研究チームでは，日常生活の中で負担なく計測できるという，スマートウォッチなどの装着型の機器の長所をなるべく活かしながら，これまでの機器よりも少し詳しい生体情報を得ることをねらいとして，生体情報の新しい計測方法と，得られた情報を活用する情報処理技術の研究を進めています⁽²⁾。

新しいセンシング

新しいセンシングの1つがウェアラブル心電計です。医療機関で一般的に行われる心電図検査では，手足と胸部に設置した合計10個の電極から12種類の電位差を得て，その波形を診断に役立てます。またスマートウォッチでは，両手の電位差から簡易的な心電図を得ることができるものも普及しています。これらに対し私たちは，心臓の活動を立体的にとらえる目的で，心臓が胸郭ともっとも近接する心尖部領域を基準点とし，ほぼ直交する3方向に対極を備えたウェアラブル心電計を提案しています（図1(a)）。試作品では，電極と配線が伸縮性のベルトと一体化しており，肩ベルトとウエストベルトを締めるだけで簡単に装着できるように工夫されています⁽³⁾。

また，心電図と同時に多チャンネルの音響信号を計測できる，AIテレ聴診器と呼ぶ装置を提案しています。ウェアラブル型（図1(b)）と手持ち型（図1(c)）を試作しており，いずれも，



(a) ウェアラブル心電計



(b) AIテレ聴診器（ウェアラブル型）



(c) AIテレ聴診器（手持ち型）

図1 研究用試作品

計測した情報をリアルタイムで遠隔地に送り、遠隔地において端末画面上で体表面上の位置を選びながら音を聴ける機能が備わっています。一般的な無線式の電子聴診器とは異なり、心臓の活動を立体的にとらえられるように、複数の個所で同時に音響信号をとらえる点がAIテレ聴診器の特徴です。

信号から生体内部を探る 情報処理

前述したセンシング装置は、目下のところ医療機器ではなく研究用の機器であり、日常生活の中で体の状態をできるだけ簡便かつ精緻に測り、心臓モデリングのための情報を得ることを主眼としたものです。つまり、単に測定するだけではなく、測定した情報から生体内部の状態や機能を推定するための情報処理の研究が重要なポイントです。

心臓は心筋細胞が周期的に活動することによって機能しています。心筋細胞の活動は、電気的な活動と力学的な活動の2つの側面をとらえることができます。一般に心電計では、心臓を構

成する多数の心筋細胞の活動電位の集合体が電位差として観測されます。また心音は、心臓の力学的活動、特に心臓内部に4つある弁の開閉がその主要因となっており、もし心臓にある種の異常があれば、血流のみだれなどからも音が生じて心雑音として観測されることが知られています。電気も音も、観測できるのは数多くの要因が混ざり合って生じた結果だけであり、その物理的機序を逆にたどってその原因、つまり心臓の状態を推定するのは容易なことではありません。私たちは、場所の手掛かりを得るために立体的にとらえた電気や音の情報を活用し、さらに機械学習への物理的制約の導入⁽⁴⁾をはじめとするさまざまな情報処理の工夫を行うことで、この問題に多面的にアプローチしています。

心臓の異常を検知しようとする場合、一般的な心電図では波形の異常がわずかなものにとどまる場合も少なくありません。私たちが提案する手法では、心電図の波形から、心筋細胞の集団の活動電位の変化に関する統計的パラメータを推定することによって、場

所ごとの心筋細胞の活動電位の可視化を試みています（テンソル心電図）⁽⁵⁾。活動電位の情報を可視化すれば、標準的な心電図に比べて非定型的な異常が明瞭に表現されやすく、心不全や虚血性心疾患、心臓突然死と関連する不整脈の早期発見などに役立つと期待されます。

また、心音を立体的にとらえることで、心臓のどこからどのような音が出ているかを推定できるようになると考えられます。音の発生場所やその音色・性質は、病気の有無や程度を判断するための重要な手掛かりになります。これまでは聴診器や心音計（マイククロホン）を体表面に当てて音をとらえていましたが、この方法でとらえられるのは体内で生じているさまざまな音が混ざったものであり、体内で発生している個々の音そのものを、非侵襲的に個別に聴く手段はありませんでした。これに対し、私たちが提案した心音の振動子分解技術 PCUSD（Physically-Constrained Unsupervised Signal Decomposition）は、体表で観測し

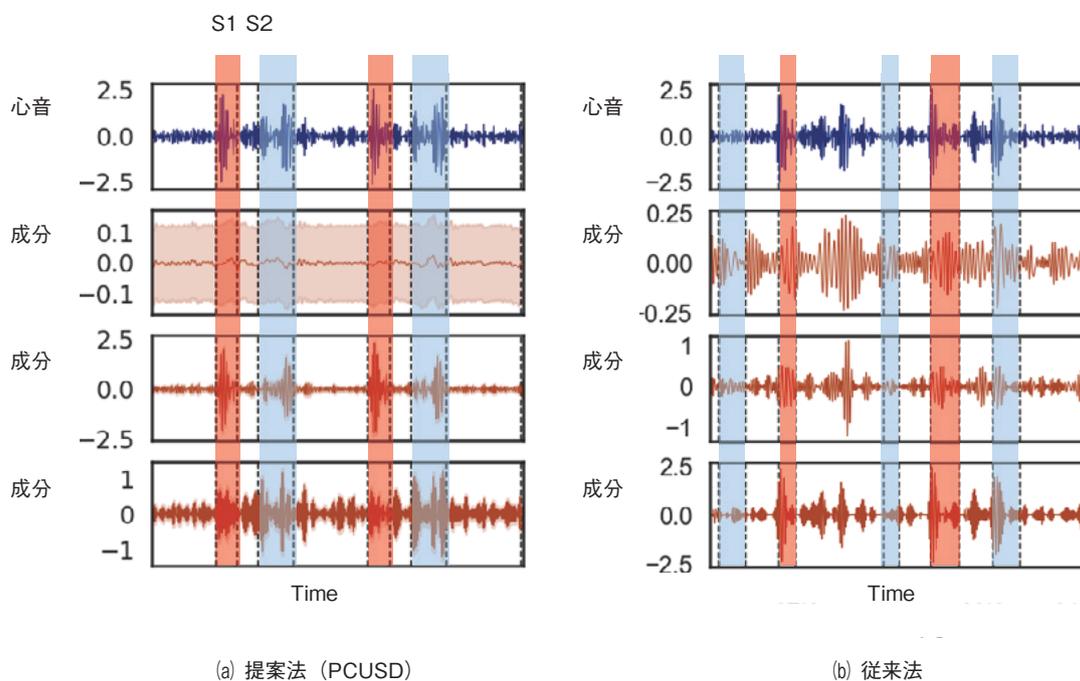


図2 提案法と従来法によるS1区間とS2区間の推定の例

た音から体内の音源を推定することを目的としたものです。その手掛かりとして、PCUSDでは、心臓の動きの周期性と、心音が発生する仕組みに着目しました。心臓は、平常時にはほぼ周期的に動いていて、S1、収縮期、S2、拡張期の4つの状態を順に遷移しています。心音を「ドキドキ」と表すとき、S1がドの音、S2がキの音に対応します。さらに、各状態において異なる弁が開閉し、それらの振動によって心音が発生します。そこで、弁の物理モデルに基づいた振動成分が複数存在し、それらの振幅が心周期の状態に応じて変化することで状態に応じた心音が生成されるという仮定の下、心音の発生機序を表現する確率的生成モデルを構成しました。

PCUSDを1チャンネルの心音に適用した例を図2に示します。提案法を評価するための方法の一例として、

S1音の区間とS2音の区間の推定精度を調べてみました。図2は僧帽弁逆流症の症例で、心雑音が含まれていますが、一般に心雑音の存在によって状態（ここではS1とS2の区間）の推定は一層難しくなります。実際、生成モデルを用いない従来法では、推定を誤る場合が生じやすくなっています。これに対し提案法では、同じ区間に対して、正しく推定されていることが示されています。これを数値で表したものが表で、従来法よりも精度が向上していることが示されています⁽⁶⁾。

さらに、この方法は複数チャンネルの心音に適用することもできます。図3は、大動脈弁狭窄症に罹患された方の体表面で観測した4チャンネルの音響信号(図3(a))から、PCUSDにより8つの体内音源波形(図3(b))を推定したものです。提案法では弁の振動の物理モデルを用いているため、これ

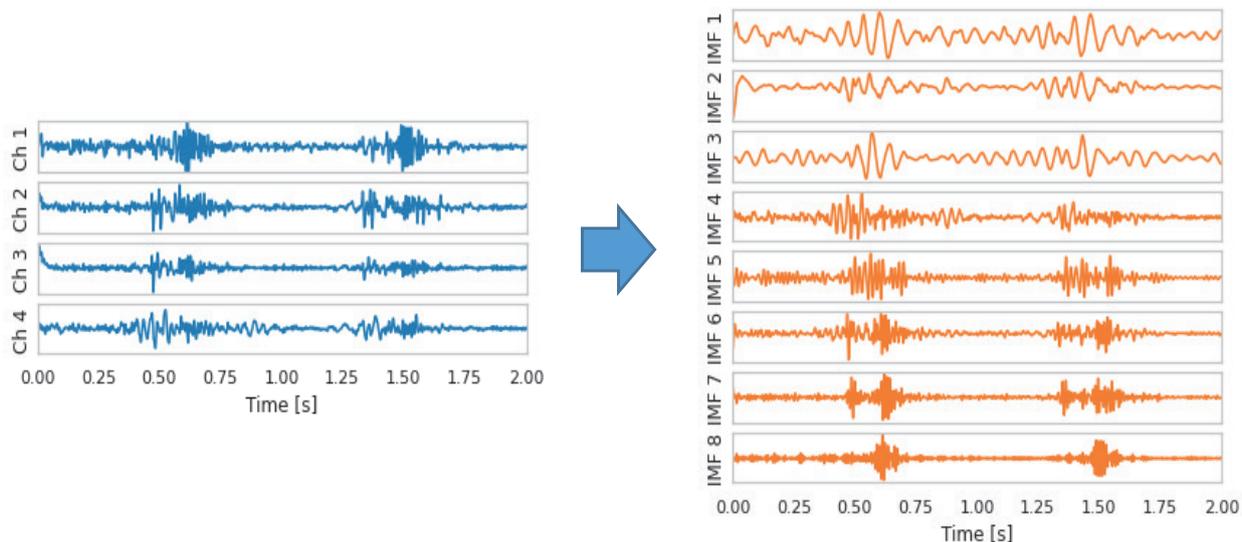
表 提案法と従来法の S1, S2 区間の推定精度 (F1スコアは精度を表す数値で、値が大きいほど良い)

F1スコア	提案法	従来法
S1	96.1	86.5
S2	96.4	85.7

らが心臓の各弁から発生しているような成分ということになり、そのそれぞれを音として取り出すことができたこととなります。将来的には、それぞれの波形をAIで解析することなどにより、不調になりかけている弁の状態やその変化を、体表面でとらえた音から客観的に調べることができるようになることも期待されます。

活用に向けて

本稿で紹介したように、新たな心電と心音に関するセンシングと推定の技術を活用すれば、現在普及している標



(a) 体表面でとらえた音

(b) 推定した体内音源波形

図3 体表面でとらえた音から推定した体内音源波形の例

準的な心電図や電子聴診器による聴診に比べ詳細に心臓の活動を把握できる可能性があります。心臓の異常には、心電に異常が現れやすいもの、心音に異常が現れやすいもの、そしてそれらを照らし合わせることで検出しやすいもの、などがあります。また、心臓の状態以外の情報を併用することで、シミュレーションの精度は向上するでしょう。そのような観点から、私たちは、その時々のも多種類の観測情報に基づく推定結果と、その人の過去の受診履歴や検査結果などを総合して、パーソナル心臓モデリングを実現することをめざしています。そのモデリングに基づいて、例えば、病気にかかるリスクを考えて生活習慣をコントロールしたり、早期発見につなげたりといった可能性が開かれると考えられます。

しかし、医療や健康への適用可能性、有用性を議論するためには、着実な研究と検証が何よりも重要です。現在、複数の医療機関、研究機関、専門病院などとも連携し、ある種の心疾患

の早期発見、心不全に罹患した方への支援、リハビリテーションへの活用などを想定して研究を進めており、今後も鋭意検証を行ってまいります。

■参考文献

- (1) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2020/11/17/201117c.html>
- (2) 中野・渋江・柏野・塚田・小笠原：“生体音と心電信号の新たな計測と解析の技術—パーソナル心臓モデリングによる心疾患の早期発見・リハビリ応用に向けて,” NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 5, pp. 27-31, 2021.
- (3) Y. Tsukada, M. Tokita, H. Murata, Y. Hirasawa, K. Yodogawa, Y. Iwasaki, K. Asai, W. Shimizu, N. Kasai, H. Nakashima, and S. Tsukada: “Validation of wearable textile electrodes for ECG monitoring,” Heart Vessels, Vol. 34, No. 7, pp.1203-1211, 2019.
- (4) M. Nakano, R. Shibue, K. Kashino, S. Tsukada, and H. Tomoike: “Gaussian process with physical laws for 3D cardiac modeling,” Proc. of EUSIPCO 2020, pp. 1452-1456, Amsterdam, Netherlands, Jan. 2020.
- (5) S. Tsukada: “Wearable textile electrodes for long-term vector ECG monitoring “Tensor Cardiography” ,” Proc. of ISMICT 2020, Nara, Japan, May 2020.
- (6) R. Shibue, M. Nakano, T. Iwata, K. Kashino, and H. Tomoike: “Unsupervised heart sound decomposition and state estimation with generative oscillation models,” Proc. of EMBC 2021, pp. 5481-5487, Guadalajara, Mexico, Oct. 2021.



(左から) 柏野 邦夫 / 渋江 遼平 / 塚田 信吾

ICTとAIによる医療の革新にリアルタイムで立ち会っているという緊張感を日々感じています。未来の生体情報処理に向け、着実に基礎研究を進めていきたいと考えています。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
メディア情報研究部
TEL 0774-93-5020
FAX 0774-93-5026
E-mail cs-liaison-ml@hco.ntt.co.jp

デジタルツインでモビリティ群を賢く制御する ——分散深層学習がもたらす未来の可能性

デジタルツインを介した集合知形成・協調制御の最新研究について紹介します。サーバ群やIoT (Internet of Things) 機器群に分散して蓄積されたデータや分散した制御系を学習可能なデジタルツインを介して協調利用することを考えています。これにより、個ではなく群を効率良く制御したり、分散して観測したデータを使って集合知モデルを形成し、全体の系を最適化することが可能になります。本稿では、デジタルツインを介して交通網やデータセンタ網を賢く制御する研究プロジェクトについて報告します。

にわ けんた
丹羽 健太

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

はじめに

スマートフォンやスマートスピーカを通じた音声によるシステム操作等の機械学習の恩恵を一般の人が利用することが当たり前になってきました。次世代の機械学習に関する大きなインベーションの可能性として、「個」ではなく、通信で連結された「群」を協調して制御・推論することで大規模な系全体（例えば交通網，データセンタ網，エネルギー網）を最適化したり、分散蓄積されたデータから集合知を形

成することが期待されています。本稿では、私たちが行ってきた学習可能なデジタルツインを介して交通網やデータセンタ網を賢く制御する研究プロジェクトについて報告します。

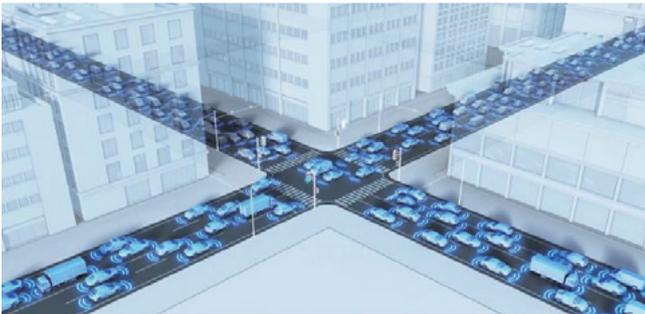
シグナルフリーモビリティプロジェクト

将来、ICTの高度化により、ヒト・クルマ・インフラが高度に協調し、安全・効率的な移動を提供する高度協調型モビリティ社会の実現が期待されています。IOWN (Innovative Optical

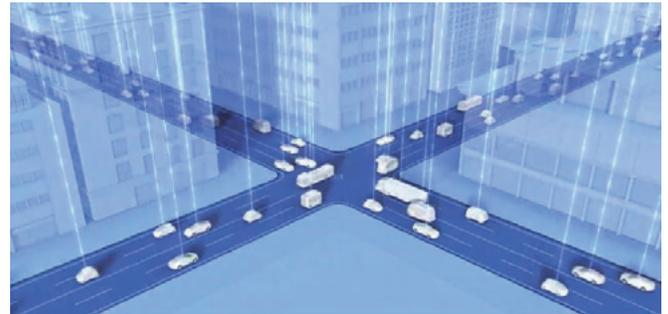
and Wireless Network) 構想により究極に高度化されたICTがもたらすモビリティ社会のコンセプトとして、信号機のない街を自動運転車群が相互に通信をしながら自律走行し、衝突することなく輸送時間を短縮する未来のモビリティの姿、「シグナルフリーモビリティ」が示されています(図1)。シグナルフリーモビリティの実現に向けた第一歩として、私たちは、シグナルフリーモビリティを実現するための分散制御・推論問題に取り組んでいます⁽¹⁾。

シグナルフリーモビリティでは、車

現在 (信号機を使った交通制御)

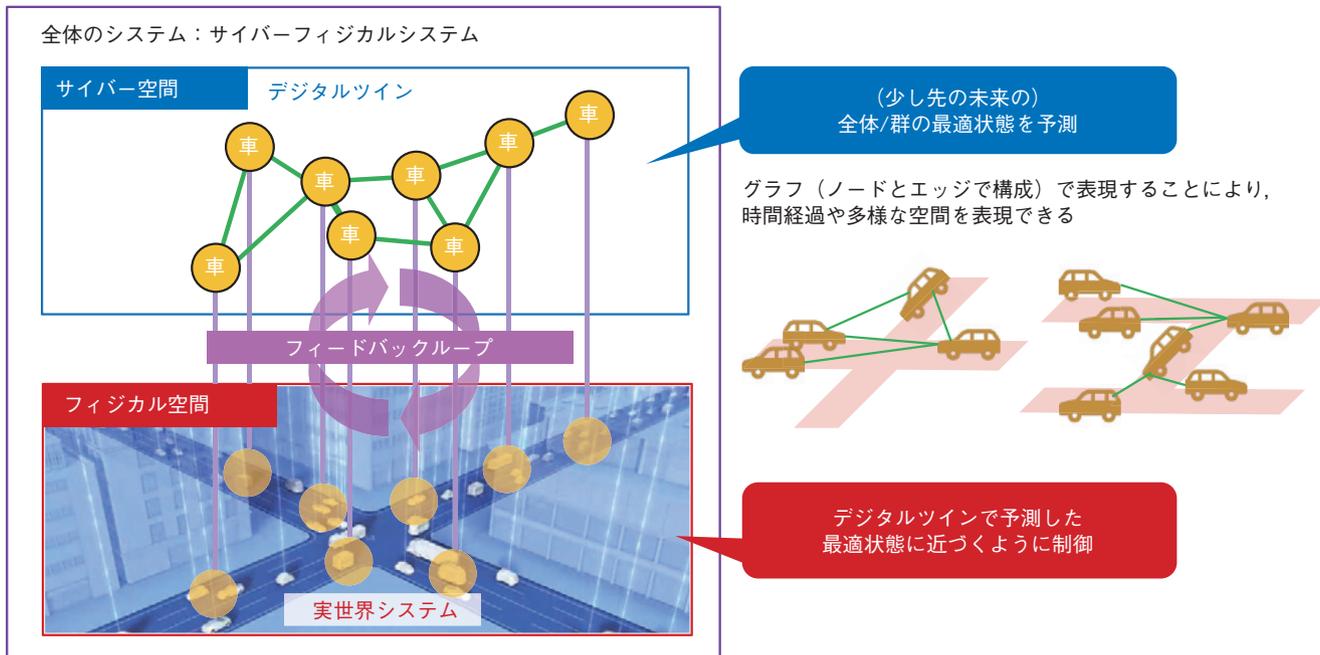


IOWN構想のシグナルフリーモビリティが実現すると…
(信号機のない街を自動運転車が自律走行。衝突することなく輸送時間を極限まで短縮)



2019年12月発表された IOWN 構想のコンセプト動画より抜粋 (Mobility by IOWN, NTT official https://www.youtube.com/watch?v=4fo_kEYrY6E)

図1 シグナルフリーモビリティのイメージ



デジタルツイン上で少し先の未来の状態を予測し、それに近づくように実世界の交通を制御するフィードバックループをリアルタイムで繰り返します。

図2 デジタルツインを介した交通制御のイメージ

群から収集したデータをデジタルツインで解析し、衝突することなく移動時間を短縮するための交通全体の最適状態（各車の速度や位置）を予測して制御します。このデジタルツイン上の状態予測系のモデル化、およびデータ駆動型でそのモデル学習する方式を確立することが研究課題です。本研究では、図2に示すように、各車（ノード、黄色の頂点で表示）とそのつながり（エッジ、緑色の辺で表示）で構成されるグラフを用いて、デジタルツインの状態予測系をモデル化しました。時々刻々と変化する複雑な交通制御を単純な部品（各車の状態予測・制御と近接車間の通信）の組合せで表現することがそのねらいです。

次に、車の状態予測に関するデジタルツインの演算について説明します。図3に、実世界システムとデジタルツインが相互にフィードバックしながら、車群の最適状態（速度や位置）の予測と制御を時系列的に発展させるイメー

ジが描かれています。状態予測に至るまでのデジタルツインの演算は複数ステップに分かれています。デジタルツイン上では、実世界で収集されたデータ（周囲状況を模した画像データ等）を蓄積し、一定以上の車間距離を保つように斥力を課すための情報を計算して近接車間の通信を介して交換されます。その情報を使ってぶつからずに目的地点に近づくための各車の状態を予測します。なお、この一連の処理（前向き伝播）は、各車で実施可能な分散型の演算と近接した車間の通信を繰り返すことで実施できるように設計されています。演算や通信といった処理が分散化されていることから、ネットワーク負荷の少ないIoT（Internet of Things）機器群の協調制御を体現しているといえるでしょう。さらに、状態予測系に含まれる学習可能なパラメータを最適化することで、平均速度を向上させるような効率的な交通制御モデルを学習できます（後向き伝播）。

なお、この2種類のフロー（前向き伝播、後向き伝播）は、常微分方程式（ODE：Ordinary Differential Equation）^{*1}で表現されていて、それを各車の演算や近接車間の通信によって実施できるように分散・離化することで特殊なニューラルネットワーク（CoordiNet）として定義し、デジタルツインの演算を具体化しました。前向き伝播（図3(a)）では、デジタルツイン上のデータを解析して車群の最適状態（速度や位置）を予測し、交通を制御するフィードバックを繰り返します。後向き伝播（図3(b)）では、デジタルツイン上に蓄積されたデータを使って、平均速度を向上するように交通制御モデルを最適化します。

提案法（CoordiNet）を使って実

*1 常微分方程式：流体、気象等の連続的な物理現象は常微分方程式で表現されることが多い。今回、実世界システムとデジタルツインが相互に作用しながら交通制御するという複雑な現象を表現しました。

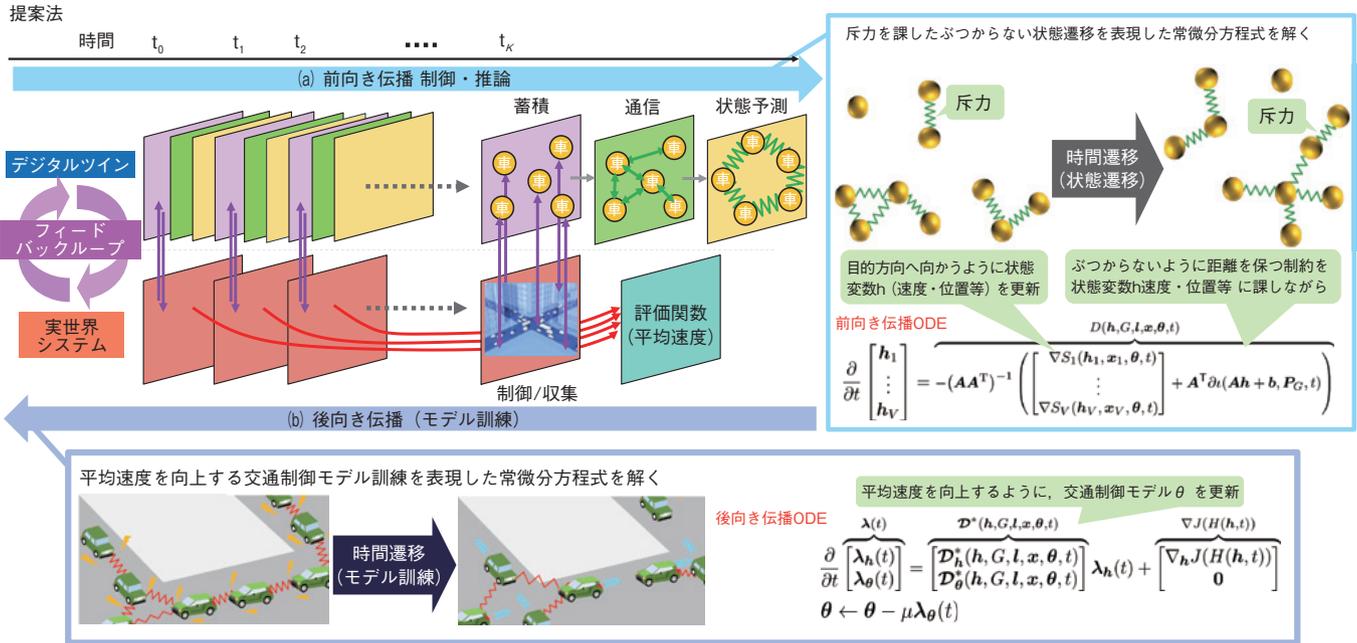


図3 デジタルツインを介した交通制御における時系列処理を表現したニューラルネットワーク (CoordiNet)

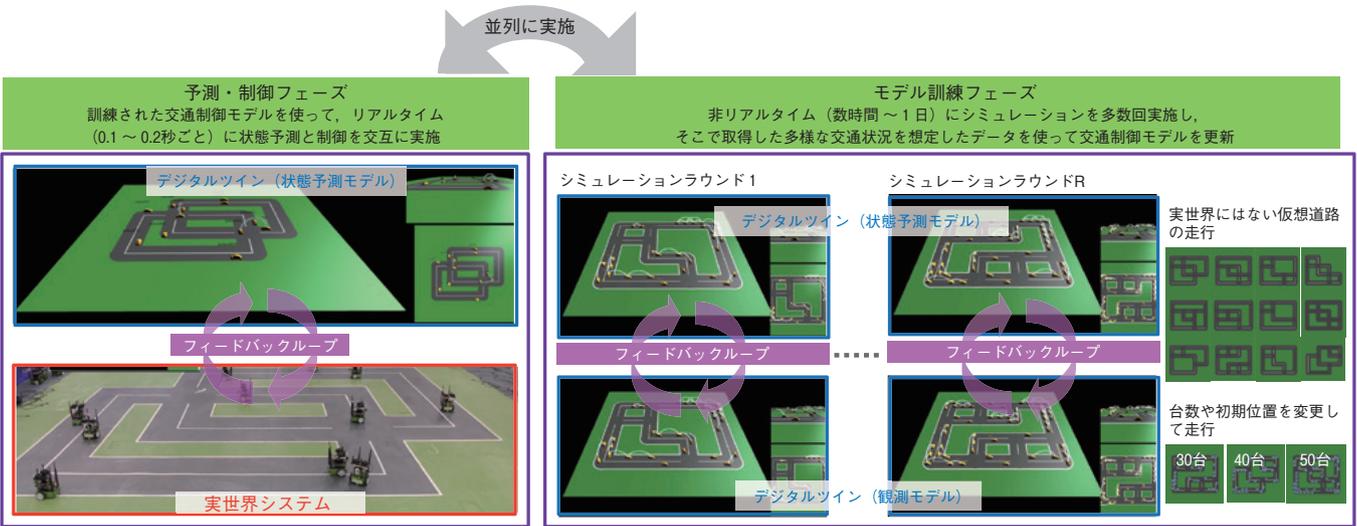


図4 今回構築したシグナルフリーモビリティシステムを構成する2種類のフェーズ

装したシグナルフリーモビリティのシステムは、図4に示すように予測・制御フェーズとモデル訓練フェーズの2つで構成されます。モデル訓練フェーズでは、デジタルツイン上で多様な交通状況を想定したシミュレーションを多数回実施し、交通制御モデルを最適化します。実世界にある道路だけでなく、仮想空間上に構築した道路に、車の台数や初期位置を変えて配置してシ

ミュレーションを行うことで、多様な交通状況を模したデータ収集を可能にします。このデータを使って交通制御モデルを学習することにより、多様な交通状況でもぶつからずに効率良く走行することが期待されます。なお、このモデル訓練フェーズは、膨大な計算量を必要とするため、非リアルタイム (数時間~1日) に行われます。一方、予測・制御フェーズでは、学習済の交

通制御モデルを使って、デジタルツインとフィードバックしながら実世界の交通を制御します。構築したシステムでは、リアルタイム (おおよそ0.1~0.4秒ごと) に各車の状態予測と制御が行われました。

モデル訓練フェーズ (図4右) における実験結果の一部を図5に示します。提案法では、シミュレーションを繰り返すとともに安定して平均速度が

向上しました。最大値が1.0になるように速度を正規化した評価実験で、ランダムに初期化した学習前の時点では0.64であったのに対して、学習後には0.90まで向上しました。これは、シミュレーションを介したデータ収集により、交通制御モデルの学習を効率的に進めることができた恩恵だと考えられます。一方、状態遷移に斥力を課さない一般的なニューラルネットワークや交通シミュレータ (SUMO:

Simulation of Urban Mobility^{*2)}を比較方式として性能を調査しました。学習可能な方式については提案法と同様にシミュレーションを介して学習しました。例えばグラフニューラルネットワークの一種であるGAT (Graph Attention Networks)^{*3)}を用いた場合、車が衝突してしまったり、平均速度が安定して向上しませんでした。また、SUMOを用いた場合は、ぶつかることはなかったですが、交差

点前で停滞する状況が頻繁に起きてしまい、提案法ほどの平均速度は得られませんでした。

学習後の交通制御モデルを使って、予測・制御フェーズ (図4左) を実施するためのシステムを構築しました。

図6に示すように、各自動運転ミニカーには、位置情報を計測するためのビーコン、計算するためのGPU、Wi-Fi通信モジュール、左右独立に制御可能なモーターが搭載されています。Wi-Fiを介してサーバや他の車と通信し、ぶつからずに全体の輸送時間を短縮する状態をデジタルツインで予測し、10~20台の自動運転ミニカーをリアルタイム (おおよそ0.1~0.4秒ごと) に制御することができました。デジタルツインで予測された状態のように、ぶつからずに走行している様子を実験的に確認しました。

比較した方式 (計5種類)

提案法: CoordiNet

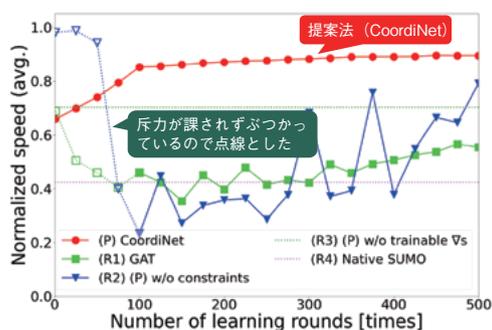
v.s.

(R1) GAT (斥力なし, 学習可)

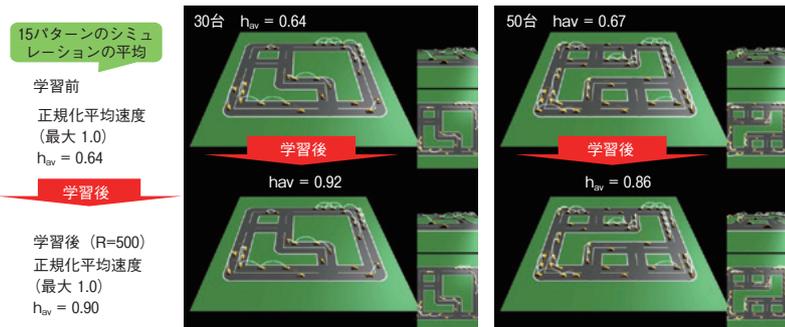
(R2) CoordiNet (斥力なし, 学習可)

(R3) CoordiNet (斥力あり, 学習不可)

(R4) Native SUMO (学習不可)



(a) モデル訓練による平均速度の変化 (方式別)



学習前 (ランダムに初期化) と比較して、約40%の平均速度向上

(b) モデル訓練による平均速度の変化 (提案法 道路別)

図5 モデル訓練フェーズ実験の評価

非同期分散型の連合学習プロジェクト

シグナルフリーモビリティでは、シ

- *2 SUMO: フリーの交通シミュレータで、世界的にITS分野の研究者で利用されています。 <https://www.eclipse.org/sumo/> よりダウンロード可能。
- *3 GAT: Graph Neural Networksの一種で、ノードのつながりの重要度について適応的に更新しながら状態変数を更新する特徴を持ちます。ただし、交通制御等への応用のために提案された方式ではありません。

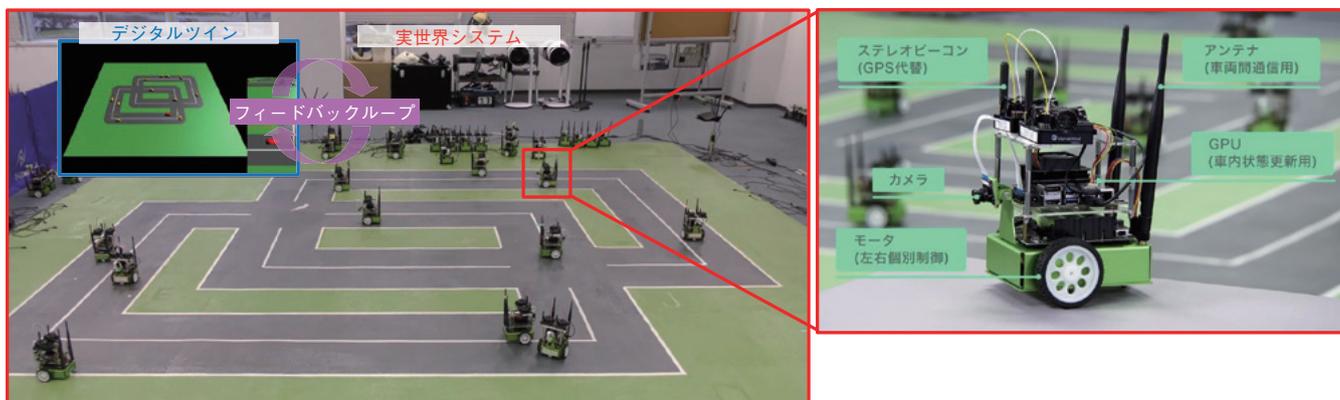


図6 自動運転ミニカーを使った予測・制御フェーズ実験の様子

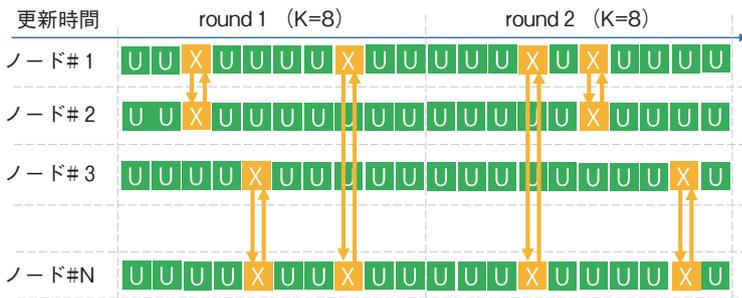
1. 任意のネットワーク構造でノードを接続
2. 各ノードの保有データは統計的偏りあり
3. 非同期通信を許可

3. (非同期通信) の説明

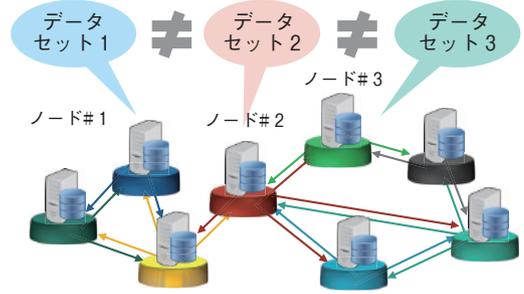
学習アルゴリズムは、以下2種類の処理を交互に実施

U : 各ノード内での計算処理

X : エッジごとに非同期通信 (変数の交換)



1 (分散型ネットワーク), 2 (統計的偏りのあるデータ) の説明



提案アルゴリズム

Algorithm 1 Proposed ECL-ISVR

```

1:  $\rho$  Set  $w_i = w_j \sim \text{Norm}$ ,  $z_{i,j} = 0$ ,  $\mu$ ,  $z_i$ ,  $A_{i,j}$ 
2: for  $r \in \{1, \dots, R\}$  (Outer loop round) do
3:   for  $i \in \mathcal{N}$  do
4:     for  $k = \{1, \dots, K\}$  (Inner loop iteration) do
5:       Stochastic gradient calculation
6:        $g_i(w_i) \leftarrow \nabla f_i(w_i, \chi_i)$ 
7:       Update local primal and dual variables
8:        $(w_i, z_{i,j}) \leftarrow \mu + g_i(w_i)$ 
9:       for  $j \in \mathcal{E}$  do
10:         $z_{i,j} \leftarrow z_{i,j} - 2A_{i,j} w_i$ 
11:      end for
12:     Procedure when communicated with  $j$ -th node
13:     for  $j \in \mathcal{C}^d$  (at random time) do
14:       com
15:       (一部変数を交換 (データは出さない))
16:     end for
17:   end for
18: end for
19: end for
    
```

The code is annotated with 'U' for local computation (lines 4-11) and 'X' for communication (lines 12-15).

図7 非同期分散型の連合学習の問題設定

ミュレーションで得られたデータを1つのサーバ上に集約して運転制御モデルの学習を行っていました。しかし、今後、ヒトやモノのデジタルツインを介して全体の系を協調していく世界では、データを1個所に集約するのではなく、デジタルツインごとに分散蓄積されたデータを用いて補助情報を交換するだけで、集合知が形成される未来になるでしょう。

ノード数やエッジ数(デジタルツインの数やそれらの通信接続数)が大きくなり、巨大なネットワークグラフで演算が行われることを想定して、非同期分散型の連合学習の研究を進めています。従来研究では、接続しているノード間でモデル変数を交換して平均化しながら合意形成をとる連合学習則⁽²⁾が多用されていますが、私たちが提案した方法^{(3)~(5)}は、①非同期分散通信を許容でき、②計算サーバ間のモデルの合意形成に関する制約を課すなど、計算サーバ間の統計的なデータの偏り

に耐性のあるアルゴリズムを構築したことが特徴です(図7)。

今後の展開

今後、基盤となる数理をさらに発展させるとともに、ネットワークを介して全体系を性的制御する応用事例を増やし、群全体の最適制御によるデジタルツインコンピューティング社会の早期実現に貢献します。

参考文献

- (1) https://www.kecl.ntt.co.jp/openhouse/2022/exhibition_01.html
- (2) B. McMahan, E. Moore, D. Ramage, S. Hampson, and B. A. y Arcas: "Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data," Proc. of AISTATS 2017, pp. 1273-1282, Fort Lauderdale, U.S.A., May 2017.
- (3) K. Niwa, N. Harada, G. Zhang, and B. Kleijn: "Edge-consensus learning: deep learning on P2P networks with nonhomogeneous data," Proc. of KDD 2020, San Diego, U.S.A., pp. 668-678, August 2020.
- (4) K. Niwa, G. Zhang, B. Kleijn, N. Harada, H. Sawada, and A. Fujino: "Asynchronous decentralized optimization with implicit stochastic variance reduction," Proc of ICML 2021, July 2021.
- (5) G. Zhang, K. Niwa, and B. Kleijn: "Revisiting

the primal-dual method of multipliers for optimisation over centralised networks," IEEE TSIPN, Vol. 8, pp. 228-243, 2022.



丹羽 健太

NTTの掲げるIOWNへの1つの提案として分散自律学習について研究を進めています。シグナルフリーモビリティはコンセプト的な事例ではありますが、こうした事例を通じて、IOWNの早期実現に向けて盛り上げていきたいと考えています。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
 協創情報研究部
 知能創発環境研究グループ
 TEL 0774-93-5020
 E-mail cs-liason-ml@hco.ntt.co.jp

対称性に基づく解析学と幾何学による数論と量子相互作用

数学と物理学とのつながりは古くから多くの成功を生みました。宇宙論などでは現代数学が駆使されています。一方、量子コンピュータづくりにも必要な量子光学の理論研究と現代数学のつながりは必ずしも深くありません。本稿では、量子光学におけるもっとも基本的な理論モデルとされる量子ラビ模型などを取り上げ、それらと現代数学、特に整数論とのかかわりを、対称性の観点からの研究経緯、今後の進め方について、数学の予想を交えながら紹介します。

わかやま まさと
若山 正人

NTT基礎数学研究センター

数学と数学研究

数学研究の目的は、未解決問題の解決と新しい問題を発掘して数学を豊かにすることです。それにより、すぐにはみえない応用も生まれます。本稿では“対称性に視点をおく量子相互作用と数論の研究”を例に、筆者の研究動機、目的と成果、それらを踏まえた今後の目標について解説します。なお本稿で扱う相互作用は、非可換調和振動子 (NCHO: Non Commutative Harmonic Oscillator)⁽¹⁾、量子ラビ模型 (QRM: Quantum Rabi Model) と非対称量子ラビ模型 (AQRM: Asymmetric QRM) です。

数学研究の特質の1つは、離れてみえていた事実を統一的に理解しようとする営みです。長い間、互いに無縁だと信じられてきたものの間に、疑いのようなない親近性が明確にされていくことには特別な価値があります。ポアンカレによると、数学は同一視の技術です。朝永振一郎も“うまくいったのは、実験と実証と数学による抽象化で

ある。抽象化によって非常に普遍化できる。これらは物理学の非常な強みだ”としています。他方、数学の定理は発明ではなく発見するものです。これは、存在しているが隠れた数学的真相を、紙と鉛筆で掘り出すのが数学研究だとする小平邦彦^{*1}の考えにおいても明確です。

さて、タイトルにある対称性とは、群の作用を考えるとというものです。群や群の作用といえば、ユークリッド平面・空間の合同変換群や物理や化学などで馴染みの結晶群を思い起こされる方も多いと思います。群論は、20歳のときに決闘で亡くなったガロアにより創始されました。ガロア以前は、2次方程式の根の公式、さらに3次、4次方程式の公式と続き、5次以上の方程式のそれを求めることへの努力が続いていました。しかし、ガロアが行ったのは、方程式の根の置換の全体（置換群）を考え、その構造から、方程式が5次以上の場合、一般には（四則演算とべき根をとる有限回の操作で根を表示する）根の公式は存在しないという

ものでした^{*2}。これは大きなパラダイムシフトです。ところで、構造とは何か、ということですが、それは群の非可換度の強さが関連します。シャツを着てからスーツを羽織るのと、スー

*1 小平邦彦は日本で最初のフィールズ賞受賞者です。代数曲面として重要なK3曲面はヴェイユが代数幾何学者（クンマー、ケーラー、小平）と当時未踏峰だったK2に因み名付けたものです。夏目漱石の短編集『夢十夜』の第六夜に、運慶が護国寺の山門で仁王像を彫る描写があります。見ていた一人が、運慶の様子をとらえ、“彫っているのではなく、もともと木の中に埋まっている仁王を掘り出しているだけだ”というわけです。これは小平が説明に使っていたものです。数学は、科学に必須の再現性を、厳密証明という手立てで担保していますが、自然が相手というよりは、数学的自然の解明に向かう科学です。

*2 ガロア理論の始まりです。ガロア理論に接したことで数学者をめざした数学者も多くいます。なお、現在では2次方程式の「解の公式」と呼びますが、かつては「根の公式」と呼びました。2次方程式もいろいろな方程式の1つですので、解であることには違いありません。しかし、負の数の発見や虚数の発見をみても、それは人類の数学世界をひろげるルーツでもありました。特別な思いを込めてroot（根っこ）としておきたいと思います。また、5次方程式の根の公式の非存在自体は、ガロアと同時期にアーベルとルフィニによっても示されていました。ただしそれは、少なくとも表面的には、ガロアのような「群」という意識はみえない技術的なものでした。

ツを着てからシャツを着るのとでは大違いです。このようなことから、非可換な操作（作用）のイメージを掴んでいただければと思います。

NCHO

量子調和振動子は光子や水素原子の振る舞いを扱う量子論において基本です。そのエネルギー（固有値）は半整数で与えられ、対応する固有状態はエルミート関数です。このことはトレース0の2次の実行列からなる2次元リー環 $sl_2(\mathbb{R})$ の表現論^{*3}から綺麗な記述が得られます。リー環 $sl_2(\mathbb{R})$ は、行列式が1の実行列全体がなすリー群 $SL_2(\mathbb{R})$ の無限小作用をとらえます。ここで一般に、リー群論は代数方程式のガロア理論に感動したS. Lieが、微分方程式に対するガロア理論を構築しようと創始しました。リー群は、その名の如く群であり、かつ、多様体と呼ばれる幾何的図形でもあります。したがって、 $sl_2(\mathbb{R})$ は $SL_2(\mathbb{R})$ の単位元での接空間です。

エルミート関数は実数上の2乗可積分関数がなすベクトル空間 $L^2(\mathbb{R})$ の基底をなします。エルミート関数のような特殊関数の多くはガウスの超幾何関数 $F(a,b,c;x)$ のパラメータ a,b,c のいずれかを整数値などに特殊化することで得られます。 $F(a,b,c;x)$ は3点 $(0,1,\infty)$ とできる)の確定特異点を持つ2階線形常微分方程式の解として定義されます。19世紀以来数学の華であり続ける楕円曲線の整数論にガウスの超幾何は欠かせません。一方、表現論に目を転じると、ガウスの超幾何やその多変数版などに由来する特殊関数

は、本質的にリー群の表現の行列要素として理解できます。以下に着目点を示します。

① 調和振動子の固有値は半整数（標準的な正規化のもと）。よって、固有値から定まる調和振動子のスペクトルゼータ関数^{*4}はリーマンゼータ関数 $\zeta(s)$ ^{*5} と本質的に一致。

② $SL_2(\mathbb{R})$ の対称性はガウスの超幾何の世界にとどまる。

①, ②の背後には $SL_2(\mathbb{R})$ があります。広い世界の探究には対称性を弱める必要があります。調和振動子が持つ非可換性は、 $sl_2(\mathbb{R})$ で制御される正準交換関係のみです。微分方程式系を定めるNCHOには行列の非可換性が加わります。その定義には2つのパラメータ α, β が必要であり、名称はこの非可換性に由来します。もちろん闇雲な定義ではいけません。要請したのは、NCHOのハミルトニアン Q が実離散固有値のみを持つこと、また、 $\alpha = \beta$ において調和振動子が復元できる程度には弱い対称性を持たせることです。前者は Q が正值エルミート作用素であることを求めます。後者は、 Q のスペクトルゼータ関数 $\zeta_Q(s)$ が $\zeta(s)$ の良い拡張となることです⁽²⁾。

$\zeta(s)$ の定義級数の収束域は半平面のみですが、 $\zeta(s)$ は全平面に解析接続（一意に拡張）されます。そしてリーマン予想とは $\zeta(s) = 0$ となる虚数の実部がすべて $\frac{1}{2}$ だと主張です。ところで20世紀数学の頂点にはリーマン予想の類似物が2つあります。合同ゼータ関数のヴェイユ予想と、素測地線分布に関するセルバーグゼータ関数に対するものです。どちらの予想も、

各ゼータ関数がエルミート作用素による行列式表示を持つことで決着がつけました^{*6}。本来のリーマン予想の攻略でも $\zeta(s)$ の行列式表示を探求することが重要です。

QRMとNCHO

1. Rabiは1936年に光と2準位原子の相互作用の様子を記述しました。後1965年に、JaynesとCummingsが光も量子化しQRMを定めました。ところがQRMの可積分性が不明である一方、その回転波近似であるJaynes-Cummings模型には（連続的な）不変量が存在して理論的扱いが容易であり、実験にも合うことから重宝されました^{*7}。しかし、量子コンピュータの実現も射程におく近年、技術が発達し

*3 表現論は対称性の学問といわれます。代数、幾何、解析の交流点にあり、おおよそ対称性に着目する数学では欠かせないものです。群の表現論であれば、作用素空間（一般には無限次元）に元のそれぞれが線型変換として定まり、群の積が線型写像の合成として保たれるものです。ここではヴェイユ表現という、掛け算作用素 $\frac{1}{2}x^2$ 、微分作用素 $-\frac{1}{2}\frac{d}{dx}$ 、そしてオイラーの次数作用素 $x\frac{d}{dx} + \frac{1}{2}$ がなす $sl_2(\mathbb{R})$ の表現を使います。

*4 重複度が一定に抑えられている正の固有値 $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3 \leq \dots$ を持つ作用素のスペクトルゼータ関数とはディリクレ級数 $\lambda_1^{-s} + \lambda_2^{-s} + \lambda_3^{-s} + \dots$ で定義されるものです。

*5 $\zeta(s) := 1 + 2^{-s} + 3^{-s} + 4^{-s} + 5^{-s} + \dots = (1 - 2^{-s})^{-1} \times (1 - 3^{-s})^{-1} \times (1 - 5^{-s})^{-1} \times (1 - 7^{-s})^{-1} \times (1 - 11^{-s})^{-1} \times \dots$ （オイラー積）は、複素数 s の実部が1より大きいときのみ収束します。リーマン予想（1859年）の提出以来160年余を経過した現在も未解決です。多くの天才たちの挑戦が続くこの予想は、コッホ曲線有名なコッホにより示されたように素数の究極的分布と同値です。

*6 有限体上の代数多様体・スキームに対して定まる合同でゼータ関数の場合はフロベニウス作用素とよばれるものの行列式表示により肯定的に解決され、セルバーグゼータ関数の場合には、複素上半平面の不変微分作用素であるラプラシアンによる行列式表示により解決されました。

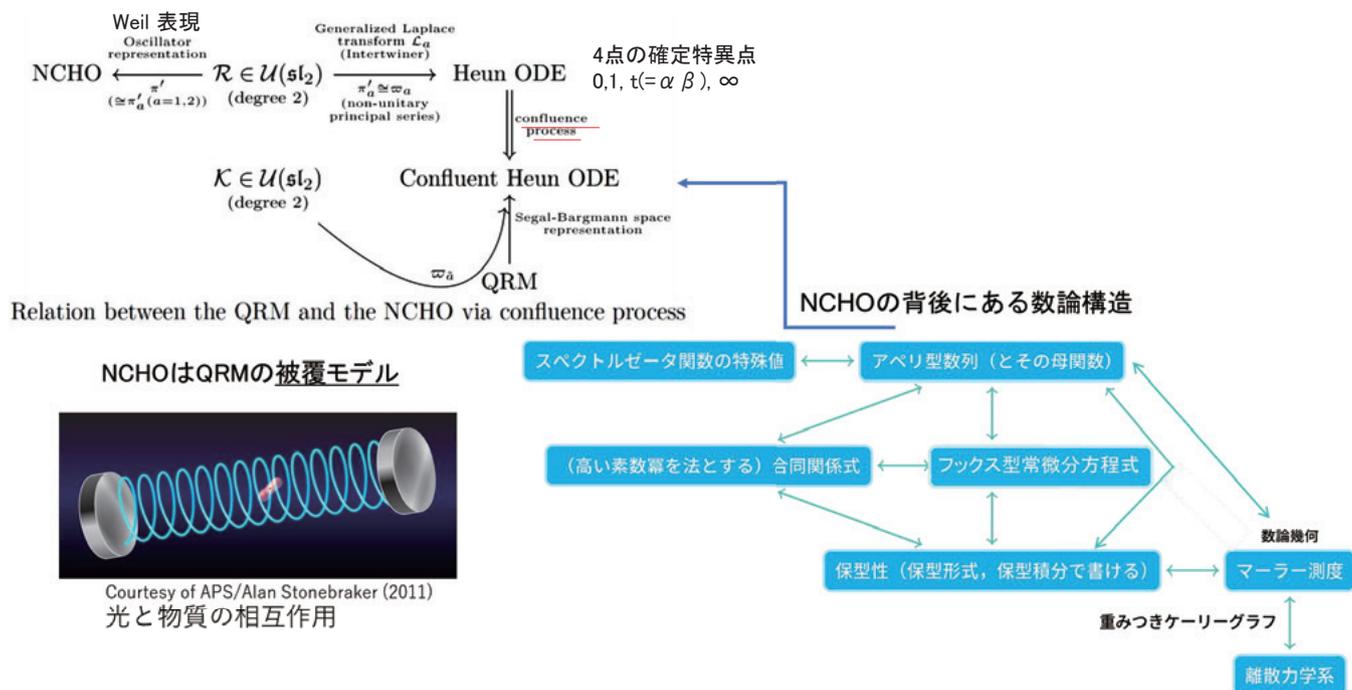


図1 非可換調和振動子 (NCHO) と量子ラビモデル (QRM)

てJaynes-Cummings 模型が実験に合わない例が報告されることになりました。そうした中、2011年にはD. Braak⁽³⁾がQRMの可積分性を示して一気に周辺研究が進みました。事実、超伝導人工原子による実験測定結果⁽⁴⁾は(A)QRMの理論のとおりでした⁽⁵⁾。

NCHOは期待どおり世界を広げました。実際、NCHOの固有値問題はホイン微分方程式^{*8}の、 $0, 1$ を含み α, β を含まない領域の正則関数の存在と同値であることが分かりました。この事実は落合啓之が発見⁽⁶⁾し、その15年後に完全な理解に至りました⁽⁷⁾。一方で、(A)QRMもホイン描像を持ちます⁽³⁾。ただしNCHOとは異なり合流型の方程式です。ところが、 $\alpha\beta \rightarrow \infty$ として特異点を合流させるとNCHOのホイン描像からQRMの合流ホイン

描像が得られることも分かりました⁽⁷⁾。NCHOはQRMの被覆モデルだったのです^{*9} (図1)。

量子化は離散化であり、それは数論の舞台です。実際、(後述するように) NCHOの $\zeta_q(s)$ の特殊値には、豊かな数論性がみられます。ゼータ関数の特殊値といえば、古くはオイラーが解決したパーゼルの問題^{*10}があります。一般に $\zeta(s)$ の偶数点での値は円周率 π の冪と有理数で表されます。しかし、奇数点となると、1978年のR. Apéryによる $\zeta(3)$ の無理数の証明まで300年以上の間不明のままでした。今なお、無理数性に関する最良の成果は、5, 7, 9, 11の少なくとも1つでは無理数となるという定理です。一方で、ヴェイユ予想を解決したP. Deligne^{*11}による種々のゼータ関数の特殊値

に関する幾何学的予想や楕円曲線から定まるL-関数(ゼータの親戚)の特異点に関する Birch・Swinnerton-Dyer 予想など、特殊値研究は現代数学の深い問題です。

さてApéryは、無理数性の証明にアペリ数という有理数数列を用いまし

*7 2012年度の Haroche と Wineland による量子系の測定と操作を可能とする画期的実験手法に対するノーベル物理学賞の業績も、こうした流れの中心だと思われます。

*8 ホイン (Heun) 方程式とは4点 $(0, 1, t, \infty)$ とできます) を確定特異点を持つフックス型の2階常微分方程式です。ガウスの超幾何 (ホイン方程式から reduction できる) と異なり、数学構造には明らかにしておくべき点がありますが、さまざまな物理現象の記述に現れています。

*9 このことは、NCHO に適切なバイアス項を追加すれば AQRN の場合にも成り立ちます。

*10 $1 + \frac{1}{4^3} + \frac{1}{16^3} + \frac{1}{25^3} + \dots = \frac{\pi^2}{6}$ というもの。円周率が現れたことに大きな驚きもたれました。

*11 1978年度フィールズ賞。

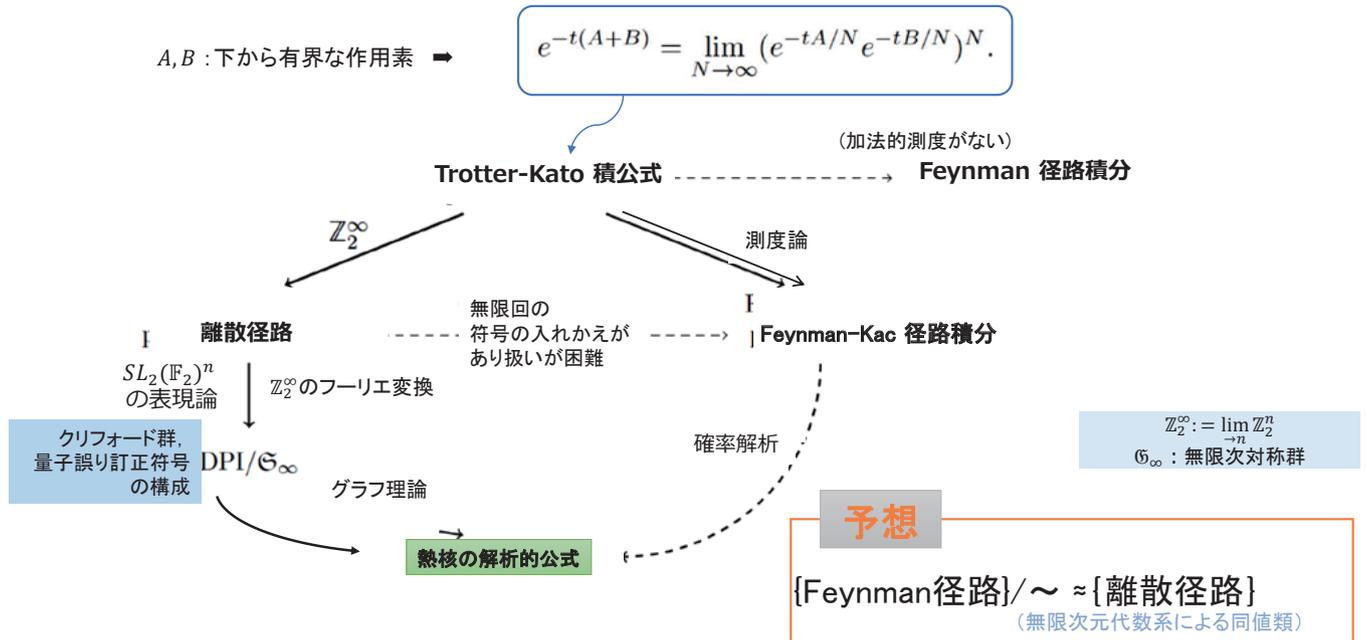


図2 Trotter-Katoの積公式→熱核の公式

た。これは思いつくには困難とみえる不思議なものでした。F. Beukersは、その理由の解明とさらなる無理数性証明へ挑戦し、その背後にある楕円曲線やK3曲面と保型形式の研究を見事なかたちで展開しました。その結果、アペリ数たちが持つ顕著な合同関係式なども示されて、代数的整数論の研究対象となっています。ところで $\zeta_a(2)$, $\zeta_a(3)$ からも、アペリ数と同様な性質を持つ数列が得られます^{(8)~(10)}。また、それらの背後に楕円曲線や保型形式がひそみ、さらに $s = 4$ の場合には、保型形式を一般化した保型積分^{*12}までもが現れます⁽⁸⁾。次の発展には(数学においてきわめて重要なラングランズ・プログラム⁽¹¹⁾にも関係して)より広い保型形式の研究が待たれます。

AQRMのスペクトルと隠れた対称性

統計力学における分配関数(状態和)の重要性は、それが系の時間発展をよく“知っている”からです。AQRMのスペクトルゼータの研究には、その熱核・プロパゲータ・分配関数の解析的公式を知ることが最重要です。事実、分配関数とスペクトルゼータ関数はメリンの積分変換で1対1に対応しています。しかし、それらの解析的公式を求めることは極めて困難であるとされていました。そのため、物理学者はFeynman経路積分という直感にすぐれた表現形式を用いて種々の近似計算を行い、目的の物理系の理解を深めています。Feynman経路積分は経路が非加算的であり、積分というものの、一般にはそれを定める加法測度が

存在しないため、数学的に厳密には扱えません。もちろん、その理解のためのさまざまな検討が今も続いています。私たちは(A)QRMに対して熱核の導出に挑みました^{*13}。その方法は、成功した結果⁽¹²⁾からいえば、 m 次対称群 S_m の Z_2^m ($m=1,2,\dots$)への作用、 Z_2^m 上のフーリエ変換とグラフ理論を駆使するものです。ここで Z_2 は $Z/2Z$ あるいは2元体 $F_2=\{0,1\}$ です。得られた解析的公式は、熱核が m 単体上の初等関数(指数関数の積商)の積分の m に関する級数和です。これは、0と ∞ を結ぶ離散経路の無限対称群 S_∞ による同値類全体にわたる S_∞ の軌道

*12 アーベル積分の拡張であることからそのように名付けられています。Eichler形式とも呼ばれます。
*13 Trotter-Katoの積公式が熱核導出の出発点です。Feynman経路積分を形式的に導くにはこの積公式が有用です。

$$\mathcal{O}_\lambda := \{\sigma \in \mathbb{Z}_2^\infty : |\sigma| = \lambda\} = \mathfrak{S}_\infty \underbrace{[1, 1, \dots, 1]}_\lambda \quad (\mathfrak{S}_\infty\text{-軌道})$$

(長さ $|\cdot|$ は \mathfrak{S}_∞ -不変量)

$$\underbrace{([1, 1, \dots, 1])}_\lambda = \underbrace{(1, 1, \dots, 1, 0, 0, \dots)}_\lambda \in \mathbb{Z}_2^\infty$$

$$\mathbb{Z}_2^\infty = \coprod_{\lambda=0}^\infty \mathcal{O}_\lambda \quad (\mathbb{Z}_2^\infty \text{の軌道分解})$$

$$K_{\text{QRM}}(t) = \sum_{\lambda=0}^\infty (t\Delta)^{2\lambda} \int_{\mathcal{O}_\lambda} \exp[g, t, x, y, \mu_\lambda \text{の指数関数の明示式}] d\mu_\lambda$$

(\mathcal{O}_λ 上の軌道積分は、 λ -単体上の積分とみなせる)

[経路の同値類]

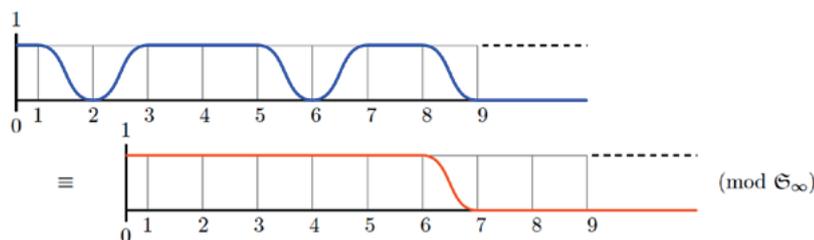


図3 熱核公式 - 幾何学的解釈

積分の和 (積分) という解釈も可能です (図2)。表現論的には、 \mathfrak{S}_∞ の \mathbb{Z}_2^∞ への作用を既約分解に対応しています。ここで得られた公式は、例えば磁性を持つ微小不純物に対する近藤効果などの理論解析における熱核の行列要素の一部を表す公式や、種々の物理系に対する分配関数の近似式ともよく似ています。こうしたことから、一般に、Feynman積分の非可算経路たちに対する無限次元の代数系の存在と、その同値類としての離散経路の獲得という構図も追求すべきでしょう (図3)。

熱核の解析的公式から分配関数が求まり、スペクトルゼータ関数が無限遠点を出る周回積分で表示されます。よって、その全平面への解析接続が得られ、固有値の個数の漸近評価 (ワイ

ル法則) が従うほか、特殊値研究に着手できます⁽¹³⁾。NCHOはQRMの被覆ですので、数論的な性質も伝搬しているはず。QRMが持つ数論や幾何構造がいかなるものなのか、知るべきことは山積みです。

AQRMはハミルトニアン^{*14}のフリップ項が半整数 $\ell/2$ のときに限り縮退が起こります^{(14),(15)}。ところが、フリップが0でないAQRMはQRMにある \mathbb{Z}_2 -対称性 (パリティ) を持ちません。一方物理学では、縮退は対称性の存在を示唆すると考えられています⁽¹⁶⁾。古典力学とは違い、量子力学においては可積分性の概念が明確ではありません。しかし、古典系のアナロジーから、 H_{AQRM} と可換で非自明な作用素を探す研究⁽¹⁷⁾が始まりました。触発された私たちは徹底した解析を行い H_{AQRM} と

可換な作用素を完全に決定しました⁽¹⁸⁾。興味深いことに、その可換な作用素の環^{*15}には自然な生成元 J が定数倍を除き一意に存在します。しかも J の平方は $J^2 = p_\ell(H_{\text{AQRM}}, g, \Delta)$ と H_{AQRM} の多項式で表示されます。ここで p_ℓ は ℓ 次多項式です。方程式 $y^2 = p_\ell(x; g, \Delta)$ は超楕円曲線を定めます⁽¹⁷⁾。

他方、AQRMの縮退固有値は、正整数 N を用いて $N \pm \ell/2 + g^2$ のかたちです。 N, ℓ を固定すると (g^2, Δ^2) はホイン方程式から定まる制約多項式

*14 AQRMのハミルトニアンは $H_{\text{AQRM}} = [\text{光子場}] + [2\text{準位原子}] + [\text{相互作用項}] + [\text{フリップ項 (実数で与えられる)}]$ のかたちをしており、 H_{AQRM} のフリップ項は0です。

*15 整数の全体 (整数環), 多項式の全体 (多項式環) など、割り算以外、加減乗では閉じている代数系です。

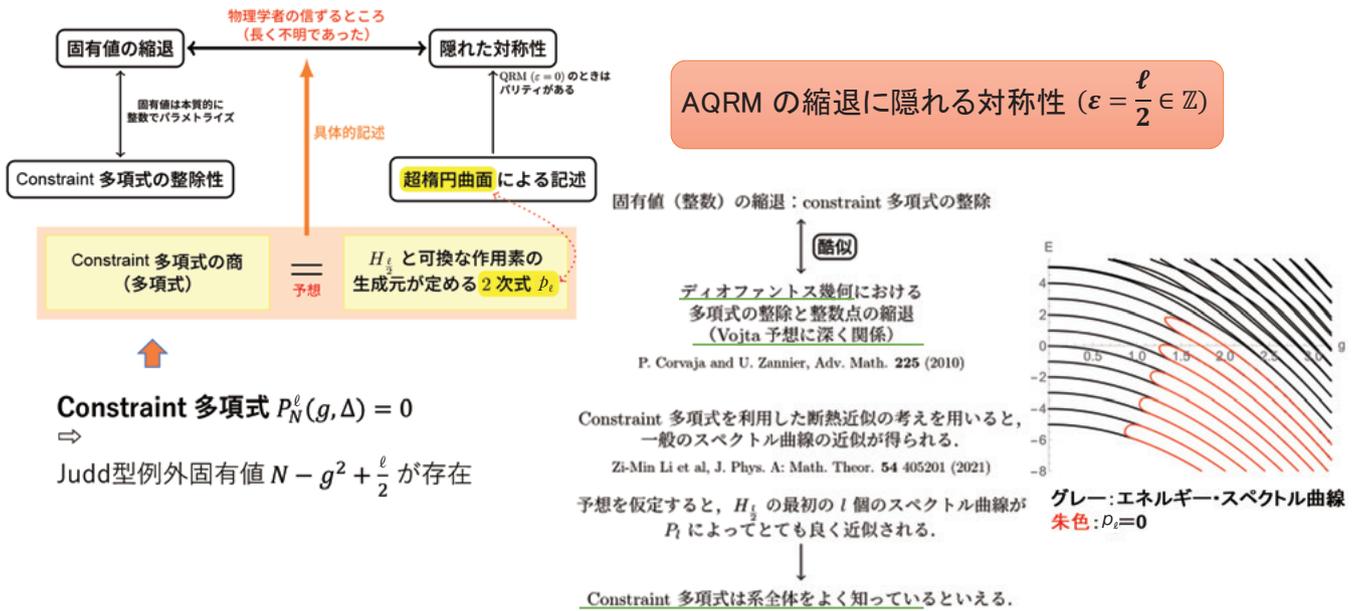


図 4 根拠的理由の説明が待たれる

主予想

$$\ell \in \mathbb{Z}_{\geq 0}, N \geq \ell \Rightarrow p_\ell(N + \frac{\ell}{2} - g^2; g, \Delta) = A_N^\ell(g^2, \Delta^2)$$

主予想が成立⇒

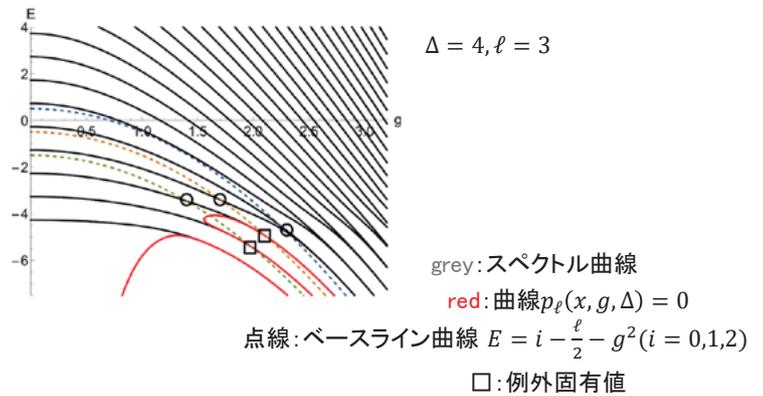


図 5 縮退固有値は系全体のスペクトルを知っているのかもしれない

$P_{N+\ell}^{(-\ell/2)}(g^2, \Delta^2)$ と $P_N^{(\ell/2)}(g^2, \Delta^2)$ の共通零点となります。実際、 $P_N^{(\ell/2)}(g^2, \Delta^2)$ は $P_{N+\ell}^{(-\ell/2)}(g^2, \Delta^2)$ を割り切り、商となる多項式を

$A_N^\ell(g^2, \Delta^2)$ とすればその正值性も分かります⁽¹³⁾ (図 4 左)。

数値計算から $A_N^\ell(g^2, \Delta^2) = p_\ell(N + \ell/2 - g^2, g, \Delta) (\ell \leq 6)$ が分かり

ます。これが一般に成立していれば、“縮退の背後の隠れた対称性” は明確です (図 4)。ただし証明の手立てがなく、予想のままです⁽¹⁹⁾ (図 5)。し

かしこの予想は，そのかたちがディオファントス幾何の定理^{(20)*16}に酷似しています。そのため，証明の糸口がそこに発見できるかもしれません。また，AQRMの縮退固有値は有限個であると予想しています。未解決ですが先の予想に重ねると，ここにはモーデル予想^{*17}との形式的類似点も見出せます。

おわりに

数学を特徴付ける言葉をいくつか拾います。まずはピタゴラスによる“万物は数”。現代社会を席卷するビッグデータ，AI（人工知能）を彷彿させます。万能の天才レオナルド・ダ・ビンチは“工学は数学的科学的の楽園である。何となればここでは数学の果実が実るから”と述べています。ガリレオ・ガリレイによる“宇宙は数学の言葉でかかれている”はあまりにも有名です。また，ウィグナーによる“自然科学における数学の不合理的ともいえる有効性”は見事な指摘です^{*18}。

数学研究は作曲に似ている点がありますが，スコアからシンフォニーが再現されるような，数学論文を音楽のように奏でる仕組みがなかなか見つかりませんでした。しかし近年，機械学

習・AIなどが生み出す数学の活用が生まれました。研究の動機は多様ですが，好奇心だけで進める純粋数学を含み，今や基礎数学と応用数学が見事な協奏を奏でる機会が到来したかのようです。新たな“数楽”が生まれることを願い本稿を閉じます。

参考文献

- (1) A. Parmeggiani and M. Wakayama: “Oscillator representations and systems of ordinary differential equations,” PNAS, Vol. 98, pp. 26-30, 2001.
- (2) T. Ichinose and M. Wakayama: “Zeta functions for the spectrum of the non-commutative harmonic oscillators,” Comm. Math. Phys., Vol. 258, pp. 697-739, 2005.
- (3) D. Braak: “Integrability of the Rabi Model,” Phys. Rev. Lett., Vol. 107, 100401, 2011.
- (4) 布施・吉原・角柳・仙場: “超伝導人工原子と電磁場の相互作用～強結合のその先へ～,” 日本物理学会誌, Vol. 73, pp. 21-26, 2018.
- (5) 若山: “光とゼータ関数の特殊値,” 数学通信, Vol. 25, No. 4, pp. 24-52, 2021.
- (6) H. Ochiai: “Non-Commutative Harmonic Oscillators and Fuchsian Ordinary Differential Operators,” Comm. Math. Phys., Vol. 217, pp. 357-373, 2001.
- (7) M. Wakayama: “Equivalence between the eigenvalue problem of non-commutative harmonic oscillators and existence of holomorphic solutions of Heun differential equations, eigenstates degeneration and Rabi model,” Int. Math. Res. Not., Vol. 145, pp. 759-794, 2016.
- (8) K. Kimoto and M. Wakayama: “Apéry-like numbers for non-commutative harmonic oscillators and automorphic integrals,” Ann. Inst. Henri Poincaré - D, (in press) - arXiv:1905.01775, 2020.
- (9) L. Long, R. Osburn, and H. Swisher: “On a conjecture of Kimoto and Wakayama,” Proc. Amer. Math. Soc., Vol. 144, pp. 4319-4327, 2016.
- (10) J.-C. Liu: “A generalized supercongruence of Kimoto and Wakayama,” J. Math. Anal. Appl., Vol. 467, pp. 15-25, 2018.
- (11) R. Langlands: “Letter to André Weil,” <https://publications.ias.edu/rpl/paper/43>
- (12) C. Reyes-Bustos and M. Wakayama: “The heat kernel for the quantum Rabi model,” Adv. Theor. Math. Phys., (in Press)-arXiv:1906.09597, 2020.
- (13) C. Reyes-Bustos and Masato Wakayama: “Heat kernel for the quantum Rabi model: II. Propagators and spectral determinants,” J. Phys. A: Math. Theor., Vol. 54, pp.115202-115231, 2021.
- (14) K. Kimoto, C. Reyes-Bustos, and M. Wakayama: “Determinant expressions of constraint polynomials and the spectrum of the asymmetric quantum Rabi model,” Int. Math. Res. Not., pp. 9458-9544, 2021.
- (15) M. Wakayama: “Symmetry of asymmetric quantum Rabi models,” J. Phys. A: Math. Theor., Vol. 50, pp. 174001-174020, 2017.
- (16) S. Ashhab: “Attempt to find the hidden symmetry in the asymmetric quantum Rabi model,” Phys. Rev. A, Vol. 101, 023808, 2020.
- (17) V. Mangazeev, M. Batchelor, and V. Bazhanov: “The hidden symmetry of the asymmetric quantum Rabi model,” J. Phys. A: Math. Theor., Vol. 54, 12LT01, 2021.
- (18) C. Reyes-Bustos, D. Braak, and M. Wakayama: “Remarks on the hidden symmetry of the asymmetric quantum Rabi model,” J. Phys. A: Math. Theor., Vol. 54, pp. 285202-285215, 2021.
- (19) C. Reyes-Bustos and M. Wakayama: “Degeneracy and hidden symmetry—an asymmetric quantum Rabi model with an integer bias,” Comm. Number Theor. Phys. (in Press) - arXiv:2106.08916, 2021.
- (20) P. Corvaja and U. Zannier: “Integral points, divisibility between values of polynomials and entire curves on surfaces,” Adv. Math., Vol. 225, pp.1095-1118, 2010.



若山 正人

数学の研究は，多くの科学と同様に多様な動機や関心から生まれます。良い研究はゆっくりと重要性が認識されていき，大変息の長いものです。抽象性が高く応用から遠くみえることも，広く科学・技術の足場となり得ることとのトレードオフです。しかし，これは同時に数学の役割をよく表すものです。

◆問い合わせ先

NTT基礎数学研究センター
TEL 046-240-3604
E-mail masato.wakayama.hp@hco.ntt.co.jp

*16 この定理は著名なヴォイタ予想に深く関係したものです。なお，ヴォイタ予想はモーデル予想の高次元化とも位置付けられABC予想とも深くかかわりを持つものです。

*17 有理数体上で定義された1よりも大きな種数(穴)を持つ曲線は，有限個の有理点しか持たないであろうという予想です。1983年にファルティングスにより証明されました。

*18 Eugene Wigner (1902-1995: 1963年ノーベル物理学賞受賞「原子核と素粒子の理論における対称性の発見」)による1960年に公開された講演録。

主役登場

とっさに判断して動く脳のメカニズムの解明に向けて

小林 明美

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
研究員



私は大学院時代宇宙物理学を専攻していて、人の役に立つ研究がしたいと思いNTTに入社しました。入社してからはしばらくはヒューマンインタフェースの研究に従事していましたが、元々大学で基礎研究をしていたこともあり、研究を進めるにつれ、そもそも人はどのように感じて判断し、動いているのかを解明したいという思いが強くなり、現在取り組んでいる「とっさに判断して動く脳のメカニズムの解明」という研究テーマに着手しました。

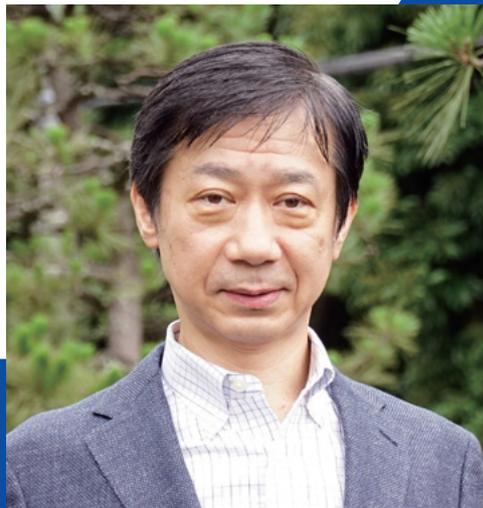
日常生活では、とっさに判断をすることが多くあります。例えば、何か物が飛んできて手でそれを取ろうとしているときにそれが危険な物であることが分かったら、取るのをやめて素早く手を戻さなければ怪我をしてしまいます。それ以外にも、車の運転など、瞬時に判断して動かなければならないシーンは多くあります。これらのシーンではゆっくり時間をかけて判断して何か決まった動作を実行するのではなく、時間が限られている中で動きながら判断をしています。この短時間で動きながら判断するという状況がより顕著になるのは、私が現在研究の題材としている野球などの球技スポーツシーンです。例えば、野球の打者は時速150キロの球を打つときに約0.4秒という短い時間で球筋を見極めてバットを操作する必要があります。正確な判断や動作には時間が必要ですが、このような厳しい時間制約下でどのように判断と動作を両立させているのか、その脳情報処理の仕組みについて研究を行っています。

従来、判断や動作の研究は別々に扱われることが多いで

すが、両者は密接に関係すると考えられます。私たちは、判断と動作の関係性を評価するため、野球の打撃に似せた2次元の腕動作実験を行い、厳しい時間制約下では打つか見送るかの判断が悪くなり、結果的に打ち返せる割合が低くなることを確認しました。そして、そういった判断の悪化を防ぐために、なるべく動作開始を遅くすることや、特に見送るときに適切に動作を途中で止めるといった動作戦略を変更できることが重要であることを発見しました。NTT コミュニケーション科学基礎研究所では、基礎実験による人の脳情報処理メカニズムの解明だけでなく、実戦やVR (Virtual Reality) など幅広い環境での実験を行うことで、現場の実課題と基礎をつなぐ研究を行っています。現在、VRを使ったトレーニングへの応用や、運動経験による判断・動作特性の違いについて検討を進めており、さまざまな脳情報処理機能の評価や学習手法の確立をめざしています。人の判断・動作特性を理解することは、新たな才能発掘や、リハビリテーションへの応用などへも貢献できると考えています。

私が最初研究していた宇宙の研究と、現在取り組んでいる人の研究は、一見全く関係ないようにみえますが、実は、判断の数理モデルと天体形成モデルには共通点があり、宇宙と人のつながりに面白さを感じています。将来、宇宙物理学の研究背景を活かした研究テーマを生み出すことも私の目標の1つです。

挑戦する 研究者たち CHALLENGERS



塚田 信吾

NTT 物性科学基礎研究所
フェロー

医学と情報通信の橋渡しにより、
作による突然の不幸を減らしたい。
抜きんでた研究者に共通するのは
グッド・コミュニケーターである

医療機関における診断、バイタルモニタ、健康診断、AEDなどで
広く活用されている心電図はICTの発達と機械学習等の情報処理
技術の進歩により、ヘルスケアなどの領域にも活用を広げつ
つあります。また、超高齢化社会における心疾患の増加により、
心電図を活用した在宅・遠隔医療のニーズも急速に高まりつつあ
る現代において、医師としての臨床経験を活かし、医療とICTを
融合した学際領域の研究に臨む塚田信吾フェローに研究活動の進
捗等を伺いました。



新しい誘導と解析を用いたモバイル 立体心電図：テンソル心電図

3年ぶり、3回目のご登場ですね。研究活動は順調に進んで
いますか。

おかげさまで順調に進んでいます。私たちは現在、
hitoe[®]を用いたウェアラブル心電計の開発経験を活かし、
臨床心電図の医学的な知見と近年の情報処理技術を組み合
わせて、心電図の常時計測・解析システムの構築に取り組
んでいます。

2014年に発表したhitoe[®]は、東レの新素材を用いた衣

服型のバイタルセンサで、最先端の繊維素材であるナノファイバ
生地地に、導電性の樹脂をコーティングして、生体信号
を検出する専用の生地素材です。

hitoe[®]を活用した研究の過程で、研究成果を世の役に
立つようにと常に意識してきました。2021年に世界最大の
スポーツイベント（大会）という非常に良い機会に巡り合
いました。衣服型で運動時等においても生体情報のセンシ
ングが可能である利点を活かして、競泳と自転車競技にお
いて、大会出場を目標とした選手強化にかかわらせていた
だきました。

競泳においては、選手の練習に伴う慢性的な筋緊張によ

る胸郭を中心とした運動機能の低下がみられることに対して、脊柱・肋骨・体幹の機能的な連携への自覚を促し、自然で効率的な体の動きを回復させるトレーニングを提案して、中京大学水泳部の2名の競泳選手、トヨタ自動車の川本武史選手、そしてミキハウスの相馬あい選手をサポートしました。トレーニングにおいてエクササイズの前・後ストリームラインの姿勢の変化を3方向から撮影して評価し、hitoe[®]で筋電・呼吸・モーションを計測するマルチセンサベルトを活用して、呼吸のしやすさや腕の上げやすさ、呼吸時の胸囲の伸縮を計測しました。コロナ禍であったため、スマートフォンのWeb会議システムを使用して、リモートによるコンディショニングを提供しました。川本、相馬両選手とも、日本選手権等における優勝等の成績を残し、この取り組みを継続できて本当に良かったと思います。

自転車競技においては、表面筋電位計測と分析と可視化を手掛けました。hitoe[®]を生体電極として使用し、ブリヂストンサイクル、NTTデータとの共同研究の下、チームブリヂストン所属の橋本英也選手を含む国内トップ選手を対象に、筋疲労・筋活動からみえるペダリングの評価に臨みました。大会の競技会場を含むさまざまな場所で計測を実施し、集めたデータを基に、選手ごとのペダリングの特徴を可視化し、選手にフィードバックして、選手の感覚、主観を交えたディスカッションを行い、強化のポイントを明らかにしました。

アスリートにとって競技中の筋の活動の状況を知ることにはパフォーマンスの向上やコンディショニングのために重要です。hitoe[®]の計測する「表面筋電位」は体の表面から筋肉の活動を知ることができ、着替えるだけでセットでき身体への負担も少ないことから現場での運動解析に有効と考えられます。今回の取り組みにより、生体電極のhitoe[®]の有用性を確認することができました。

他にもhitoe[®]から派生した新たな研究テーマが生まれたそうですね。

医師として働いていた私は2010年にNTTに中途入社して以来、新しい分野の研究をほぼ0から再スタートしました。生体電極の発明から着衣だけで心拍・心電図の常時モ

ニタリングを可能にする生体電極用の素材の作成、そして社会実装まで担当させていただきました。

さまざまな生体電極やウェアラブル機器に関する提案をしてきましたが、社会実装に至るのはそれらのごく一部で、それは他社も同様です。幸い私の提案は着るタイプの生体センサとして新規であったため、国内外で注目され、世界中を飛び回る多忙な生活が続いていました。ストレスを抱える中、まさに医者の不養生で、突然心臓発作に見舞われました。その際に私自身が研究していたウェアラブル心電図で確認した心電図と、さらに病院の精密検査で行った誘発試験中の心電図には衝撃を受けました。発作の際の強烈な自覚症状と比較して、心電図の示す異常所見(信号の歪)は極めて小さかったのです。

ウェアラブル心電計は心臓発作の回避や早期診断を目的に研究してきたにもかかわらず、従来の心電図の判定法(正常と異常を診断する目安となる基準)には限界があり、これらのツールをもってしても、見落としてしまうような小さな異常が存在し、心臓発作を早期発見できない原因になっていることを自覚しました。この限界を突破するには、情報処理技術を用いた革新的な心電図の解析技術が必要となります。時を同じくしてコロナ禍の行動制限から、これまでの多忙な生活から一変、この課題に集中的に取り組む時間を持つことができ、新しい方法で心電図を測定・解析する「テンソル心電図」を生み出すことができました。

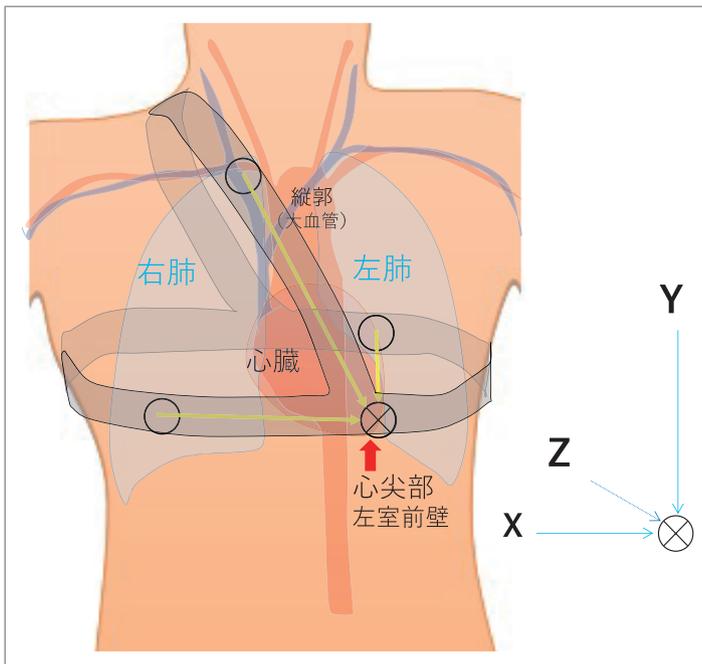


臨床医、そして門外漢の経験が活かされた

大変なご経験を通じて新しい解析技術が生まれたのですね。「テンソル心電図」について詳しく聞かせてください。

心電図は、胸部、四肢等に設置した複数の生体電極から取得した電位差の時間変化を表したものです。胸部の電極からは体動の影響を受けにくい比較的大きな心電位を得ることができるのですが、そのほかの電極は体動の影響を大きく受けるため、心電図の測定は基本的に安静状態で行われます。

前述の心電図の微小な異常(波形の歪)を見つけるため



(a) 心尖部（心臓の先端）を基準とした心電図の新しい誘導法*
 ※心臓の電位を取るための電極の位置・組み合わせ



(b) ウェアラブル電極hitoe®を用いた
 ベルト式テンソル心電計

図1 テンソル心電計

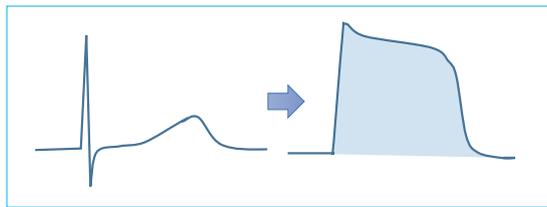
には、心電図の長時間安定的な記録が必要となり、心臓が胸郭ともっとも近接する心尖部領域（心尖部—左室前壁）を基準点とし、ほぼ線形独立な3方向に対極を備えたウェアラブル心電計を考案しました（図1）。心臓は立体であり、その動作も立体的であるため、心臓を囲むように3次元に設置された電極からは心臓の動きに応じた立体的な心電図を得ることができます。電極の装着性向上と体動による電極の位置等への影響を極小化するために、電極と配線は伸縮性のベルトと一体化して、肩ベルトとウエストベルトを締めるだけで簡単に装着できます。さらにこの立体心電図とともに心拍出量・深部血管脈波の同時計測機能を備えたポリグラフ（心機図）を開発しました。

従来の心電図の判定基準は、心電図の正常範囲が広く、現状では疾病やパターンごとに個別に基準を設けて対応しているのが現状です。心臓発作（狭心症などの異常）が発生しても、ほんのわずかな波形の歪しか現れないことがあり、加えて、非定型的な心電図の異常を定量的に評価する

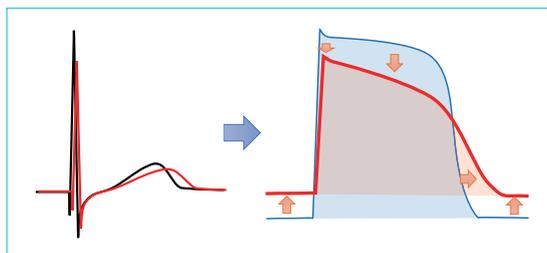
方法は確立しておらず、異常と判定されないケースがあります。

心電図は多数の心筋細胞の活動電位と呼ばれる興奮によって発生した電位を体表面から記録したものです。心筋細胞の活動電位は、体表面から測定することはできません。そこで、ガウス分布を用いてこの活動電位の変化するタイミングを統計的にモデル化し、心電図を基に心筋の活動電位の集団的な推移を推定する方法を考案しました。この方法により、心電図の非定型的な歪を分解し、拡大して、明瞭に可視化することができます（図2）。

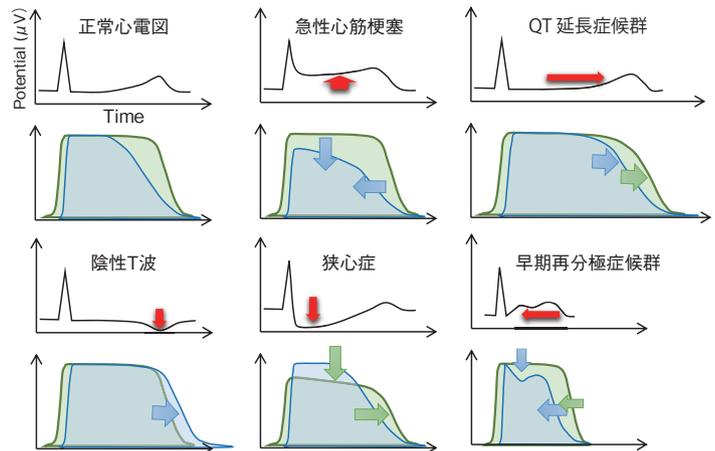
現在は、この方法によって得られるパラメータが心臓の複雑な異常の分類や、これまで見過ごされてきた心電図の微細な歪を定量的に抽出し、統一的に評価する指標として有効であるかを検証しています。将来このテンソル心電図の解析手法が、心不全や虚血性心疾患、心臓突然死と関連する不整脈の診断に役立つことを期待しています。



(a) 正常の心電図と心筋の活動電位（電気的な興奮）



(b) 心電図の異常と心筋の活動電位の歪



(c) 心電図を心筋の活動電位の歪を基に解析*

*研究段階の技術のため、病気の診断に用いることはできません

図2 テンソル心電図による心臓の異常の可視化

このような心電図の解析は今まで成されてこなかったのでしょうか。

テンソル心電図に関して、過去の論文と先行特許の調査を行いました。類似のケースは見つからなかったため、新規性は高いと考えています。

一方、心不全や心臓発作が死因の第一位である欧米において、この分野の研究は盛んであり、昨今ではApple等もこの領域に参入するなど研究開発競争は激化しています。その多くは機械学習・AI（人工知能）を使って、異常な心電図を自動判定し、さらにこれまで判定できなかった異常を検出しようとしています。ただ、現時点の心電図のAI診断には課題もあります。学習させる心電図データによる影響を受けること、なぜその判定結果を得たのかという理由、因果関係が必ずしも明白ではないこと、大量の心電図のデータを準備する必要もあります。

心電図から心筋の活動電位を計算し異常を解析する、いわゆる「心電図逆問題」は、解の得られない難問とされてきました。しかも心電図の異常には形状のわずかな歪や電位の変化にとどまる場合も少なくありません。

しかし、私は臨床医の中に、心電図の微細な変化を読みとって鑑別する名医がいることを知っていました。彼らは

数多くの患者の心電図を診てきた経験から異常を識別しているのだと仮説を立て、私はこの問題にチャレンジするために情報処理や統計学を勉強しました。私の学んだ医学は現在の情報処理とは縁遠く、再びゼロからのスタートとなり、しかも不可能とされている逆問題は非常に多難でした。ところがふとあるとき、統計学におけるガウス分布の再学習中にひらめいて非常に簡潔なモデル式で計算を試みたところ、制約付きながらも解けることに気が付いたのです。情報処理や統計学の素人ゆえの発想が奏功したのかもしれない。



新しい時代に向けて、新しいタネを見つけ、育てるのが研究者の使命

前回、先進的な医療機器の開発と病気になる予兆を検出するのが夢であるとお話しましたが、夢の実現は間近に迫っているのですね。

この方法が正しいのか、臨床医学に役立つのかは現時点では分かりません。もしテンソル心電図が有効であればまさに夢の実現に迫るもので大きなブレイクスルーです。これからストレステストに入りますが、乗り越えなければな



らない技術的課題、さらに社会実装までには大きな関門がいくつもあります。臨床研究はスタートしたばかりですが、もし有効性や価値が認められれば3年から5年程度で心電図の解析法の1つとして認知される可能性はあります。ただし、心電図のAI診断は猛烈なスピードで発達していますから、負けてしまう可能性もあります。テンソル心電図の解析手法はすべての心電図に適用可能な汎用性の高い技術です。もし臨床的な有効性が確認されれば、例えば10年後くらいにWebサイトをクリックするだけで自分の心電図を精密に解析したり、心臓病の予兆を検出したりできるようになり、社会に貢献できる可能性があります。

学術的には、情報処理と医学の中間にあたる学際的な雑誌に論文を投稿しようと考えています。現代の研究課題の多くは1つの専門領域では解決には到達できないことを私は実感しています。事実、欧米においてはクロス・ディシプリン、あるいはダブルメジャーといった、1つの専門領域を極めた研究者や専門家がもう1つの専門領域を追求する、あるいは専門家どうしが課題解決のために緊密なタグを組むことはよくあります。一方、日本ではクロス・ディシプリンや学際的な取り組みは進んでいないように感じています。まして、私の年代では本当に数少ないのが実情です。

私は、NTTの研究者として医学、生理学、医工学、生体計測・情報処理の分野にまたがって活動しています。それぞれの領域の専門家の橋渡し役としてコミュニケーションを取り、医療費高騰の問題等、社会課題の解決に臨みたいと願っています。

研究者として大切にしていることを教えてください。

私は次の時代に向けて、新しいタネを見つけて、それを育てるのが研究者の役割と考えています。どの領域においてもその時代に注目される研究テーマはありますが、必ずしもすべてが重要な課題に結び付いているとは限りませんから、テーマの重要性、社会的必要性を見極めて研究に臨みたいですね。加えて、専門性を高めることは必須ですが、学際的な交流も積極的に行い、さらには現場の経験を積む泥臭い取り組みもまた大切にしたいです。さまざまな交流を通じて各分野の苦労話や技術のボトルネックを把握でき

ますし、そこからユニークな発想が生まれることもあります。交流やコミュニケーションのために、前回お話したときと同様に、これからも「相談しやすいおじさん」でありたいと願っています。

ところで、患者さんへの対応をしてきた医師時代の経験から、幸せとは単に成功したとか成果を上げたとか、地位がある等で得られるものではなくて、家族や友人、同僚に恵まれること、人と交流することで得られるものではないかと思っています。この感覚はこれまでかかわってきた多くの医療従事者と意見の一致するところです。研究者においても、周囲と良い関係を築いている方のほうが、研究活動を継続できて、結果的にも安定した成果を上げているように感じられます。もちろん、単独で専門領域の目覚ましい成果を上げられる方もいらっしゃいますし、研究スタイルはそれぞれですが、私はさまざまな方とかかわり合い助け合いながら研究活動を続けたいと考えています。

研究者の評価は論文数やインパクトファクタなどの指標もありますが、抜きんでた成果を上げている研究者に共通するのはグッド・コミュニケーターであることではないかと思っています。彼らはコミュニケーション力が際立って高く、専門外の領域にも精通していて、例えば他領域の話題や苦労にも共感できる力があります。私もそうありたいですね。今後も引き続き、研究成果を少しでも社会に役立てられるように、また若い研究者の皆さんの活躍できる機会が増えるように、明るい未来に結びつく研究を継続できるようにと願っています。

挑戦する 研究開発者たち CHALLENGERS



増田昌史

NTTドコモ
無線アクセス開発部 開発戦略
担当部長

グローバルな視点、 コミュニケーション力、 そして好奇心で 研究開発に臨む

NTTドコモは、多様化する市場ニーズに迅速かつ効率的、経済的に対応していくことを目的として、O-RAN ALLIANCEを設立し、無線アクセスネットワーク（RAN）のオープン化に先導的な役割で取り組んでいます。オープンRANの標準仕様策定、相互接続のための検証環境整備、そしてこれらを通じたオープンRANのエコシステム構築により、グローバルな普及をめざす、NTTドコモ無線アクセス開発部 増田昌史担当部長に研究開発の概要と醍醐味を伺いました。



世界の通信事業者と連携して 「O-RAN ALLIANCE」を設立

現在、手掛けている研究開発の概要をお聞かせください。

5G（第5世代移動通信システム）の無線アクセスネットワークの高度化、オープンRAN（Radio Access Network）戦略および標準化などを担当しています。移動通信ネットワークは、基地局と端末間の無線アクセスネットワーク（RAN）、接続等通信の制御を行うコアネットワーク（CN）、そしてIPパケットの転送を行うIP転送ネットワークから構成されていますが、その中で特にオープンRAN

の標準化、普及に注力しています。

移動通信システムは第5世代に突入し、移動通信に対するニーズやユースケースはますます多様化し、さらにTTM（Time To Market）は短縮化の一途をたどっています。こうした中、お客さまのニーズに迅速かつ効率的、経済的にこたえるために、市場の多様な通信機器ベンダ製品を柔軟に取り込むことを可能にするグローバルで共通化・標準化されたオープンインタフェース、およびあらゆる機器がオープンに相互接続可能なエコシステムを構築するといった考え方が、世界の通信事業者の間に出てきています。

このような背景を受け、私たちは2018年、世界の通信事



業者と連携してRANのオープン化やインテリジェント化を目的とした団体「O-RAN ALLIANCE」を設立し、Board Memberとして中心となって活動しています。2022年3月末時点で、世界の主要な通信事業者31社、RANの大手ベンダ、新興ベンダを含めて330を超える企業や団体が加盟しており、移動通信システムの国際標準化団体である3GPP (Third Generation Partnership Project) を補完するかたちでRANの標準仕様やテスト仕様の策定、オープンソースの作成、相互接続環境の構築を推進しています。

O-RAN ALLIANCEの主なスコープとして、①オープンインターフェースを用いた異なるベンダ装置間の相互接続の実現、②装置内のハードウェア (HW) とソフトウェア (SW) の分離およびRANの仮想化 (vRAN) による、より拡張性の高い基地局装置の実現、③人工知能 (AI) や機械学習 (ML) を活用したRANのインテリジェント化をめざしています。

具体的な取り組みを教えてください。

オープンインターフェースに関しては、これまで同一ベン

ダによって提供されていた基地局を構成する無線装置（主として電波の送受信を行う装置）とベースバンド装置（主として信号を電波に乗せるための変換や基地局の制御を行う装置）を、それぞれ異なるベンダ装置を組み合わせ、フロントホール（接続線）を介して接続することで、設備構築の柔軟性が大きく向上します（図1）。

このことから、私たちは2020年3月の5G商用サービス開始当初からO-RAN ALLIANCEの仕様に準拠したオープンフロントホールインターフェースにより、マルチベンダ構成で5GのRANを展開してきました。また、4G（第4世代移動通信システム）と5Gのシステム間を同じくO-RAN ALLIANCEの仕様に準拠したX2インターフェースで接続し、マルチベンダ構成で実現しています。さらに、オープンインターフェースによりミリ波帯への展開や複数の周波数帯の電波を利用して信号を送受信するキャリアアグリゲーションの高度化、そしてこれらに関する装置ラインアップを拡大して、2022年3月末時点で、3つの5G専用周波数帯（3.7 GHz帯、4.5 GHz帯、28 GHz帯）を用いて5G基地局数累計2万局、人口カバー率55%の5Gネットワークを展開しています。

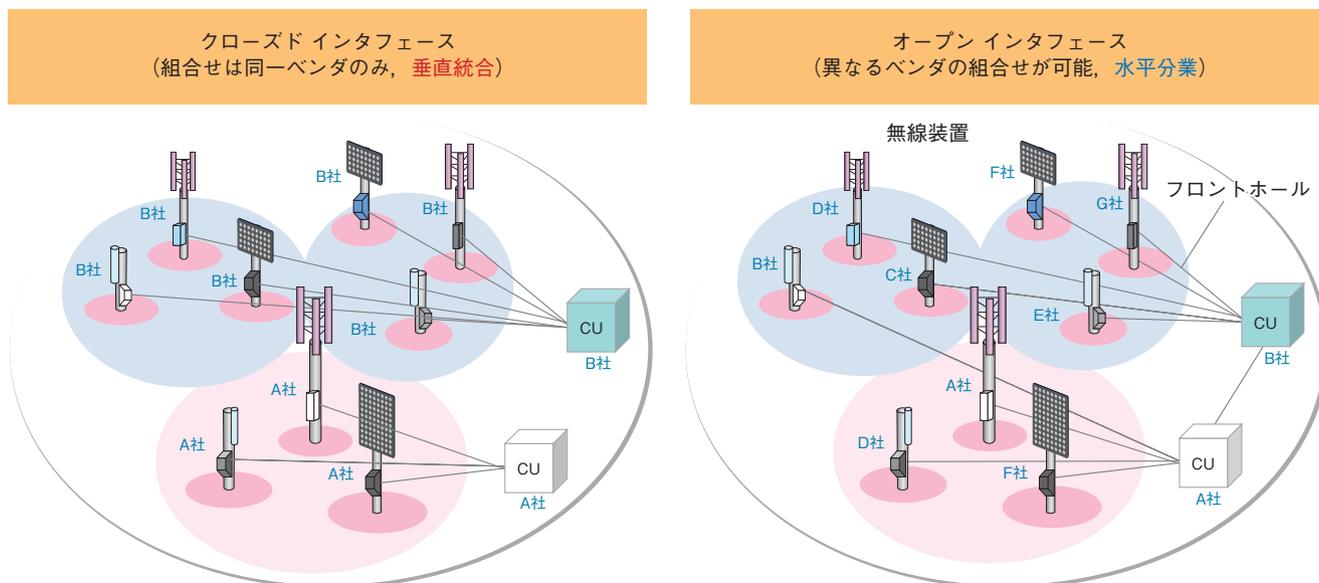


図1 オープンインターフェースとは

CU (Central Unit) : ベースバンド装置

RANの仮想化に関しては、これまで基地局装置は専用
に開発されたHWとSWの組合せにより実装されてきま
したが、HWとSWをオープンインタフェースにより分離
したうえで、HWとして主に汎用サーバを活用し、SW化
による拡張性向上や仮想化による運用の効率化をねらった
vRANとして標準化や実装化を進めています。こうした動
きの中、NTTドコモでは、vRAN関連の技術を有する12
社のパートナー企業と2021年2月より「5GオープンRAN
エコシステム（OREC）」の協創プログラムを開始し、す
でに商用導入済みのCN装置の仮想化の知見も活かしつつ、
2022年度末までに高性能・高品質なvRANを商用化すべ
く実機検証などの取り組みを進めています。

さらに、O-RAN ALLIANCEと、オープンソースのコン
ピュータOSであるLinuxの標準化と普及を目的として
2000年に設立されたLinux Foundationとが連携し、
O-RAN Software Communityとして、オープンRAN
構成要素のオープンソースの供給に取り組んでいます。

これらの活動を通して今後はRANからCN、MEC
（Multi-access Edge Computing）までマルチドメイン

での基盤共通化や、仮想化資源、およびアプリケーション
のライフサイクルマネジメントの統合化の実現といった仮
想化の拡張が期待されるところです。

インテリジェント化に関して、3GPPではSON（Self-
Organizing Networks）として、RANの構築・最適化・
障害復旧の自律制御を仕様化していますが、基地局装置の
制御アルゴリズムは、基地局装置がブラックボックスであ
ったことから、自動化・最適化機能も同一ベンダによる提供
が一般的でした。O-RAN ALLIANCEではRIC（RAN
Intelligent Controller：インテリジェント機能部）を基
地局本体から分離し、オープンインタフェースとして仕様
策定する取り組みを進めています。これにより、基地局本
体の製造能力を有さないもののAI/ML技術に強みを持つ
などでRICを製造可能なプレイヤーの参入が可能になり、よ
り高度で多彩な自動化・最適化機能の実現を見込めます
（図2）。

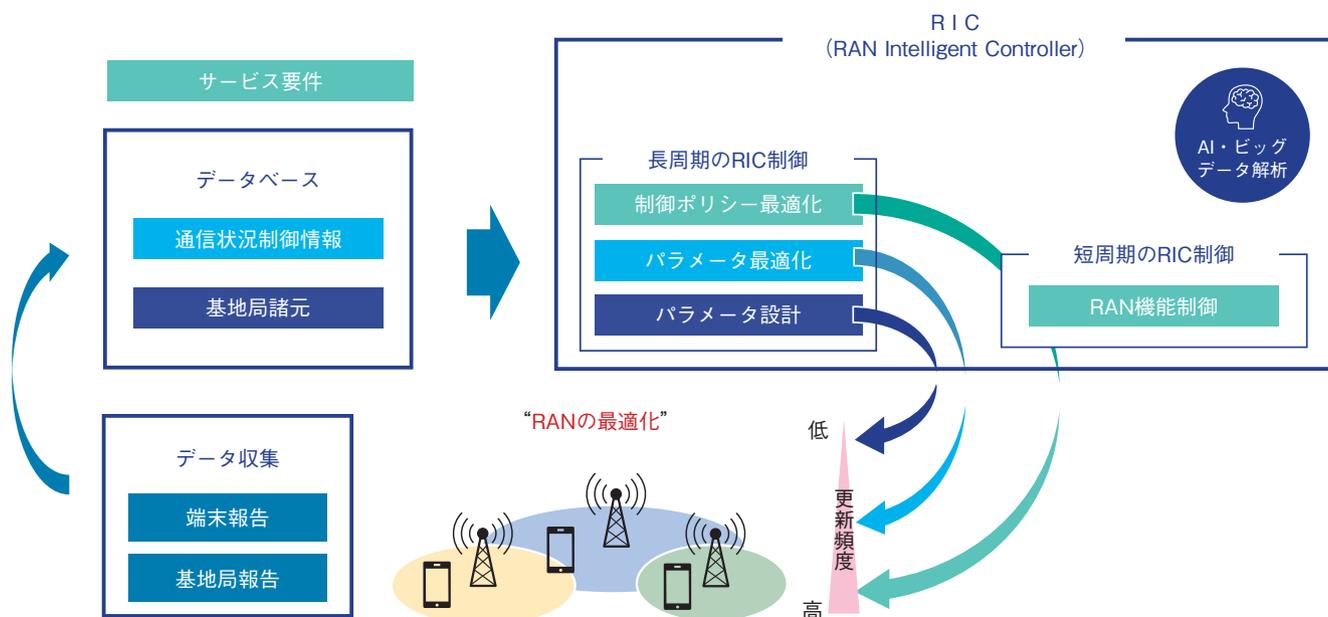


図2 RANのインテリジェント化



世界規模の社会課題への ソリューションの提供をも視野に

オープンRAN実現・普及に向けての課題を教えてください。

オープンRANを実現・普及するための課題は、①マルチベンダ・インテグレーション、②vRAN性能確保、③保守監視システムの実現、④商用運用システムのマイグレーション、⑤TCO (Total Cost of Ownership) の最適化と、大きく5つあります。

マルチベンダ・インテグレーションに伴い役割分担や責任分界点の定義、当該のプレイヤーによる実行能力の獲得、中間製品調達モデルを含むビジネスモデルの確立、持続可能なエコシステムの形成が必要となります。現在、O-RAN ALLIANCEはOTIC (Open Testing and Integration Centres) の枠組みにより相互接続検証の環境整備を推進していますが、商用レベルでのインテグレーションには、環境整備へのさらなる対応も求められると考えます。

vRANの性能確保に関しては、汎用サーバの活用によるコスト低減が一般に期待されていますが、所定の性能を確保したうえで低コスト化を実現する必要があります。導入シナリオに応じたHWアクセラレータの効果的な活用が1つの鍵となります。そこで、vRANのライフサイクルマネジメントやオーケストレーション、RICによるインテリジェント機能を実現するための保守監視システムが必要となります。O-RAN ALLIANCEはSMO (Service Management and Orchestration) としてアーキテクチャの定義やインタフェースの仕様化を進めているところです。

商用運用システムのマイグレーションについては、新規参入のケースを除き多くの通信事業者はネットワークをすでに構築して運用しているため、経済性や提供サービスの連続性の観点から一朝一夕に新しいシステムに置き換えることはできません。オープンRANの導入にあたっては、旧システムとの相互接続性の課題をクリアしつつ実現可能で経済合理性のあるマイグレーションシナリオを策定して実行する必要があります。

通信事業者にとって通信設備の構築から運用までを含めたTCOの最適化は重要な経営課題です。オープンRANにより、多様な市場製品の柔軟な取り込みや、汎用サーバの活用、仮想化・インテリジェント化による運用の効率化といったCAPEX (初期投資)・OPEX (運用費用) の低減要素が見込まれますが、その一方で、前述の4つの技術課題への経済的なソリューションが求められ、事業収支に見合ったTCOを実現する必要があります。

オープンRANの普及は今後どのようなインパクトがあるのでしょうか。

オープンRANは黎明期から普及のフェーズに入りつつあります。今後、さらにエコシステムが構築されれば、移動通信システムが十分に普及していない海外におけるエリア拡大に大きく寄与するばかりではなく、CNやITシステム、固定通信ネットワークにまたがった仮想化やオーケストレーションの共通化・統合も考えられます。また、単一ベンダへの依存性を下げることによるサプライチェーンリスクの緩和、低消費電力デバイスやアルゴリズムの取り込みによるカーボンニュートラルへの寄与など、世界規模の社会課題へのソリューションの提供にもつながると考えます。

そして、オープンRANの重要性や課題の本質は、5Gを超えてBeyond 5G/6Gの時代においても不変であると考えています。私たちは標準化やシステム実装の研究開発、商用システム構築・運用ノウハウのフィードバック、および海外への展開を通じて、オープンRANのさらなる発展に寄与していきたいと思えます。



直接、社会貢献の実感を得られる喜び

研究開発者として大切にしてきたことをお聞かせください。

オープンイノベーションをめざして、自分たちとは違う経験や技術、バックグラウンド、ノウハウをお持ちの方々と共有できるモノ、コトを見出していくことを心掛け、好

奇心と相手を尊重したコミュニケーションを大切にしてきました。

私は1998年にNTT 移動通信網（当時）に入社後、第2世代から現在の第5世代に至る移動通信システムの研究開発に従事してきました。無線アクセス開発部よりR&D戦略部を経て、グアムにあるNTTドコモ子会社のDOCOMO PACIFIC, Inc.における技術責任者を務めた後、2019年より主に5GやオープンRANなどの無線アクセスネットワークの研究開発に取り組んでいます。これらの仕事において社外、国内外の方々と頻りにコミュニケーションを図り、いただいたご意見を研究開発に取り込んでできました。もともと技術や研究開発が好きであったことに加え、NTTドコモでこれまで培った経験によって、さらにその重要性を実感するようになりました。

新たな価値を創造するには何事にも好奇心を持って対峙することも重要です。好奇心は自らを積極的にしますし、信頼関係を築く際の姿勢にも影響します。例えば、ベンダとの関係性において、装置を購入するという立場から通信事業者は上から目線になりかねません。しかし、好奇心を持って相手の声を聴き、双方にとって価値ある取り組みを検討することで、Win-Winの関係で事業を創造できると思います。最終的には自分の頭で考えるとしても、まずは好奇心を持って耳を傾けることが大切だと思います。

ORECには13社もの世界有数のベンダに参画いただいています。個社の取り組みとしてこれだけ広く、深く、多くのベンダとパートナーリングし、実際に活動しているのは稀なケースと自負しており、それは設立当初から相手を尊重したコミュニケーションができていたからこそであると思っています。

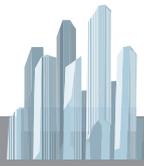
これからの研究開発者に求められるスキル等を教えてください。

私の経験を通しての実感ですが、RANに限らず技術全般としてよりオープン化が進んでいくにしたがって、社外やグローバルな連携は多くなりますから、グローバルな視野に立って相手の文化や価値観を理解しコミュニケーションできるスキルが必要になると考えます。

それから、国内外の複数の企業が連携する標準化の現場では、複数の企業に属する研究開発者が、当該課題に関して知恵を出し合って最適なソリューションを生み出すことに努めています。この際に研究開発者には知的財産等の法的问题をクリア、あるいは折り合いをつける力が必要になります。企業の法務や知財部門等は、当然のことながら、法律の観点から自社の価値を最大限にすることを検討しています。ところが、自社にとっての価値最大であるがゆえに、パートナーにとってそれが価値最大であるとは限りません。特に利害相反している場合は、せっかく導き出したソリューションを実現することはできません。そこで、現実には折り合いをつけることで、法的にもソリューション的にも全体最適化を図る力が必要とされています。

実用開発を担う研究開発者の醍醐味は、自ら開発した技術等が実際に使われることで社会の役に立てていると直接的に実感できることではないでしょうか。例えば、私は入社2年目で複数周波数の共用に関するテーマを任せていただき1年後には社会実装を実現し、社会の役に立てたという実感を初めて抱きました。また、グアムに赴任中に海底ケーブルが切れて北マリアナ諸島の通信が断絶するという社会的な問題が発生し、それを機に新しい海底ケーブルとLTEの快適な通信環境を提供したところ、大変喜ばれたという経験があります。これらはほんの一例ではありますが、直接的に社会に貢献できているという実感が得られるのは研究開発者の醍醐味かと感じています。

若い研究開発者の皆さん、事業のスピードが増している現代において、競争力の強化、迅速な事業展開等をベースとして、研究開発にプレッシャーを感じることもあると思います。一方で現在ではツールも豊かになっていますし、自分たちだけでは限界に突き当たってしまう開発のスピードも、パートナーリングやオープンイノベーションによってこの波に乗っていけると思います。そのためには、自分のスタイルを見出し、好奇心を持って研究開発に臨んでいくことが大切だと思います。



新島有信 特別研究員

電気刺激による効率的な運動学習で 人間の可能性を拓げる筋肉インタフェース技術

従来の運動学習は視聴覚を中心とした学習でしたが、初心者が熟練者のような筋肉の使い方を習得するには長い時間をかける必要がありました。今回は、電気刺激を用いて効率的な運動学習を実現する筋肉インタフェース技術について、新島有信特別研究員にお話を伺いました。

◆PROFILE：2017年東京大学大学院博士課程修了。博士（工学）。2012年、日本電信電話株式会社に入社、NTT人間情報研究所に所属。2021年よりNTT人間情報研究所特別研究員。情報通信・ヒューマンインタフェース、インタラクションの研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会サイバースペース研究賞、Best Poster Award, Augmented Humans 2021等を受賞。



運動学習を効率化して 人間の可能性を拓げる筋肉インタフェース技術

◆「運動学習のための筋肉インタフェース技術」とはどのようなものですか。

「運動学習のための筋肉インタフェース」という技術をひと言で表すならば、筋肉を通じてスポーツや楽器演奏などの運動の学習を支援するシステムです。私が行っている現在の研究では、ピアノ演奏の学習を対象にしていますが、熟練者と初心者の動きをセンサで分析したときに身体の使い方が全く異なるというデータが出ます。初心者が熟練者のようにピアノを弾けない理由の1つとして、無駄な力を入れていたり、逆に使うべき筋肉を使わなかったりしているということが挙げられます。そこで、熟練者と初心者の身体の使い方の違いに基づいて、初心者の筋肉に電気刺激を流すことで、熟練者の動きを直接体感することが可能となるシステムを実現しようと考えました。

例えば従来の運動学習では、熟練者が初心者に身体の動かし方を言葉で伝えて教えたり、初心者が熟練者の演奏を観察したりして学ぶ、といった視聴覚を中心とした学習が行われていました。しかし、熟練者の筋肉の動かし方を視聴覚だけで学習することは難しいと考えられます。そこで、より直接的に筋肉を動かすことで筋肉の動かし方を効率的に学習することをめざしているのが筋肉インタフェース技術です。

私は大学でスポーツチャンバラをやっている、大学の新入生や小学生にも教えてきたのですが、初心者に共通して最初に教えないといけないことは「もっと力を抜いて剣を振ってください」

ということでした。一方、自分が水泳を習っているとインストラクタに「力を抜いてください」と同じことを言われ、またピアノの弾き方を本で勉強すると、そこでもやはり「力を抜いて演奏しましょう」と書いてありました。どんな運動でも「力を抜く」ということが1つのポイントになっているのは面白いと思い、運動学習に興味を持ち、「これをコンピュータで支援することができないか」と考えたのがこの研究を始めたきっかけです。

◆筋肉インタフェース技術はどのような方法で行うのでしょうか。

筋肉インタフェース技術では、EMS（Electrical Muscle Stimulation）という電気刺激で筋肉を動かす技術を用いて、熟練者の筋肉の動きを初心者に伝えていきます。筋肉は脳から電気信号を与えることで収縮するのですが、その脳からの電気信号の代わりに、外部から筋肉に電気刺激を与えるのがEMSの技術です。

この技術は、もともとリハビリ用途として医療分野で使われていたのですが、健常者が運動学習をするときのインタフェースとしても使えないか、というところから研究を始めました。

図1はEMSによるピアノ演奏の運動学習支援を説明したものです。ピアノ演奏では2つ以上の鍵盤を高速で弾く「トレモロ」という奏法があります。これは初心者にとっては簡単なようで難しい技術で、すぐに疲れを感じてしまい長時間演奏することができません。その理由を調べるために、筋電（EMG：Electromyography）センサを使って初心者と熟練者の演奏中の筋肉の使い方を分析すると、初心者は熟練者に比べて、指を動かす総指伸筋や長母指伸筋などの筋肉に無駄な力みがあることが分かりました。これに対して熟練者は、指を動かす筋肉ではなく手首を回転させるための回内筋と回外筋という筋肉を使って弾く

ことで、疲れを感じずに長時間演奏することができます。そこで初心者の腕の筋肉の使い方を変えるため、回内筋と回外筋に交互にEMSを提示することで、熟練者のように手首を回転させながらトレモロを弾く技術を教えるシステムをつくりました。このシステムを用いた練習を通じて、指ではなく手首の回転を意識することで、疲れずに長時間トレモロを演奏するコツを短時間の練習で習得することが可能になります。

ここで重要なことは、初心者自身も電気刺激の動きに合わせて手を動かし、能動的に学習していくということです。そうすることで運動学習が進み、練習後にEMSなしでトレモロを演奏しても、きちんと手首の回転を使って弾くことができるようになります。

従来のヒューマンインタフェースにおけるEMS技術では、EMSで筋肉を収縮させて動かすことが目的の研究が多く、脱力支援を目的とした研究はほとんどありませんでした。それに対してこの筋肉インタフェース技術では、熟練者の効率的な身体の動かし方のデータに基づいて初心者の筋肉に電気刺激を与えることで、間接的に特定の筋肉の弛緩状態を転写することが可能になったことが大きな進歩です。

この研究で一番難しいことは、どこまで複雑な運動を教えることができるかということです。例えば全身運動といわれているゴルフスイングの学習支援では、複数の筋肉が運動に関与するため、問題が複雑になってきます。そのようなときに、どの筋肉に電気刺激を与えてどのような動きをさせれば、熟練者のような動きが学習できるか見極めることがこの研究の肝だと思っています。これを達成するためには、研究をする運動分野の知識を得ることから始めて、文献だけではなくあらゆるメディアから徹底的に情報を集め、それぞれに共通する運動のコツなどを抽出しています。そのあとに、運動時の生体信号を筋電センサやモーションキャプチャを使ってデータ化し、どの筋肉をどのように使っているかを分析していきます。分析の方法は個別の筋肉データを見

るという方法だけではなく、筋シナジー解析といった手法を使って、どの筋肉とどの筋肉が協調しているのかという筋協調運動を解析します。このようにしてさまざまなデータを集めることで、熟練者の動きを再現するにはどの筋肉に着目すればよいのか見極めることができます。またデータを集めるという段階では終わらずに、最終的には実際に電気刺激を与えるシステムをつかって自分で試し、運動学習のコツをつかむ感覚を体験できるかどうかを主観的にも評価することを大事にしています。

チャレンジの障壁を取り払う 筋肉インタフェース技術の未来

◆筋肉インタフェース技術を応用した今後の展望について教えてください。

図2は、私が研究している筋肉インタフェース技術などのサイバネティクス技術と、ネットワークを通じて人の動きをコントロールするという人間拡張基盤との連携を表したものです。今後の展望として、人の動きを別の人にコピーする運動転写技術を使って、熟練者の身体情報データを離れた場所にいる初心者に送り、電気刺激装置で刺激を受け取ることで、リモートでリアルタイムの運動学習支援ができるのではないかと考えています。

また自身の過去と現在の動きをシンクロさせて、老化して筋力や認識力が衰えて、若いときはできていたものができなくなったときに、昔のデータをダウンロードして身体の動かし方を取り戻させることで、健康寿命を延ばすことができればよいと考えています。人は新しいことにチャレンジしなくなると一気に活力がなくなってしまいますので、筋肉インタフェースによる学習支援を使うことで、技術習得における最初の障壁を乗り越えてもらい、何歳になっても新しいことにチャレンジできるという人生の手助けをしたいと思っています。

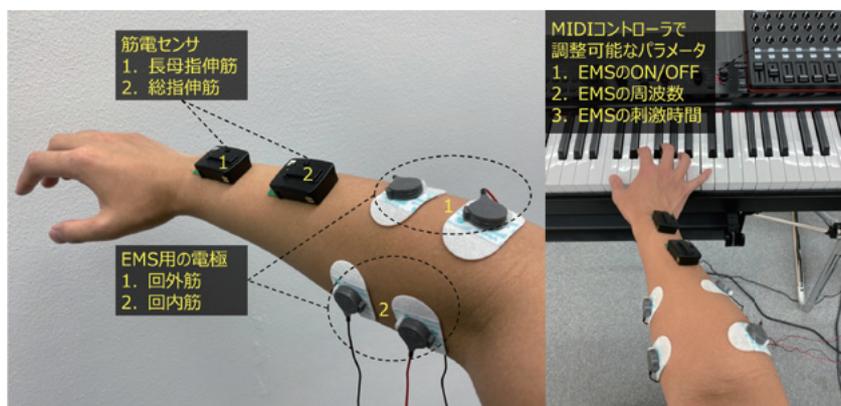


図1 運動学習のための筋肉インタフェース技術のピアノ演奏における例

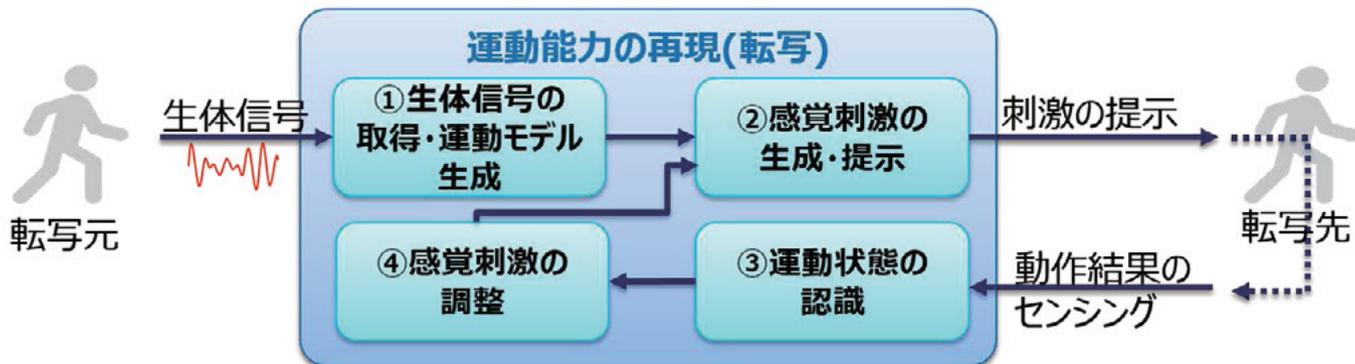


図2 人間拡張基盤と連携した筋肉インタフェース技術の展望

◆研究者や学生、ビジネスパートナーへメッセージをお願いします。

現在私が所属しているNTT人間情報研究所では、名前のとおり人間を中心にした研究を強く意識しています。ときに技術者や研究者は、人間を置き去りにして技術をどんどん高めていくことに注力しがちです。しかし一度立ち止まって研究の目的は何かということを考えると、やはり「人の生活や未来を良くする」ことが目標にあるはず。私自身も、ヒューマンコンピュータインタラクションの研究者として、人間を研究の対象の中心として扱っていますので、人間情報研究所のビジョンに共感でき、とても働きやすい環境だと感じています。

NTTの強みの1つは、社内の多様な専門家と気軽に話ができることだと思います。私の研究分野のヒューマンコンピュータインタラクションというのは、専門技術が定まっていないともいわれる学術分野であり、研究を始めようとしたときに必要な知識や技術が広範囲にわたります。例えば今研究している運動学習支援

においても、センサの技術や解析の技術、一連のシステムを組むためのエンジニアリングのスキルに加えて、人間の運動に関する脳神経科学の知見やさまざまな筋肉に関する知識も必要です。これらの別分野の知識や技術を併せて、初めて1つのテーマを遂行できます。このときに、自分1人ですべてを調べるとなると、多大な時間と労力が必要ですが、NTTではほかの研究員に気軽に尋ねたり、簡単に会って打ち合わせすることができますので、それにより短時間で必要な専門知識を習得できます。

またNTTという会社のネームバリュー、大きさというのはやはりすごいなと感じています。一般に研究者は、研究して論文を書いてどこかの学会で発表して終わりということが多いのですが、NTTでは社会に向けて技術を発表したときに桁違いの反響を得られ、社会実装につなげていくことができます。そこがNTTならではの達成感、やりがいかなと思っています。

最近では自分の好きなものが分からないまま研究をしているという若手の研究者や学生の方がいますが、私自身が研究を続けていて思ったことは、やはり自分の好きなことをやるというのがすごく大事だということです。例えるならば、大学や大学院での研究は短距離走のようなものなので、自分の興味がなくても短期的な目標のために頑張ることができます。しかし社会人になってからは長距離走のようなもので、今後研究が何十年も続くとなると、興味がないことを続けるというのは難しいことです。そこで、どうすれば長く走ることができるかを考えたときに、やはり好きだからやるというのはとても大きな原動力だと思います。私自身も、日々いろいろなことに興味を持ち「これは面白そうだな」と思って研究を始めることが多々あります。もちろん、社会の課題を解決するという思いは大事なのですが、それだけではなく、自分は何が好きなのかを見つめ直して、それをはっきり言語化することを大切にしてほしいなと思っています。



(今回はリモートにてインタビューを実施しました)

e-Craft

趣味の活動をきっかけに、 プログラミング教育ビジネスを 展開

e-Craftは、趣味の「ものづくり」から誕生したembotが、さまざまなコンテストで高い評価を得たことで、NTTドコモの新規事業創出活動に参画して誕生したベンチャー企業だ。embotをベースとしたプログラミング教育とそのビジネスへの思いを、創業者である、CEOの額田一利氏に伺った。

趣味の「ものづくり」で ベンチャー企業が誕生

◆NTTドコモ発のベンチャー企業なのですね。設立の経緯について教えてください。

e-Craftは、NTTドコモの「39works」という新規事業創出活動の成果として、子どもがプログラミングをより楽しく学び、プログラミング教育を通して「つくりたいものをつくる」ことができる世の中の実現を目的に、2021年8月に設立されました。私はNTTドコモの先進技術研究所（現クロステック開発部）において、エネルギーマネジメントシステムの研究を行っていました。そのかわり、2016年ごろに「ものづくり」をしてそれを多くの人に使ってほしいとの思いから、NTTドコモ社内2名のプログラミング能力の高い友人と、余暇の趣味として「ものづくり」を始めたところが起源です。

「ものづくり」といっても何をつくれればいいのか模索するとともに、単なる趣味の範囲では人に使ってもらうことにたどり着けないのではないかと考え、コンテストへの応募を目標に活動しておりました。人に使ってもらうためにはコンテストである程度の評価を得る必要があるため、そこに向けて、近況の一言一憂を遠くに住む大切な人に動作・ポーズで伝える、感情お届けロボット「embot」（emotion robot）を手づくりし、コンテストで賞をいただく等、高い評価を得られるようになりました。

一方、当時「プログラミング教育」という言葉がメディア等に登場し始めたころで、ユーザから「自分でもつくってみたい」という声があったことから、この分野をターゲッ



e-Craft 額田一利さん

トとすればさらに多くの人に使ってもらえるのではないかと考え、プログラミング教育サービスとしてプロダクトをより洗練化させてきました。2017年ごろ、メディアで少しずつプログラミング教育の必修化という言葉が登場するようになると、embotがより注目を集めるようになり、ビジネス化を意識するようになりました。ちょうどその当時、docomo Open Houseのイノベーションチャレンジブース（社員の個人的な活動を展示するブース）にembotを出展し、タカラトミー様が興味を示され、このころから連携の話を進めていました。

その後、NTTドコモ内にイノベーション統括部という新規事業開発をミッションとする組織ができ、そこからembotの事業化の話が来て、それに応諾した瞬間に興味からビジネスに変革しました。事業化の過程でプログラミング教育をベースに、法人（教育機関）、コンシューマ両方をターゲットとし、ものづくりから物販も行うといったビジネス展開に合致する事業部が見つからなかったことから、起業する方針で準備を進め、e-Craftを設立しました。私がNTTドコモからの出向者を含めて直接社員をスカウトして集め、現在8名ですべての業務を行っています。

◆embotによるプログラミング教育とはどのようなものでしょうか。

embotは、キットとして準備されたLEDライトやサーボモーター等の電子工作パーツを組み込んだ段ボール製のロボットで、タブレットやスマートフォンでプログラミングアプリを使って操作します（写真）。プログラミングアプリは、個々の動作の制御や動作のための条件等を設定するための、図形や絵で表示されたブロックプログラミング



写真 embot (エムボット)

で、例えば、設定した時間になるとロボットの手（サーボモーター）を動かす等の操作を行うものです。段ボールのロボットはカスタマイズや自作も可能であり、センサや回転するサーボモーターなども追加が可能であるため、プログラミングを工夫することで、さまざまなオリジナルのロボットをつくることもできます。

教育的観点から、まず、ロボットを組み立てることを通して、電子工作や造形の基礎を学ぶことができます。そして、プログラミングアプリを使ってロボットの動作を決め、アプリ上で点滅している実行個所と比べながら実際にロボットを動かすことで、正しくプログラムできたかどうかを確認し、アプリの指示や試行錯誤により修正を加えつつ正しく動作させます。プログラミングの方法は、1ステップずつ順次処理する「ブロック式」と条件分岐処理や反復処理を行う「フローチャート式」があり、さらにロボット本体がなくてもプログラミングの内容をアプリ上で確認するシミュレータ機能もあります。こうした体験を通して、プログラムのロジックを学習することが可能です。

また、API (Application Programming Interface) を使ってプログラミングできる機能もあり、天気の情報を取得できる天気APIやニュースの情報を取得できるニュースAPI等があります。明日が雨なら傘を持っていくことを教えてくれるロボットなど、自分のアイデア次第で拡張したembotの世界も出来上がり、上級レベルのプログラミング体験・学習も可能です。

◆事業概要を教えてください。

embotは当初は手づくりでしたが、事業化に伴い大量生産が必要となりました。現在はタカラトミー様と共同で開発・製造・販売を行い、自社ECサイトである「e-Craft shop」を始めとするさまざまな店舗やオンラインショップでembot関連商品を販売しています (<https://www.ecl.embot.jp/>)。また、教育機関の授業に適した、「embot信号機セット」「embot A分類対応 算数用作図

セット」「embot補助教材セット」などの教育機関向け教材の販売も行っています。

そして、プログラミングスクール「embot creative lab」の企画、教室運営も行っており、オフィス内に設置された教室に小学生を集めて、プログラミング教育を行っています。さらに、「embot」を用いた授業やワークショップなどの企画および運営の受託も行っています。

具体的な事例では、未来の学びコンソーシアム（文部科学省・総務省・経済産業省）においてホームページに実践事例を掲載するとともに、「未来の学び プログラミング教育推進月間（通称：みらプロ）」で全国100校以上に教材を提供し、約3000人の小学生がembotで授業を行っています。

栃木県の小学校では、3年生の総合的な学習の時間において「地域学習」でembotを用いて授業を実施しております。ロボットが実社会でどのように活用されているか調査する中で、子どもたちが想像力を働かせ、社会に結びつけながら自由にembotをカスタマイズしました。

東京都の私立小中学校では、5年生の図工でembotを活用しています。目的ではなく、表現のための手段や発想を広げるツールとしてembotを活用し、作品を生み出していました。

その他教員向けのプログラミング研修会の開催や授業支援、ドコモショップにおけるプログラミング教室も行っています。

embotによるプログラミング教育で 子どもの創造性も育てる

◆どのような事業環境なのでしょう。

事業を開始して約1年、embotの販売を中心として事業展開をしてきました。embotをプログラミング教育の教材として考えた場合、プログラミング教育の必修化が具体化してきた2019年ごろは、海外の企業や大企業が軒並み

関連教材を出してきたのですが、まだ市場が立ち上がっていない日本においては当然ビジネスが成立することなく、撤退する企業も少なくありませんでした。embotについては、単なる教材の販売ではなく、子どもの遊びとしての体験につながるツールになるよう工夫を凝らしております。

一方、タカラトミー様から販売されていることもあり、どうしても玩具としては高価にみられてしまう部分もあります。玩具業界は毎年多くの新商品が出るため、その中で生き残ることは大変です。EducationとEntertainmentの融合領域であるEdutainment領域を狙い、遊びながら学べるサービスとして独自性を強くしていきたいと考えています。

◆今後の展望についてお聞かせください。

プログラミングには2段階のステップがあると思っています。第1ステップはいわゆる最初の導入段階で、難しいというイメージがあるため、そこを乗り越えるためには大きなエネルギーを必要とします。第2ステップは導入後の段階で、プログラミング教育で学習したことを本当に使いこなせるようにすることですが、これにも大きなエネルギーを必要とします。

現在は、プログラミング教育そのものが始まったばかりであり、第1ステップをクリアすることが教育現場では求められていると考えます。embotは手軽に扱うことがで

きるので、当面は、1つでも多くの事例をつくり、それを広く紹介していくことでこの段階をクリアできると考えています。それにより、小学校におけるプログラミング教育がさらに浸透し、指導できる教員が増え、需要が伸びてくるとともに、入学と卒業が繰り返される小学校において、毎年定常的な需要が発生するため、そこに対して事業を展開していくつもりです。

そのうえで第2ステップを視野に入れながら、ソフトウェア、デジタルコンテンツ、API連携を手掛けていきたいと思えます。現在、プログラミングスクール「embot creative lab」で小学生にプログラミングを教えているのですが、ある程度使えるようになってくると、自分たちでいろいろと組み合わせて、独自のものをつくり出します。こういったところから得られる知見は非常に貴重な財産になると思えます。さらにプログラミングスクールで学んだことを用いて、子どもが子どもにプログラミングサービスを提供する、C2Cプラットフォームをつくることのできるのではないかと考えています。

embotの販売を成長させ、ビジネス的にまずは当初の目標である単年度黒字を何としても達成してビジネス基盤を安定させ、C2Cプラットフォームを実現させていきたいと思えます。

e-Craft ア・ラ・カルト

■おしゃれなオープンカフェが応接室

オフィスは、習い事としてプログラミングスクールに通ってくれる子どもが多そうな、高級住宅街でもある代官山にあります。オフィスは社員が業務をする執務スペースとプログラミングスクールのスペースがあるのですが、境がありません。スクールが開催されないときはスクールスペースが会議卓になることもありますし、子どもの多いイベントがあるときは執務スペースがイベント会場になることもあります。また、オフィスには区切られた応接や会議室はありません。複数の会議が同時にある場合はウッドデッキにアウトドアデスクとチェアを置いてそこから遠隔で会議に参加したり、隣接するカフェで打ち合わせをしたりすることもあるとのこと。代官山の雰囲気といい、なんともおしゃれなオフィスです。

■デジタルな会社でアナログなイベント

リモートがメインのデジタルな会社のおしゃれなオフィスで、月に1回、チームメンバー全員でピザを食べながらアナログなボードゲーム大会を開催するそうです。ボードゲームが大好きで自宅に多くのゲームを持っているエンジニアが、一度会社にゲームを持ってきたことがきっかけで、それが非常に好評だったことから始まったそうです。アナログなボードゲームはモノ（用具）に触ることでゲームが進むので、「ものづくり」で普段からモノに触っているチームメンバーのレクとして相性がいいようです。ゲームは人間性が見えてくるという側面もあり、それゆえにメンバーとのコミュニケーションが取りやすくなり、和気あいあいとした雰囲気が漂っています。

■プログラミングスクールがいつの間にか工作場に

プログラミングスクールにはレーザーカッターが設置されており、それを子どもたちが使いながら「ものづくり」を行うことができます。スクールが開催されていないときに、しばしばタカラトミーの開発担当の方が来訪されレーザーカッターで試作に利用することもあります。時期によっては子どもたちよりも利用頻度が高いときもあり、大人と子どもの垣根のない「ものづくり」ができる素敵なスペースになっています。

社会課題を解決するビジネス創出へ。 OPEN HUBの挑戦

NTTコミュニケーションズでは、お客さまやパートナーの皆様とともに社会課題を解決し、Smart Worldの実現を加速させるため、2021年10月に事業共創プログラム「OPEN HUB for Smart World (OPEN HUB)」を開始しました。ここでは、OPEN HUBの特長について紹介します。

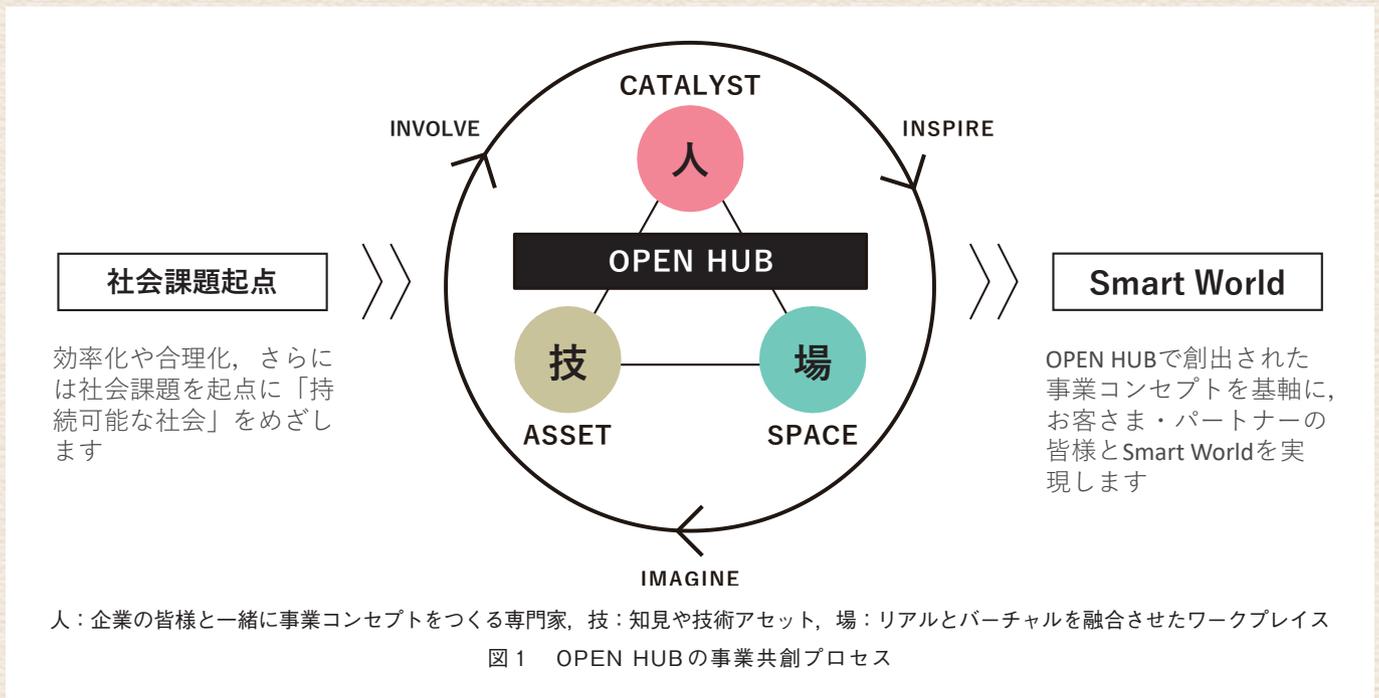
ビジネス創出に重要なコンセプト検討

OPEN HUBは「未来をひらく『コンセプトと社会実装』の実験場」をテーマに掲げ、組織・分野の垣根を越え、遊ぶように自由に発想し試行を繰り返し、社会課題から社会実装を促していく共創を促進するプログラムです。「人」「技」「場」が三位一体で循環することで、これまでにない価値創造をめざしています（図1）。

総勢200名のカタリスト（CATALYST）と呼ばれる社内外の専門家が、お客さまやパートナーの皆様と一緒に、これまでに蓄積された知見や手法、NTTグループの最先端テクノロジーを掛け合わせ、課題解決やコンセプト創出、そして社会実装を支援します。

CATALYSTは、仮説検証や事業コンセプトのデザインを行い実装する「ビジネスプロデューサー」をはじめ、仮説段階のプロトタイプをもつくる「アジャイルエンジニア」、人間中心・ユーザ思考のアプローチを担う「デザイナー」「リサーチャー」など、ビジネスを創出するうえで欠かせない、さまざまな分野に精通した人材がそろっています。企業の皆様の課題や向き合うテーマに適したチームを組んだり、プロジェクトに適したアクティビティを設計したりすることができます（図2）。

Smart Worldの実現につながるビジネスを創出するためには、コンセプト検討が非常に重要です。このコンセプト検討が不十分なために、社会実装やPoC（Proof of Concept）に至らないケースが多々あります。そこで



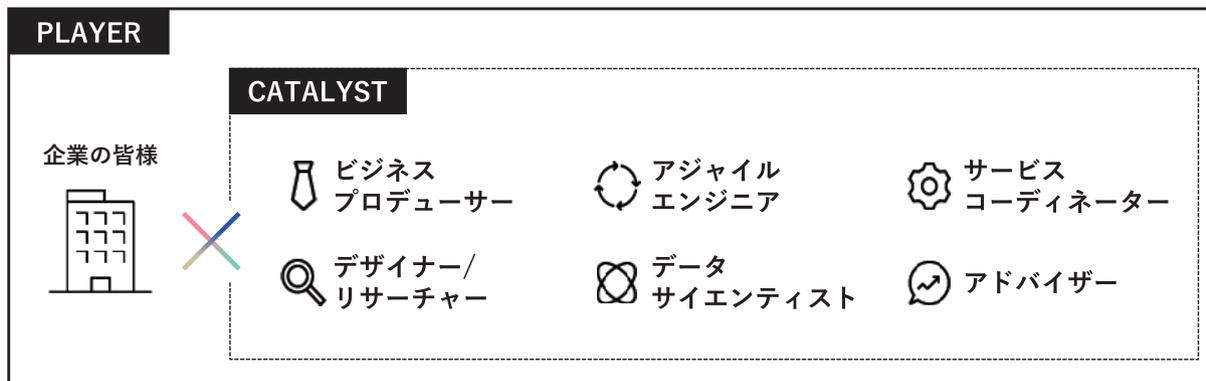


図2 さまざまな専門分野の「CATALYST」が課題解決・コンセプト創出を支援

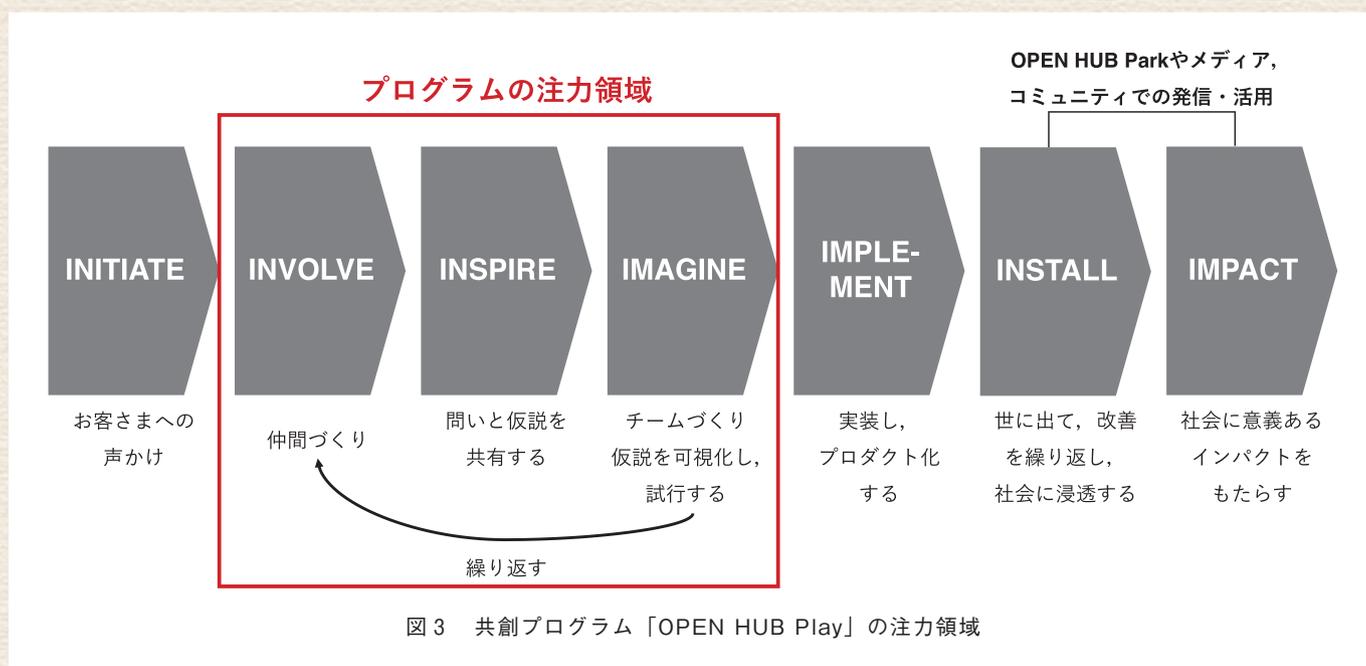


図3 共創プログラム「OPEN HUB Play」の注力領域

OPEN HUBでは、社会課題起点のコンセプト検討に力点を置いた共創プログラム「OPEN HUB Play（以下、PLAY）」を用意しています（図3）。

PLAYでは、まず各種リサーチ情報を基に社会の変化やトレンド、エンドユーザのインサイトの把握をします。次にそれらを基に問いを設定し、初期仮設計画、ニーズ検証、プロトタイピングを繰り返すことで、ビジネスコンセプトを磨き上げていきます。その際、例えばリサーチに活用可能な外部リソースや、ワークショップで活発なアイディエーションを促すオリジナルのアセットカードなど、さまざまなツールや手段も用意しています。そこで生み出されたコ

ンセプトをベースに、お客さまやパートナー、各種専門CATALYSTとともに社会実装をめざしていきます。

リアルとバーチャルの垣根を越えた共創の場

2022年2月、大手町にOPEN HUBの中心活動拠点となるワークプレイス「OPEN HUB Park（以下、PARK）」を開設しました。近年リモートワーク率が増えたことを機に、出社3割を前提としたオフィス集約によりできたスペースが、共創の場として生まれ変わりました。またフレキシ

ブル・ハイブリッドワークの働き方にマッチするよう、リアルとバーチャルの垣根を越えた、場所に制限されないコミュニケーションが可能なワークプレイスです(写真1)。

来訪者向けに、展示だけでなくコンセプト検討へのインスピレーションを与える各種デジタル体験を用意し、議論の活性化を促していきます。例えば、データの利活用は普段目に見えないものですが、大型LEDモニタに収集したデータを可視化し、直感的に分かりやすく表現することで、データ利活用の検討に役立てています(写真2)。また離れた場所にあるNTTグループのイノベーション拠点と臨場感を持ってコミュニケーションができるディスプレイや、遠隔から操作できるロボットを用意しました。これらを利用してリモートからでもPARKに来場ができ、リアルな来場者とのコミュニケーションを実現します。

ビジネスのアイデアや種の創出だけでなく、ここで生まれたビジネスや社会実装の成果をPARK内に設置されたスタジオやオウンドメディア「OPEN HUB Journal」で

発信します。ビジネス共創の仲間が集まる共創コミュニティ「OPEN HUB Base」と連動し、トークイベントや会員交流イベントを通じてエコシステムを拡大するとともに、新たなビジネスの展開を図ります。

IOWN構想をはじめとする最新ICTインフラ構築・実証および社会実装の取り組み

実際にPARKで実施した社会実装への取り組みとして、NTTが研究開発を進めているIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想についての取り組み事例を紹介します。

NTTでは、近未来なスマートな世界を支えるコミュニケーション基盤としてIOWN構想を発表し、その具現化をめざしています。IOWN構想の3つの主要技術分野の1つとして掲げているオールフォトニクス・ネットワーク (APN) は、光ベースの技術を用いることで従来とは別格の通信パフォーマンスを実現します。NTTコミュニケーションズはNTT研究所と連携し、大容量、低遅延、低消費電力が特長のIOWN APNをPARK、東京第11データセンタ、NTT 武蔵野研究開発センタの3拠点で接続するとともに、IOWN実証実験環境の構築をしました。

さらに、さまざまな分野の方とのオープンイノベーションを促進するため、実際に見て触れられるIOWN構想の技術をPARKにて紹介しています。

第一弾では、NTT未来ねっと研究所が開発した「世界初、非圧縮8K120p^{*1}に対応したSMPTE ST 2110規格による超低遅延映像伝送技術」を活用した実証実験を開始しました(図4)。本技術とIOWN APNを活用することで、エンド・ツー・エンドの光パスを通した映像伝送の長距離化と低遅延化を実現し、実際に伝送させた非圧縮8K120p映像の画質や低遅延性を体験していただきました。

この技術を活用することで、例えば、リモートプロダクションや遠隔医療、遠隔監視などのユースケースへの適用が期待できます。

また第二弾として、セキュア光トランスポート技術^{*2}を活用したデータ伝送の実証実験を実施し、APN上での盗聴・改ざん・なりすましができない耐量子セキュリティを有する通信を実現しました。

この技術を活用することで、例えば、個人情報など特に



写真1 リアルとバーチャルが融合した新しいワークプレイス



写真2 3m x 10mの大型LEDモニターでダイナミックにデータを可視化

*1 8K (横7680画素、縦4320画素)、フレーム周波数120 Hzからなるプログレッシブ方式の映像。
*2 セキュア光トランスポート技術: 量子鍵配送 (QKD: Quantum Key Distribution) と耐量子計算機暗号 (PQC: Post-Quantum Cryptograph) が利用されています。

距離を意識させない最高品質映像コミュニケーション

NTT未来ねっと研究所が発表した、**世界初、非圧縮8K120pに対応したSMPTE ST 2110規格による超低遅延映像伝送技術**を利用し、「OPEN HUB Park」を含む3拠点を接続したIOWN APN環境上で伝送実験を実施

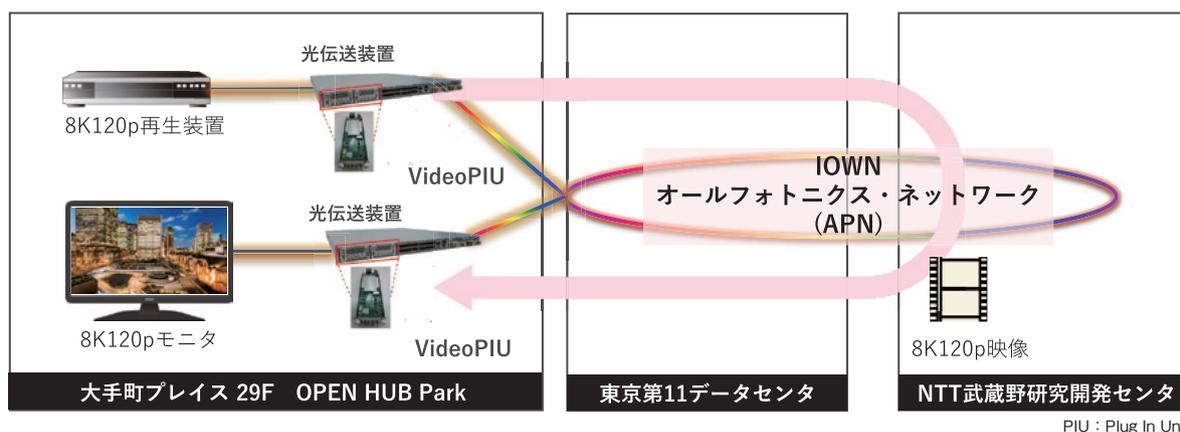


図4 非圧縮8K120pに対応したSMPTE ST 2110規格による超低遅延映像伝送技術

秘匿性の高いデータを扱う分野（金融、医療、公共など）において、将来の脅威に備えた安心・安全なデータ伝送への適用が期待できます。

なお現在は、IOWN構想のデジタルツインコンピューティング（DTC）などを紹介しています。

IOWN構想についてはお客さまより、早期実現への期待を多数いただいています。PARKでいち早くお客さまに体感いただくことで新たなビジネスを創出するとともに、スマートソサエティ、低炭素社会、ウェルビーイングなど社会への実装をめざします。

その他の実証実験や体験展示事例

PARKではIOWN構想以外にも実証実験や体験を提供しています。例えば、欧州のデータ流通プラットフォーム「GAIA-X」に接続し、グローバルサプライチェーンにおけるCO₂や廃棄物の排出量を可視化する環境を用いて、お客さまの産業機器を接続した検証を実施しています。

また、パブリック5G（第5世代移動通信システム）・ローカル5Gの環境も配備。AGCとNTTドコモが共創した5Gガラスアンテナを屋内に設置し、景観に影響を与えず、高層階でも快適な通信環境を実現しています。将来的には、5Gスタンドアローン方式を導入し、実証実験に活用できる環境を構築していく予定です。

これらの通信インフラ環境を活用したロボット体験も可

能です。Web RTC技術SkyWayを活用し、リモートから見学・回遊を可能とするテレプレゼンスロボットをはじめ、AI（人工知能）アシスタンス機能を搭載し、音声指示で自動追従や登録地点まで障害物をよけながら案内できるロボットや、実際に弊社データセンターでも使われている人の動作の再現を可能にし、遠隔操作で省力化を実現する汎用人型等身大のロボットなど、さまざまなロボット体験を通じて、ビジネスシーンでのロボット活用の検討に役立てています。

OPEN HUBの今後の展望

2021年10月以降、OPEN HUBを起点にさまざまなビジネスのアイデアや種が生まれています。それらに対し、企業の皆様とNTTグループが“人”“技”を結集し、リアル、バーチャルの“場”でブラッシュアップすることで、持続可能な社会を実現する新しいビジネスへとつなげていきます。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーションズ
OPEN HUB事務局
URL <https://openhub.ntt.com/>