

NTT

ISSN 0915-2318 平成2年3月5日第三種郵便物認可
令和6年3月1日発行 毎月1回1日発行 第36巻第3号(通巻420号)

技術ジャーナル

3 MARCH
2024
Vol.36 No.3

特集

バイオ・ソフトマテリアル研究の最前線 II

個人にも寄り添う連鎖型スマートシティを実現する 「街づくりDTC」

トップインタビュー

柏木 利夫

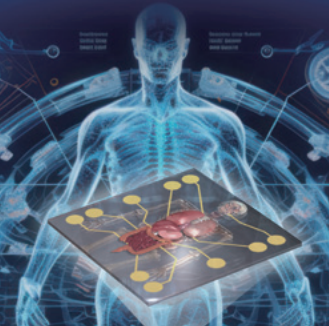
NTTコムウェア 代表取締役副社長

グループ企業探訪

テルウェル西日本

from NTTファシリティーズ

建物安全度判定サポートサービス「揺れモニ[®]」の展開



4 トップインタビュー

慌てず、怒らず、そして、
「2度同じことはしない」

柏木 利夫

NTTコムウェア 代表取締役副社長 (CIO/CDO)



8 特集1

バイオ・ソフトマテリアル研究の最前線II

- 10 オンチップ生体モデルを生み出す材料とセンシング技術
- 14 オンチップ生体モデルの構築に向けたハイドロゲル運動素子の創製
- 20 立体変形電極を用いたオンチップ培養脳モデル
- 24 人工細胞膜の構築のための脂質分子機能評価
- 28 超伝導磁束量子ビットによる神経細胞中の鉄イオン検出
- 32 主役登場 手島 哲彦 NTT Research, Inc.



34 特集2

個人にも寄り添う連鎖型スマートシティを実現する
「街づくりDTC」

- 36 デジタルツインで実現するスマートシティ
- 38 デジタルツインの連鎖が生み出す個人に寄り添う街区体験
——デジタルツイン統合基盤・統合アプリ
- 43 個人の快適性と省エネを両立したパーソナル空調
- 47 スマートストアの店舗内行動データを活用した販促施策の最適化
- 51 モバイルオーダによるロボット配送サービス
- 55 SDSCの要素技術を集約し価値化を加速するAI価値基盤
- 61 仮想市場を活用した農産物流通の効率化
- 65 電力安定供給に向けた日射量予測による太陽光発電計画の精緻化



70 挑戦する研究者たち

李 斗煥

NTT未来ねっと研究所 上席特別研究員

約100年前に登場した理論を掘り起こして、
世界トップデータを実現



74 挑戦する研究開発者たち

檜山 聡

NTTドコモ クロステック開発部 担当部長

スマートフォンのデータとAIで、
医療・ヘルスケア分野における社会課題解決にチャレンジ



78 明日のトップランナー

高橋 順子

NTT社会情報研究所 特別研究員

光情報処理基盤の安全を支える
「光論理ゲートで構成する光暗号回路技術」



82 グループ企業探訪

テルウェル西日本株式会社

扱い商材が豊富な
“非通信領域における総合商社”



85 from NTTファシリティーズ

建物安全度判定サポートサービス「揺れモニ®」の展開

88 Webサイト オリジナル記事の紹介

4月号予定

編集後記

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

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

NTT技術ジャーナルは
Webで閲覧できます。

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





NTTコムウェア
代表取締役副社長（CIO/CDO）

柏木 利夫 Toshio Kashiwagi

PROFILE

1988年日本電信電話株式会社入社。2016年NTTコムウェア取締役、2020年同社常務取締役を経て、2021年6月より現職。



慌てず，怒らず，そして， 「2度同じことはしない」

NTTの通信インフラを構成するシステムやサービス運用にかかわるシステムをソフトウェアの側面から支えるNTTコムウェア。NTTドコモグループの一員となり，ソフトウェアのプロフェッショナル集団として，NTTドコモグループのビジネス拡大の基盤ともなるシステムの開発も手掛けています。通信という社会インフラに加えて，その先の社会に新たな価値を提供し続ける柏木利夫NTTコムウェア代表取締役副社長に，ソフトウェアのプロフェッショナル集団としての強みとトップとしての心構えを伺いました。

日本の社会インフラを支える NTTコムウェアの品質と信頼

ソフトウェアのプロフェッショナル集団として通信インフラを支えるNTTコムウェアの強みをお聞かせいただけますでしょうか。

NTTコムウェアは1997年の創業から，ネットワーク関連システムのソフトウェア開発や，数千万人の通信サービス利用者の情報管理システムや運用系システム等を設計・開発・保守運用し，NTTグループの通信インフラを支えてきました。

私たちの大きな強みは磨き上げてきた技術力です。当社には，ソフトウェア技術を中心にシステムの企画から開発，基盤構築，運用までの一連のプロセスを支える技術者が約4100名，イノベティブなサービスをデザインし，継続的な改善プロセスを実践して素早くつくるアジャイル開発の技術者が2600名超，そして，3400名を超えるデー

タサイエンス技術者がいます。こうした技術力を礎に新たな価値を提供し続けています。

さらに，未来にわたって技術力を磨き上げていくために，人材育成にも引き続き取り組んでいます。アジャイル開発技術の実践力向上や，AI（人工知能）・ビッグデータなどの最新のデジタルテクノロジーを駆使し，さまざまなデータ解析・分析に精通した技術者育成を進めています。

このような布陣で，現在，年間約500件もの多種多様なプロジェクトを進行しています。1000人以上のメンバーが携わり企画からサービス開始まで数年に及ぶ数百億円規模の大規模な開発から，お客さまのビジネスを機動的に支えるスクラムというフレームワークを活用したアジャイル開発まで広範にわたっています。

技術の進展とともに通信インフラを支えてきたですね。この経緯やNTTドコモグループの一員となったことを踏まえて，現在はあるようなビジョンを掲げていらっしゃるのですか。

2022年に会社創業25周年を迎えると同時に，NTTドコモ，NTTコミュニケーションズとともにドコモグループとして新たにスタートしました。また，ドコモ・システムズを統合，ドコモ・データコムをグループ会社を迎え，新たにNTTコムウェアグループが発足したのを契機に，NTTコムウェアの存在意義，大切にしている価値観，ありたい姿である「コムウェア・アイデンティティ」，「コーポレートメッセージ」を一新しました。

そして，「コムウェア・アイデンティティ」を実現するため，「コムウェア新宣言」と「サステナビリティ活動方針」を策定しました。「コムウェア新宣言」は2027年度までにNTTコムウェアが取り組む具体的な事業



の方向性を示すもので、「サステナビリティ活動方針」は事業と密接不可分なサステナビリティ活動についての姿勢を定めています。

急速に変容する世界において、社会・経済・環境を将来へと「持続」させていくことを目的とした「サステナビリティ」の実現による社会課題解決の重要性が高まっています。生活者、ビジネス、社会における価値観が新しく生まれ変わる中、これまで「効率化先行型」であるデジタル化から、そこから生まれる付加価値も意識したデジタルトランスフォーメーション（DX）へと変化してきており、そこに求められる要素も変容しています。これらの変容を踏まえて、私たちには急速に変化するユーザの価値観に対し、常に新たな体験を創出し、社会基盤としての安定性とパフォーマンスを高めることが求められています。

このため私たちは、最先端のテクノロジーとの融合などソフトウェアの力で先進性を追求しながらDXを推進することで、これまで優先されてきた「効率化」を超えた「豊かなコミュニケーション社会の実現」をめざします。これまで大切にしてきた品質と信頼はそのままに、パートナーの皆様の成長や発展にこれまで以上に寄与できるよう、ビジネス視点を持った活動に重点を置いています。

世界中が直面している新しい時代を踏まえ、変革する

「サステナビリティ」を重要視されているのですね。ところで、2023年は生成AIが盛り上がりました。データ活用やAI活用等の取り組みを推進する立場として、「サステナビリティ」に対してどのようなアプローチをお考えでしょうか。

2023年1月に米国ラスベガスで開催された、電子機器見本市CESに行きましたが、そこでは生成AIについては全く触れられていなかったのにもかかわらず、2カ月後にはさまざまなメディアで話題に上っており、とても驚いたのを覚えています。生成AIについては、すでに各国で各社が使いどころや手法を検討して、ようやく整理できて活用し始められるようになったと実感しています。

私たちも同様に、生成AIを開発工程や運用にどう活かすかを試行錯誤していますし、NTTドコモグループにおいても各事業に応じて活用しています。ユースケースも含めて、どうアピールすべきかの情報共有も進み、ようやく全体を俯瞰して使いどころが分かり始めてきた段階です。

そこで実感したのが、システム開発はまだ「人」の仕事ですが、これでは未来の社会へは対応できないこともあり、人に代わってどこまでAIに担わせることができるかといったポイントをしっかりと見極め、実行していくことを私たちがリードしなければならないということです。

現在私たちが運用しているシステムには、今の技術者が生まれる前から動いているシステムもあります。新しい技術が登場して、老朽化・陳腐化したハードウェアはリプレイスされてきていますが、その上で動いているソフトウェアは開発当初のものに機能追加や改修等が施されてはいるものの、ベースとなる考え方は大きく変わっていません。おそらく、当時の開発者は自分たちの寿命よりも長きにわたって、システムが使い続けられるとは思っていなかったでしょう。こうしたシステムには、ドキュメント類が整備されていても膨大なページ数であったり、開発の当事者でなければ分からない思いや文書化できないノウハウがあるものですが、それらの継承は容易なことではありません。なぜならシステムをつくった開発者、技術者はすでに引退しており、有識者に頼ることもできない時代が到来しつつあるからです。

すなわち、「人頼み」では前述の「サステナビリティ」は成り立たなくなっているのです。しかし、システムが提供している機能、業務はソフトウェアにより実現されているので、こうした機能や業務が続く以上は、ソフトウェアのベースも使い続けられることになります。この状況を打破するにはアセットやノウハウをAIに引き継がせていくことが重要となるのではないのでしょうか。おそらく、これは世界中が直面していることで、新時代の黎明期、転換期ともいえそうです。

次世代を担うといえばIOWN構想もその1つですが、実現に向けてNTTコムウェアが重点的に取り組んでいる技術テーマをお聞かせいただけますか。

私たちは長年にわたり通信サービスを支える中で培った、オペレーションシステムの開発・構築ノウハウを活かし、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想における最適なネットワーク構築・運用とマネジメントシステムの具現化に向けた取り組みを進めています。

具体的にはIOWNを構成する「オールフォトリソ・ネットワーク (APN)」[デジタルツインコンピューティング (DTC)] [コグニティブファウンデーション (CF)]のうち、特にCFによるオペレーションやその情報処理システムについて、私たちが担う部分であると考えています。現在は、さまざまなネットワークの構成要素、ICTのリソースを「横串 (よこぐし)」で監視しながら自動運用する仕組みであり、CFの基本部であるオーケストレーションに関するシステム開発を行っています。

また、2023年はInterop Tokyo 2023で、IOWNのユースケースの1つとして、APNを活用した「XR卓球」を初めて公開しました。そこでは、実際のAPNを用いて、会場と光ファイバの線長で約100 km離れた千葉県の幕張と我孫子の拠点を接続して、「XR卓球」をあたかもその場でプレーして

いるような感覚で提供し、遅延時間を通常回線の200分の1に抑えたIOWN APNの性能をアピールすることができました。

これまでは同じ場所にいないとできなかったこと、例えば、APNを用いることで東京のオペレーションセンタから大阪のデータセンタに設置されているロボット等を制御し、あたかも現地 (大阪) でオペレーションしているような状況を創出できるのです。これは、開発の現場や開発者、そして運用者の業務を大きく変える可能性を秘めていることにほかなりません。

35年間、「枕を高くしては寝られない」

トップとして大切にしていることを、ご経歴と合わせて教えていただけますか。

私は1988年にNTTに入社しました。研修期間を除けばまさに今手掛けているソフトウェア開発に関することが最初の業務でした。NTTが民営化されたとはいえ、当時の長距離通話の料金は10分1000円程度だったと思います。今と比べるととても高額でしたから、何とか安くすることに貢献したい、そのためにも「ネットワークやシステムに関するコストを低減させる」という思いを抱いていました。ちょうどそのころから、人が行っていた業務はソフトウェアが代替し、専用ハードが汎用ハードに置き換わることでコスト削減が相当加速しま

した。その結果、入社して15年ほどで現在の料金水準が実現しました。どこまで貢献できたかは分かりませんが、入社当初の思いは達成できたかたちにはなりました。でも今振り返ると、そこでやっとICTが社会課題を解決する土台が整っただけだったように思います。

入社以来35年に及ぶNTT人生、そのほとんどがシステム開発に関する経験を経て、今実感するのは「枕を高くしては寝られない」という現実です。入社当時から今まで、この瞬間も動いているシステムは増える一方です。しかも、35年前と比較してシステムが社会生活の中に浸透しており、安定的にシステムが動くことの重要性は増えています。システムトラブルが発生すれば、多くの人々が「電車に乗れない」「買い物できない」等といった状況を引き起こし、日常生活に多大なる影響を与えます。この流れは止めようがありません。自身がこうしたシステムにかかわっている以上、システムの社会的意味を考えると、「枕を高くしては寝られない」状況に置かれていると認識せざるを得ません。一般的にはこうしたストレスから解放されたいと思うかもしれませんが、反面、その重責を担う仕事は誇りでもあるのです。

開発工程でどんなに周到に備えても意表を突いてシステムトラブルは発生するものです。また、それが何万年に1回程度の確率で発生するようなものもあります。しかし、いかなる状況においても一度トラブルが発生すると、その早期復旧に向けて全力で取り組むことになります。トラブルはソフトウェアに起因することが多いので、その報告を受けた後、解析、原因究明、対処方法の検討、これらに対する最終的な判断は冷静かつ論理的に行う必要があります。ですから、トラブルの報告があったときには「慌てない、怒らない」ことに努めています。さらにトラブルが発生して困っている状況の人からの報告になるので、上司が慌てていたり、怒っていたりすると、正確な情報が報告されなくなり、それが判断の誤りにもつながります。そのうえで、トラブルへの対処が終わった段階では、その原因が明確になっているので、「2度同じことはしない」ように心掛けています。

この姿勢がどのように身に付いたのか、





明確なきっかけは覚えていません。課長やPMに就いたところからかもしれません。思い起こせば、私の上司等もおおむねこのスタンスでトラブルに臨んでいました。

「2度同じことはしない」という姿勢に、私たちの日常が支えられているのですね。最後に技術者、研究開発者、そしてパートナーやお客さまにもメッセージをお願いします。

最近では「自らの仕事を変えなくてはならない」と考えています。10年前はシステムが正常に動作し続けているという観点から、「今日と同じ明日を迎える」というスタンスでしたが、今では「今日とは違う明日を迎える」ことが求められています。

システムをつくる側はできるだけ品質と信頼性が高いものを提供することに努めますが、システムを使う側である現場の業務をストップさせてしまうわけにはいきません。このシステムで、現場ではどのような業務が動いていて、そこで一番大切な業務

は何かをしっかりと考えることが重要なのです。だからこそ、私たちはお客さまの業務の効率や利便性をこれまで以上に重視して、私たち自身の発想を変え、仕事の仕方を変えるのです。意識や発想を変化させるのには時間がかかるものですが、NTTグループ全体だけではなく世の中が変化していますから、悠長なことはいってられません。とはいえ、さまざまなところに歪みが出ないように無理をしない範囲で、少しでも早急に対応していきたいと考えています。

技術者や研究開発者の皆さんには、現在手掛けている研究開発が社会課題の解決にどう役立つかを念頭に置いて仕事に臨んでいただければと思います。そして、常に変化している社会へどうアジャストし、自らの仕事をどうアップデートしていくかを考えていただければと思います。昔であれば、「この腕一本で身を立てる」というような匠の腕の感覚があったかと思いますが、社会全体のサステナブルはその感覚では成立しなくなっています。ぜひ皆さんの成果を

次世代に引き継いで、新しいものを生み出す礎にしていだければと思います。私も自分独自の能力や考え方・知見に依存する仕事をなくそうと努めてきました。というのも、以前、上司に「5年後、（自分と）同じ立場の人間が同じ課題をやっているようではダメだ」と言われたことがあり、そのとおりだと思ったからです。そして、仕事は矛盾を解消することです。そうでなければ作業でしかありません。仕事は常に矛盾をはらんでいるものですが、それをなくし続けることに努めたいですね。

最後に、お客さまやパートナーの皆さん。NTTコムウェアはこれまで同様に高い品質と信頼を提供していきます。また、ドコモグループとして社会の抱える課題の解決に貢献できるよう努めてまいります。今後も引き続き、良きパートナーとしてお付き合いいただきますようお願いします。

(インタビュー：外川智恵/撮影：大野真也)

インタビューを終えて

収益を上げ、組織を動かし、社会貢献をする。文字にすると20文字程度ではあっても、それを実現するのは並大抵のことではないことはビジネスパーソンであればよくご存じのこと。トップとしてそんな重責を担いながらも、「柏木副社長は優しく、社員に慕われている方です。シャイな一面をお持ちです」と社員の皆さんは評します。写真撮影も、「(写真撮影は) 慣れないので

すよ。笑ってと言われてもねえ」と、シャイな一面をのぞかせながらも周囲を和ませて、しっかりとご対応くださいました。スポーツがお好きとのことですが、現在は、ケガなどの不測の事態を避け、スポーツ観戦やウォーキングに勤しまれているという柏木副社長。常に仕事を念頭に置き、周囲に配慮しながらご自身の行動をお考えになる姿勢に、トップとしての責任感を学ばせていただいたひと時でした。

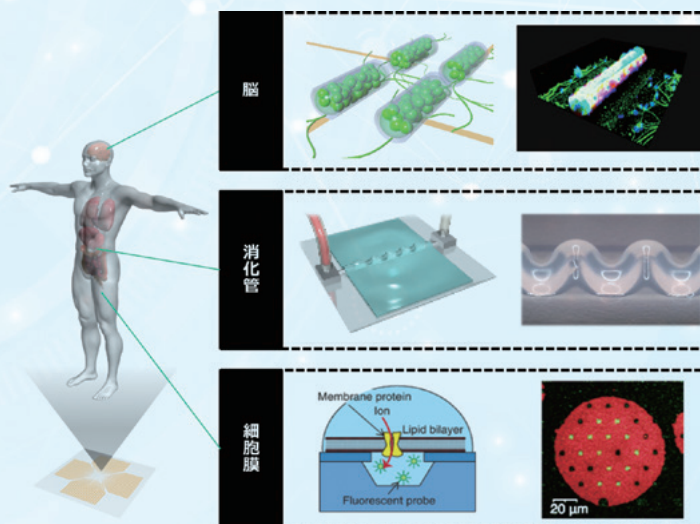


バイオ・ソフトマテリアル研究の 最前線Ⅱ

本特集では、細胞や生体分子との複合が可能な生体にやさしいソフトマテリアルの立体化やアクチュエーションなどの機能化技術、それらのソフトマテリアルと組み合わせた細胞の活動計測、超高感度センシング技術など、NTT物性科学基礎研究所の最新の研究成果を紹介する。

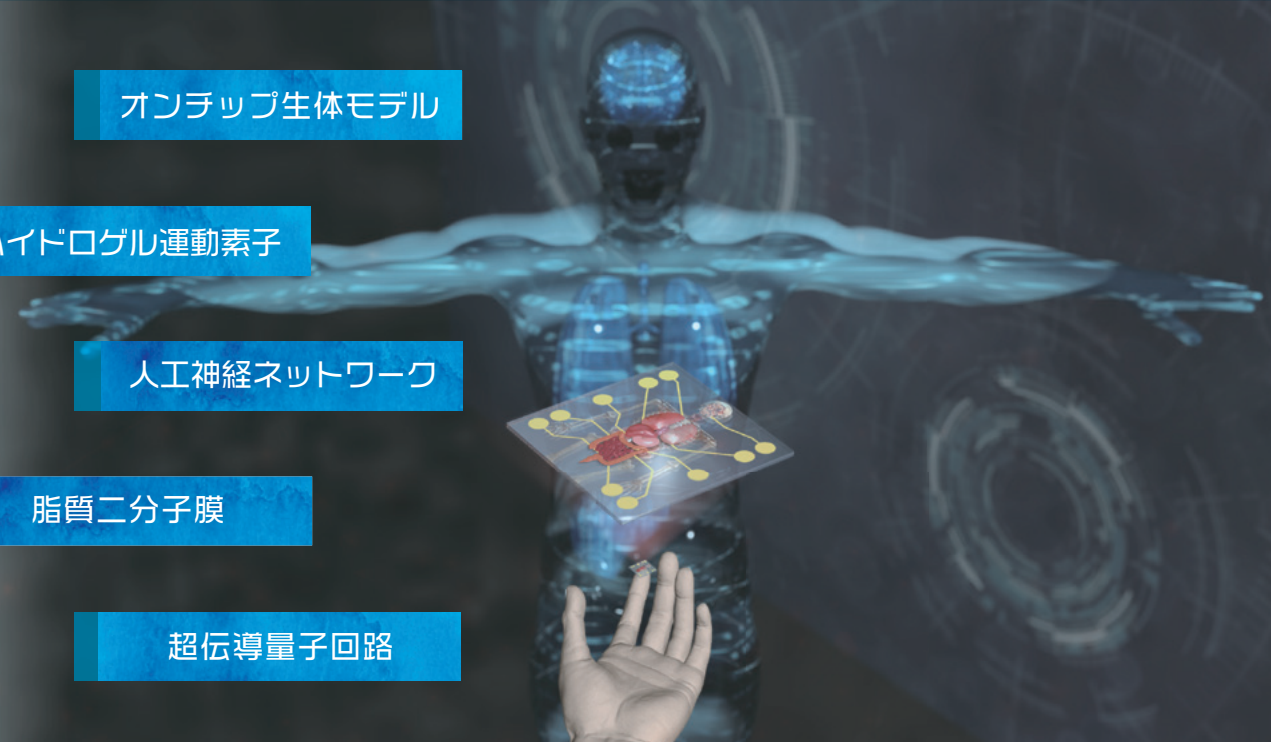
オンチップ生体モデルを生み出す材料とセンシング技術 — 10

NTT物性科学基礎研究所でのバイオ・ソフトマテリアル研究の概要、および最新の展開について紹介する。



オンチップ生体モデルの構築に向けた ハイドロゲル運動素子の創製 — 14

生体に類似した性質を示す材料であるハイドロゲルを、生体器官を模した薄膜・管状構造へとチップ上で形状制御する技術を紹介する。



オンチップ生体モデル

ハイドロゲル運動素子

人工神経ネットワーク

脂質二分子膜

超伝導量子回路

特集

立体変形電極を用いたオンチップ培養脳モデル ————— 19

脳らしい特徴として立体構造とモジュール構造を再現し、電極チップ上に細胞を培養することで脳における神経ネットワークの機能をモデリングする取り組みを紹介する。

人工細胞膜の構築のための脂質分子機能評価 ————— 24

細胞膜を構成する脂質について、相分離や脂質二分子膜形状の変化など脂質の特性機能評価および細胞膜モデルへ向けた取り組みについて紹介する。

超伝導磁束量子ビットによる神経細胞中の鉄イオン検出 ————— 28

超伝導磁束量子ビットを応用した高感度・高空間分解能磁場センサによる神経細胞中の鉄イオンの検出について紹介する。

主役登場 手島 哲彦 (NTT Research, Inc.) ————— 32

チップ上で心臓を再現する



オンチップ生体モデルを生み出す材料とセンシング技術

生体にやさしいソフトマテリアルのユニークな加工技術を創製し、バイオ材料と組み合わせることで、研究の幅とその応用可能性が飛躍的に高まりました。NTTが掲げる医療健康ビジョンの下、医療・医学への貢献に向けた新しい基盤技術が生み出されています。本稿では、NTT 物性科学基礎研究所でのバイオ・ソフトマテリアル研究の最新の展開について紹介します。

キーワード：#ソフトマテリアル、#細胞、#オンチップ生体モデル

やまぐち ますみ^{†1}
山口 真澄^{†1}
たなか あや^{†1}
田中 あや^{†1}
くまぐら かずひで^{†2}
熊倉 一英^{†2}

NTT 物性科学基礎研究所^{†1}

NTT 物性科学基礎研究所 所長^{†2}

NTT 物性科学基礎研究所での バイオ・ソフトマテリアル研究

NTT 物性科学基礎研究所（物性研）では、1980年代から脳との情報通信をターゲットとしたバイオインタフェースの研究が進められてきました。近年は半導体などの微細加工技術と組み合わせたバイオセンサなどのナノバイオデバイスや、高速走査プローブ型顕微鏡による生体分子のライブイメージングなど先端の観察技術を用いた研究が展開されています⁽¹⁾。NTT では2020年11月に医療健康ビジョン「バイオデジタルツインの実現」を発表し、データを活用した医療健康支援技術の構築に向けて動き出しました⁽²⁾。バイオデジタルツインは、疾病の予測やシミュレーションを行うために、バーチャル空間上に身体や心理の写像をつくり出す技術です。この取り組みの中では、単なるデータサイエンスだけでなく、これまで培ってきたNTTでのバイオ・ソフトマテリアルの研究を取り込むことで、人体内の診断や治療を行うバイオマイクロロボットや、人体や臓器の機能をチップ上に再現する臓器チップなどのデバイスの基礎研究にも着手し、医学や情報科学の研究者だけでなくとどまらない、デバイス、バイオサイエンス、マテリアルサイエンスなど幅広い領域の技術者、研究者がかかわった取り組みになっています。この動きは、これまで物性研でバイオ・ソフトマテリアルの基礎研究に従事してきた者にとっても、脳との通信という狭いスコープではなく、広く生体の情報を獲得するデバイス技術や、生体機

能を人工的に模倣する技術に至るまで視野を広げることになりました。

その端緒となった研究の1つとして hitoe[®]*¹が挙げられます。これは、もともとは物性研に行っていたマウスの脳の神経活動を検出する実験において、脳組織を傷つけない電極としてつくった手術用の糸糸を導電性高分子PEDOT:PSSでコーティングする技術に端を発します。この技術を基に、肌から人の発する心電や筋電などの電位を検出する親水性の電極素材として東レ株式会社との共同開発が進み、2014年に心拍の測れるスポーツ用ウェアとして市販されました⁽³⁾。さらに最近では医療機器としてのサービスが展開されており、人の医療・健康、Well-beingを実現するために生体データを計測する有力なツールとして期待されています⁽⁴⁾（図1）。

最近の物性研でのバイオ・ソフトマテリアル研究では、従来の技術や研究テーマの延長にとどまらず、独創的な技術やテーマが生まれて育ってきています。本特集では、物性研で進めているそれらの研究の中から、チップ上における細胞や生体機能の再現や、生体の動きを模倣するオンチップ生体モデルに関連した研究成果と、最先端のセンシング技術とのコラボレーションが生み出した成果を取り上げています。

オンチップ生体モデル

材料加工の技術は、精密機械や電子機器の発展とともに高度化、微細化してきており、NTTの研究所においても電気・光通

信デバイスの研究開発に合わせて、ガラスや半導体の微細加工技術が進化してきました。従来のバイオ・ソフトマテリアル研究においては、例えばシリコン半導体の微細加工など、既存の加工技術をうまく活用してバイオと融合した研究につなげるという視点が支配的でした。しかし、それらのいわゆるハードでドライな材料の先端加工技術との組合せはバイオ・ソフトマテリアル研究の可能性を広げる一部分でしかありません。

物性研では、前回の本誌特集『バイオ・ソフトマテリアル研究の最前線』⁽¹⁾で紹介した2016年ごろから、単なる既存の加工技術ではなく、ソフトマテリアルを中心とした生体にやさしい材料（生体内に入れても大丈夫、培養細胞が育つ、細胞培養の足場となるような材料）の独自の加工技術の創出に取り組んできました。その走りとなったのが、シルクゲル薄膜2層系の自己立体化技術です⁽⁵⁾。この研究から発展して、本特集で紹介するグラフェン・パリレン2層系を用いたオンチップ培養脳モデルの研究へと進展しています⁽⁶⁾。また、それに引き続き、ガラス基板上のハイドロゲル薄膜を用いた座屈剥離の制御技術が確立されまし

*1 hitoe[®]：東レ株式会社とNTTが共同で開発した機能繊維素材。導電性高分子PEDOT:PSSをナノファイバにコーティングした導電性布帛。金属製の繊維を使わず、汗などの水分との親和性が高いためソフトな肌触りと肌への高い密着性があります。スポーツ時などの汗をかくシーンにおいてもノイズが少ない生体信号測定が可能であるなどの特長を持っています。

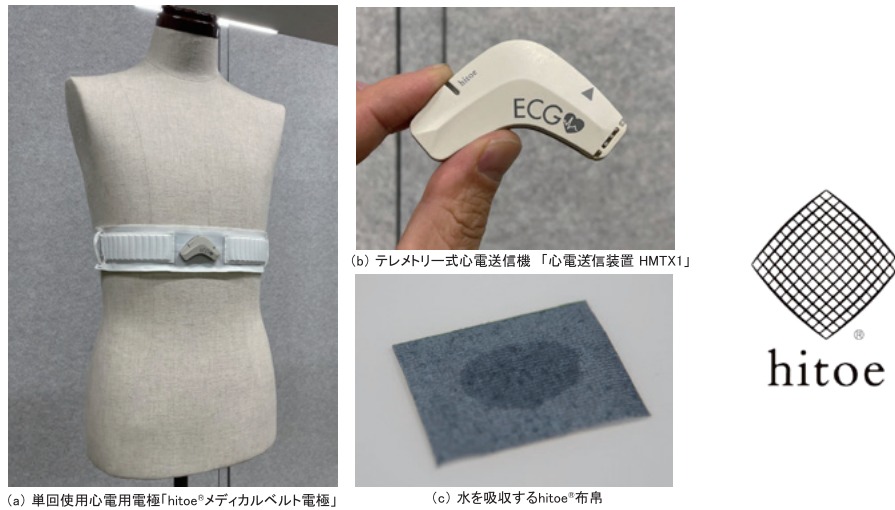


図1 物性研のバイオ・ソフトマテリアル研究から生まれた親水性の電極素材は、現在医療機器としてのサービスへと展開されている

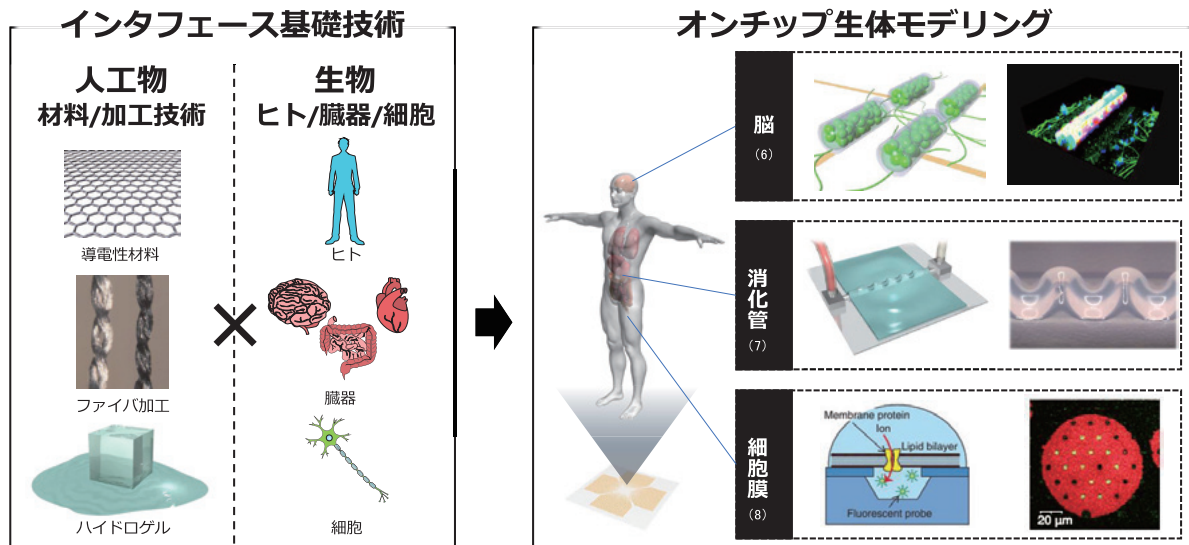


図2 物性研で取り組むオンチップ生体モデル

た⁽⁷⁾。これら2つの加工技術の原理は特徴的で、半導体の基板成長やプロセスではむしろ嫌われる、異物質界面での物性の違いから生じる応力を、逆に制御することで自発的にロールを形成させたり、流路に加工したりしています。これらの独自の加工技術により生体信号を検出するための立体電極の作製や薄膜からのバリエーションに富んだ流路形成などの基本技術が生み出されています。さらに、2023年に入ってから光照射によって生体の動きを模倣するような動的制御技術も生まれています。これらのデバイスはどれも生体適合性に優れた材

料からできていますので、それらのデバイス上で細胞を培養して立体的に形成された細胞組織の動きや生体信号を観察するなど、この数年のうちに飛躍的に研究が進展しています(図2)。

詳しくは本特集のそれぞれの記事にて紹介しています。『立体変形電極を用いたオンチップ培養脳モデル』の記事で紹介するグラフェン・パリレンの自己組み立て技術⁽⁶⁾では、犠牲層を使って自発的に立体化する技術により、細胞に大きな負荷を与えることなく包み込むことができ、まとまった数の細胞塊の培養や、それらどうしによる

チップ上での神経ネットワークの形成が実現されているほか、このグラフェンを電極としてそれぞれの細胞塊からの生体信号を取得することに成功しています。このグラフェンの自己組み立て技術では、グラフェンと基材の厚さの制御によってその大きさや立体形状を制御することも可能です。

『オンチップ生体モデルの構築に向けたハイドロゲル運動素子の創製』の記事で紹介するハイドロゲルの座屈剥離制御技術⁽⁷⁾では、ガラス基板上のハイドロゲルの接着パターンや硬さを制御することによりさまざまなバリエーションを持った流路構造が

形成され、また、ハイドロゲルの合成を工夫することにより光熱によって生体を模倣した動きを再現し、チップ上での血管や腸管動作の模倣を実現しています。このデバイス上で細胞を培養することでデバイスの動きや、チップ上の流れと培養細胞を組み合わせた研究へと新たな展開が期待されています。

『人工細胞膜構築のための脂質分子機能評価』の記事では、従来から取り組んでいる、人工細胞膜の研究の最近の進展を紹介しています⁽⁸⁾。人工細胞膜はシリコン半導体基板上の微細加工井戸を細胞膜の基質である脂質二分子膜で覆うことにより、細胞膜面内や表面に存在する膜タンパク質の機能をチップ上に再現する技術です。人工細胞膜デバイスの研究では、脂質の構成要素の違いにより生じる相分離膜を基板上で制御する方法や昆虫細胞由来ウイルスによる組み換え膜タンパク質導入の検討を行っています。また、基板と脂質膜との隙間を通したイオンの移動に伴う電気的なリークの抑制方法も技術的に進展して電気生理計測のためのシール技術として確立間近となっています。

精密医療への貢献

基板の上で生体内の環境を再現して、培養細胞によってチップ上に臓器機能などを発現する技術は臓器チップと呼ばれ、創薬研究をはじめとして個別化医療や疾患モデリングなどに役立つ技術として注目を集め

ています(図3)。臓器チップはシンプルなものではすでに市販されているデバイスもありますが、そういった単純なものにとどまらず、より複雑な生体システムを模倣することで、個別の臓器機能を再現するだけでなく、将来は動物実験を代替するデバイスとして期待されています。ただし、そのためには、例えば、立体的な臓器の形状であったり、生体が持つ動きであったり、あるいはそれらをつなぐ血液や体液の輸送機構、神経などの情報伝達機構などまだ実現されていないさまざまな要素が必要となります。

臓器チップは一部がすでに市販されていることから分かるように、すでに医薬の研究に役立てられている技術です。実用に用いるデバイスの技術開発においては、その目的を明確にすることが極めて重要です。すなわち、どのような目的でどのような計測を行いたいのかという明確な用途がないと、設計指針がふらつき、やがては使えないデバイスが仕上がります。また、何かの用途のためのデバイスをつくることと研究をリンクさせると、研究の指向として、その用途に必要な既存の技術の組合せやその性能強化に重心が移ってしまうことに気を付けなければなりません。物性研でのオンチップ生体モデルの研究の特徴は、そのような実用デバイスの技術開発ではなく、より広い意味での生体の模倣、生体機能の再現というイメージの下、特定の疾患や医薬研究への活用という視点を離れて、生体にやさしい材料の合成や加工によって、構造

化、動き、センシングなどの新しい可能性を見出し、新機能を創生するというボトムアップの立場で研究テーマを切り拓いているところです。これにより、従来の技術の延長では実現できないような複雑な生体機能・生体模倣機能をチップ上に再現する技術へと発展しています。

高感度センシング技術とのコラボレーション

物性研では、より高感度なバイオセンシングをめざして、量子技術やナノメカニクス技術との組合せにも挑戦しています(図4)。その1つとして、本特集では超伝導量子ビットによる神経細胞中の鉄イオンのセンシングについて紹介しています⁽⁹⁾。超伝導量子ビットは量子コンピュータの演算素子という表の顔だけでなく、それ自体が超低温環境で動作する非常に感度の高い磁気センサでもあります。超伝導磁束量子ビットセンサは20個の電子スピン(鉄イオン)を検出可能な感度を持ち、そのサイズ(典型的には10から数マイクロメートル角程度)で決まる空間分解能を持ちます。ここでは、基板に貼り付けた神経細胞の磁化の測定を紹介していますが、この技術がさらに進化すれば将来は細胞単位での空間分解能で微量金属元素が分析可能になると期待されます。また、本特集では紹介していませんが、微小機械振動子センサにおいて液体の特性や液中の粒子を超高感度に検出する技術の研究が進んでいます⁽¹⁰⁾。これまで、金属や半導体のようなドライでハードな物質をターゲットとしてきた高感度センサ技術が、今後はウェットでソフトなバイオ領域にも応用が広がっていくと考えられます。

出会いを大切に ——研究パートナー

研究テーマはボトムアップであっても、自分たちの知らなかった研究テーマの課題と結び付くことで、研究成果の活用の方向性が見えてきたり、応用が拓けたりするこ

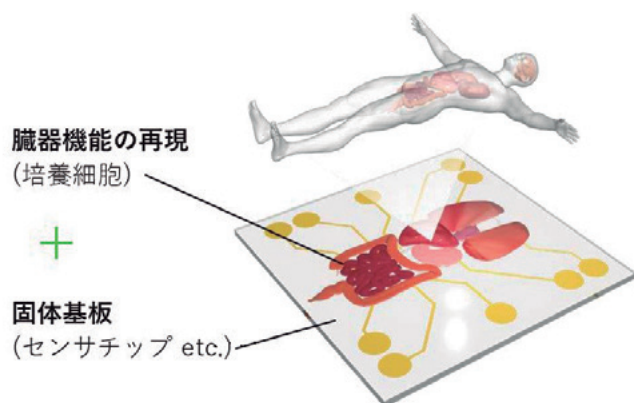


図3 臓器チップの概念図

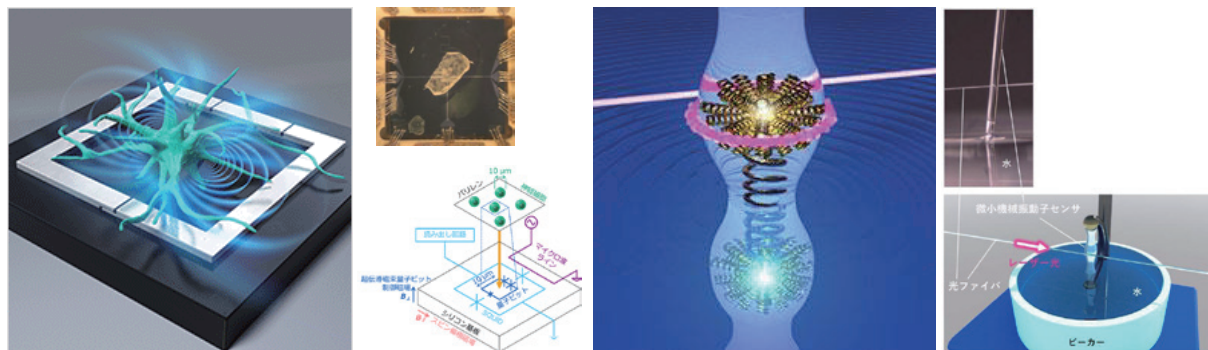
(a) 超伝導量子ビットによる神経細胞中の鉄イオンのセンシング⁽⁹⁾(b) 微小機械振動子センサにおいて液体の特性や液中の粒子を超高感度に検出⁽¹⁰⁾

図4 高感度センシング技術はバイオセンサへと展開されていく

とがあります。実際に、本特集で紹介するハイドロゲル座屈剥離流路技術も、NTT研究所が毎年開催しているR&Dフォーラムに腫瘍を研究されている医学部の先生が来訪された際に、実験で直面されていた課題を解決できるのではないかとお声掛けをいただき、これまでの汎用的なデバイスチップでは実現できなかった実験に活用されて、医学の研究にも貢献することができました。ボトムアップの基礎研究は、実際に役立つこととは無関係ということではなく、その指向が具体的な実用デバイスに向けた開発ではないというだけです。ここで紹介したオンチップ生体モデルやセンシングの技術についても、すでにいろいろなところに活用できるものと考えています。表面に見えているニーズを追いかけて研究の本質を見失わないことが大切ですが、新しい出会いによる進歩を逃さないように研究に取り組んでいきたいと思っています。

そのような研究の有機的な結合をめざして、物性研でのバイオ・ソフトマテリアル研究ではバイオメディカル情報科学研究センタを中心として内外との共同開発や共同研究を推進しています。主役登場にて紹介しているようにNTT Researchの生体情報処理研究所には物性研にてシルクゲル薄膜やグラフェン・パリレンの2層系自己立

体化技術を手掛けた手島哲彦主任研究員が在籍して、ミュンヘン工科大学を拠点に研究を進めています⁽¹¹⁾。また国内では、大阪大学を拠点としたWPI PRIME^{*}2にも参画しています。これからも、国内外での新しい出会いを大切にして、バイオ・ソフトマテリアルのフロンティアを切り拓く研究を進めていきたいと考えています。

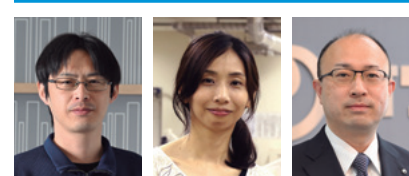
参考文献

- (1) 特集：“バイオ・ソフトマテリアル研究の最前線,” NTT技術ジャーナル, Vol. 28, No. 6, pp.10-40, 2016.
- (2) 特集：“NTT医療健康ビジョン——バイオデジタルツインの実現に向けて,” NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 5, pp.10-37, 2021.
- (3) 手島・塚田・中島：“生体信号計測に向けた導電性複合材料,” NTT技術ジャーナル, Vol. 28, No. 6, pp. 36-39, 2016.
- (4) 特集：“NTTテクノクロスによるヘルスケア分野の事業拡大とメディカル分野への本格参入,” 月刊ビジネスコミュニケーション, Vol. 60, No. 8, pp.57-64, 2023.
- (5) T. Teshima, H. Nakashima, Y. Ueno, S. Sasaki, C. S. Henderson, and S. Tsukada: “Cell Encapsulation and 3D Self-assembly Using Multi-layered Polymeric Thin Films,” NTT Technical Review, Vol. 16, No. 8, pp. 53-61, August 2018.
- (6) 酒井・後藤・手島：“立体変形電極を用いたオンチップ培養脳モデル,” NTT技術ジャーナル, Vol. 36, No. 3, pp. 19-23, 2024.
- (7) 高橋：“オンチップ生体モデルの構築に向けたハイドロゲル運動素子の創製,” NTT技術ジャーナル, Vol. 36, No. 3, pp. 14-18, 2024.
- (8) 大嶋・櫻村：“人工細胞膜の構築のための脂質分子機能評価,” NTT技術ジャーナル, Vol. 36, No. 3, pp. 24-27, 2024.
- (9) 樋田・酒井・手島・角柳・Imran

Mahboob・齊藤：“超伝導磁束量子ビットによる神経細胞中の鉄イオン検出,” NTT技術ジャーナル, Vol. 36, No. 3, pp. 28-31, 2024.

(10) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/11/03/221103a.html>

(11) 手島・Joe Alexander・Bernhard Wolfrum：“バイオデジタルツインの創出に向けた生体インタフェースの開発,” NTT技術ジャーナル, Vol. 35, No. 1, pp. 32-37, 2023.



(左から) 山口 真澄/ 田中 あや/ 熊倉 一英

発想と情熱を大切に、思わぬ出会いを逃さないよう、着実にバイオ・ソフトマテリアルの研究を進めていきたいと思っています。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
企画担当
TEL 046-240-3312
FAX 046-270-2358
E-mail btl-kensui@ntt.com

* 2 WPI PRIME: 文部科学省の世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)に採択されている大阪大学ヒューマン・メタバース疾患研究拠点。



オンチップ生体モデルの構築に向けた ハイドロゲル運動素子の創製

臓器のような高次機能を培養細胞で発現・維持するためには、細胞を育てる環境をいかに生体内に近づけるかが重要です。NTT 物性科学基礎研究所では、生体に類似した性質を示す材料であるハイドロゲルを、生体器官を模した薄膜・管状構造へとチップ上で形状制御する技術を確認しました。本稿ではさらに、光刺激で大きく・素早く・任意領域を動かせる運動素子へと展開し、生体器官さながらに運動制御する技術について紹介します。

キーワード：#オンチップ生体モデル、#ハイドロゲル、#ソフトアクチュエータ

チップ上における生体内環境の再現

近年、化粧品・医薬品・農業などの開発における動物実験の代替法として、培養細胞を用いたアッセイプラットフォーム^{*1}が注目されています。ヒト細胞を用いることで動物倫理の問題のクリアはもちろん、種差による応答の違いを考慮する必要がない魅力的なツールとして期待されています。一方で、生体を使わずに適切な評価を行うためには、従来の培養方法では実現できなかったin vivo（生体内）機能を再現する必要があります。そこで、より生体内の環境に近い状態を人工的に再現し、培養細胞による高度な臓器機能を発現・維持させる臓器チップ（Organ-on-a-chip：Ooc）技術をはじめとした、生体模倣システム（Microphysiological System：MPS）が盛んに研究されてきました⁽¹⁾。こうした技術を基に、センサ基板上で臓器機能を再現した「オンチップ生体モデル」を構築できれば、細胞レベルの解像度で各種臓器のさまざまな情報を精細なデータとして取得できることが期待されます。加えて、iPS細胞^{*2}などを活用することで、人種の差異や個人のゲノム多様性^{*3}を反映した生体データを、分子・組織・臓器レベルごとに取得・解析可能な技術として限らない可能性を秘めています。このオンチップ生体モデルの実現に向けて、細胞を培養する環境をいかに生体内に近づけられるかが課題であり、「生体に優しい材料」・「生体に近い形状」・「生

体内の刺激環境」を同時に実現できる技術が求められてきました。

そこでNTT 物性科学基礎研究所（物性研）では、高い生体適合性を示す材料である「ハイドロゲル」に着目し、生体を模した3次元形状へと制御する技術を研究してきました。ハイドロゲルは、高分子のネットワークに大量の水が閉じ込められたゼリー状の材料であり、身の回りではコンタクトレンズやおむつなどに使われています。私たちの体の中も生体由来の高分子やタンパク質によるネットワーク構造が存在し、水を保持しています。すなわち、私たちの体もまたハイドロゲルであり、細胞を育てる足場としてもっとも適した材料の1つであると考えられています。一方で、ネットワーク中の水分量に応じて体積が変化してしまう、材料の構成成分のほとんどが水であるため非常に柔らかくもろい、といった特性があり、基板上で3次元的に形状を制御することが課題でした。そこで私たちはこれまでに、ハイドロゲルが水を吸って膨らむ力を逆に利用し、血管や腸管といった生体器官^{*4}のように薄膜かつ中空な管状形状へと自立成形させるオンチップ形状制御技術を報告しています⁽²⁾。具体的な技術の概要を図1に示します。図1(a)に示す作製スキームに従って、まずガラス基板の表面をハイドロゲルと化学的な接着が可能なシランカップリング剤で処理し、一般的なリソグラフィ技術^{*5}を利用して処理・未処理のパターンを形成します（例では矩形パターンを図示）。次に、ハイドロゲル薄膜を基

たかはし りく
高橋 陸

NTT 物性科学基礎研究所

板上で合成することで、ガラス基板とパターン上に接着されたハイドロゲル薄膜が得られます。その後、ハイドロゲルを水にさらすことで吸水し、膨潤による圧力が発生します。その結果、非接着部位では周囲からの圧力を解放するために浮き上がる物理現象、「座屈剥離^{*6}」が生じ、ハイドロゲル薄膜とガラス基板から成る薄膜・管状構造が形成されます。その立体構造を蛍光で観察した結果を図1(b)に示します。得られる構造は、ハイドロゲルの硬さ・厚み・水分量や非接着部位の幾何パターンなどの物理的なパラメータで制御できることが分かっており⁽³⁾、生体内におけるひだ・しわといった滑らかな立体構造の再現が可能です。加えて、特徴的な流路状の構造は、接着パター

*1 アッセイプラットフォーム：創薬研究において、化合物の評価を多面的に行うことが可能な原理・手法のこと。

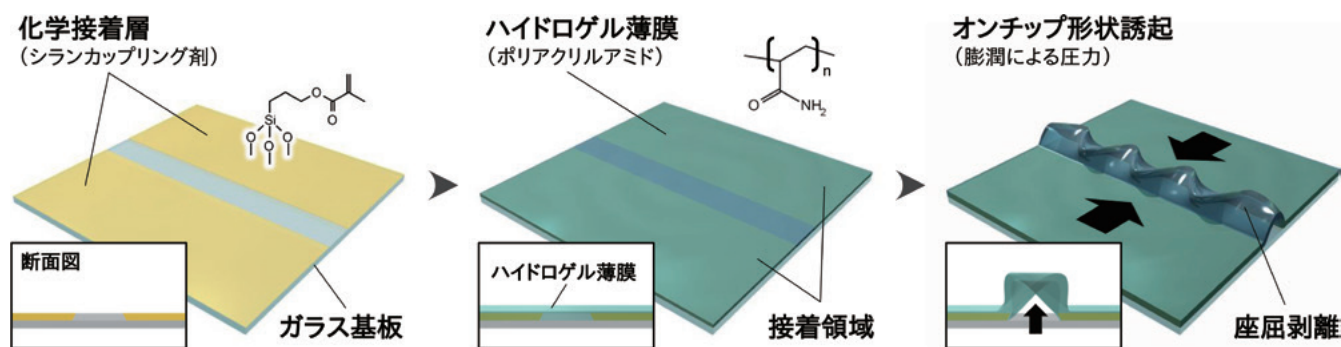
*2 iPS細胞：人の体細胞に、特定の遺伝子を導入することでつくられる、あらゆる種類の細胞に変化する潜在的な能力とほぼ無限に増える能力を持った細胞のこと。

*3 ゲノム多様性：DNAの文字列に表された遺伝情報のすべてであるゲノムには、個人間で0.1%程度配列が異なり、多様性をもたらしています。

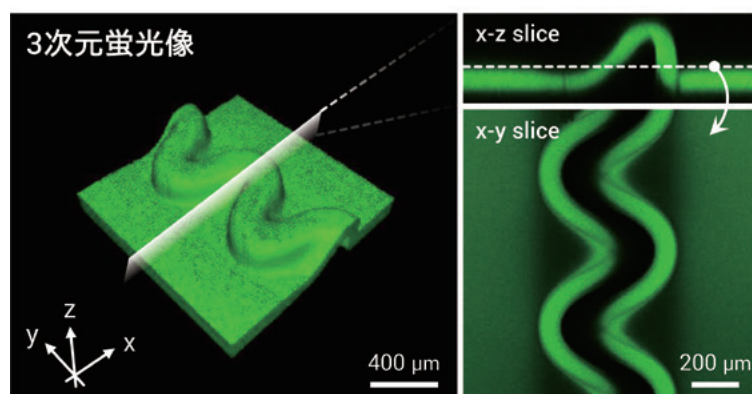
*4 生体器官：多細胞生物の体を構成する単位を指し、協同して一定の機能を営んでいる組織の集合体のこと。臓器とも呼ばれます。

*5 リソグラフィ技術：感光性の物質を塗布し、露光、現像工程によりパターンを形成する技術。半導体集積回路をはじめとするさまざまな製品製造に使用されています。

*6 座屈剥離：薄膜を両端から圧縮することで、中央部が湾曲しながら浮き上がり、アーチ状の構造へと変形します。これが、折れ曲がりながら（座屈）剥がれる（剥離）という座屈剥離現象。



(a) ハイドロゲル薄膜の膨潤圧力によるオンチップ形状制御



(b) 蛍光顕微鏡による3次元構造観察



(c) 接着パターンによる形状制御

図1 ハイドロゲル薄膜のオンチップ形状制御技術

ンを制御することで自由に設計することができ、血管網を模した分岐・合流流路などを作製することが可能です (図1(c)).

大変形と高速応答を両立したハイドロゲル運動素子

これまでの紹介した技術により、「生体に優しい材料」で「生体に近い形状」をチップ上に作製できるようになりました。一方で、生体内における動的な刺激環境を再現するためには、ハイドロゲル薄膜の形状を「動かせる」技術が必要になります。簡単な方法としては、ハイドロゲル薄膜で作製された流路構造を外部ポンプと接続し、流圧を制御する手法が考えられます。非常に柔らかい本流路構造は、圧力に応じて大きく変形させることが可能であり、血管が脈動するような収縮運動を再現することが可能です⁽⁴⁾。一方で、本手法では構造全体が一様に変形してしまう、外部機器との接続が必須といった課題もあり、より生体器

官に近い複雑な動きを簡便に再現できる新たな手法が求められてきました。

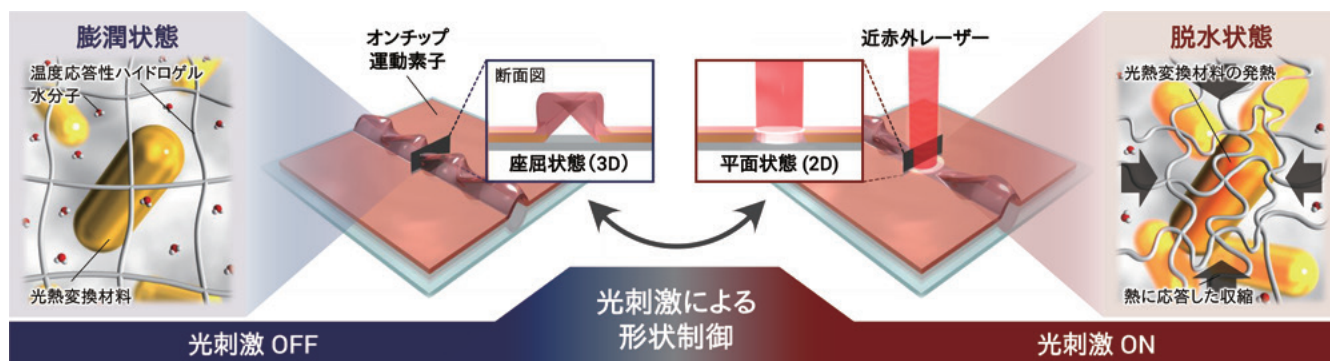
そこで私たちは、「光刺激で変形できる」ハイドロゲル薄膜を設計・作製し、オンチップ形状制御技術を適応させた光駆動型の運動素子^{*7}を提案・作製しました⁽⁵⁾。その概要を図2に示します。今回作製した素子は、温度に応じて水を吐き出し収縮する温度応答性ハイドロゲルと、光照射で発熱する光熱変換材料を組み合わせることで、光刺激のON/OFFで膨潤状態と脱水状態を切り替えることが可能です (図2(a))。温度応答性のハイドロゲルとしては細胞培養の基材としても使用されているポリイソプロポリアクリルアミドゲル^{*8}を、光熱変換材料としては、近赤外光の照射で効率的に発熱する金ナノロッド^{*9}を使用しています (図2(b))。そのため、チップ上におけるハイドロゲル薄膜の座屈構造に近赤外レーザー照射することで、局所的な座屈状態と平面状態の形状制御が可能です。実際のサンプルのアクチュエーション挙動の様子を図2(c)

に示します。画像中心部にある座屈状態の立体的管状構造に近赤外レーザーを照射したところ、完全に管がつぶれた平面状態へとすぐに変形し、光刺激をやめることでまた元の座屈状態まで急速に復元する様子が観察されました。本変形挙動をより詳細に調べるため、運動素子を真横から観察可能な実験系を用意し、光刺激中の運動素子の高さ変化を経時的にプロットしたものを図3(a)に示します。驚くべきことに、光刺激開始後2秒以内に平面状態へと移行し、光刺激停止後2秒程度で座屈形状まで復元するこ

*7 運動素子：アクチュエータとも呼ばれ、何らかのエネルギーを動作に変換する装置のこと。

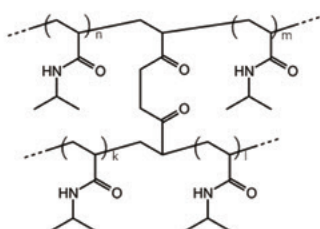
*8 ポリイソプロピルアクリルアミド：温度に応じて、保持した水を吐き出しながら収縮可能なハイドロゲル。生体適合性があり、細胞培養基材としても利用されています。

*9 金ナノロッド：球を伸長させたカプセルのような形をした金由来のナノ材料。適切な波長の光を照射することで、光エネルギーを熱へと変換し、発熱する（光熱変換材料）。ロッドの長さを調節することで、光の吸収ピークを550～1400 nm程度まで制御することができます。

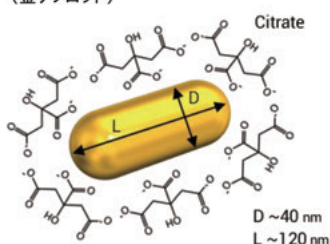


(a) 温度応答性ハイドロゲルと光熱変換材料の複合化による光駆動型運動素子のアクチュエーションメカニズム

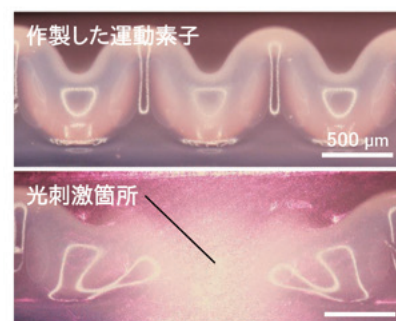
温度応答性ハイドロゲル:
(ポリイソプロピルアクリルアミド)



光熱変換材料:
(金ナノロッド)



光刺激 ON
⇕
光刺激 OFF



(b) 光応答性ハイドロゲルを構成する材料

(c) 光刺激によるアクチュエーション挙動の様子

図2 光駆動型オンチップハイドロゲル運動素子の概念図

とが分かりました。加えて、運動素子のアクチュエーション変形率（最大・最小高さから見積もった変形量の割合）は約360%に達することも確認されました。この高速応答・大変形アクチュエーションは、これまでの光駆動型ハイドロゲル運動素子と比べても非常に高い性能であることが分かっています。

高性能化のポイントについて、高速応答と大変形の観点からそれぞれまとめました。まず高速応答を可能にした構造のポイントを、図3(b)に示します。通常、ハイドロゲルは数10 nmの孔が開いたネットワーク構造をしており、この穴を抜けて水分子が移動します。今回用いたハイドロゲルは特殊な作製法により、数10 μmのつながった孔が開いています（多孔質構造）。すなわち、1000倍近く大きな孔の開いた構造をしているため、スポンジのように水の出入りが容易となり、溶媒の移動に伴う体積変化の応答が素早くなったと考えられます。また、この応答時間はハイドロゲルのサイズの2乗に比例して長くなることが知られています。今回、100 μm程度のハイドロゲル薄

膜を運動素子としたことで、厚みのあるハイドロゲルと比べてより短い時間で膨潤・脱膨潤が可能になりました。

次に大変形を可能にした変形のポイントを、図3(c)に示します。通常、ハイドロゲルが水を吸って膨らむ、あるいは水を吐き出して縮む場合、すべて方向が同じ割合で変化する等方変形になります。今回、ハイドロゲルの一部を基板に固定（拘束）した状態で膨らませるオンチップ形状制御技術に適応させたため、変形が許容される膜厚方向への座屈による立体変形が生じました。本変形は膜厚方向でみると大きく立ち上がることであり、変位増幅機構として機能しています。これにより、通常の膨潤変形による1方向当りの変形率と比べて、約10倍大きく変位できることが確認できており、大変形が可能になったと考えています。

その他、本運動素子は空気中において安定的に動作できる特徴があります。本来、ハイドロゲルの膨潤・脱膨潤を利用した運動素子は、水のある環境でのみ動作が可能であり、空気中での長期使用が難しいという課題がありました。管構造を備えた本運

動素子は、管内に水を保持することができるため、空気中においても乾燥することなく安定動作が可能です。また、ゲルの硬さや素子の高さを変化させることで、運動性能を細かくチューニングできることも分かっています。そのため、さまざまな環境で動作可能なオンチップ型運動素子として、マイクロフルイディクス^{*10}やソフトロボティクス^{*11}といった幅広い分野における応用も期待できます。

生体模倣アクチュエーションの実現

本運動素子は高い性能だけでなく、挙動制御の面においても優れています。刺激源が光であるため、遠隔から離れた位置へ

*10 マイクロフルイディクス：μm程度のサイズ幅の流路を流れる流体に関して、流体挙動が従来のスケールとは異なる流体システムを扱う研究分野のこと。

*11 ソフトロボティクス：ロボット工学のうち、柔軟性のある素材を用いた、動きに繊細さやしなやかさを持たせたロボットを扱う研究分野のこと。

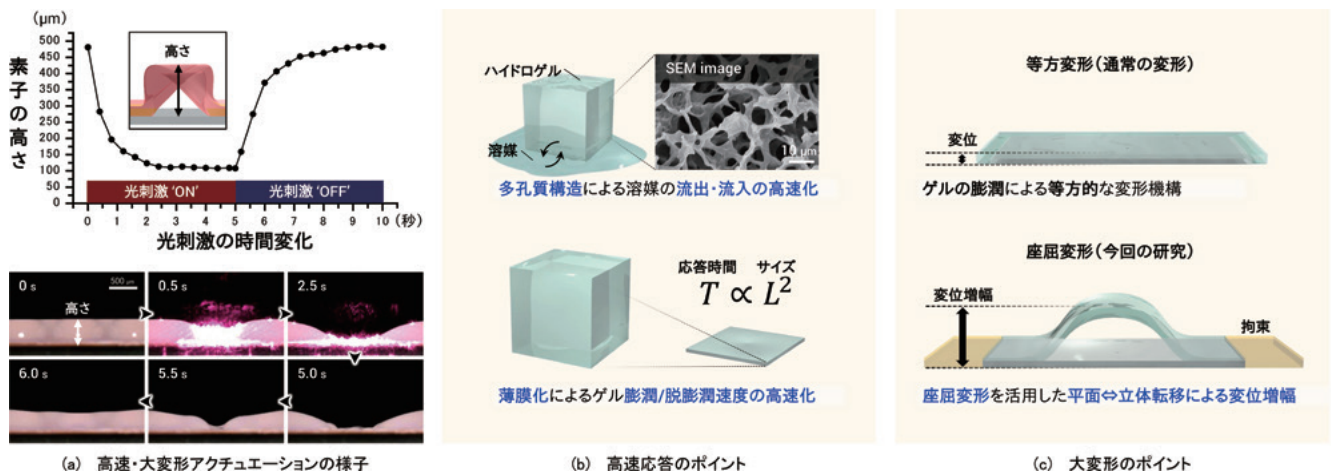


図3 高速応答と大変形を両立した高性能運動素子

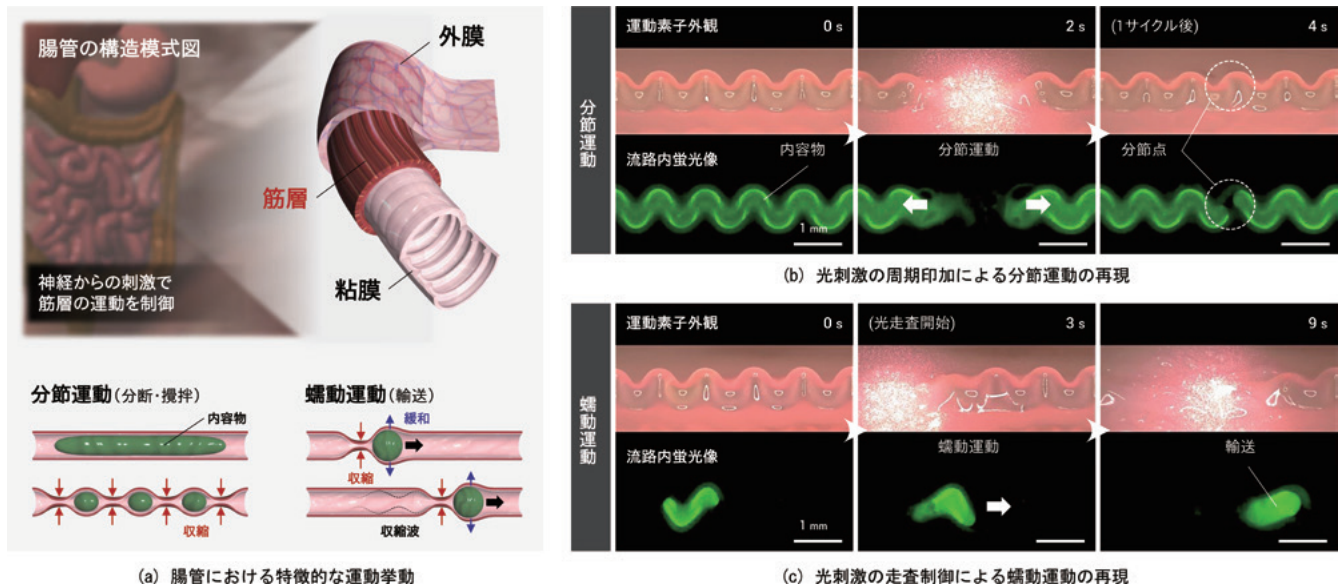


図4 光刺激制御による生体模倣アクチュエーションの実現

の照射が可能であり、運動素子自体に配線など外部機器を接続する必要がありません。また、今回用いた材料の組合せは、35℃以上に加熱されることで急速に収縮します。光熱変換材料である金ナノロッドの含有量を調整することで、光刺激時に35℃程度まで迅速に加熱できる設計にしております。過剰に加熱されることがありません。そのため、光刺激時には照射部位のみ変形が生じ、周辺部位への熱拡散による影響を抑えることができます。以上のように本運動素子は、光刺激による正確な変形の位置制御と局所制御が可能であり、生体器官を模した複雑な挙動の制御も実現できています。

一例として、私たちは腸管の特徴的な運

動に着目しました。図4(a)にその概要を示します。腸管は3層構造をしており、臓器間の摩擦から保護するための外層、特徴的な運動を起こすための筋層、消化と吸収を担う粘膜から構成されています。この中の筋層の収縮運動を、神経からの刺激で巧みに制御することで、特徴的な2つの運動をコントロールしています。具体的には、特定のポイントにおいて収縮と緩和のサイクル運動が繰り返されることで、腸内容物の分断や攪拌を担う分節運動が発生します。また、収縮と緩和の隣り合うポイントが連続した波（収縮波）として伝搬することで、ホイップクリームを絞り出すかのように腸内容物を輸送する蠕動運動が発生します。

私たちはこの2種類の運動を、光刺激を時間的・空間的に制御することで再現することを試みました（図4(b)）。まず、運動素子の内部に、腸内容物を模した粘性の高いオイル（ミネラルオイル）を注入しました。このオイルは緑色の蛍光物質で着色してあるため、蛍光顕微鏡で内容物の状態を観察することができます。その後運動素子の特定のポイントにおいて、2秒周期で照射を繰り返し、座屈状態と平面状態のスイッチング、すなわち管構造を開閉運動させました。その結果、連続していた内容物が押しつぶされ、確かに分断できる様子が確認できました。これは管構造を完全に閉じることができるためであり、中空構造・

大変形が可能な本運動素子の特徴を活かして分節運動の再現が可能であることを示しました。

次に、運動素子の内部に、上述した腸内容物モデルを少量の塊として注入しました。そして塊の少し後ろの点を光刺激して管構造をつぶし、ゆっくりと照射点をスライド（走査）させました。その結果、つぶれた管が移動していく収縮波を再現することができ、それに伴って内容物が移動していく様子が確認できました。これは管構造を閉じられる大変形はもちろん、変形の位置制御・局所制御が可能であるためであり、蠕動運動の再現も可能であることを示しました。

このように、運動素子を生体器官における筋層、光刺激制御を生体における神経制御として、生体器官の複雑な動作を再現できることが分かりました。加えて、本運動素子で再現した運動の性能は、同じサイズスケール生体器官であるラットの腸管に匹敵するものであることが確認できています。

今後の展開

本稿では、オンチップ生体モデルの作製に向けた基盤技術として、「生体に優しい材料」を、「生体に近い形状」へと制御し、「生体内の刺激環境」を再現する運動素子について紹介しました。細胞内外における物理的な刺激（メカニカルストレス）は、細胞の成長・分化・増殖・形態形成などさまざまな機能調節に関与していることが明らかになってきました。そのため、生体器官の複雑かつ動的な機械刺激をチップ上で再現可能な本技術は、生体内に近い環境を提供することを可能とし、細胞培養と合わせることでより洗練された生体モデルを提供できることが期待されます。今回の運動素子は35℃、空気中で効率的に駆動する設計であり、細胞の培養に適した環境（37℃、培養液中）での駆動条件とは異なっていますが、材料組成を調整することで動作

温度を細かく調整可能なことを確認しています。今後はメカニカルストレスによる影響を調べたい培養細胞を適切に検討し、実際に刺激を印可しながら培養できる実験系の構築をめざします。

また、生体データの取得を目的とした、バイオセンサとの統合も今後の課題です。本運動素子は生体内環境を模倣可能なハイドロゲル薄膜部と、ガラス基板などの固体からなる支持基板部の、ヘテロ（異なる2種の）構造をとっています。さまざまな材料種を選択可能な支持基板部は、ハイドロゲル薄膜部と異なり加工難度も低いため、NTT研究所の得意とする半導体加工技術を活用したセンサを作製・統合できると考えています。

こうした技術が成熟し、個々人のさまざまな臓器機能を高性能なバイオセンサ基板上で再現することができれば、パーソナライズ化された生体データを高精度・多角的に取得することができ、自身をデジタル空間で再現したモデルである「バイオデジタルツイン^{*12}」の構築につながることが期待されます。特に、実際の生体では試すことが難しい条件（極限環境や薬剤投与など）におけるデータが取得できるため、モデルの補完にも貢献できると考えています。このようなオンチップ生体モデルの実現をめざして、今後も基盤技術を積み重ねていきます。

参考文献

- (1) D. E. Ingber : "Reverse Engineering Human Pathophysiology with Organ-on-Chips," Cell, Vol. 164, No. 6, pp.1105-1109, 2016.
- (2) 高橋・田中・山口・小池 : "医療健康の未来を拓くバイオニクス技術," NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 5, pp.32-36, 2021.
- (3) R. Takahashi, H. Miyazako, A. Tanaka, and Y. Ueno : "Dynamic Creation of 3D Hydrogel Architectures via Selective Swelling Programmed by Interfacial Bonding," ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol. 11, No. 31, pp. 28267-28277, 2019.
- (4) R. Takahashi, H. Miyazako, A. Tanaka, Y. Ueno, and M. Yamaguchi : "Tough, Permeable and Biocompatible Microfluidic Devices formed through the Buckling Delamination of Soft Hydrogel Films," Lab on a Chip, Vol. 21, No. 7, pp.1307-1317, 2021.
- (5) R. Takahashi, A. Tanaka, and M.

Yamaguchi : "Biomorphic Actuation Driven via On-Chip Buckling of Photo-responsive Hydrogel Films," Advanced Functional Materials, Vol. 33, No. 24, p.2300184, 2023.



高橋 陸

刺激応答性ハイドロゲルを用いたオンチッププラットフォームは、生体器官に類似した性質・形状・動きを再現できる魅力的な技術です。生体モデルとしてはもちろん、高性能・高機能な運動素子として、新奇応用にも取り組んでいきます。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
企画担当
TEL 046-240-3312
FAX 046-270-2358
E-mail brl-kensui@ntt.com

^{*12} バイオデジタルツイン：サイバー空間における、人それぞれの身体および心理の精緻な写像をバイオデジタルツイン（Bio Digital Twin：BDT）と呼び、NTT医療健康ビジョンの根幹を支える技術。



立体変形電極を用いたオンチップ培養脳モデル

神経や脳の機能は、細胞どうしの電気的信号のやり取りにより成立しています。私たちは、生体に適合した導電性材料や微細加工技術を駆使することで、立体変形の可能な電極を並べたチップを作製し、神経細胞が集まった立体的な神経ネットワークからの電気的信号の計測を可能にしました。そして、そのチップ上で計測された電気的信号を時空間的に解析することにより、脳の神経細胞がどのような仕組みで働くのかを調べることができるオンチップ培養脳モデルを創出しました。

キーワード：#生体計測、#神経電極、#組織工学

脳らしい構造のモデリング

生体組織の機能はその構造に大きく依存しています。血管や腸は管状であることで物質を流すことができ、骨格筋はファイバ状であるからこそ牽引力を生むことができます。脳も例外ではありません。脳は立体的であり、なおかつモジュール構造を特徴としています。例えば、モジュール構造についていえば、大脳は運動野、体性感覚野、視覚野など領野によって仕切られていて役割が異なります。それぞれの領野の中でも、神経細胞たちは一様には分布せず、細胞どうしが密に集まった塊と、それらの塊どうしが弱くつながった状態が維持されています。こうした大小問わず、ある役割を持った集団とそれが弱く結合した状態がモジュール構造と呼ばれており、モジュールどうしが同調的に働いたり個別に働いたりとバランスを取ることが脳の機能には必要とされています。

本研究では、こうした脳の構造がどのように同期現象に影響するのかを、培養神経細胞を電極基板上に育てるというアプローチで、ミクロなレベルから詳細に調べていきます。脳の組織からバラバラに分解した培養神経細胞でも、電気信号を発する特性は残っています。さらに、基板上に育つ細胞どうしで自然に神経ネットワークを形成するので、多点で配置した電極からは、細胞どうしのコミュニケーションの様子を見ることができます。一方で、平たい基板の上では、細胞は一様かつ平面に育つので、脳とは全く異なる構造の中に育っています。そのため、脳らしい立体構造やモジュール構造を再現するためには、培養神経細胞が

育つための足場を組んだり、細胞を局所に集合させたりと人工的に構造を操る必要があります。私たちは、①電極を使って細胞の電気信号を計測すること、そして②所望の立体構造になるよう細胞を配置すること、の2つを両立するために、電極そのものを立体的な足場にするという方策を考案しました。

本稿では、まず電極の立体変形技術と、それを足場にして細胞を立体的に育てる技術を紹介します。その後、細胞の塊どうしをつないで立体構造・モジュール構造のいづれも再現したオンチップ培養脳モデルを作製します(図1)。脳モデルを使って実際に記録された神経信号について紹介した後、最後に技術の発展性について概説します。

立体変形する電極と細胞を包む技術

電極を細胞の足場にする具体的な方法と

さかい こうじ^{†1}
酒井 洸児^{†1}
ごとう とういちろう^{†1}
後藤 東一郎^{†1}
てしま てつひこ^{†2}
手島 哲彦^{†2}

NTT 物性科学基礎研究所^{†1}

NTT Research, Inc.

Medical and Health Informatics Lab^{†2}

して、私たちは、電極を立体的に曲げて、その中に細胞を包み込むという手法を創出しました^{(1)~(3)}。図2の上段に概念図を示しています。立体的に培養細胞を育てる手法そのものは、組織工学^{*1}やその発展であるOrgan-on-a-chip^{*2}(臓器チップ)の技術分野で盛んに研究されているので、既存の立体的な足場に平たい電極基板(Micro-electrode Array: MEA)を組み合わせたという方策ももちろん考えられます。しかし、平たい電極と立体培養組織との間で起きる接触状態の不良は信号強度の減弱を引き起こしてしまいます。Organ-on-a-chipにおいてセンシング技術が発展しにくい背景にも、センサチップの多くが平面的なために立体培養組織の表面に適合できないと

*1 組織工学：再生医療に向けて、細胞を集めて目的の臓器の形や機能を持たせる技術分野です。

*2 Organ-on-a-chip：創薬の支援に向けて組織工学の発展した分野で、微小流体チップ上で細胞を培養し、薬物動態や安全性を試験する技術です。

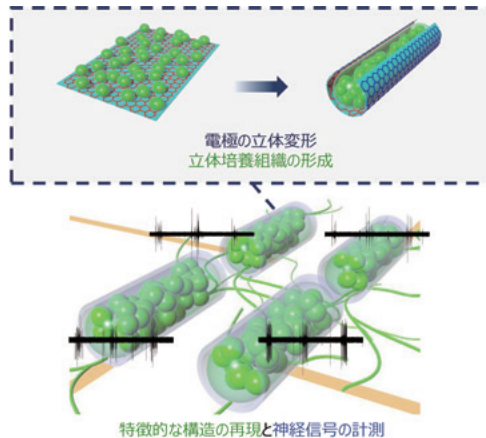
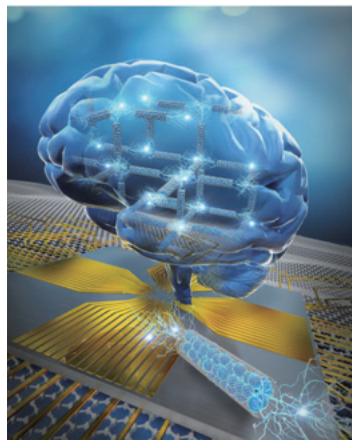


図1 オンチップ培養脳モデルのイメージ(左)と概略図(右)(参考文献(6)より引用)

いう難しさが根本にあります。そのため、電極も立体化して、形成された培養組織の表面に沿わせることが必要になるのです。電極は、細胞と同等のサイズ（10～100 μm スケール）が求められますが、平面であればフォトリソグラフィ^{*3}により作製が可能です。実際に、細胞を測るバイオセンシングの技術はフォトリソグラフィの加工精度により支えられています。一方で、このように精密につくられた電極を手動で折り曲げるのは困難です。

そこで、私たちは薄膜の自己組立てと呼ばれる手法に着目しました。2種類の材料から成る二層薄膜において、片方の層に収縮あるいは伸展の力が加わると薄膜は曲がります。自己組立てとは、基板上に二層薄膜を用意してあらかじめ片方に応力を加えておくことで、基板から薄膜が剥離する際に自発的な薄膜の屈曲を誘導する手法で、折り紙のように精密に薄膜を組み立てる方法として材料工学の分野で注目されています。典型的な変形の例は、長方形の薄膜から筒状への変形や、サイコロの展開図からキューブ状への変形が挙げられます。NTTでは、これまでもシルクに代表される生体適合性材料^{*4}による自己組立て技術を創出し、細胞を包むことに成功しています⁽⁴⁾。そのノウハウを活かし、さらに電極としても利用できる材料を探索しました。

私たちは、生体適合性、導電性、そして曲げが可能な柔軟性を兼ねそろえている点から、グラフェンと呼ばれる炭素原子一層から成る材料を選定しました（図2(b)）。グラフェン^{*5}は、脳に埋入する神経電極としても報告のある材料であり、神経計測と相性が良いことが知られています。グラフェンとともに自己組立てする薄膜の候補となる素材を何種類かスクリーニングした結果、パリレンCと呼ばれるポリマー素材が自己組立てを誘導できることを見出しました^{(2),(3),(5)}。図2(c)に示す断面図を見ると分かるように、グラフェン・パリレンCから成る二層の薄膜は、基板上に張り付いている間は平らですが、ひとたび基板から剥がれると数秒ほどで曲がって筒状になります。ポイントは、グラフェンとの密着性の高さにあります。密着性が高いために曲がった

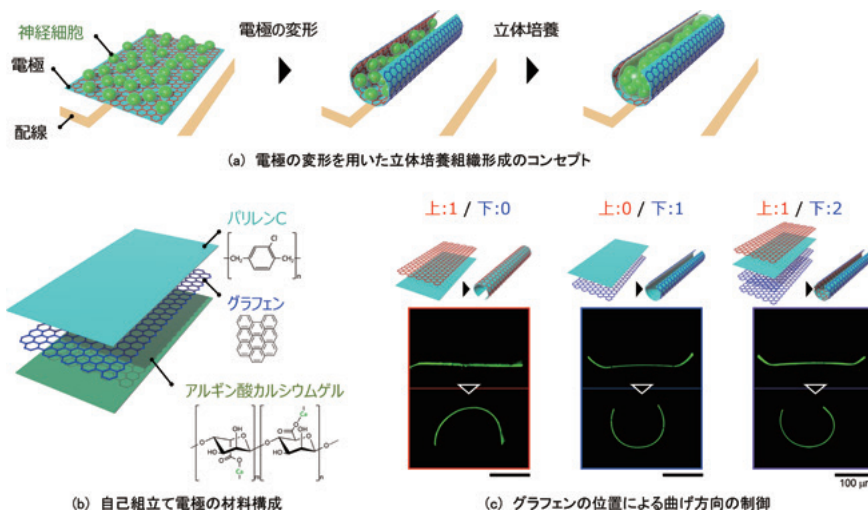


図2 グラフェン薄膜電極の立体変形技術（参考文献(6)より引用）

際に剥離することがなく、基板上で生じた残留応力が曲げの駆動力として働いてくれます。パリレンCもまた神経電極の絶縁層に広く用いられる材料で、生体適合性と透明性にも優れているため細胞の観察にも適しています。

二層薄膜を基板に支持する役割を持つ犠牲層についても、材料選定にこだわりがあります。溶解時の培養細胞の生存に影響しないという観点から、犠牲層にはアルギン酸カルシウムゲル^{*6}を選定しました。アルギン酸カルシウムゲルは、カルシウムイオン（ Ca^{2+} ）を回収する試薬により培養細胞の生存に影響することなく溶解することができます。 Ca^{2+} を奪う試薬の添加から数秒の間に速やかに薄膜は基板から剥離し、自己組立てを完了します。アルギン酸カルシウムゲル、パリレンC、そしてグラフェンを含む三層の薄膜を積層した後に、フォトリソグラフィによって描画したマイクロパターンを保護層として、酸素プラズマを用いて三層を削ることで、フォトリソグラフィの精度で薄膜の形状を決めることができます。典型的には、100～1000 μm 辺の長方形をパターンとして描くと、パリレンCの膜厚に応じて変形後に半径10～200 μm の筒状を得ることができます。この薄膜自己組立てを実現した際に一点だけ課題となったのは、必ずグラフェンを外側ににして曲がるという特徴でした（図2(c)）。培養細胞を包んだ際に絶縁性のパリレンC薄膜

としか細胞が接触できません。そこで、私たちは、図2(c)の右に示すように、グラフェンによってパリレンC薄膜を挟んだサンドイッチ構造の薄膜を作製し、この薄膜でも自発的に曲げが誘導できることを見出しました。こうして、内側にグラフェンの導電層を有する自己組立て電極の創出に成功しました⁽⁶⁾。

今回用いたグラフェンは生体適合性に加えて透明性にも優れているため、細胞を蛍光染色して顕微鏡下で観察することで、筒の中で細胞が育つ様子や立体培養組織が形成されるまでの過程を可視化できます（図3）。ラットの海馬から採取した培養神経細胞^{*7}を含む液体を薄膜電極上に滴下して、神経細胞が沈んで電極表面に接するのを待った後に自己組立てを誘導すると、

*3 フォトリソグラフィ：感光性の液体を塗布し、露光、現像によりパターンを形成する技術で、半導体集積回路やプリント基板のほか、バイオセンサの作製にも広く用いられます。

*4 生体適合性材料：細胞や生体組織と親和性があり、生体の異物に対する反応を惹起しない性質を持つ材料です。

*5 グラフェン：炭素原子1層の厚みで構成される二次元材料で、高い導電性と透明性、生体適合性を有しています。

*6 アルギン酸カルシウムゲル：藻類に含まれる多糖類で、二価のイオンによって架橋されてゲルになります。二価のイオンを一価のイオン置換することで容易に溶解することができます。

*7 海馬由来培養神経細胞：海馬の神経細胞の多くは、興奮性神経細胞と呼ばれる結合先の神経細胞が発火するような入力を与える神経細胞です。

立体変形する電極に神経細胞が包まれます(図3(a))。図3(b)に示すように、最初は筒内部に点在している神経細胞ですが、時間が経つに連れて増殖や伸長することで組織の体積を大きくしていきます。培養1～2週間程度で筒内部をほぼすべて埋めるほどに組織の体積が増大し、筒の形状に沿った立体培養組織が形成されます。培養3～4週間以降も、ほとんどの神経細胞が生存しており、立体培養組織は筒内部に維持されます。実は、このように長い期間にわたって培養を維持するために、電極の構造に工夫を加えています。

細胞は培養液の供給が滞ると栄養や酸素が不足して生存できないので、立体的な組織を長期的に培養するうえでは組織の内部まで培養液を供給し続けることが求められます。筒を使った培養においては、外部からの培養液の供給が難しいため、細胞の生育には不利になります。そこで、図3(d)に示すように、筒の壁面に小孔を設けることで物質透過性を向上させるという対策を講じました^{(1), (2)}。フォトリソグラフィの分解能を利用して3～6 μmの小孔を設けることで、神経細胞を筒内部に閉じ込めたまま、物質の透過性を向上することができま

す。また、小孔の役割は、物質の透過性を向上させるだけではありません。筒内部に育てた神経細胞が筒外部と構造的に接続するための通路としても小孔は機能します。神経細胞は、軸索^{*8}と呼ばれる細い突起を伸ばして他の神経細胞とつながり、神経ネットワークを形成します。本稿の冒頭で述べたようなモジュール構造を実現するためにも、立体培養組織どうしが軸索を通じてつながるように小孔を設けることが重要になります。図3(c)の下段は、実際に小孔を介して筒外部へと軸索(緑)が伸びる様子を染色像で示しています。細胞の本体〔細胞体(赤)〕は筒の内部にとどまったまま、軸索のみを筒外部へ伸ばし他の立体培養組織へ連結することが可能です。これにより、冒頭で述べた培養組織と電極のいずれも立体化するという技術的課題を解決し、次の

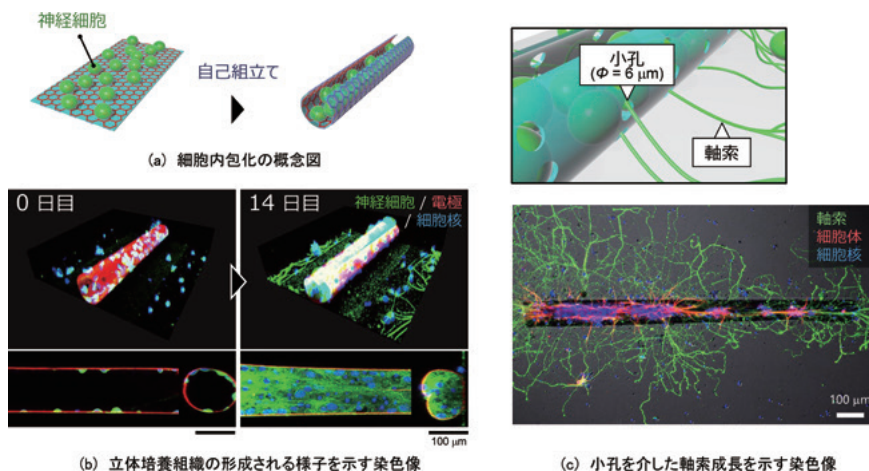


図3 細胞の内包化技術(参考文献(1), (6)より引用)

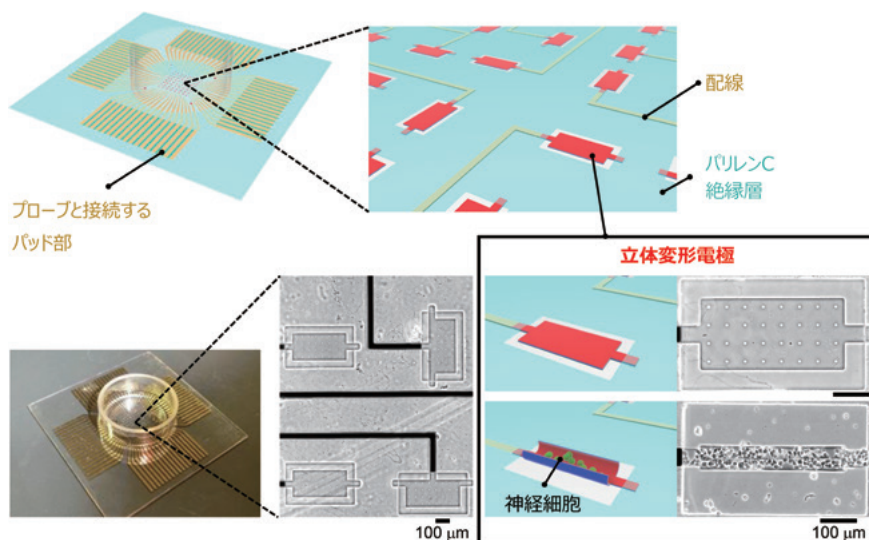


図4 立体電極アレイ基板(参考文献(6)より引用)

課題であるモジュール化についても、軸索の通過するための小孔を設けることで立体培養組織どうしの連結を実現することができました。

立体電極アレイを用いたオンチップ培養脳モデル

本稿の冒頭で述べたように、立体構造とは異なるもう1つの脳の特徴が、モジュール構造です。ここまで立体的な電極と培養組織の作製手法を紹介しましたが、私たちは、それらを複数つなげてモジュール構造を構築しました⁽⁶⁾。図4に示すように、立体変形能力を持つ電極を8×8点のマルチア

レイ状に並べた基板を作製し、それぞれの電極内部で立体培養組織を形成すれば、個々の立体培養組織をモジュールとした神経ネットワークがつくられます。神経細胞が自発的に軸索を伸ばすことで立体培養組織どうしは互いに結合します。立体培養組織に含まれる神経細胞どうしの密な結合と比べて弱い結合が立体培養組織間に形成されるため、結合の強弱の際立ったモジュール構造が構築されます。それぞれの電極を外部の計測機器に独立に配線すれば(図4)、個々の立体培養組織から発せられる神経信号が独立に計測されます。計測された神経信号の同期性や時間遅れなどを解析することで、複数の立体培養組織がどのような神

* 8 軸索：細胞体から伸びる突起で、他の神経細胞へとシナプスを形成して結合します。

経ネットワークを形成しているのかを調べることができます。このようにして、脳の構造的な特徴を再現しつつ、その神経ネットワーク内のやり取りを電氣的に可視化する、オンチップ培養脳モデルが機能します。実際に作製したオンチップ培養脳モデルはどのように活用できるのか、私たちは、長期的な計測性能、そして特徴的な構造による同期現象への影響という2点に着目して、実験を行いました。

まず着目したのは長期的な計測性能です。平面的なセンサチップで課題となる、電極と立体培養組織との間の構造的なミスマッチが、立体的な電極であれば克服できるはずですが、そのため、個々の立体培養組織からどの程度長く安定して計測が行えるかを確認しました。図5にその計測結果をまとめています。比較として、従来の平面的な電極上に立体培養組織を形成したところ、培養日数が進むにつれて計測信号が減弱し、最終的には消失する様子が見られました。原因は、構造的なミスマッチに加えて、培養細胞の移動する能力にあります。図5上段にも示すように、立体培養組織が平面電極から移動することで接触状態が悪くなり、計測信号は次第に減弱したと考えられます。一方で、立体変形した筒状の電極においては、筒の中に立体培養組織が固定されているので、組織と電極間の接触が良好なまま保たれます。図5下段に、培養日数に対する計測できた電極の数と記録された神経発火頻度の推移が示されていますが、立体電極では培養日数が経過しても計測信号は減弱せず、培養開始から70日後も計測が持続できることが実証されました。

続いて、神経ネットワークの構造と同期現象との関係を検証しました。神経細胞がつながった神経ネットワークの中では神経細胞は同期的に発火し、電気信号を伝えます。モジュール構造においては、神経細胞どうしが密に結合したモジュール内、つまり立体培養組織内の神経細胞どうしは同期的に発火しやすく、疎に結合したモジュール間での神経発火は比較的同期しにくい状態になっています。こうした構造的な特徴による同期性への影響を調べるために、モジュール構造と立体構造を持つネットワー

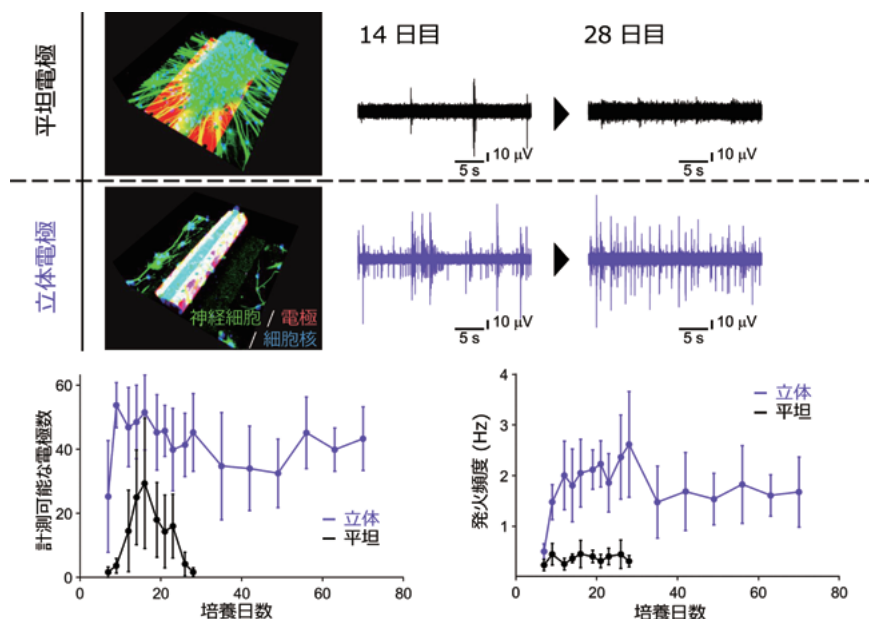
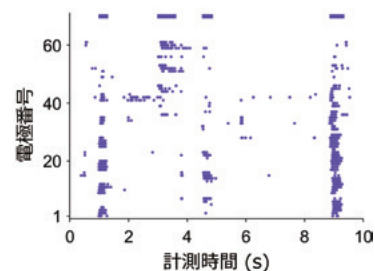
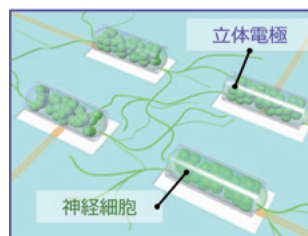


図5 立体培養組織からの長期的な計測（参考文献(6)より引用）

立体・モジュール型



平面・一様

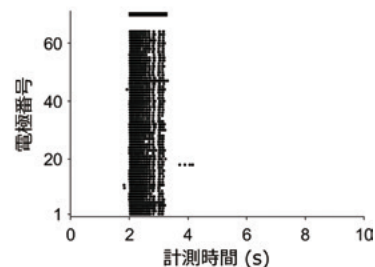
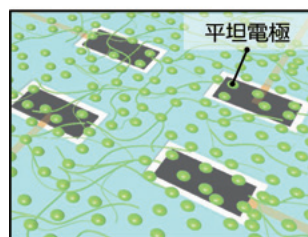


図6 神経ネットワークの特徴的な構造による同期現象への影響の可視化（参考文献(6)より引用）

ク（立体・モジュール型ネットワーク）に加えて、比較対象として従来の平面的かつ一様に細胞が基板に生着した神経ネットワーク（平面・一様なネットワーク）からも自発活動の計測を行いました。図6は、それぞれの電極で発火が見られた時刻のプロットで、立体培養組織間における同期を可視化しています。平面・一様なネットワークでは、細胞どうしの結合が強く全体が同

期的な発火パターンが繰り返し支配的に現れます。一方で、立体・モジュール型のネットワークでは、いくつかの立体培養組織どうしが同期したパターンが多様に現れ、さらには同期現象に参加していない神経発火も混在するという結果が得られました。この結果は、立体培養組織どうしが同期的に働くパターンが多様である一方、一部のモジュール間では非同期的に発火するという

ことを示しています。実際の脳内においても、こうしたモジュール構造により同期と非同期の混在した多様な発火パターンを生じることが情報処理に有利であることが理論的に示されています。本研究では、モジュール構造や立体構造の再現により実際に同期と非同期のバランスが変動することを実験的に証明しました。

長期的な計測性も併せて活かすことで、神経細胞の成長に応じた同期性の変化も追うことができます。例えば、軸索により立体培養組織どうしがつながり始める培養7～9日後では、完全に非同期だった発火が次第に同期的になります。また、培養2～3週間を過ぎると、次第に全体的な同期発火が支配的になり、繰り返す同期発火の時間間隔も短くなります。こうした神経組織の成熟化に伴う電気生理的な変化を時系列で検証することで、脳の発達過程に関連した神経ネットワークの変遷についての理解も深めることができます。このように、本研究で構築したオンチップ培養脳モデルを使えば、筒のサイズや間隔といった形状のパラメータに加えて、培養日数を変えることで、神経ネットワークの構造や成熟に関連するさまざまな生命現象をその発火パターンから調べることができます。

技術の発展性

本稿では、脳らしい特徴として立体構造とモジュール構造を再現しつつ、電極チップ上に細胞を培養することで脳における神経ネットワークの機能をモデリングするという取り組みを紹介しました。単体としても他の細胞に比べて複雑で興味深い構造や特性を示す神経細胞ですが、それを培養する条件や基板の構造によっては集団としても振る舞いが変わるところに面白さや奥深さがあります。もちろん実際の脳とは根本的に環境が異なりますが、培養神経細胞に保存された特性を引き出すことで、脳の機

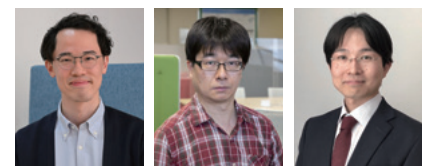
能や発達に関連する新たな知見が明らかになる可能性があります。特に、細胞集団の構造や性質が脳に近くなるほど、今まで見えてこなかった細胞集団の振る舞いと脳の機能との関連性が徐々に明らかになっていくと期待しています。

また、本技術は、生理学的な範囲での現象だけでなく病理モデルとしての可能性も秘めています。例えば、神経ネットワークにおける構造の異常との関連性が知られる自閉症を模擬した神経ネットワークを構築することや、神経疾患の患者に由来するiPS細胞^{*9}から作製した神経細胞を本モデルに混ぜることなどにより疾患・病態モデルを構築するような医学研究への展開も期待できます。実際の脳を使わずとも、脳らしい機能を持った神経ネットワークに対する薬剤応答を調べられるモデルになるので、実験動物の削減や薬剤の試験を加速するという観点でも、医学研究や創薬研究に対して貢献できると期待されます。

今後は、計測点数の増加や刺激機能の追加（光や熱、振動など）、電極立体形状の多様化によるチップの高性能化とともに、脳の機能や病理に関連した実際の事象をターゲットに定めることで、生命現象や疾患をより反映したオンチップ培養脳モデルの高度化をめざしたいと考えています。

参考文献

- (1) K. Sakai, T. F. Teshima, H. Nakashima, and Y. Ueno: "Graphene-based neuron encapsulation with controlled axonal outgrowth," *Nanoscale*, Vol. 11, No. 28, pp. 13249-13259, 2019.
- (2) T. F. Teshima, K. Sakai, H. Nakashima, and Y. Ueno: "Self-foldable 3D graphene biointerfaces," *NTT Technical Review*, Vol. 18, No. 2, pp. 32-39, 2020.
- (3) T. F. Teshima, C. S. Henderson, M. Takamura, Y. Ogawa, S. Wang, Y. Kashimura, S. Sasaki, T. Goto, H. Nakashima, and Y. Ueno: "Self-folded three-dimensional graphene with a tunable shape and conductivity," *Nano Lett.*, Vol. 19, No. 1, pp. 461-470, 2019.
- (4) T. F. Teshima, H. Nakashima, Y. Ueno, S. Sasaki, C. S. Henderson, and S. Tsukada: "Cell Encapsulation and 3D Self-assembly Using Multi-layered Polymeric Thin Films," *NTT Technical Review*, Vol. 16, No. 8, pp. 53-61, 2018.
- (5) T. Goto, T. F. Teshima, K. Sakai, and M. Yamaguchi: "Three-dimensional self-folding assembly of multi-layer graphene at the interface with a polymeric film," *AIP Adv.*, Vol. 12, No. 7, 075002, 2022.
- (6) K. Sakai, T. F. Teshima, T. Goto, H. Nakashima, and M. Yamaguchi: "Self - Folding Graphene - Based Interface for Brain - Like Modular 3D Tissue," *Adv. Funct. Mater.*, Vol. 33, 2301836, 2023.



(左から) 酒井 洸児 / 後藤 東一郎 / 手島 哲彦

神経ネットワークを模倣した工学技術、AIがブームですが、まだ分かっていない神経ネットワークの役割を解明すれば、より高度な技術を生む一端になります。むしろ工学技術を駆使して生物の曖昧さを科学するという研究戦略の面白さを感じてもらえれば幸いです。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
企画担当
TEL 046-240-3312
FAX 046-270-2358
E-mail btl-kensui@ntt.com

* 9 iPS細胞：人工多能性幹細胞(induced pluripotent stem cell)のことで、多くの細胞に分化できる分化万能性と、分裂増殖を維持できる自己複製能を併せ持っています。



人工細胞膜の構築のための脂質分子機能評価

脂質や膜タンパク質は細胞間との情報伝達だけでなく、細胞内の小胞輸送など多くの反応にかかわっています。細胞の反応を分子レベルで理解するためのボトムアップアプローチとして人工細胞膜の研究に取り組んでいます。細胞膜の基本構造である脂質二分子膜に膜タンパク質を導入し、評価するためには、さまざまな要素技術が必要です。本稿では、細胞膜モデル基板の創出に向けた挑戦について紹介します。

キーワード：#脂質二分子膜、#膜タンパク質、#細胞

分子を組み上げてつくる脂質二分子膜再構成

細胞は脂質の膜で覆われ、細胞の内外を隔てています。この細胞膜には多様な膜タンパク質が存在しています。膜タンパク質は脂質膜に付着あるいは貫通して機能しているタンパク質で、細胞膜の重量のほぼ50%が膜タンパク質です。膜タンパク質には神経伝達物質などの信号分子を受け取る受容体タンパク質やエネルギーを使ってイオンなどを輸送するトランスポーターなどがあります。そのうちイオンチャネル型受容体タンパク質はリガンド結合などにより受容体の構造変化が起こって、イオンチャネルが開くことによりイオンが細胞内へ流入し電位変化を誘起して情報伝達を行います。生体内での情報伝達は生命活動に不可欠で、情報伝達の異常はさまざまな疾病の原因になります。このように、膜タンパク質やその機能を維持する基盤となる脂質膜は、生体機能と密接な関係があり、それらの動きを理解することは生命科学においてだけでなく医療・創薬の面でも重要です。

では、どのように脂質やタンパク質を評価するのか、その手法の1つとして脂質二分子膜再構成系があります。再構成系は目的の脂質や膜タンパク質を任意の溶液や温度の下に組み上げ、特定の細胞膜上の現象を再現し、分子レベルでの評価を行います。脂質膜は脂質分子が二重に重なった厚さ5 nm程度の脂質二分子膜と呼ばれる構造です。脂質分子は水と馴染む親水性の頭部と水をはじく疎水性の炭化水素鎖を持つ分子であり、脂質分子そのものは水に溶けません。溶液中では脂質分子は自己集積化によって単分子膜が内側に疎水基を閉じ込め

るように2枚重なった脂質二分子膜構造になります。

私たちは脂質二分子膜とナノ・マイクロスケール加工技術によって作製した井戸型基板を組み合わせた、脂質やタンパク質の機能評価を行う細胞を単純化したモデルの提案を行ってきました(図1)。このモデルでは脂質二分子膜で井戸を覆い、膜タンパク質を配置します。井戸内外が細胞内外を想定しており、井戸内外は任意の溶液で満たされています。井戸構造の1つは細胞1つと同程度の大きさに設計しています。この井戸構造は安定に脂質二分子膜を支え、平面型であるため、顕微鏡による経時変化観察が可能となります。井戸に形成した脂質二分子膜は井戸の淵の基板によって支えられていますが、脂質二分子膜と基板は物理的に吸着しておらず厚さ数nmの水層を介して存在しています。そして二分子膜を構成する脂質分子1つひとつは膜面内を動いていることが知られており、この脂質の動きは膜の状態を評価する指標となります。

本稿の前半ではこの細胞膜モデル基板を

用いて脂質の相分離や脂質二分子膜形状の変化など脂質の特性機能評価について、後半は脂質二分子膜へ膜タンパク質をどのように導入するか、そして導入した膜タンパク質のイオン流入を評価するために必要な対策について紹介します。

脂質相分離膜

細胞膜を構成する脂質分子の種類は多様ですが、炭化水素鎖に不飽和結合を持たない飽和脂質と、1つ以上の不飽和結合を持つ不飽和脂質に大きく分けられます。これらの脂質分子は面内で一緒に混ざり合っているのではなく、飽和脂質は細胞膜に存在するコレステロールと局所的にドメインを形成していると考えられています。この脂質のドメインはラフトとも呼ばれ、周囲の膜とは相状態が異なり、信号伝達に関与するタンパク質が局在します。役割や機能の解明が求められていますが、このラフトは細胞膜では直接観察することは難しいため、脂質分子の動きを物理的現象として理解するために再構成系が用いられてきました。

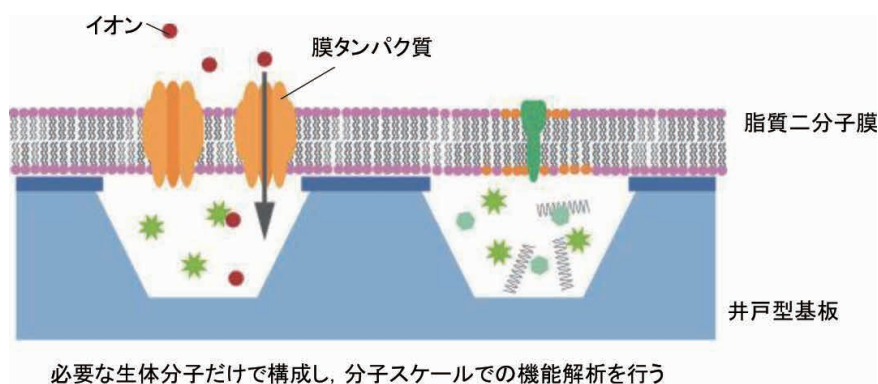


図1 人工細胞モデル基板

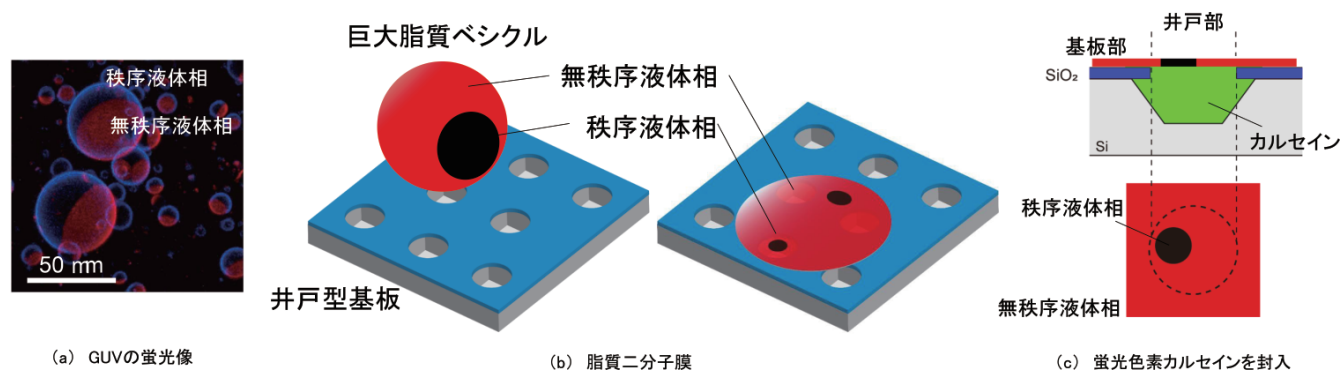


図2 巨大ベシクル蛍光像および井戸型基板上での脂質二分子膜形成方法

飽和脂質・不飽和脂質・コレステロールの3成分の脂質二分子膜を作製すると、炭化水素鎖の秩序性を反映して不飽和脂質からなる無秩序液体相の中に飽和脂質とコレステロールが凝集した秩序液体相のドメイン構造が観察されます。秩序液体相は無秩序液体相より流動性が低く、分子密度が高いことが分かっています。

このような相分離膜を井戸構造上に展開すると、どのような振る舞いをするか観察をしました。井戸構造上に相分離膜を作製するために、まず巨大脂質ベシクル (GUV) を飽和脂質、不飽和脂質、コレステロールの3成分の脂質混合溶液から作製します。各相状態を見分けるために秩序液体相をLaurdan、無秩序液体相をRhodamine付脂質で蛍光標識しました。図2(a)は作製したGUVの蛍光像です。GUVは脂質二分子膜がシャボン玉と同じように球状の状態で、青い個所が秩序液体相、赤い個所が無秩序液体相を示しています。このGUVを図2(b)のように井戸基板上で展開させると井戸部をシールする脂質二分子膜ができます。脂質二分子膜が形成しているかどうかをより判別しやすくするために、井戸内部に蛍光色素カルセインを封入します(図2(c))。図3は相分離膜展開後に時間が経過した後の井戸基板の蛍光像です。赤い色が無秩序液体相、色が無い暗い個所が秩序液体相を示しています。カルセイン由来の緑色の蛍光を見ることで脂質二分子膜が井戸部をシールすることに成功しているかどうかを確認できます(図3(a))。カルセイン由来の蛍光をフィルタすると(図3(b))シールに成功した井戸部はすべて赤色が観測され、無秩序液体相が優先的に存在しており、秩序液体相は井戸部外の基板部にのみ存在

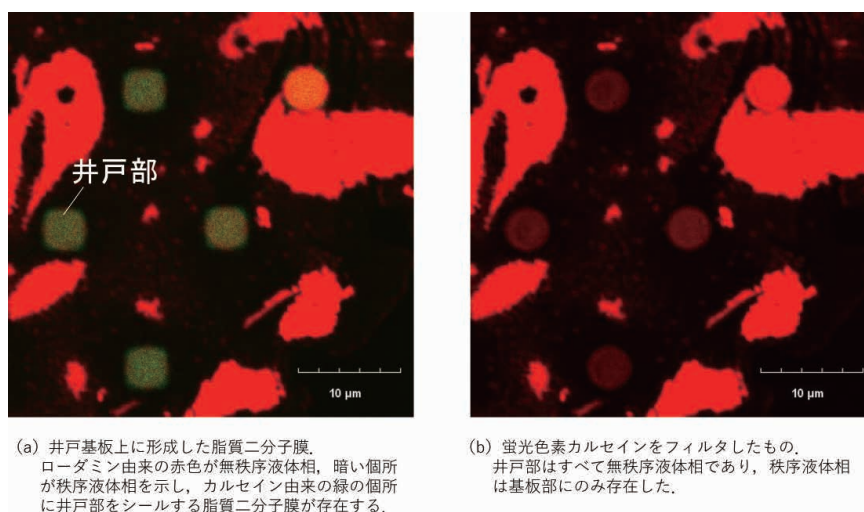


図3 相分離膜展開後に時間が経過した後の井戸基板の蛍光像

していることが分かりました⁽¹⁾。

GUV展開直後には秩序液体相のドメインが井戸部でも確認されましたが、ドメインは井戸部内を動きながら時間経過とともに小さくなっていき、無秩序液体相の面積が増加し、最後には秩序液体相のドメインは井戸部内から消失しました。脂質二分子膜面内で脂質1つひとつが動いていますが、流動性の低い秩序液体相を形成する脂質(飽和脂質、コレステロール)は井戸部から基板部へ移動し流動性の高い無秩序液体相を形成する脂質(不飽和脂質)が井戸部へ入っていったと考えられます。井戸部内では脂質二分子膜は基板に接していないため、基板部のように基板-脂質の相互作用がなく動きやすい環境となっています。また支えがないので、形状がたわみやすいことが予想されます。

これらの結果から1枚の連続した脂質二分子膜でもそれを構成する脂質ごとに存在しやすい環境があることが分かってきました

た。秩序液体相・無秩序液体相がそれぞれ存在しやすい条件を解明し脂質の動きを制御することができると、より多様な細胞膜反応を再現でき、生体に近い細胞膜モデルが構築できると考えています。

脂質二分子膜の形状変化

私たちの細胞膜モデルでは井戸部に無秩序液体相が優先的に存在しますが、秩序液体相を優先的に存在させることはできないのでしょうか。そこで、井戸部の脂質二分子膜の形状を変えたとき、相分離がどのように変化するかを観察しました。井戸内外は脂質二分子膜によって隔たれており、井戸外部は測定中に溶液を交換することが可能です。イオンや大型で電荷を持たない極性分子(アミノ酸やグルコース)は脂質二分子膜を透過しにくいですがH₂OやO₂など小さな分子は透過します。図4(a)の概略図に示すように井戸外の溶液を交換して井

戸内外で浸透圧差を発生させると浸透圧差を解消するために脂質二分子膜を介して井戸内部へ H_2O が流入して、井戸内部の溶液体積は増加していきます⁽²⁾。井戸部をシールする脂質二分子膜は流動性があるため井戸部から脂質が移動し、風船のように膨らんでいきます(図4(a)蛍光像)。飽和脂質、不飽和脂質、コレステロールの3成分の脂質二分子膜に対して浸透圧差を発生させると、浸透圧差のない等圧の状態では秩序液体相が減少していきましたが、脂質二分子膜が膨らんでいく過程で図4(b)の矢印で示す秩序液体相の面積が増加していきました。これは井戸部の周囲の基板部に存在する秩序液体相を形成する脂質(飽和脂質、コレステロール)が井戸内部の体積増加に伴って井戸部へ移動していったためです。井戸部の膨らみが終わり、井戸部のほとんどが秩序液体相に変化した後、1時間以上にわたって井戸部に秩序液体相を存在させることに成功しました⁽³⁾(図4(b))。脂質二分子膜の形状を変化させると脂質の動き方に変化が現れました。このように脂質二分子膜の動きを物理的に制御する手法は、脂質二分子膜の状態に影響を与える因子を検討していくために重要です。

昆虫細胞由来出芽ウイルスの膜融合機能を利用した膜タンパク質導入

脂質二分子膜へ膜タンパク質を効率的に導入することは再構成系において重要な課題となっています。膜タンパク質の機能を維持し、数や向きを制御して脂質二分子膜中に配置することができれば、多くの細胞膜反応が再現可能となります。バキュロウイルスは昆虫細胞を寄生とするウイルスで、これに外来遺伝子を組み込み、昆虫細胞に感染させて目的のタンパク質を発現させる技術が確立されています。バキュロウイルスが昆虫細胞外に出芽する際、昆虫細胞の膜をまとうため、発現膜タンパク質が昆虫細胞由来出芽ウイルスに付加されています。昆虫細胞由来出芽ウイルスは次の寄生へ侵入するために、細胞に融合する機能を持っています。

私たちはこの機能に着目し、脂質二分子膜への膜タンパク質導入を試みました⁽⁴⁾。昆虫細胞由来出芽ウイルス全体を蛍光標識

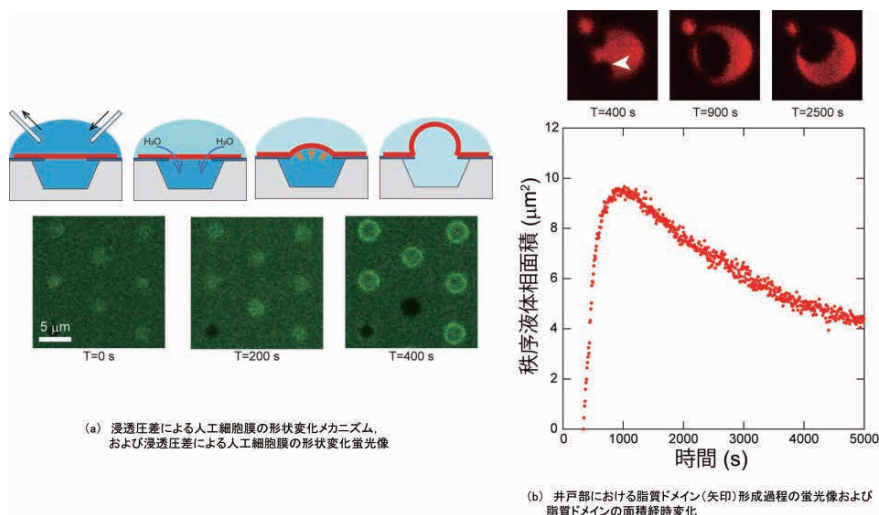


図4 脂質二分子膜の形状変化

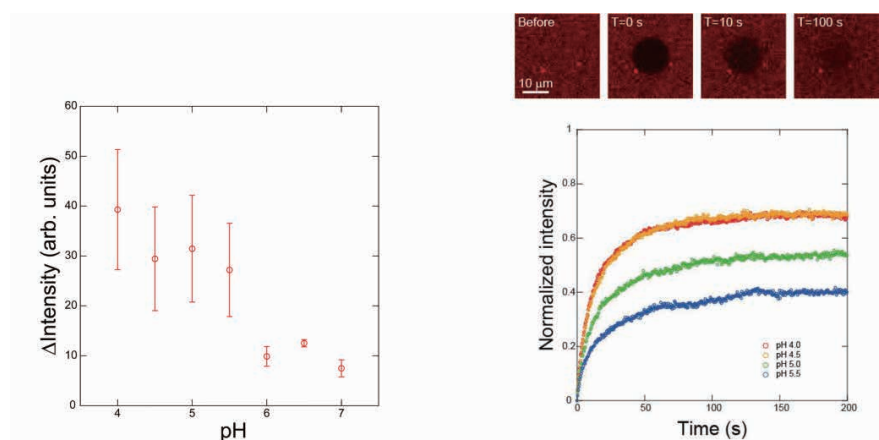


図5 昆虫細胞由来出芽ウイルス添加後の蛍光強度変化グラフ

し、シリコン基板上に形成した脂質二分子膜に加え、pHの異なる溶液において脂質二分子膜上の昆虫細胞由来出芽ウイルス標識蛍光由来の蛍光強度の変化を調べました。1時間経過した後の蛍光強度変化が図5(a)です。グラフの横軸は溶液のpHを示しており、pHが5.5以下になると昆虫細胞由来出芽ウイルスを標識した色素由来の蛍光強度が上昇しています。これは昆虫細胞由来出芽ウイルスが脂質二分子膜へ到達した量の増加を示しています。pH6.0と5.5の間に昆虫細胞由来出芽ウイルスの融合能が活性化するしきい値がありそうです。

一方、pH5.5以下では蛍光強度だけ見ると大きな差はありません。脂質二分子膜どうしが融合するとき、膜どうしが付着した状態、いくらか混じり合った半融合、1枚の脂質二分子膜になる全融合と段階があり、

付着の状態ですれ以上融合が進まない場合もあります。私たちの目的は膜タンパク質を脂質二分子膜へ導入することなので、昆虫細胞由来の膜成分が基板の脂質二分子膜へ全融合した状態が望ましいのですが、それはどのpHで達成できているのか蛍光強度変化の結果だけでは分かりません。そこで脂質の側方拡散を測定することで、昆虫細胞由来出芽ウイルスの膜成分が脂質二分子膜へ移動しているか評価しました。Fluorescence recovery after photobleaching (FRAP: 光褪色後蛍光回復法)法は任意の個所の蛍光色素を強い光で退色させ、側方拡散によって退色した蛍光色素と周囲の蛍光色素が入れ替わる過程から得られる蛍光回復曲線を解析し二分子膜面内の脂質や構成分子の動きの動きを評価する一般的な手法です。

図5 (b)が蛍光色素を消光させた、色素が側方拡散によって動いていく過程の蛍光像です。この蛍光像の輝度の変化から各pHの蛍光回復曲線を得ました。pHが低くなるほど蛍光の回復率が上昇しています。これは昆虫細胞由来出芽ウイルスの膜成分が基板の脂質二分子膜に移動し、拡散している割合が増えているため、pHが低くなるほどより全融合の量が増えていることを示しています。溶液のpHと膜融合状態の関係は図6に示すようにpH5.5付近では膜どうしが付着する割合が多く、pHが低くなるにつれて全融合の割合が増えることが分かりました。私たちの提案する細胞膜モデルにおいて、溶液pH4.5以下が膜タンパク質導入に最適な条件です。この溶液条件の下で井戸構造の脂質二分子膜へ膜タンパク質導入に成功しました。

膜タンパク質機能計測に向けて

次のステップは導入した膜タンパク質の機能評価ですが、そのためには解決すべき課題があります。私たちはこれまでも細胞膜モデル基板によって、脂質二分子膜にポア形成しイオンを透過させる機能を持つ膜タンパク質 α -ヘモリシンを通るイオンの流れを測定してきました。しかし外部溶液から井戸内部へのイオンリークが存在し、受容体膜タンパク質のようなピコアンペア(pA)レベルの極微細なイオン流入の信号を検出するためには、このイオンリークの低減を行う必要があります。理論および実験的な検証の結果、イオンリークの原因は、脂質二分子膜と井戸基板との間のわずか2 nmほどの界面水層からのイオン流入であることが分かりました。低減方法として基板表面を牛血清アルブミン(BSA)で表面修飾することにより、イオンリークのパスとなっていた界面水層と外部溶液とのインタフェース部分をブロックする手法を提案しました⁽⁵⁾。

また最近、溶液としてイオン液体希薄水溶液を用いた簡便かつ容易な手法を見出しました。イオン液体はイオンのみからなる液体性の塩で、一般的に嵩高い有機イオンで構成されています。私たちは通常の無機塩の代わりにイオン液体を電解質として用い、嵩高いイオンを界面水層内に閉じ込め

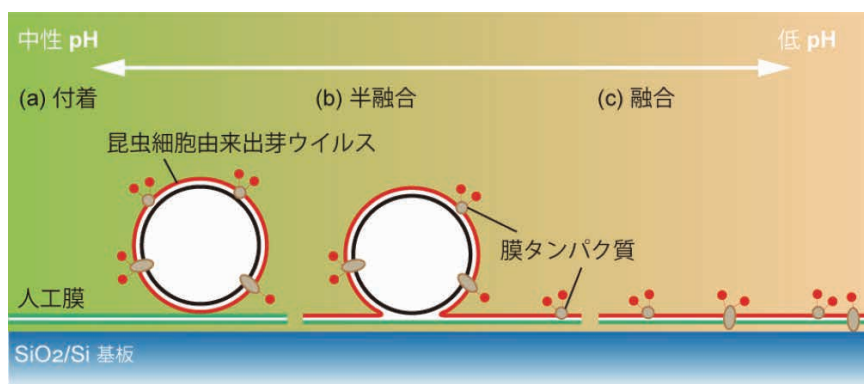


図6 昆虫細胞由来出芽ウイルスの脂質二分子膜への融合状態とpH依存

ることによって界面水層を介したイオンリークを大幅に低減することに成功しました。これらの手法で形成した井戸基板の脂質二分子膜を用いて長時間かつ高感度な α -ヘモリシンのイオン透過機能計測に成功しました。

今後の展開

脂質や膜タンパク質は細胞間との情報伝達だけでなく、細胞内の小胞輸送など多くの反応にかかわっています。脂質や膜タンパク質の動きを評価し、制御する手法を探索し細胞で起こっている反応を再現することで細胞では可視化が困難な各生体分子1つひとつの役割を定量的に評価する手法の提案をめざしています。NTTが得意とする生体材料に適用する基板加工技術によって脂質や膜タンパク質などの生体分子の動きを制御することで、生体内の複雑な伝達経路をボトムアッププロセスで紐解く脂質二分子膜再構成系の新たな展開が期待できます。

参考文献

- (1) K. Sumitomo and A. Oshima: "Liquid-Ordered/Liquid-Crystalline Phase Separation at a Lipid Bilayer Suspended over Microwells," *Langmuir*, Vol.33, No.46, pp.13277-13283, 2017.
- (2) 大嶋・乾・上野・住友: "マイクロウェル架橋脂質二分子膜の水透過計測," *電気学会論文誌 C*, Vol.140, No.4, pp.421-425, 2020.
- (3) A. Oshima, H. Nakashima, and K. Sumitomo: "Phase separation in freestanding bilayer lipid membrane induced by osmotic pressure difference," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.59, No.2, 027001, 2020.

- (4) A. Oshima, K. Nakanishi, N. Kasai, H. Nakashima, K. Tsumoto, and K. Sumitomo: "Mechanism of Budded Virus Envelope Fusion into a Planar Bilayer Lipid Membrane on a SiO₂ Substrate," *Langmuir*, Vol.38, No.18, pp.5464-5471, 2022.
- (5) Y. Kashimura, K. Sumitomo, and H. Nakashima: "Biodevices using microwells sealed with artificial lipid bilayers: Improvement of sealing performance by protein coating," *Electr. Commun. Jpn.*, Vol.103, No.9, pp.15-22, 2020.



(左から) 檜村 吉晃/ 大嶋 梓

生体分子の動きを定量的に評価する新しい手法をめざして研究に取り組んでいます。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
企画担当
TEL 046-240-3312
FAX 046-270-2358
E-mail brl-kensui@ntt.com



超伝導磁束量子ビットによる神経細胞中の鉄イオン検出

超伝導量子計算機の開発競争を背景に、近年発展の著しい超伝導量子回路技術が量子センシング分野に応用されています。これまで、超伝導量子センサによるオンチップ測定ターゲットは半導体中の不純物等に限られていましたが、応用範囲はそのような「固い」材料に限りません。本稿では、超伝導磁束量子ビットを応用した高感度・高空間分解能磁場センサによる神経細胞中の鉄イオンの検出について紹介します。

キーワード：#超伝導量子回路、#量子センシング、#バイオマテリアル

樋田 啓^{†1} / 酒井 洸児^{†1}
手島 哲彦^{†2} / 角柳 孝輔^{†1}
Imran Mahboob^{†1} / 齊藤 志郎^{†1}

NTT 物性科学基礎研究所^{†1}

NTT Research, Inc.

Medical and Health Informatics Lab^{†2}

生体中の微量金属元素

鉄は生体内に含まれる量は少ないものの重要な役割を果たす微量金属元素の1つです。生理学側面ではヘモグロビンによる酸素の輸送やATP (Adenosine triphosphate)^{*1}によるエネルギー産生に関与し、病理学的側面ではアルツハイマー病など多くの神経変性疾患に関係します。これらの現象の理解には、鉄イオンの輸送や酸化数の変化等を詳細に調べる必要があります。

生体試料中の金属イオンを調べる方法

生体試料中の金属イオンを調べるための代表的な手法として、質量分析法が挙げられます。この手法は定量性を持つ手法で、細胞単位での分析も可能です。しかし、分析の過程で誘導結合プラズマやレーザ照射によるイオン化、すなわち細胞の破碎を伴うため、その場観察は難しくなります。また、ラマン分光法などの光学的手法も金属元素の分析に使われます。ラマン分光法は光を用いた方法であることからその場観察に適しており、細胞内部の構造のイメージングも可能です。しかし、ここまで挙げた方法では原理的に酸化還元反応やタンパク質との結合等に起因するイオンの価数の変化をとらえられないので、これらの情報を得るためには異なる手法が必要です。

イオンの価数等も含む生体試料中の金属イオンの分析に用いられるのが電子スピン共鳴 (Electron Spin Resonance : ESR)

で、物理・化学・生物・地球惑星科学・製薬・医療等のさまざまな分野で幅広く応用されています。この手法では、g因子と呼ばれる「材料の指紋」ともいえるパラメータを求めることで、イオンの価数も含む金属イオンの違いを見分けることが可能です。通常の場合、分析は細いガラス管に試料を充填して行うため、数ミリリットル単位の試料を用意することが必要で、得られる情報もその平均値となります。また、空間分解能と感度の制約から、細胞単位でのイメージングは難しくなります。

超伝導量子回路^{*2}による磁場センサはマイクロメートルレベルの空間分解能を持ち、ESRと同様に金属イオンをはじめとする不対電子^{*3}を持つ物質の分析が可能です。そのため、生体内の金属イオンを細胞単位で調べるための有用なツールとして期待できます。

超伝導量子回路を用いた量子センシング

超伝導量子回路を用いた量子センシングでは、主に磁場もしくはその源である電子スピンの超高感度測定をめざしています。物質中で電子スピンは環境となる周辺元素の性質を反映するプローブとして働き、材料分析のツールとして用いることができます。

超伝導量子回路を用いたセンシングの研究は大きく2つの方向で進められています。1つは、既存のESRで感度を制約する原因となっている増幅器の雑音等の要素を超伝

導量子回路の技術で徹底的に改善し、超高感度をめざすものです。もう1つは、磁場に対して敏感な特性を持つ種類の超伝導量子ビットをセンサとして用い、電子スピンを高い感度で検出するものです。どちらの方法も、超伝導量子回路チップ近傍の試料に含まれる電子スピンを超高感度で検出するという点では共通しています。NTTは後者のアプローチで研究を行っており、長年研究を続けてきた超伝導磁束量子ビットを磁場センサとして用いています。これまでに1秒間の信号の積算で20個の電子スピンを検出可能な超高感度センサを実現し、それを応用することでESRにより固体試料をマイクロメートルの空間分解能で分析することに成功しました^{(1),(2)}。

超伝導量子回路を用いたセンシングデバイスのもう1つの特徴は、センサとして働く超伝導量子デバイスの大きさを小さくすることができ、高い空間分解能を実現できる点です。例えば、超伝導磁束量子ビットは1辺の長さが数マイクロメートル程度の長方形のループから構成されます。超伝導磁束量子ビットはループを貫く磁場のみ

*1 ATP：アデノシン三リン酸。細胞はATPを経由してエネルギーを利用しています。

*2 超伝導量子回路：量子力学的にふるまう回路素子を含む超伝導回路。超伝導量子回路は通常の電子回路と同じインダクタ、キャパシタのほか、非線形な電流・電圧特性を持つジョセフソン接合で構成されます。

*3 不対電子：原子や分子に含まれる電子のうち、ペアを構成していない電子を指します。不対電子を含む物質は磁性を持つため、磁化の源になります。また、不対電子を含む物質の性質はESRによって測定することができます。

を選択的に検出するため、マイクロメートルスケールの空間分解能での測定が可能です。

超伝導磁束量子ビットによる電子スピンセンシングの高感度・高空間分解能という特徴は、生体試料測定への応用で特に威力を発揮します。数マイクロメートルという超伝導磁束量子ビットのサイズは典型的な細胞のサイズとちょうど同じ程度ですので、1つひとつの細胞を見分けられる空間分解能が得られることになります。また、超伝導量子ビットは量子計算機応用をめざした集積化も進んでいるので、この技術に応用し超伝導磁束量子ビットの2次元的なアレイを作製すれば、単一細胞レベルの空間分解能での元素イメージングを行うことも可能です。

本研究では、細胞単位でのイメージングへ向けた第一歩として、超伝導磁束量子ビットを用いて細胞中の微量金属元素を測定する原理検証実験を行いました。その結果、神経細胞中の鉄イオンを単一細胞レベルの空間分解能で測定することに成功しました⁽³⁾。

超伝導磁束量子ビットによる電子スピンの測定方法

超伝導磁束量子ビットを用いた電子スピン測定系の概略を図1に示します。超伝導磁束量子ビットと測定対象の神経細胞を希釈冷凍機の中に設置し、実験は200 mK以下（-272.95℃以下）の温度で行いました。生体試料をこのような極低温まで冷却して

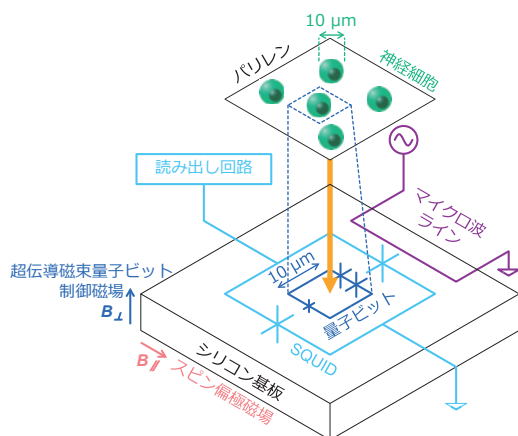
測定することはほとんどありません。生体と低温という組合せから、神経細胞の様子が低温では変わってしまい、有益な情報が得られないのではという懸念があるかもしれません。しかし、本研究の測定のターゲットは試料中の金属イオンですので、低温でも測定は可能です。また、電子スピンの測定では、一般的な特性として温度を下げるほど感度が高くなるので、量の少ない金属イオンを測定するには、低温環境のほうが望ましいといえます。

超伝導磁束量子ビットは、シリコン基板上に作製しました。図1のとおり、超伝導磁束量子ビットはジョセフソン接合^{*4}（図中では×記号で表しています）を3つ含むループ状の素子で、ループを流れる左回り・右回りの電流を2つの量子状態に対応させることで、量子2準位系を構成します。さらに、超伝導磁束量子ビットは超伝導量子干渉素子（Superconducting Quantum Interference Device：SQUID）^{*5}に囲まれています。このSQUIDは常温に設置した増幅器・アナログ-デジタル変換器・PC等に接続されていて、超伝導磁束量子ビットの量子状態を読み出します。超伝導磁束量子ビットの2準位間の遷移周波数は、ループを貫く磁束を変えることにより変化します。この磁束は、超伝導磁束量子ビット近傍に取り付けた超伝導磁石から磁場（図1の超伝導磁束量子ビット制御磁場）を与えることにより制御します。

超伝導磁束量子ビットによる電子スピン測定の原理を図2に示します。先述のとおり、通常、超伝導磁束量子ビットは外部の

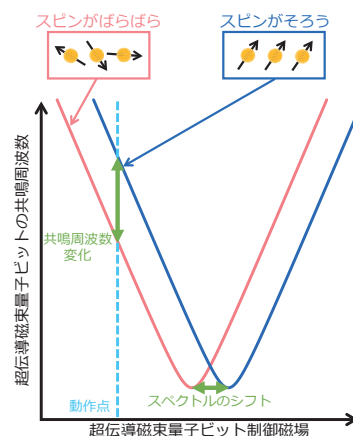
超伝導磁石により制御しますが、超伝導磁束量子ビットの近傍にスピンを持つ試料があり、それが磁場の源となる場合も同じように超伝導磁束量子ビットの共鳴周波数を変化させます。試料に含まれる磁性体が常磁性^{*6}を示すものであれば、試料の磁化、すなわち試料に含まれる電子のスピンそのものは温度と試料に印加する磁場で変えることができます。低温・強磁場の場合、熱揺らぎにより電子スピンのばらばらな向きを向く効果より、磁場の向きに沿って電子スピンのそろそろ効果が大きく、結果として試料は大きな磁化を示します（図2の青枠）。一方、高温・低磁場の場合、熱揺らぎにより電子スピンのばらばらな向きを向くため、試料は小さな磁化を示します（図2の赤枠）。試料の磁化が変化することにより超伝導磁束量子ビットのループを貫く磁束が変化するので、超伝導磁束量子ビットの共鳴周波数が変化します。したがって、磁場（図1のスピンの偏極磁場）や温度を変えながらある動作点での超伝導磁束量子ビットの共鳴周波数の変化、もしくはそれに対応するスペクトルの磁場軸方向のシフト量を測定することにより、試料の磁気的性質を明らかにすることができます。ここ

- *4 ジョセフソン接合：超伝導体の間にごく薄い絶縁膜を挟んだ構造の素子で、超伝導量子回路においては非線形素子として使われます。
- *5 超伝導量子干渉素子：2つのジョセフソン接合を持つループ状の素子で、高感度磁束計として利用されます。
- *6 常磁性：外部から磁場を与えない場合に電子スピンの向きはばらばらで、磁場の印加により電子スピンの向きがそろい、磁化を示す磁性のこと。



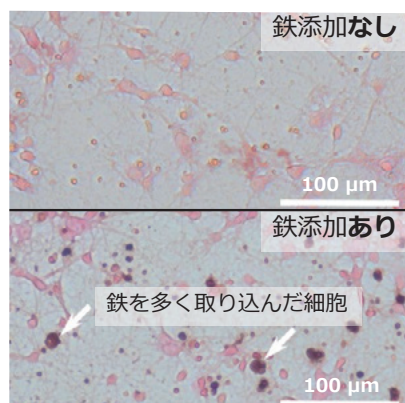
※図は原著論文⁽³⁾のものを[クリエイティブ・コモンズ・ライセンス（表示4.0 国際）]を改定して作成しました。

図1 超伝導磁束量子ビットを用いた電子スピン測定系の概略図



※図は原著論文⁽³⁾のものを[クリエイティブ・コモンズ・ライセンス（表示4.0 国際）]を改定して作成しました。

図2 超伝導磁束量子ビットによる電子スピン測定の原理



※図は原著論文⁽²⁾のもの〔クリエイティブ・コモンズ・ライセンス（表示4.0 国際）〕を改変して作成しました。

図3 通常の培地および鉄を添加した培地で培養した神経細胞の光学顕微鏡写真

で、スピンのそろい具合を制御する磁場は図1の超伝導磁束量子ビット制御磁場とは異なることに注意が必要です。

実際に測定を行う場合、対象となる試料と超伝導磁束量子ビットの距離を小さくするほど両者の磁氣的相互作用が大きくなるため、電子スピン検出の感度が高くなります。しかし、測定対象である生体試料は、場合によっては液体を含む場合もあり、絶縁性が期待できません。そのため、超伝導磁束量子ビットを正常に動作させるためには、両者の間に絶縁膜をはさむ必要があります。両者を十分絶縁しつつ、高い感度を実現するために距離を近づけるには工夫が必要です。そこで、生体適合性が高く、厚さが数マイクロメートルと非常に薄い高分子膜（パリレン）を絶縁に用いることでこの課題を解決しました。

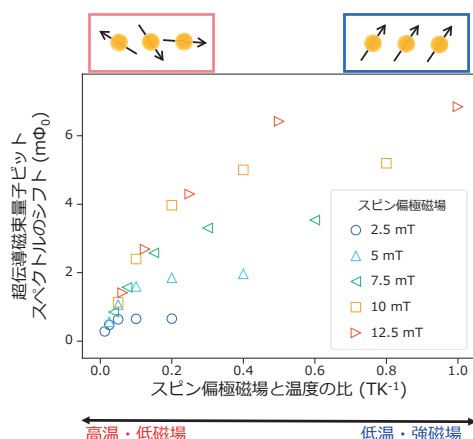
生体試料としては、ラットの海馬から採取した神経細胞を用いました。神経細胞はパリレン膜の上に直接培養しています。また、細胞に鉄などが多く含まれる神経変性疾患をはじめとする病変を模擬するため、培養は鉄イオンを添加した培地で行いました。図3に示したとおり、このような培養法を用いることにより通常の培地で培養したものに比べて鉄イオンを多く取り込んだ神経細胞を調製しました。

神経細胞を培養したパリレン膜は、超伝導磁束量子ビットを作製したシリコン基板の上に置き、測定を行います。超伝導磁束量子ビットのループサイズは $24 \times 6 \mu\text{m}^2$ の大きさで、神経細胞のサイズと同程度です。したがって、実験で得られたデータは単一

の細胞の性質を反映したものと考えることができます。

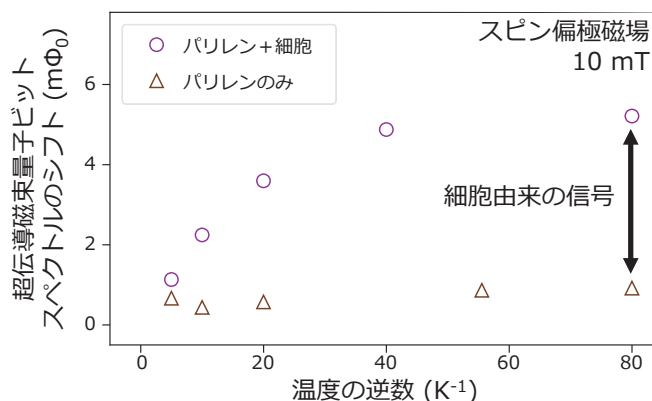
超伝導磁束量子ビットによる神経細胞の測定

はじめに、神経細胞の磁化を検出する実験を行いました。実験は、パリレン上に神経細胞を培養した試料に、いくつかの異なる磁場〔数mT（ミリテスラ）程度〕を印加した状態で試料の温度を変えながら、超伝導磁束量子ビットの共鳴周波数の変化に対応するスペクトルのシフトを測定することで行いました。図4から温度を下げる、または大きな磁場を印加するにしたがって超伝導磁束量子ビットのスペクトルが大きくシフトする、すなわち試料が大きな磁化を示すことが分かります。この結果は、試料に常磁性体が含まれている場合に期待されるふるまいと矛盾しないものです。した



※図は原著論文⁽²⁾のもの〔クリエイティブ・コモンズ・ライセンス（表示4.0 国際）〕を改変して作成しました。

図4 超伝導磁束量子ビットにより測定した神経細胞の磁化



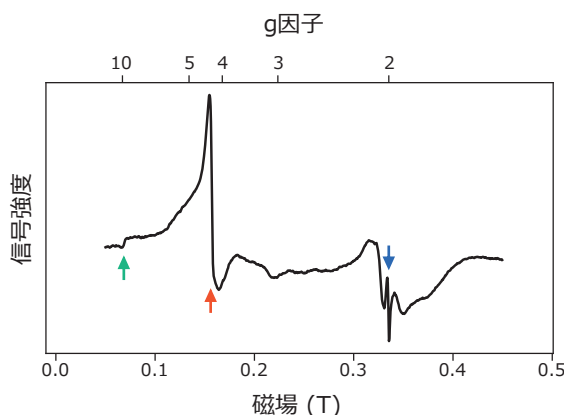
※図は原著論文⁽²⁾のもの〔クリエイティブ・コモンズ・ライセンス（表示4.0 国際）〕を改変して作成しました。

図5 パリレン上に培養した神経細胞とパリレン単体の磁化の比較

がって、神経細胞とパリレンのどちらか、もしくは両方に何らかの常磁性を示す物質が含まれていると考えられます。

次に、神経細胞とパリレンのどちらが磁性を示すかを検証するために、同じ実験条件でパリレンのみの測定を行いました（図5）。パリレンは炭素と水素から成る不對電子を含まない高分子膜であり、基本的には磁性を示さないものと期待されますが、電子線照射などのダメージによりわずかに磁性を示す場合があることが知られているため、このような対照実験が必要です。その結果、パリレンの磁化は神経細胞よりも有意に小さいことが分かりました。したがって、図4でパリレン上に培養した神経細胞から検出した磁化は、ほとんど神経細胞に由来するといえます。

ここまでの結果で、神経細胞に何らかの常磁性体が含まれていることは分かります。しかし、それがどの元素に由来するものな



※図は原著論文⁽³⁾のものを[クリエイティブ・コモンズ・ライセンス(表示4.0 国際)]を改変して作成しました。

図6 神経細胞の電子スピン共鳴スペクトル

のかは分かりません。そこで、低温でのESRを得意とする静岡大学の小野・堀研究室と連携し、さらに試料を分析しました。ESRスペクトルからは、g因子を得ることができます。この値をすでに知られている材料固有のg因子と比較することで、磁性の起源となる元素の同定が可能になります。

神経細胞の電子スピン共鳴スペクトルを図6に示します。このスペクトルにはg因子9.8, 4.3, 2.0に対応するピークがみられます。g因子9.8, 4.3は、細胞中の3価の鉄イオンに対応することが知られており⁽⁴⁾、ピークの大きさからこれが試料の磁化の主な起源だといえます。この結果と、これまでに超伝導磁束量子ビットによる測定で得られた結果を合わせることで、神経細胞中の鉄イオンを単一細胞レベルの空間分解能で検出したといえます。また、g因子2.0のピークは2価の銅イオンによるものと考えられ、量は少ないものの鉄以外の元素も磁化に参与していたことが分かります。

ここまで、超伝導磁束量子ビットを用いて、神経細胞中に含まれる金属イオンについて定性的な分析を行ってきました。さらに、超伝導磁束量子ビットを用いた磁化測定の結果からは、神経細胞中に含まれる金属イオンの定量も可能です。超伝導磁束量子ビットの共鳴周波数の変化量は磁化の大きさに対応します。したがって、別に行った電子スピンの濃度が既知の参照試料の実験結果と比較することで、共鳴周波数の変化を金属イオンの数に換算することができます。その結果、測定したラット海馬の神経細胞には乾燥状態で1 g当り8 μg の鉄

が含まれるという結果を得ました。これは、ヒトの脳細胞で行われた先行研究^{(4), (5)}で得られた2~34 $\mu\text{g/g}$ という値と、対象は異なるものの矛盾しない結果です。

今後の展望

超伝導磁束量子ビットを用いた量子センシング技術を応用することで、神経細胞中の金属イオンを単一細胞レベルの空間分解能で検出し、定性的・定量的に分析することに成功しました。

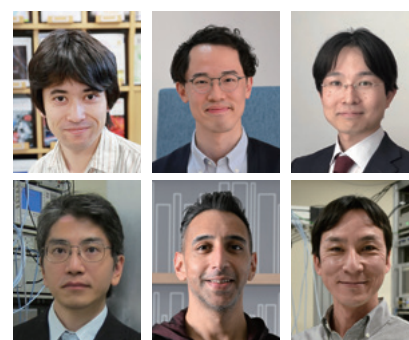
今後の課題としては、神経細胞のESRスペクトル測定を、超伝導磁束量子ビットを用いて単一細胞レベルの分解能で行うこと、また、超伝導磁束量子ビットをアレイ化することにより組織中の細胞に含まれる金属イオンの2次元イメージングを行うことなどが挙げられます。

参考文献

- (1) R. P. Budoyo, K. Kakuyanagi, H. Toida, Y. Matsuzaki, and S. Saito : "Electron spin resonance with up to 20 spin sensitivity measured using a superconducting flux qubit," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 116, No.19, 194001, May 2020.
- (2) 齊藤・水野・竹中・樋田・角柳 : "超伝導量子回路に基づく量子情報技術," *NTT技術ジャーナル*, Vol.35, No.4, pp.18-22, 2023.
- (3) H. Toida, K. Sakai, T. F. Teshima, M. Hori, K. Kakuyanagi, I. Mahboob, Y. Ono, and S. Saito : "Magnetometry of neurons using a superconducting qubit," *Commun. Phys.*, Vol. 6, No. 19, Feb. 2023.
- (4) P. Kumar, M. Bulk, A. Webb, L. van der Weerd, T. H. Oosterkamp, M. Huber, and L. Bossoni : "A novel approach to

quantify different iron forms in ex-vivo human brain tissue," *Sci. Rep.*, Vol. 6, 38916, Dec. 2016.

- (5) L. H. P. Vroegindeweij, L. Bossoni, A. J. W. Boon, J. H. P. Wilson, M. Bulk, J. Labra-Muñoz, M. Huber, A. Webb, L. van der Weerd, and J. G. Langendonk : "Quantification of different iron forms in the aceruloplasminemia brain to explore iron-related neurodegeneration," *NeuroImage : Clinical*, Vol. 30, 102657, April 2021.



(上段左から) 樋田 啓 / 酒井 洸児 / 手島 哲彦

(下段左から) 角柳 孝輔 / Imran Mahboob / 齊藤 志郎

超伝導量子回路の応用として量子計算機が特に注目を集めていますが、量子センシングも応用が期待される分野の1つです。超伝導とバイオという意外な組合せに面白さを感じてもらえれば幸いです。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
企画担当
TEL 046-240-3312
FAX 046-270-2358
E-mail btl-kensui@ntt.com



主役登場

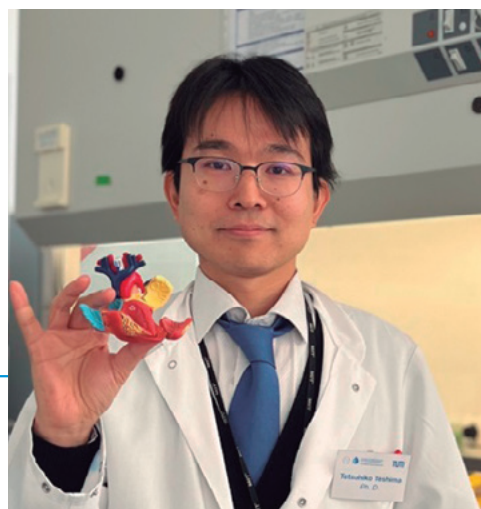
チップ上で心臓を再現する

手島 哲彦 Tetsuhiko Teshima

NTT Research, Inc.

Medical and Health Informatics (MEI) Laboratories

Senior Research Scientist (主任研究員)



ヒトの身体は複数の臓器・器官から成り、37兆個ほどの細胞から構成されています。その1つひとつの細胞は外部からのさまざまな化学的・物理的なシグナルを受容し、それらに応じて適切な生理応答を示しますが、その細胞に対して影響する仕組みはいまだ解明されていない謎に満ちています。私は大学生のころより細胞の持つ多様な謎に魅せられ、獣医学や細胞生物学、バイオイメージング技術などを学んできました。そんな私がNTTで細胞の研究を継続しているのは、細胞をデータや情報の宝庫であると考え、情報通信に寄与する研究を展開できると確信したからです。もし細胞の生理応答を高感度に検出するセンサを開発し、生命動態にかかわる情報の時空間的かつ定量的なデータベースを構築できれば、動的システムとしての生命の理解を深化でき、将来的には病気の治療や予防に役立てることができそうです。

生体情報を取得する高精度のセンサやデータ解析プラットフォームを開発するためには、基礎的な生物学の手法だけでなく、材料科学や微細加工技術、バイオインフォマティクスなどの物理、化学、情報のさまざまな知見を結集することが必要不可欠です。私の前職であるNTT物性科学基礎研究所（物性研）では新機能材料やナノテクノロジーのエキスパートの方々から最先端の

知見やノウハウを学ぶことができました。またhitoe®と呼ばれるウェアラブルデバイスの研究開発チームでは、機能性材料の基礎研究から生理学的データの解析手法、商品化に至るまでのダイナミックな研究開発の展開を目の当たりにしました。その貴重な経験を基に、NTT Research, Inc.では、2020年よりミュンヘン工科大学において研究拠点を立ち上げ、電子工学や化学、生物物理などさまざまなバックグラウンドを持つ研究者や大学院生と協力して、循環器系バイオデジタルツインを支援するバイオセンサの開発に取り組んでいます。

私が現在研究のターゲットにしている心筋細胞はその範囲がとても広く、単一細胞レベルから体内にある実際の心臓組織やその周囲の迷走神経組織など臓器レベルにまでわたります。中でも実際の心臓ほど複雑な形状ではなく、ヒトiPS細胞由来の心筋細胞を三次元的に組み立てて分化させた細胞の凝集塊である心臓オルガノイドは、ミニチュア心臓として機能するため、創薬や個別化医療の疾患モデルとなるバイオデジタルツインの構築に不可欠です。ここで特筆すべき点として、心臓オルガノイドを単なる球状だけでなく、シート状や筒状、円錐状など特異的な三次元形状に加工したり、結節や心筋の細胞を所望の位置にパターンニングしたりすることで、より本来の心臓に

近い電気生理的振る舞いを誘導できることが挙げられます。

現在、私たちのチームでは、心臓オルガノイドを任意の形状に組み立て、そこから微弱な細胞外電位を計測し、時系列で三元マッピングできる多電極アレイシステムの開発に取り組んでいます。これにより、各種薬物の作用に対して濃度依存的に変調する電気シグナルの振幅や頻度を計測データベース化し、不整脈モデルのミニチュア心臓を用いた病態研究や薬効評価へと応用しています。しかし、心筋細胞の分化誘導手法やペースメーカー伝導系を誘導する構造最適化など、いまだ改善するべき点も多く、技術的な課題が山積している状況です。そのため、活発な議論ができるダイバーシティの高いチームを構成し、これまで培った材料化学、微細加工技術、電気化学、情報工学などの工学的アプローチも積極的に取り入れることで、独創的な心臓オルガノイドの操作技術を通じたチップ上でのミニチュア心臓の再現に日々取り組んでいます。2030年を目処に電気生理学的な計測データベースを構築し、循環器バイオデジタルツインのための心臓の変調モデルを実現して再生医療分野に技術革新をもたらすことができるよう、引き続き共同研究先の物性研やハーバード大学との連携をさらに強化しながら、研究を推進していきます。

個人にも寄り添う 連鎖型スマートシティを実現する 「街づくりDTC」

本特集では、「街づくりDTC」の技術要素である、

「ドメイン(空調・店舗・ロボット配送等)ごとにサービスを設計し個別デジタルツイン(DT)をつくる」

「DT間を媒介する人のDTをつくる」「複数のサービスで価値の両立と、人モノ環境の制御を行う」について、

代表的なドメインでの取り組みから複数サービス間の全体最適化の取り組みまでを紹介する。

デジタルツインで実現するスマートシティ ————— 36

デジタルツインの仕組みを活用した、スマートシティに関する取り組みについて紹介する。

デジタルツインの連鎖が生み出す個人に寄り添う街区体験 ——デジタルツイン統合基盤・統合アプリ ————— 38

複数のデジタルツインの予測値を基にトレードオフのバランスが取られた状態を計算する「デジタルツイン統合基盤」と行動前後の文脈を踏まえた個人に寄り添うサービスの「統合アプリ」を紹介する。

個人の快適性と省エネを両立したパーソナル空調 ————— 43

エネルギー消費の増加抑制と個々人の快適性を両立させる空間制御の取り組みについて紹介する。

スマートストアの店舗内行動データを活用した 販促施策の最適化 ————— 47

スマートストアの店舗内で得られる購買データと行動データを活用し、効率的に販促・店舗改善施策を導くための運営効率化技術について紹介する。

AI

デジタルツイン

スマートシティ

デジタルツイン統合基盤

AI 価値基盤

特集

モバイルオーダによるロボット配送サービス ————— 51

「ロボット最適制御技術」を活用し、ロボットの配送所要時間を正確に予測しながら最適な走行経路を選択する「ロボット配送」の取り組みについて紹介する。

SDSCの要素技術を集約し価値化を加速するAI 価値基盤 ——— 55

スマートデータサイエンスセンタ（SDSC）の各種ドメインにおけるソリューションからコアとなる技術や知見を集約したAI価値基盤を紹介する。

仮想市場を活用した農産物流通の効率化 ————— 61

農産物の需要や供給の情報を集約し、全国規模で商流と物流を最適化できる仮想市場の構築について紹介する。

電力安定供給に向けた日射量予測による 太陽光発電計画の精緻化 ————— 65

気象情報と各地の発電実績を組み合わせることで全天日射量を高い精度で観測し、予測を補正する技術について紹介する。



デジタルツインで実現するスマートシティ

デジタルツイン（DT）の仕組みを活用した、スマートシティに関する取り組みを解説します。本特集では、全体最適化されたスマートシティの考え方について概説したのち、デジタル化されたデータとAI（人工知能）を活用した各種サービス、およびそれらが相互に連鎖することで全体最適化を実現する統合基盤、さらには広域でエリア連携するサービス事例、そしてこれらのドメイン横断的なサービス提供を容易に実現するためのAI価値基盤について順に解説します。

キーワード：#デジタルツイン、#AI、#スマートシティ

しゃけ いっぺい

社家 一平

やまもと ちひろ

山本 千尋

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所/
NTTスマートデータサイエンスセンタ

はじめに

現在の社会には、健康、教育、災害、貧困、人口問題、気候変動など、解決すべき課題が数多く存在します。こうした課題に対して、人類が心得るべき目標として「SDGs（持続可能な開発目標）」が提唱されています。また日本においては、めざすべき未来社会の姿が「Society 5.0」として定義されています。さらに、コロナ禍を経て生活様式が変化し、ユーザーニーズの多様化に合わせた新しいサービス提供も求められています。このような状況下では、各産業分野における提供価値が、これまでの常識から大きく変化するとともに、個別の産

業にとどまらない分野横断でのサービスのかたちとなって、複雑化していくと考えられます。

NTTスマートデータサイエンスセンタ（NTTコンピュータ&データサイエンス研究所 スマートデータサイエンス研究プロジェクト）では、このような背景の下、デジタルツイン（DT）による社会変革に取り組んでいます。データとAI（人工知能）を活用した新しいサービス創造により産業発展と社会課題解決をめざします。本特集では、中でも特にスマートシティに向けた取り組みを紹介します。検討の方向性は、(a)住宅・ビル街区単位での最適化から、(b)複数の街区をまたぐ都市の最適化、さら

に(c)全国単位の需給を含めた最適化です(図)。

スマートシティに向けた取り組み

最終的なゴールとして実現したい価値は次の2つです。

- ① 社会と人が融合し、全体が最適化されたスマートシティ：個人やコミュニティ、さらにさまざまな産業や地球環境に至るまで、相互に価値が最大化される。将来的には空間的にも仮想的にも広域化され、街ごとの特徴を活かして幸福と繁栄が持続する (Social-wellbeing & Flourish)。

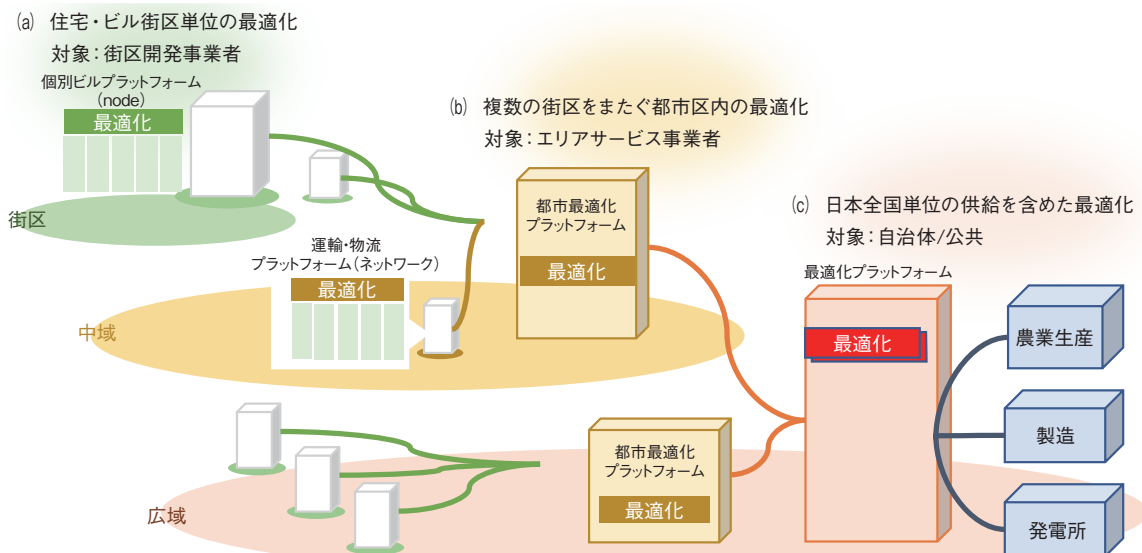


図 AI間連携による最適化の具体化

② 多様化するニーズにこたえ、個人にとっての価値が最大化されたスマートシティ：潜在的な個人のニーズとその日々の変化に寄り添い、自然なかたちで人々の生活をより良くしてくれる (Personalize & Well-being)。

これらの仕組みと具体的なサービスを提示するための取り組みを進めています。これらはすべて、DTの仕組みを活用します。現実世界の状態をサイバー空間上にモデル化して再現し、さまざまな状態変化をシミュレーションすることで現実世界に価値をフィードバックします。

検討単位(a)、(b)のようなビル街区や複数街区のエリアは、エネルギー、小売(店舗、飲食)、不動産(ビル運営、オフィス、住居)、モビリティなどの複数の産業ドメインが重なり合い価値を提供するフィールドです。その点に着目すると、街区全体を1つのDTで構成することは、実はあまり現実的ではなく、産業ドメインごとにDTを構成し、それぞれのシミュレーションを掛け合わせるアプローチで街区単位のDTを構成します。そうすることで、個人の暮らしや行動を快適にするサービスを提供しながらエネルギー消費や設備利用の最適化、フードロスの削減といった、街のオーナーや運営者ならびに社会課題に対しても同時にさまざまな価値を実現していくことができます。しかし、実際に行うとなると、街区内の人の行動や状態と、建物内の状態(店舗やオフィスなど)および社会環境(エネルギーなど)といったさまざまな要素が絡み合う難しさがあります。

例えば、省エネをめざすと人の快適性が失われ、店舗のフードロスをめざすと、売れ残りリスクのために仕入れ量を制限してしまい、お客さまにとって買いたいものが買えない事態が生じ得ます。このように、1つのニーズに特化して最適化を図ると、他のニーズを満たせない状況に陥る場合があります。街区ではさまざまなステークホルダーのサービスが存在し、複数のニーズが複雑に絡み合う空間です。サービスごとに別の最適化指標(KPI)があり、人々の個別の行動が別のサービスや外部環境に影響して、さらに回り回って、他の人や他のサービスにも影響を与えます。もしも、その構図全体をなるべく俯瞰で見ることができ、

制御できるようになれば、理想的には誰にとっても快適な環境・過ごしやすさを提供することができるようになるのではないかと考えています。

複数のサービス間の影響(連鎖)を考慮し、個人単位での行動の予測、それによってもたらされる環境・物の変化の予測、さらに影響を与えられたものが相互に与えられる影響の予測を使って、全体最適化を導き出し、制御ができるようにする取り組みを「街づくりDTC」と呼んでいます。それぞれの産業ドメインで考えられるさまざまな未来のサービスを想定して、提供される価値を具体的に定義することから始めて、街のDTという広い概念を具体化します。街で提供される価値とは、街を訪れる来街者やワーカー、住居に暮らす居住者のユーザ体験(User eXperience: UX)に加えて、ビルオーナーや街区管理者、店舗やオフィスなどのテナント事業者が、自らのお客さま(来街者)や従業員(ワーカー)に対して、より良い体験を継続的に提供できるように支援するサービスも含まれます。それらすべての提供価値を、広義にUXと定義すると、街づくりにおけるデータ駆動とは、より厳密にはUX駆動ととらえることができ、まずはじめに未来のUX設計を行うことが重要となるわけです。

検討単位を全国規模まで広げた広域での最適化(c)については、広域で需要・供給の影響を及ぼし合う産業ドメインに着目する必要があります。例えば、人の生活や行動に密着して、需要側の観点で最適化を行うことが有用なドメイン(エネルギー利用、小売、不動産、モビリティなど)は、その利便性や快適性に着目した最適化を行うにあたり、全国規模の広域で考えることはそれほど重要ではありません。一方で、供給(量や種類、タイミング、生産場所など)およびその流通を考慮して、需給のマッチングを最適化するような産業、すなわちサプライチェーンの全体を考慮すべき製造業、農業、電力エネルギーなどの産業もあります。これらは、工場や生産地、発電所などの供給源と需要家との間で、量や種類や配送経路の最適化などの問題が生じます。そこでこれらの産業については産業別に、サプライチェーンの最適化プラットフォーム(PF)をDTで実現することに取り組んで

います。

おわりに

これまで、(a)に関する取り組みとして、ビル共用部の空調最適化、フードロスゼロ店舗などの個々のサービスを、DTを用いて実現してきましたが、本特集では、パーソナル空調サービス、店舗運営最適化と1to1マーケティング店舗、モバイルオーダーによるロボット配送サービス、およびそれらの連鎖による全体最適化を実現するDT統合基盤と統合アプリを用いたおもてなしサービスについて概説します。次に、(c)に関する取り組みの中で、農業流通の仮想市場化、電力需給最適化を紹介します。最後に、これまでこのようにさまざまなドメインで、複数のAIモデルの開発とAI間連携、およびそれぞれのサービス化に向けた課題抽出と解決を行ってきたことにより、ドメイン横断してサービスを俯瞰することにより得られた知見を、AI価値基盤として具現化しており、それについて概説します。



(左から) 社家 一平/ 山本 千尋

比類なき体験を実現できる未来の街を、街づくりDTCで具体的に実現していきます。

◆問い合わせ先

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所/
NTTスマートデータサイエンスセンタ
E-mail sdsc@ntt.com



デジタルツインの連鎖が生み出す個人に寄り添う 街区体験——デジタルツイン統合基盤・統合アプリ

街区にはさまざまなステークホルダーが存在し、それらの利害関係にはトレードオフがあります。デジタルツイン統合基盤は、複数のデジタルツインの予測値を基にトレードオフのバランスが取られた状態を計算することで、Social Well-beingの実現をめざします。また、複数サービスにまたがる行動を1つのIDで把握することにより、行動前後の文脈を踏まえた個人に寄り添うサービスを統合アプリが提供します。

キーワード：#街づくりDTC, #デジタルツイン統合基盤, #統合アプリ

いとう じゅん
伊藤 淳
さとう ひろゆき
佐藤 弘之
ほしの あい
星野 安泉

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所/
NTTスマートデータサイエンスセンタ

デジタルツインコンピューティングによる街区の全体最適化

街区は人・モノ・環境が複雑に相互影響を与えながら成り立っています。そのため、1つのデジタルツイン（DT）で街区を表現することは困難であると私たちは考えています。街区を1つのDTで表現する代わりに、私たちはまず街区を構成する産業ドメインごとにDTをモデル化し、次に複数のDT間を媒介する人のDTをモデル化し、最後にデジタルツインコンピューティング（DTC）によりDTを連鎖^{*1}させ相互影響をモデル化する、というアプローチを取ります（図1）。

DTはそれぞれ異なる目的を持つため、DTを独立に動作させるとDTどうしで競合する可能性があります。例えば、飲食店のDT（飲食フードロスDT）は、来店者数やメニューごとの販売数の予測値と実績値の差分に応じてフードロスが発生するととらえており、フードロスが最小となることを目的としますが、フードロス抑制のために個人の嗜好と異なる飲食店へ来店させることは、個人の満足度の最大化を目的とする人のDT（個人サービスDT）と競合します。このように、フードロスの抑制と個人の満足度はトレードオフの関係にあり、フードロスの最小化と満足度の最大化を同時に実現することはできません。したがっ

て、フードロスと満足度がバランスした最適解を求める必要があります。

フードロスの最小化と満足度の最大化のように、目的関数が複数あるときにそれらがバランスした最適解を求めるような問題を多目的最適化問題^{*2}と呼びます。多目的最適化問題では最適解は一意に定まらず、複数の最適解が曲線（目的関数が2つの場合）または曲面（目的関数が3つ以上の場合）を形成します。この曲線・曲面をパレー

*1 単体で価値提供を行う機能群が相互に連動すること。

*2 多目的最適化問題：目的関数が4つ以上になる場合は、最適化がより困難になることから、多数目的最適化問題と呼び区別されます。

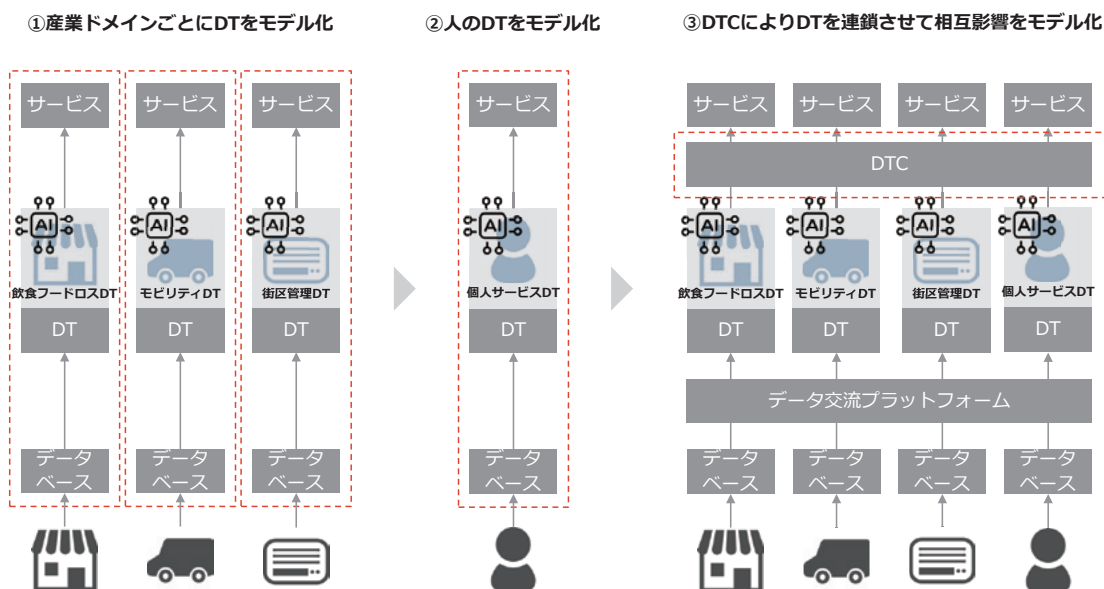


図1 街づくりDTCにおける街区モデル化のアプローチ

トフロントと呼びます（図2）。DTCによりDTを連鎖させ相互影響をモデル化するのは、連鎖する複数のDTに関する多目的最適化問題の定式化を行い、パレートフロントを求められるようにすることを意味します。

DTCの目的は、DT独立での最適化を超えた街区の全体最適化を実現することで新たな価値提供を行うこと、にあります。複数のDTのトレードオフのバランスが取られたSocial Well-beingな状態を多目的最適化問題を解くことによって求め、環境を自動制御したり、人に働きかけたりすることによって、その状態が実現するように現実世界へフィードバックします。そのためには、DTを接続して全体最適化計算を行い、計算結果を外部システムへAPI（Application Programming Interface）経由で提供する「基盤的機能」が必要となります。また、人に対して最適なタイミングに、最適なコンテンツを、最適なコミュニケーション方法で提供し、行動変容を促す「アプリケーション」が必要となります。

デジタルツイン統合基盤

デジタルツイン統合基盤（DT統合基盤）は前述の「基盤的機能」を実現したものです。街づくりDTCのアーキテクチャ⁽¹⁾におけるDTCレイヤに該当し、DT接続機能、全体最適化機能、APIなどを具備しています（図3）。DT接続機能はDTとの入出力インタフェースであり、各DTの予測値を全体最適化機能の入力として受け取ったり、環境制御（空調制御など）のために全体最適化計算結果を特定のDTへ出力したりします。全体最適化機能はDTCを行うDT統合基盤のコア機能です。APIは外部システムとの入出力インタフェースであり、顧客接点アプリで取得したログを受け取ったり、人に働きかけるために全体最適化計算結果を顧客接点アプリへ出力したりします。

全体最適化機能の課題は大きく2つあります。1つは連鎖する複数のDTに関する多目的最適化問題の定式化を行うこと、もう1つは現実的な時間内でパレートフロン

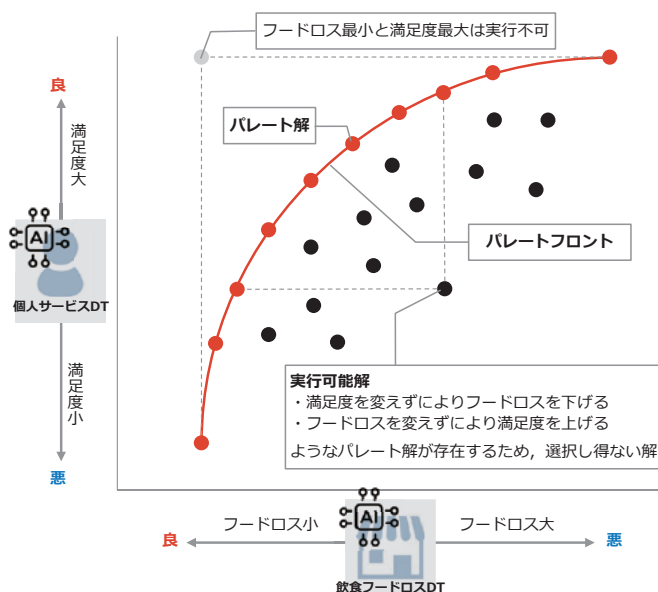


図2 フードロスと満足度のパレートフロント

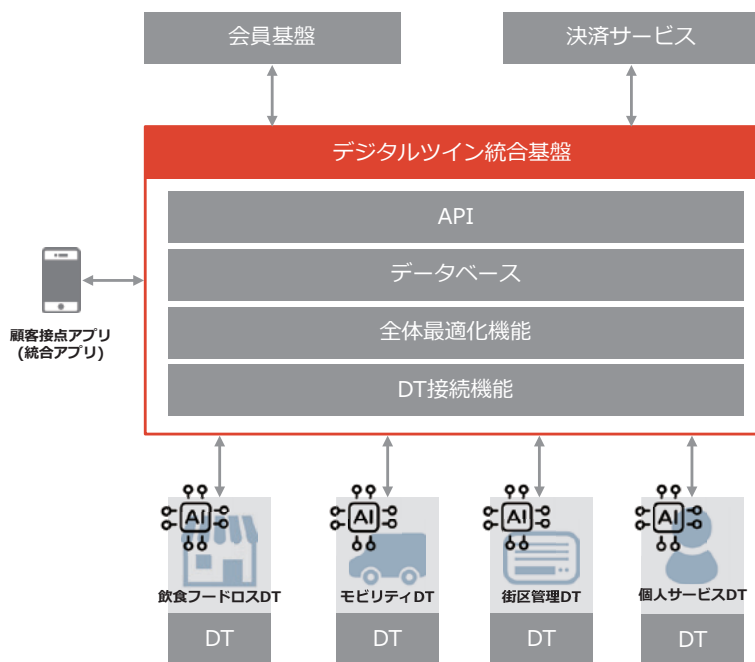


図3 デジタルツイン統合基盤の構成図

トを求めること、です。

まず定式化は、接続されるDTの種類や数、複数DTのバランスを取った結果をどのように具体的なサービスとして価値提供していくか、などに依存して変わるものです。DT統合基盤にDTを接続すれば直ちに全体最適化が行われるのが理想的ですが、人・モノ・環境の複雑な相互影響を自動的

に読み解くことになり、実現は困難です。そのため私たちは、具体的なサービスとして「ランチ推薦」や「フリーアドレスの席推薦」などを想定し、定式化を行いました。これらの詳細は事例として後に記述します。

次に現実的な時間内でのパレートフロントの求解は、全体調停・部分変更の2つに

全体最適化を分けることにより実現しました。全体調停は夜間や早朝など、各DTに対応する現実世界のオブジェクト（飲食店や人など）が動作していない状態で実行され、各DTの予測値を基に終日の動作計画を立てる計算処理です。また、部分変更は、各DTに対応する現実世界のオブジェクトが動作している状態で事前に設定されたトリガー条件（フードロスがしきい値以上など）に応じて実行され、全体調停で作成した動作計画からの差分を補正する計算処理です。全体調停・部分変更により、全体の動作計画を立てながらも状況に応じて一部の動作計画変更を行うことが可能になります。これにより、トリガー条件に合致するたびに全体調停が繰り返され、前回の計算処理が完了しないまま次の計算処理が走ってしまい、現実的な時間内で計算処理が完了しない状況を抑制します。

統合アプリ

統合アプリは前述の行動変容を促す「アプリケーション」を実現したものです。街づくりDTCのアーキテクチャ⁽¹⁾や図3における顧客接点アプリに該当します。街区

ユーザに向けて、ランチ推薦、フリーアドレスの座席推薦、パーソナル空調制御、モバイルオーダーによるロボット配送、セルフケアサポートなどのサービスが提供されます（図4）。

DT統合基盤で想定したSocial Well-beingな状態を実現するためには、人に想定どおりの行動をとってもらう必要があります。過去のサービス利用ログを基にユーザの嗜好をとらえ、嗜好に基づく推薦により行動を促すことはこれまで広く行われてきました。しかし、複数のサービスが提供される街区において、街区での価値体験を向上させることを考えた場合、サービス単位でこれを行うのでは不十分です。複数のサービスをまたぐユーザの価値体験（バリュー）を一連の行動軌跡（ジャーニー）として連結してとらえ、サービスを横断したユーザ嗜好の把握や、サービス利用の推移を基にしたユーザ行動の予測により、街区の価値体験を向上させることができると考えています。これを私たちはバリュージャーニー型行動予測と呼びます。

バリュージャーニー型行動予測を実現するためには、複数のサービスを利用するユーザ行動を1つのIDで連続的にとらえる必

要があります。統合アプリはこれを実現するものであり、DT統合基盤に接続された会員基盤で認証を行うことで、DTやDTCが提供するサービスを同一IDでワンストップ利用することができます。複数サービスの利用ログは統合アプリを通じて学習データとしてDT統合基盤に蓄積され、行動前後の文脈を踏まえた先読み行動予測が可能となります。

次に、DT統合基盤と統合アプリを利用した具体的な事例として、「ランチ推薦」と「フリーアドレスの座席推薦」を紹介합니다。

事例1：ランチ推薦

ユーザが出社したタイミングやランチに向かうタイミングで、統合アプリがおすすめのランチを通知します。個人サービスDT、飲食フードロスDT、モビリティDT^{*3}という3つのDTの全体最適化によ

*3 モビリティDT：移動体に設置されたセンサ情報などを用いて構築される移動体のDT。ランチ推薦におけるモビリティDTは配送ロボットをDT化しています。



図4 統合アプリの画面

り、ユーザごとの推薦ランチ（時間・メニュー・手段）を決定します。また、推薦により来店者数が変化することを踏まえ、街区管理DTが空調を制御します。全員が推薦どおりにランチをとれば、満足度、フードロス（メニュー販売数の予測値と実績値の差分）、ロボット配送の利用率がバランスした全体最適な状態が実現します。また、人流の増減予測に合わせて空調をプロアクティブに制御することにより、熱的快適性とエネルギーコストがバランスした全体最適な状態が実現します。

ランチ推薦では、ユーザの満足度に対して、フードロスやロボット配送の利用率がペナルティとして働くこととみなし、3つのDTに関する多目的最適化問題を線形加重和法^{*4}により単目的最適化問題に変換することで定式化を行いました。単目的最適化では最適解が唯一に定まるためパレートフロントは形成されませんが、解空間が凸集合であれば、重みを変化させた際に得られる最適解の集合がパレートフロントとなります。街区オーナーは「ユーザの満足度が高い街区にしたい」「フードロスが少ない街にしたい」などの街区コンセプトを持っていると考えられるため、重みの強弱を変化

させることにより街区コンセプトの実現に近づけられるような設計としました。

図5は、ユーザ3人に3メニューのいずれかを推薦する際のイメージです。全員ラーメンが好みであり、寿司とパンはそれぞれで好み異なります。鮮魚を扱う寿司でフードロスが発生しそうであり、ロボット配送利用率は余力がある状況とします。全体最適化結果は図5右側の推薦ランチのとおりです。満足度重視型の街区に比べ、バランス型の街区では満足度を大きく損なうことなくフードロス抑制とロボット配送利用率向上を実現しています。満足度をさらに減らしてでも、フードロスを抑制したい・ロボット配送利用率を高めたいことも考えられ、街区オーナーは重みの強弱によりこれを調節できます。ロボット配送利用により飲食店に向かう人流が減少するため、飲食店フロアの空調を弱めるなど空調制御に反映できます。

なお、ランチ推薦は、2023年2月から3月までアーバンネット名古屋ネクスタビルにて実証実験が行われ⁽²⁾、4つのDTによる連鎖が期待どおりに動作することを確認しました。

事例2：フリーアドレスの座席推薦

ユーザが出勤したタイミングなどで、統合アプリが効率良く業務ができるフリーアドレスの座席を推薦します。個人サービスDT、街区管理DTという2つのDTの全体最適化により、推薦座席を決定します。全員が推薦どおりに着席すれば、熱的快適性（快適に業務できる温度）と一緒に働きたい人との距離がバランスした全体最適な状態が実現します。

フリーアドレスの座席推薦では、一緒に働きたい人との距離に対して、熱的快適性が制約条件として働くこととみなし、2つのDTに関する多目的最適化問題を制約法^{*5}により単目的最適化問題に変換することで定式化を行いました。制約法は、制約条件を複数回変更してみないとパレートフロン

^{*4} 線形加重和法：多目的最適化問題において、各目的関数に重みを乗算して総和をとったものを新しい目的関数とし、単目的に変換する方法。

^{*5} 制約法：多目的最適化問題において、複数の目的関数のうち1つを目的関数とし、その他の制約条件として、単目的に変換する方法。

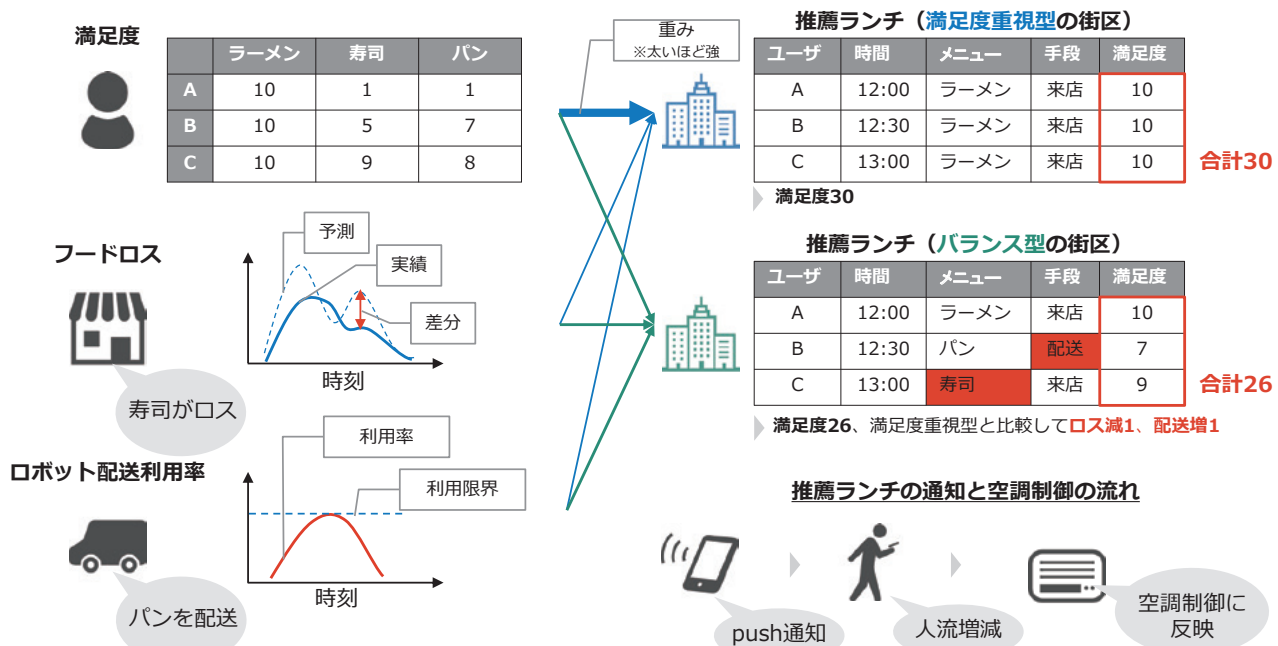


図5 ランチ推薦イメージ

グループごとの温度嗜好と一緒に働きたい関係性

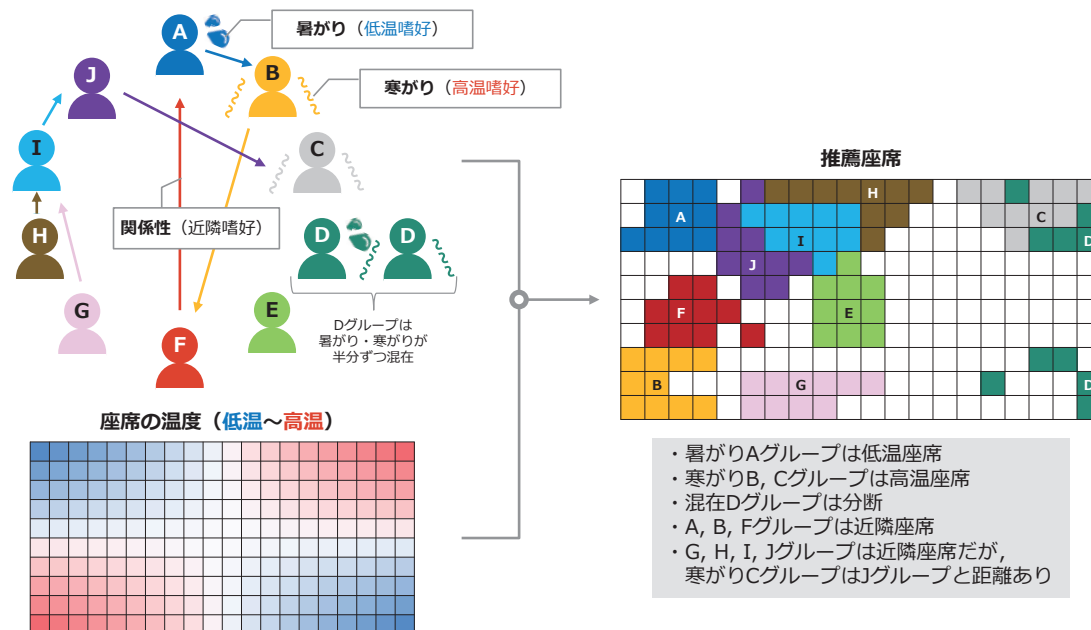


図6 フリーアドレスの座席推薦イメージ

トが分からない、制約条件が厳し過ぎると解が求まらないなどの問題がありますが、熱的快適性をユーザの希望温度と推薦座席における温度の差で表現すると、許容できる温度差の範囲は事前にある程度の想定ができるため、このユースケースにおいては問題にはならないと判断しました。また、必ずしも推薦どおりに着席や座席移動が行われないことを考慮し、推薦座席への移動率はユーザによって異なるという仮定のもとで最適化計算を行い、移動率の高いユーザに移動率の低いユーザの近傍を推薦するように定式化をしました。

図6は、1グループ当り10人からなる10グループを配席する際のイメージです。人は暑がり、寒がりといった温度嗜好があり、同一グループ内や、矢印で示されるグループ間では、一緒に働きたい関係性があるものとします。また、空調はあえて均一に冷暖房を行わずに温度にむらが発生する状況を許容し、エネルギーコストを下げている状態とします。全体最適化結果は図6右側の推薦座席のとおりです。暑がり、寒がりのグループは座席の温度に合わせて配席されているほか、一緒に働きたい関係性があるグループどうしは近隣に配席されている

ことが確認できます。

なお、フリーアドレスの座席推薦は、2023年11月よりNTTグループ会社の所有オフィスビルにて実証実験が行われています。

今後の展開

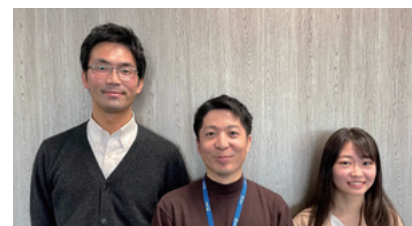
産業ドメインごとのDTの増加に伴い、トレードオフの解決が必要なユースケースも増加していくと考えています。具体的な街づくりDTCのモデル化を今後も積み重ねるとともに、共通機能の洗い出しと集約により、基盤としての汎用化も進めていきます。また、DT統合基盤が想定したSocial Well-beingな状態を実現するためには、人に想定どおりの行動をとってもらう必要があります。情報推薦のみのアプローチでは限界があるため、ナッジやインセンティブなど行動変容がより発生するような適切なアプローチを統合アプリに搭載していきます。

複数のDTが調和することで街区全体がサイバー空間上にかたちづけられ、個人に寄り添うおもてなし街区体験がフィジカル空間で得られるようなスマートシティの実

現をめざして、今後も研究開発を推進します。

参考文献

- (1) 山本・社家・深田・上野：“「街づくりDTC」によるデータ駆動・連鎖型のスマートシティ,” NTT技術ジャーナル, Vol. 32, No. 11, pp. 77-83, 2020.
- (2) 神谷・秦・朝日・星野：“アーバンネット名古屋ネクスタビルにおける「街づくりDTC®」の実証,” ビジネスコミュニケーション, Vol. 60, No. 2, pp. 18-20, 2023.



(左から) 伊藤 淳 / 佐藤 弘之 / 星野 安泉

街区で提供されるサービスごとに構成されるDTと、それらを連鎖させるDTCにより、個々のDT単位での最適化を超えた街区全体の最適化を実現することで、「街づくりDTC」は新たな価値を提供します。

◆問い合わせ先

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所 /
NTTスマートデータサイエンスセンタ
E-mail sdsc@ntt.com



個人の快適性と省エネを両立したパーソナル空調

現状のオフィスは画一的な空調制御がなされており、人によって寒く感じたり暑く感じたりするなど快適な環境を空間が提供できていません。そこで私たちは、個々人の好みに合った温度の空調を提供することで、オフィスの利用者がより働きやすく快適でパフォーマンスを発揮できるオフィスの実現をめざしています。本稿では、消費エネルギー削減と個々人の快適性を両立させる空間制御の取り組みについて紹介します。

キーワード：#空調制御、#AI、#パーソナライズ

み え だ さ と し
三 枝 知 史
さ か い そ う た
酒 井 聡 太
は た た か ひ ろ
秦 崇 洋

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所/
NTTスマートデータサイエンスセンタ

はじめに

NTTスマートデータサイエンスセンタ (SDSC) では、ビルの共用部において来訪者の増減を予測し空調を最適制御することによって、来訪者の快適さを維持しつつ消費エネルギーを削減する空調最適制御シナリオ算出技術⁽¹⁾を確立してきました。SDSCでは、これまで人が滞在するビルの専有部と比較して、人が移動する共用部において、個人の好みを考慮せずに多数の人が快適と感じる温度を維持しつつ、あらかじめ人の増減を予測することで無駄のない空調制御を行い、消費エネルギーを最大50%削減することに成功しました。一方で、人が長時間滞在する専有部では、個人の好みを満たされない場合の不満も大きく、その人の好みの温度に合わせた空調制御が求められていると考えています。そこで私たちは、ビル全体のエネルギー効率を改善することをめざし、個人の好みとエネルギー削減を両立するパーソナル空調技術の確立をめざしています。

本稿では、従来のむらのない均一な環境をめざす空調制御にはない、個人の好みをオフィスなどの1つの空間で実現するパーソナル空調技術について、どのような手段で実現しようとしているのかを解説します。

パーソナル空調技術の目標

オフィスなどのビルでは、その利用形態で共用部と専有部の2つに大別されます。廊下やロビーなどは一般的に共用部と呼ばれ、人が長時間とどまることが少なく、常に移動するような場所です。共用部では1

人の人の滞在時間が短く、多くの人が入れ替わり立ち替わり通行します。そのため多数の人にとって快適と感じられる環境をつくることが重要と考えています。一方でオフィスビルに入居している各テナントの専有部では、利用者が専有部内に長時間滞在することになり、個人の温度に対する感じ方の違いや不満が共用部に比べて大きく、快適性に影響すると考えています。具体的な人の動きを考えると、個人作業や複数人での会議など、専有部では利用者の行動はさまざまに変化するほか、オフィス内での利用場所もさまざまに変化します。「暑がり寒がり」と表現されるように温湿度に対する好みには個人差があり、また上記のように専有部では人は用途や場所を変化させながら長時間滞在することから、快適な空調制御を柔軟に提供し1人ひとりが満足する環境を提供することが必要だと私たちは考えています。

このように専有部では快適性が重要である一方で、ビルの消費エネルギーのうち半分近くが空調により消費されています⁽²⁾。一般的に、夏季や冬季など空調をより多く稼働させる季節において、快適性を求めると消費エネルギーが大きくなる傾向にあるため、単純に快適性を求めた空調制御を行うことは消費エネルギーの増加につながると考えています。SDSCでは、冒頭で述べた共用部における空調と同様に、パーソナル空調の実現においても快適性と消費エネルギー削減の両立をめざしています。

さて、近年はリモートワークの普及により、オフィス内の座席がすべて利用されることが当然ではなく、あまり利用されていない座席やエリアが従来と比較して増えて

いると考えています。こうした前提の下では、専有部においてすべての場所で均一に温度を維持することはエネルギー消費量の観点から好ましくない場合があります。このため、パーソナル空調では個人の場所を考慮して空調を強める場所と弱める場所をつくることで、あえて上下方向ではなく水平方向の温度むらをつくり、先述した個人の快適性と消費エネルギー削減の両立を図ります(図1)。

従来のビル空調制御との比較

■通常の空調制御

一般的なオフィスの空調では、部屋全体または区画ごとに温度設定がされており、均一な温度をめざした空調制御が行われています。そのため、作業内容や個人の温度への好みの違いから、すべての人にとって快適な環境は提供できていないと考えています。またオフィス内で暑い・寒いがある場合は、利用者からの申告に基づいてその場所を担当する「吹き出し」の温度設定の変更などが行われています。温度変更が行われた場合には、申告者の周辺の温度も変更されることになり、周囲の人の快適性を損なうことがあると考えています。またリモートワークの普及も進み、人がまばらなオフィスで、従来どおりの一定温度で均一に空調制御を行うことによる消費エネルギーも課題であると考えています。

■空調最適制御シナリオ算出技術 (PMV空調技術)

これまでSDSCでは、共用部の空調をターゲットにして、快適性と省エネを両立する空調最適制御シナリオ算出技術 (PMV

空調技術)に取り組んできました。PMV (Predicted Mean Vote) *1とは人の快適性を示す指標であり、温度や湿度、放射、気流、活動量や着衣量から求められます。PMV空調技術では、廊下やロビーなど多くの人が行き交う共用部において、PMVの値を推奨快適範囲に保ちつつ、人の増減を予測した無駄のない空調制御を行うことで、最大50%の消費エネルギー削減をすることができました⁽³⁾。この技術では多数の人の快適性を保つことはできますが、専有

部で求められる個人の温度の好みに応じた快適性を実現できていません。そのため私たちは、PMV空調で検討してきた強化学習による空調制御を基にして、個人の好みの温度に合わせた空調制御(パーソナル空調技術)を検討しました。

■パーソナル空調技術

オフィスのような専有部において、これまでの空調制御のように利用者がいるところもないところも一緒に空調を動作させるのではなく、温度むらをつけることで、

利用者1人ひとりの快適性を実現しながらも、できる限り無駄をなくした快適性と省エネ性を両立した空調制御をめざします。専有部内で個人個人の好みの温度を反映した、あるべき温度むらを理想温度分布として算出し、その理想温度分布を目標として、AI(人工知能)により空調制御シナリオを求めます。この空調制御シナリオは、空調システムが複数の吹き出し口の風量や温度をどのように設定し空調制御をするか運転計画を示したものです。この空調制御シナリオに従った空調制御を自動的に行うことで、個人に快適かつ省エネとなることをめざします。次にパーソナル空調技術の構成について説明します。

パーソナル空調技術の構成

オフィス内に各利用者の温度嗜好に基づいた温度むらとなる理想温度分布を実際のオフィスへ再現するために、私たちは、温度分布生成部、空調エージェント部、座席レコメンド部の大きく3つの部品から構成されるパーソナル空調技術を開発しています(図2)。

温度分布生成部では、各利用者の温度嗜

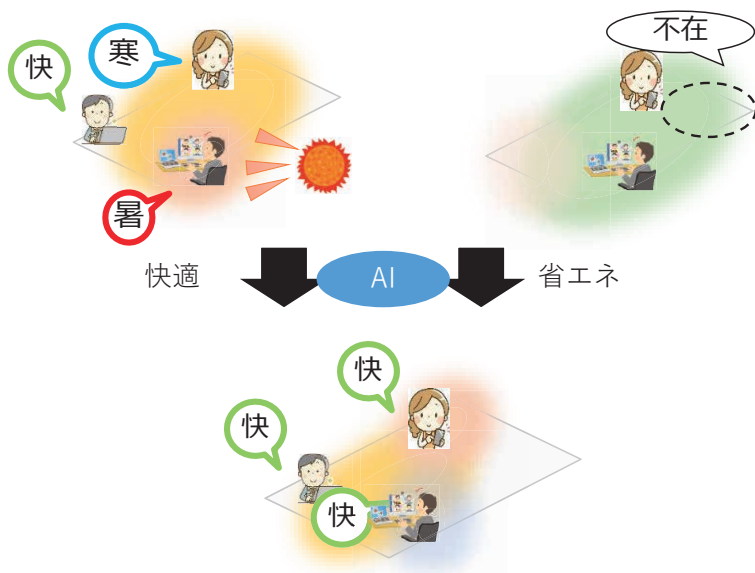


図1 パーソナル空調技術による空調制御

*1 PMV：予想平均温冷感申告。人が感じる温冷感の指標。

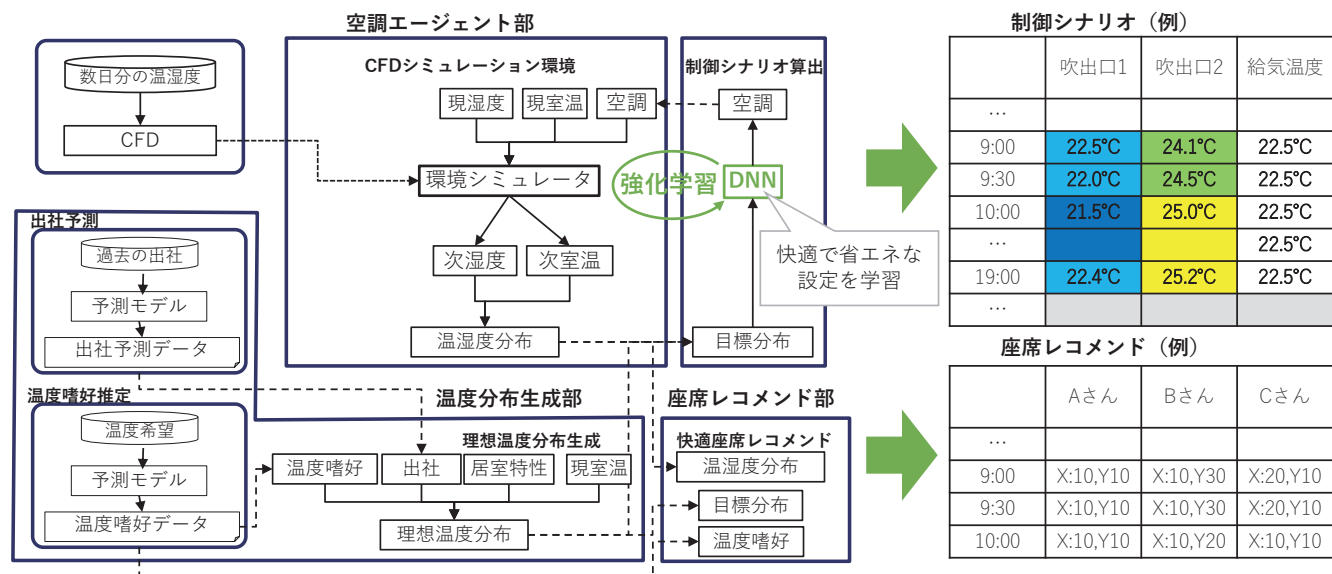


図2 パーソナル空調技術の構成

好と出社状況に応じて、オフィス内で実現すべき理想温度分布を算出します。まず利用者が出社する予定かどうかを事前に把握するために、出社予測機能により予測を行います。そして利用者それぞれの温度嗜好は、外気温などにより変化する可能性があると考えており、温度嗜好推定機能により推定を行います。これらの機能で求めた温度嗜好と出社状況の情報を基にして、理想温度分布算出機能を用いて、オフィス内で実現すべき理想温度分布を算出します。

空調エージェント部では、先に算出した理想温度分布を目標として、シミュレーション環境で空調の制御方策を立てて、最適な空調運転シナリオを算出し温度むらのある温度分布を再現します。

そして、座席レコメンド部では、空調の制御予測に基づいた将来の温度分布から、利用者の快適性に応じた作業場所の推薦を座席レコメンド機能により行います。以降では各機能部について詳細に説明します。

■温度分布生成部

温度分布生成部では、空調エージェントが空調を制御するために必要となる、目標となる温度分布（理想温度分布）を生成します。まず利用者の好みの温度を反映した場所をつくるために、温度希望のオーダ履歴を利用して温度嗜好を推定します。そして利用者の滞在に合わせて空調制御するために、利用者1人ひとりの出社を予測します。これらの情報とオフィス内の空調負荷の特性（居室特性）から理想温度分布を計算し、空調エージェントの目標分布として用います。

(1) 温度嗜好推定

利用者からの自己申告による温度嗜好を利用して理想温度分布を生成し温度むらを空調制御することも可能ですが、利用者が自身の好みの温度嗜好を正確に把握することは難しいと考えられます。利用者の好みの温度を細かく把握するために、統合アプリなどを通してオフィス内での場所や温度希望のオーダを取得します。オフィス内で利用者が滞在している場所の温度と、暑い（涼しく）や寒い（暖かく）といった温度希望の履歴情報から、各利用者の温度嗜好を推定します。

(2) 出社予測

利用者が出社したタイミングから好みの温度を反映した温度分布の生成を行うためには、出社するかどうかを把握することが必要となります。統合アプリなどを利用して各利用者の出社履歴を学習データとして蓄積し、利用者が出社するかどうかを予測することで、理想温度分布の生成に利用します。

(3) 理想温度分布生成

温度嗜好情報と出社予測情報の2つの情報と、オフィス内の各場所の温まり・冷めやすさを分析した居室特性情報および、そのときの温度分布を利用して、理想温度分布を生成します。外気温や日射、空調の吹き出し口の配置などの影響からオフィス内でも温度の高低がつきやすい場所があり、空調負荷に影響すると考えています。エネルギー効率の良い空調制御を行うために、複数日の空調制御時のオフィス内の温度分布を分析して、居室特性を求めます。この居室特性と各利用者の温度嗜好情報と出社予測情報から、利用者の快適性を満たしつつ省エネとなる理想温度分布を生成します。

■空調エージェント部

空調エージェントでは、オフィスの環境を再現した環境シミュレータを利用して、強化学習により理想温度分布を再現するための空調制御シナリオを出力します。空調機はこの空調制御シナリオに従った空調制御を自動的に行うことで、各時刻に吹き出し口や給気温度の設定変更を行い、個人に快適であり省エネとなる空調制御を行います。

これまでPMV空調技術においても環境シミュレータと強化学習により、空調制御シナリオを算出し制御を行ってきました。パーソナル空調技術では、温度センサを細かく配置してシミュレーション環境を詳細に構築すること、利用者の座席ごとに制御目標となる温度を設定した目標温度分布を用意し、給気温度、吹き出し温度（風量）、気流装置といった複数の制御対象を組み合わせ強化学習をすることで、個人の快適性を満たし省エネとなる空調制御を行います。

PMV空調技術およびパーソナル空調技

術では、空調制御を強化学習により制御シナリオを算出しています。空調制御によるエネルギー効率などの報酬の評価は、ある瞬間で空調への負荷が低下しても後ほど空調負荷が増加しエネルギーの消費量が増えることがあり、その瞬間のみでは評価ができません。1日をととした空調制御で目標温度を到達しつつ、エネルギー消費を抑制できているかを評価する必要があります。複数の吹き出し口から出る風量や、各吹き出し口への給気温度などの制御点を複雑に制御し、長期的に評価を行うために、強化学習を用いて空調制御シナリオを算出しています。

(1) CFDシミュレーション環境

強化学習により空調制御を行うためには、環境内の温度条件に応じて給気温度設定や吹き出し温度設定などをさまざまに変更・制御することで最適な空調制御を探索し、目標となる温度分布に向けた最適な制御方法を獲得する必要があります。多数の条件と多数の制御設定による数万に及び試行が必要となるため、現実空間で実際に試行することは困難です。そのため温度や気流をシミュレーションすることができるCFD (Computational Fluid Dynamics) ^{*2} を用いて環境の再現を行います。通常CFDを用いるためには流体力学に関する専門的な知識を用いて複雑なパラメータ設定が必要となるのですが、専有部内で複数の温度センサを配置してCFDのパラメータ推定を行います。この環境を用いて空調制御をシミュレーションします。

(2) 強化学習による制御シナリオ算出

空調制御のシナリオを算出するためにシミュレーション環境で強化学習を行います。シミュレーション環境を利用して、ある温度分布のときに空調の給気温度と風量をどのように制御設定すれば、消費エネルギーを抑えながら目標となる温度分布が達成できるかを学習します。シミュレーション環境を用いることで多数のバリエーションで

*2 CFD：数値流体力学。流体の運動に関する方程式をコンピュータで解くことで流体の動きをシミュレーションする手法。本技術では、居室内の温度変化の再現に利用します。

強化学習による空調制御学習

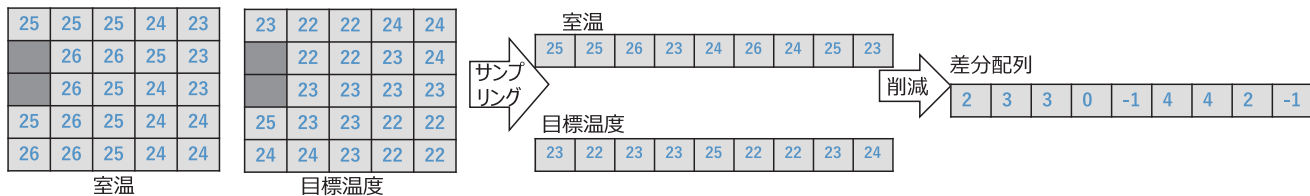


図3 温度分布のサンプリング

試行錯誤することはできますが、さまざまな目標温度分布に対する最適な空調制御を探索することは計算コストが大きくなる問題があります。シミュレーション環境内で再現された温度分布と目標となる温度分布から、座席など利用者の滞在が想定される場所のサンプリングをすることと、各サンプリング点で再現された温度と目標温度の差分を学習の入力として利用することで、計算量を削減し効率的に最適な空調制御を探索します（図3）。

■座席レコメンド部

レコメンド部では、利用者の温度嗜好、オフィス内での温度変更希望、現在と将来の居室内に再現される予定の温度分布を利用して、各利用者が居室内で快適に過ごせる場所をレコメンドします。

(1) 現在の温度分布

利用者が移動したいタイミングにオフィス内の最適な座席や場所を提案するには、そのときの温度分布が必要になります。専有部内のすべての座席や場所に温度センサを設置して各場所の温度を計測することはコストや設置場所の確保から難しいため、離散的に配置された複数温度センサから取得される温度情報を基にオフィス内全域の温度分布を予測して現在の温度分布を算出します。各地点の温度センサ情報の履歴からオフィス内の温度予測モデルを生成し、温度センサが配置されていない場所についても温度を予測します。

(2) 将来の温度分布

利用者が出社したときや座席の移動を行う場合には、将来再現される予定の温度分布が必要になります。将来の温度分布は、空調エージェント部の求めた運転シナリオとシミュレーション環境での空調制御を基にして、将来の各時刻の温度分布を求め

ます。

(3) 快適座席レコメンド

利用者が出社したタイミングや、温度変更希望をオードしたときなど、利用者の快適性を満たす場所や将来的に快適性を満たす場所をレコメンドします。他の利用者の快適性への影響がある場合や空調のエネルギー効率を悪化させる場合などには、空調を大きく変化させるよりも人を動かすほうが多くの利用者の快適性を満たし、かつ消費エネルギーの削減に適切な場合があります。その時点でのオフィス内の温度分布と将来予定される温度分布から、長期的に利用者の温度嗜好を満たす場所を算出し、利用者の温度嗜好に合う場所をレコメンドします。

課題と今後の展望

パーソナル空調技術の実現に向けて以下のような課題があると考えています。

(1) 利用者の屋内移動予測

現在は出社の有無を予測していますが、利用者の移動に合わせて空調を制御するために、利用者の居室内での滞在場所を予測し、理想温度分布に反映することが必要と考えています。

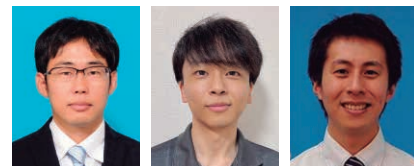
(2) 再現する温度分布の高解像度化

複数の利用者の温度希望をピンポイントに制御するために、空調に作用する制御対象を増やすなどにより、空間方向および時間方向に高解像度化する必要があると考えています。

今後、ユーザの嗜好温度に合わせたオフィス内座席レコメンドおよび実際の利用者の行動に合わせた空調制御の検証を進める予定です。

■参考文献

- (1) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2021/11/01/211101a.html>
- (2) https://www.eccj.or.jp/office_bldg/01.html
- (3) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2021/11/01/211101a.html>



(左から) 三枝 知史 / 酒井 聡太 / 秦 崇洋

SDSCの街づくりへの取り組みの中で、ビルの空調制御について紹介しました。オフィスなどで過ごす人への新たな価値提供に向けて検討を進めていきます。

◆問い合わせ先

NTT コンピュータ&データサイエンス研究所 /
NTT スマートデータサイエンスセンタ
E-mail sdsc@ntt.com



スマートストアの店舗内行動データを活用した 販促施策の最適化

スマートカートによるセルフスキャン型店舗や、一切レジを通らずに手ぶら購買が可能な店舗など、小売店のICT化が進んでいます。このような店舗では、ID付きのPOSデータや、店舗内動線などの行動データを取得できるため、従来実店舗では不可能だった、顧客が購買に至るまでの行動を把握できます。このようなデータを店舗デジタルツイン（DT）として活用し、販促施策や運営の効率化に活用するための取り組みについて本稿で紹介します。

キーワード：#スマートストア、#マーケティング、#動線分類

スマートストアの発展と店舗デジタルツイン

近年、コンビニエンスストア・スーパーマーケット等の実店舗において、顧客の購買体験の向上や、省人化によるコスト削減・収益改善などを目的としたICT化が進んでいます。例えば2016年12月に米国・シアトルでオープンしたAmazon社のAmazon Goは、カメラやセンサなどを用い、商品や顧客を自動認識することで、顧客が商品をただ手に取って店を出るだけで決済が完了する店舗として話題になりました。

Amazon Goに続くようにして、上海のCloudpick社が開発した同様の店舗システムは、日本、米国、ドイツ、フランス、シンガポール、韓国など世界11カ国で200以上の店舗を展開中です。また米国・サンフランシスコのZippin社も、米国を中心に10店舗ほどを展開しています。ほかにも、シアトルのAiFi社など、センサを用いずに、画像認識だけで購買判定を行うシステムも登場しています。日本では2020年から2021年にかけて、大手コンビニエンスストアチェーンが実験店舗を立ち上げました。特にファミリーマートは、TOUCH TO GO社と連携していち早く商用化を成し遂げ、順調に店舗数を伸ばしています。

一方スーパーマーケットにおいては、2018年2月にトライアルがレジカートで商品スキャンを行えるスマートカートの導入を開始しました。イオンでも2020年3月より、専用端末によってスマートカートを実現するレジゴーのサービスを開始し、2023年の段階で全国約200店舗にまで拡大して

います。

このようにICT化が進んだ小売店を、ここではスマートストアと呼びます。スマートストアでは、顧客IDが紐づく購買情報であるID-POSデータのほか、顧客1人ひとりの入店から退店までの動線、および店舗によっては各商品棚での滞在時間、商品を手に取ったり戻したりといった手伸ばし情報を取得できます。つまり、何を買ったかだけでなく、どのように買ったのか、購買過程に関する情報を得ることが可能です。このような情報を店舗デジタルツイン（DT）として活用し、実店舗において、顧客1人ひとりのニーズや嗜好を推定し、店舗内行動や購買を予測することで、よりそれぞれの顧客に添った販促施策を可能にし、運営の効率化を図ることができます。

本稿では、スマートストアにおける店舗DTの取り組みについて紹介します。まず、スマートストアで取得可能なデータの種類と特徴について説明します。続いて、個々の顧客に添った施策提案・店舗改善を行うための課題と解決策について分析を行います。その後、ID-POSと動線データを活用した顧客行動の分類手法を紹介し、さらに、それらと顧客情報との組合せから、売上向上が見込まれる顧客・購買群（セグメント）を自動的に抽出し、施策提案を行うための取り組みについて紹介します。

スマートストアで取得可能なデータの種類と特徴

スマートストアでは、顧客の購買行動に関するさまざまなデータを取得することが

できます。主なデータの種類は以下の3つです。

① ID-POSデータ：ID-POSデータとは、一般的なレジで取得可能な購買情報（POSデータ）に購買した顧客のIDを紐付けたデータを指します。顧客IDは、店舗入店時にスマートフォンのアプリや顔認証などで顧客を認識して、付与されるほか、決済時の会員カード提示やポイント利用などでも取得可能です。POSデータには一般に、購入した商品の種類や数量、金額、割引の有無やクーポンの利用に関する情報、決済時間と決済情報などが含まれます。ID-POSデータは、1人の顧客の購買を時系列順に追うことができるため、顧客の購買履歴や嗜好を分析するのに有用です。例えば、どのような商品をよく買うか、いつ買うか、どれくらい買うか、どのような組合せで買うかなどが分かります。これにより、顧客に合わせた商品やサービスの提供や、クロスセルやアップセルの施策などが可能になります。

② 動線データ：動線データとは顧客の店内での移動軌跡を記録したものであり、例えば店内座標の時系列データなどで表されます。赤外線カメラやRGBカメラなどで取得され、顧客の購買プロセスや行動パターンを分析するのに有用です。例えば、どのような順番で店内を回るか、どの商品棚の前でどれくらい停止するかなどが分かります。これにより、顧客の興味やニーズを把握し、店内のレイアウトや商品陳列の最適化や、リアルタイムでの商品やサービスの提案などが可能に

なります。

③ 手伸ばし行動データ：手伸ばし行動データとは、顧客が商品を手に取ったり戻したりといった行動を記録したものです。手伸ばし行動データは主に棚重量センサーで取得され、顧客の購買意欲や決断力を分析するのに有効です。例えば、どの商品に対して手を伸ばすか、手に取った商品をどれくらいの確率で購入するか、どの商品と比較しているかなどが分かります。これにより、商品の価格や配置の改善、購買促進のためのクーポンやポイントの提供などが可能になります。

個々の顧客に添った施策提案を行うための課題

従来、実店舗では顧客の購買行動を記録する手段がなく、POSデータから各商品の大きな購買層を把握する、あるいはAI（人工知能）カメラを用いて、時間帯ごとの各売り場の混雑状況や年代・性別分布を把握するといった解析にとどまっていた。スマートストアにおいて取得可能なID-POSと動線データを組み合わせることで、顧客単位、あるいは購買単位で、どのようなプロセスを経てそれぞれの購買がなされるのかを把握することができます。

課題としては以下のような点が挙げられます。

① 購買・行動データにおけるパターンの多さ：顧客が特定の商品の購買に至るまでの過程は多岐にわたります。動線1つとっても、商品を探るための回遊、不意の動線変化、商品の購買を決定するまでの棚前滞在など、さまざまな不特定の要素が混ざります。このような複雑な情報から主要なパターンを抽出・処理できる仕組みが必要となります。

② 実店舗において実施可能な施策を考慮したセグメント粒度：実店舗では、顧客に対して介入できる手段がオンライン店舗と比べて限られています。クーポンやアプリに対する通知など、個別に実施可能な施策もありますが、売り場や商品の変更、あるいは店舗内サイネージによる販促など、店舗全体への影響が及ぶ施策も多く存在します。よって1to1マーケティングであっても、施策の影響範囲に

合わせた適切な粒度でセグメントを分割することが重要です。

③ 介入効果が見込めるセグメントの発見と施策効果推定：スマートストアで取得可能なデータは多岐にわたるため、人手でさまざまな属性を組み合わせる施策を打つべきセグメントを抽出するためには多大な稼働が必要となります。一方で、実店舗において、販促施策実施結果に関する解析可能なデータが記録されていることは非常に少なく、大量の学習データを必要とする機械学習により施策効果の高い群を発見するといったアプローチも非常に困難です。

上記の課題に対し、私たちは以下の技術の研究開発を推進しています。1点目に、複雑な顧客の行動・購買パターンを、実店舗における制約を加味してクラスタリングし、適切な粒度で提示するための店舗内行動分類技術、2点目に、スマートストアにおいて取得可能な顧客・購買・行動データを組み合わせ、介入すべきセグメントとその施策効果を見積もるためのセグメント自動探索・施策提案技術です。次にそれぞれの技術について紹介します。

小売店舗での販売促進に向けた店舗内行動分類技術

顧客が購買を行う「店舗内」における販売促進施策（店舗内販促）は、売上向上のために非常に重要です。店舗内販促には、店内のレイアウトや商品陳列の最適化、デ

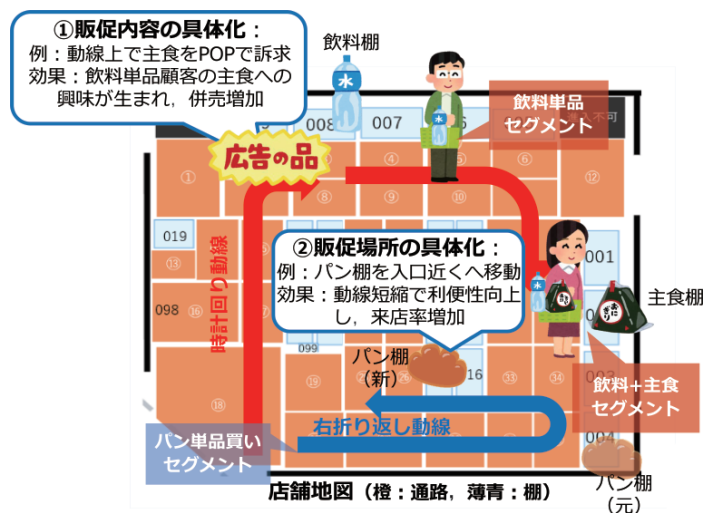


図1 店舗内のセグメントとセグメントごとの施策例

ジタルサイネージやPOPによる商品、サービス提案などさまざまな選択肢があります。これらの候補から店舗運営者が最適な店舗内販促を選択、具体化するためには、店舗内の顧客の行動を把握する必要があります。店内の顧客動線や購買傾向をセグメント化し、店舗運営者に対して提示することができれば、店舗運営者は各セグメントに適した手段、シナリオで販売促進を図ることができます。

図1に、仮に店舗内に3つの顧客セグメントが存在する場合の例を示します。この店舗には、飲料の単品購入、あるいは飲料と主食を購入する顧客は赤い動線上に、パンを単品で購入する顧客は青い動線上に多く存在すると仮定します。

セグメント分類を行っていない場合、店舗内で販促する場所・内容を客観的に判断するは困難ですが、このようにセグメント分類がなされていれば、「赤い動線の途中にPOPやサイネージを設置し、飲料単品ユーザに主食購入を訴求し、購買単価を向上させる」といった具体的な施策の立案が可能です。

そこで私たちは、動線と購買を組み合わせたセグメント化を自動的に行い、店舗運営者に提示する技術を開発しました。店舗内行動の可視化に関しては、店舗内での顧客の滞在傾向をヒートマップ表示する、棚ごとの滞在傾向を表示するといったソリューションはありましたが、動線と購買単位で、かつセグメント化まで踏み込んだものはありませんでした。

私たちの開発した技術（店舗内行動分類技術）は、①動線分類技術、②購買分類技術、③動線と購買を組み合わせたセグメント化技術、の3つの特長を持ちます（図2）。

① 動線分類技術：店舗内の動線データを入力として、動線間の類似度を計算したうえで、類似の動線を集約・分類し、主要な動線パターンを抽出する技術です。動線データは、各顧客が通過したエリアのシーケンスとして与えられ、各々データ長が異なるため、単純なベクトル類似度で類似度を計算することができません。また、店舗内には棚や通路などの制約が存在し、単純な物理的な距離で類似度を算出してしまうと、実際には類似していない動線を類似動線と混同してしまう可能性があります。これらの課題を解決するため、DTW（Dynamic Time Warping：動的時間伸縮法）⁽¹⁾を適用するとともに、「物理距離」ではなく、棚や通路などの配置を考慮に入れた「店内での移動距離」に基づいて類似度を計算する手法を用いました。これにより、特に誤って分類されやすい短動線で分類精度が向上することを確認しています。

② 購買分類技術：各顧客の購買データを入力として、各顧客の購買をベクトル化し、類似した購買を集約・分類し、主要な購買パターンを抽出する技術です。購買を分類する際は、あらかじめ商品に付与された商品カテゴリ情報が頻繁に利用されます。しかし、運営主体ごとに粒度が大きく異なること、また、原材料を中心とすることが多く、販促に必要な顧客の買い方に基づいた分類（例えば主食・副菜・飲みもの）ではないことから、そのまま購買分類に用いることはできませんでした。私たちは各商品カテゴリの特性は、その商品が単品・併買のどちらがされやすいか、併買される場合はどのような商品と一緒に買われやすいのかといった「買われ方」に現れると考えました。この発想に基づき、単品購入の傾向、および併買される商品カテゴリの傾向をその商品カテゴリの特徴を表すベクトルとして定義したうえで、各購買の分類に用いることとしました。これにより、人が主観的に分類した結果に近い分類結果が得られることを確認しています。

販促対象となる顧客セグメントの提示（本技術）

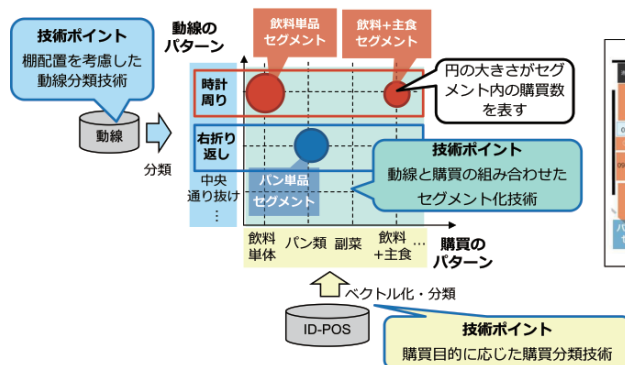


図2 店舗内行動分類技術の概要

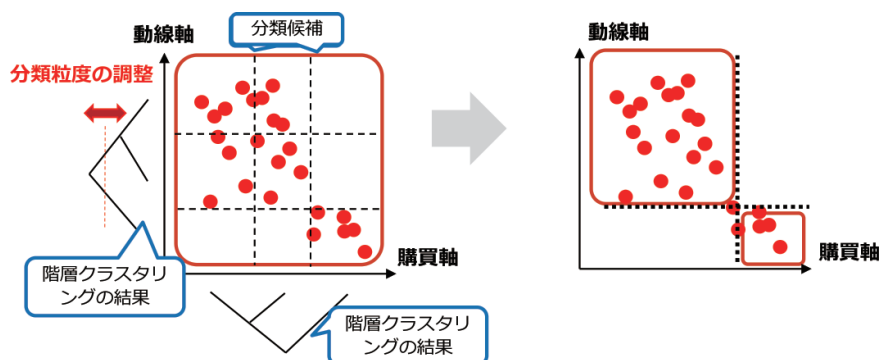


図3 動線と購買を組み合わせたセグメント化技術

③ 動線と購買を組み合わせたセグメント化技術：動線分類と購買分類で得られた結果を組み合わせ、適切な粒度でセグメント化を行う技術です。本研究では、動線と購買が強く結び付いた状態でセグメントされる粒度＝適切な粒度と定義しました。これを実現するため、①と②の分類を階層クラスタリングで行ったうえで、動線と購買の結び付きの強さを相互情報量で指標化することで、適切な分類粒度を特定します（図3）。

ここまで紹介した技術により、図2左に示すように、動線と購買単位でセグメントに分類することができ、店舗運営者は各セグメントに合った店舗内販促施策を検討・実施できます。

小売店舗運営最適化のための販促促進施策自動提案技術

一般に、売上向上や店舗改善を目的とした施策を打つ場合、データ解析結果からは「誰を」改善すべきかを見出すことは容易な一方、「どのように」改善すれば良いか、



図4 介入群（赤）と優良群（青）の例

施策方針に関する示唆を得ることは難しく、店舗運営者の知見、ノウハウによって施策を決めているのが現状です。

私たちはこの課題に対し、ある施策対象セグメント（介入群）に対して、それと類似する購買・行動傾向を持ち、かつより来店頻度や購買単価が高いなどの良い特性を持つ群（優良群）を見出し、それに近づけるような施策を見出すというアプローチを提案します。例えば図4のように、飲料棚に直行直帰する動線（赤）の購買単価が120円、飲料を購入後に中央のお菓子棚を通る動線（青）の購買単価が150円とします。

このとき、赤の動線の顧客を隣の通路まで誘導すれば、購買単価も増えるのではないかとこの仮説を得ることができます。また、施策の期待効果は（介入群の購買回数）×（介入群が変化する割合）×30円（優良群と介入群の購買単価の差）として計算されます。

■アプローチに必要なデータ

本アプローチを実現するのに必要なのは、スマートストアから得ることができる多種多様なデータから、適切な介入群と優良群の組を抽出する①顧客セグメント抽出技術、および得られた介入群に対して、優良群を参考にしながら期待効果を算出するための②施策期待効果算出技術です。以下それぞれについて概説します。

① 顧客セグメント抽出技術：本技術の目的は、類似する購買・行動傾向を持ち、統計的に有意かつ十分な施策効果が見込める介入群と優良群の組を抽出することです。やみくもに顧客や購買をさまざまに分割してその間の来店頻度や購買単価の差を比べても、その差がたまたま生じたものなのか、それとも安定して傾向の差がみられるのかは分かりません。私たちはさまざまな分布間でその有意差を検定、および群間の分布の差の程度を算出できる手法を用い、十分な施策効果がみられるであろうセグメントの組合せのみを抽出します。

② 施策期待効果算出技術：①で抽出された介入群に対し、ルールベースで定まる具体的な施策を当てはめ、優良群に近づけた場合に得られる施策期待効果を算出する技術です。特徴として、それぞれの販促施策に必要な属性をルールとして定義しておき、その属性を含む組合せに絞って探索することで、意味ある施策候補を探索できるようにしています。

■アプローチの手順

例を用いて本アプローチの手順を説明します。図5は、顧客の購買商品数を上げるために、店舗の購買・行動履歴から施策候補と施策期待効果を算出した結果の一例です。

(1) STEP1：施策ルールの登録

店舗において実施可能な施策とルールを設定します。例えばセット販売施策においては、どの商品を組み合わせるかという情

施策候補のリスト

順位	期待効果	施策例	主分類属性	従分類属性
1	250,000	商品のセット販売	同時併売	時間帯
2	100,000	商品のセット販売	同時併売	曜日
3	80,000	サイネージ広告	動線パターン	同時併売
4	50,000	商品のセット販売	同時併売	年代
5	40,000	サイネージ広告	動線パターン	商品カテゴリ
	...			

介入対象セグメントのリスト

順位	期待効果	介入群	優良群	施策例
1	100,000	飲料単体、昼	食事と飲料、昼	おにぎりとお茶のセット販売
2	80,000	菓子単体、夕方	菓子と珈琲、夕方	チョコと珈琲のセット販売
3	70,000	食事と飲料、昼	食事と飲料と菓子、昼	食事とデザート のセット販売

図5 施策候補リストと介入対象セグメントのリスト

報が重要であるため、「同時併買」を必要な属性として設定します。一方、サイネージ施策ではどこで訴求するかが重要となるため、「動線パターン」を必要な属性として設定します。

(2) STEP2：有意かつ効果の高いセグメントの組の抽出

STEP1で登録した施策ルールに対し、以下を実施します。

① 必要と設定された属性を含む属性の組を生成

② ①の各属性の組に対し、前述のセグメント抽出技術を用いて、有意かつ施策効果の高い介入群と優良群を抽出

(3) STEP3：施策具体案と施策期待効果の算出

STEP2で得られた各介入群に対して、前述のように施策期待効果を算出し、その結果から施策全体の期待効果を算出します。図5では、「時間帯」と「同時併買」に着目してセット販売を行う場合がもっとも施策期待効果が高く、具体的には3つの介入群を想定したセット販売の候補が考えられるという結果を示しています。

このように、それぞれの施策候補に対して、具体的な介入対象セグメントと施策期待効果が表示されるため、期待効果が高い施策を店舗運営者が選択できることが、本技術の提供価値です。

今後、実験店舗における実証を通して本技術の有用性、特に得られた施策の妥当性および施策導出までの稼働削減効果を検証し、実用化に向けてさらなる検討を行う予定です。

さらなる課題と今後の展望

ここまで、スマートストアの店舗内で得られる購買データと行動データを活用し、効率的に販促・店舗改善施策を導くための

運営効率化技術について概説しました。一方で、真に顧客の来店や購買を向上させるためには、店舗内行動のみでは不十分です。例えば、SNSである商品が大流行した、あるいは競合店に顧客を奪われたなどの来店・購買動機に至る情報は、その店舗のデータのみから把握することは困難であり、より多様なデータソースを組み合わせる解析を行う必要があります。今後は店舗内の購買・行動データと店舗外データを組み合わせ、大規模データを効率的に解析し、顧客の来店・購買動機を推定する技術を検討する予定です。

■参考文献

- (1) H. Sakoe and S. Chiba: "Dynamic Programming Algorithm Optimization for Spoken Word Recognition," IEEE TASSP, Vol. ASSP-26, No. 1, pp. 43-49, 1978.



(上段左から) 金 順暎 / 山田 節夫 / 水島 昌英

(下段左から) 富田 準二 / 西本 恵太

ID付きPOSデータと動線を照らし合わせると、顧客が商品を迷いながら買っている様子が分かり大変興味深いです。一方で、あまり1人ひとりを追いつけても、顧客1人から得られる施策効果は非常に低く、割に合いません。「ちょうど良い粒度」で顧客を眺めることの難しさに取り組んでいます。

◆問い合わせ先

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所 /
NTTスマートデータサイエンスセンタ
E-mail sdsc@ntt.com



モバイルオーダーによるロボット配送サービス

ビル街区において、清掃や警備、配送といった、入居者やビルオーナーにとって必要なサービスを、ロボットのような屋内モビリティを活用することにより、運用コストを削減する動きがあります。またこれらの異なるサービスに向けて複数台のロボットがビル運営で用いられることを想定し、異種・複数のロボット制御システムの実現をめざしています。本稿では、忙しいオフィスワーカーがオフィスにいながらにして小売購買が可能となるモバイルオーダーによるロボット配送サービスの実現に向けて、ロボットの配送所要時間を正確に予測しながら最適な走行経路を探索し、予定どおりに配送する「ロボット最適制御技術」の取り組みについて述べます。

キーワード：#AI, #ロボット, #デジタルツイン

おうじ さおり
應治 沙織
ふくもと よしふみ
福本 佳史
まつうら のぶひこ
松浦 伸彦

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所/
NTTスマートデータサイエンスセンタ

ロボット配送サービスとは

ロボット配送サービスとは、利用者が注文先や受取地点・時刻を自由に選択して注文した商品をロボットが配送するサービスです。利用者は自身のスマートフォン等から専用のモバイルオーダーサービスを使って店舗に対して注文と支払いを行います。注文情報はロボットに対しても送信され、注文情報に従ってロボットが店舗への集荷および指定個所への配送を行います。ロボットは配送完了した後に所定の場所に戻り、必要に応じて充電しながら次の注文が来るまで待機を行います。

図1に示すとおり、もし複数の注文が同時にあった場合は一度のロボット配送でまとめて配送を行います。もしロボットが出発後に新しい注文が来た場合は待機中の別のロボットを用いて配送を行います。

ロボット配送サービスをオフィスビルに導入することで、買い物に行く時間がない忙しいオフィスワーカー（ワーカー）に対

して希望どおりの地点・時刻に商品をお届けする新しい価値体験を提供し、人手不足の店舗に対して追加人員不要で配送サービスが提供可能という新たな販売機会創出に貢献します。

ロボット配送サービスを実現するにあたり、従来は専用のオペレータが注文内容を見ながらロボットの走行経路を手動で算出・設定していましたが、私たちは「ロボット最適制御技術」を考案し、人手を介さない自動的かつ効率的な経路算出することを可能としました。

ロボット配送サービスの課題

ロボット配送サービスを実現するにあたり、五月雨式に発生する注文に対して最小限のロボットかつ最短時間で配送すること、利用者がスムーズに商品を受け取れるように配送所要時間をあらかじめ予測して提示することが要件となります。走行時間に影響を与える要因は大きく3点あります。

まず、ロボットは走行中に障害物の接近を検知した場合は減速または一時停止によって衝突の回避を試みます。この回避行動によりロボットの走行時間が長くなるため、経路上の混雑状況やビル設備利用状況（エレベータ等）を考慮する必要があります。

次に、店舗の作業時間を考慮する必要があります。店員は注文内容を見ながら対象商品を集め、ロボットが店舗前に到着すると当該商品の積み込みを行います。商品によっては温めるといった追加作業も発生します。一連の作業に要する時間は常に一定ではなく、注文された商品の特徴や店舗の混雑状況によって大きく変化するため考慮が必要です。

最後に、ロボットどうしの競合を考慮する必要があります。例えばロボット2台が並走した場合はお互いを動く障害物だと判定して減速や一時停止を繰り返し行い、ロボット2台が通路ですれ違う場合では、お互いの回避がうまくできずにスタックして配送自体が停止する危険性もあります。ま

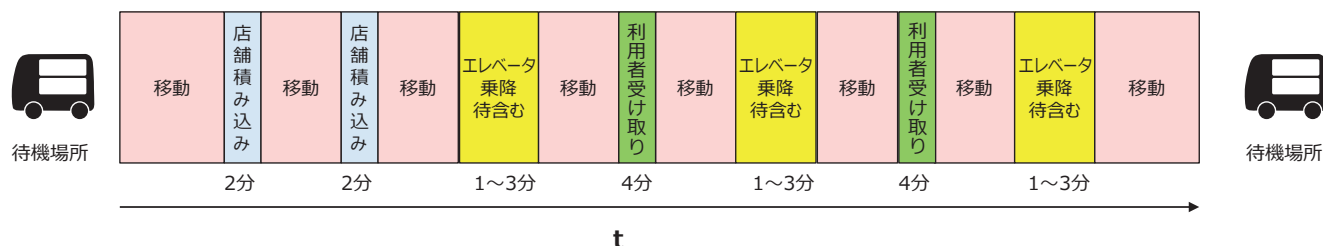


図1 ロボット配送サービスの流れ

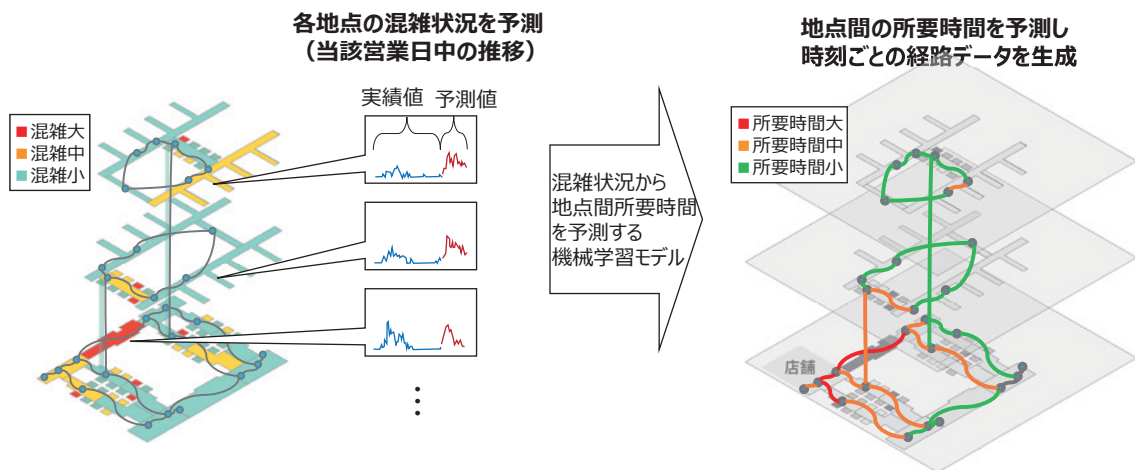


図2 経路の所要時間予測技術

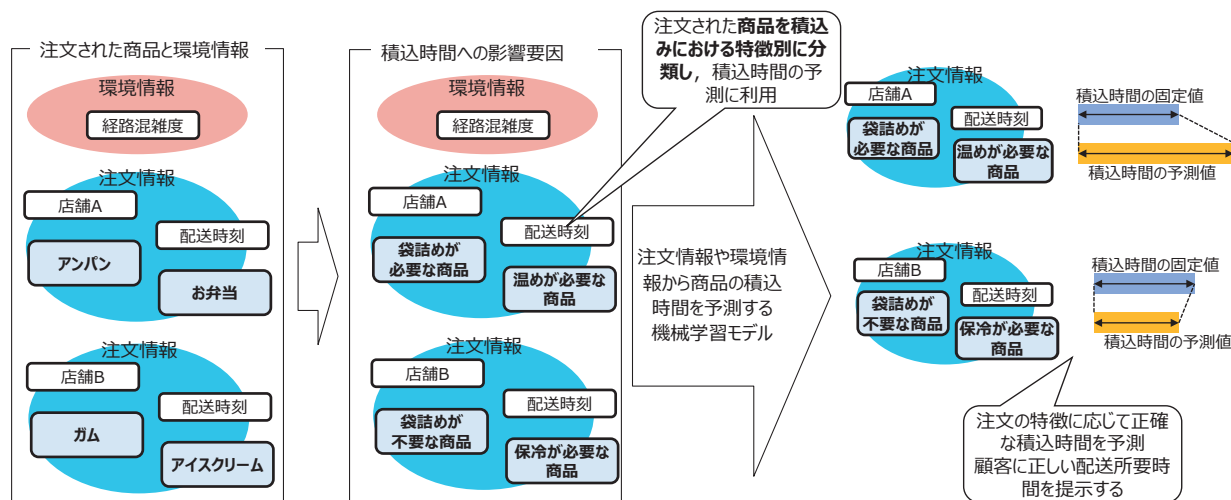


図3 店舗の積込作業時間予測技術

たロボットの並走やすれ違いは来街者の邪魔になる可能性が高く、そもそも発生させないことが重要となります。

ロボット最適制御技術について

前述のロボット配送サービスの課題を解決する技術として、街区やビルなどのロボット配送サービスの対象空間の経路をグラフ化し、各経路・各地点の走行時間および複数ロボットの競合関係を考慮して最適な経路を探索する「ロボット最適制御技術」を考案しました。当該技術は①経路の所要時間予測技術、②店舗の積込作業時間予測技術、③グラフ上での最適経路探索技術、④ロボット競合解消のための優先制御技術の4種類の技術の集合体になります。なおグラフのノードはロボットの待機地点、店舗

の積込地点、利用者の受取地点および経路の分岐地点（エレベータ乗込のため待機地点も含む）を表現し、エッジはノード間の通路を表現します。

■経路の所要時間予測技術

経路の所要時間予測技術の概要を図2に示します。人流情報やエレベータの稼働状況などを収集し、各地点の混雑状況を数値化します。そして過去の実績値を基に未来の混雑状況を機械学習によって予測し、さらに予測された混雑状況から各経路の走行時間を予測することで、配送開始時刻での経路（エッジ）ごとの走行時間を取得することができます。求めた走行時間はグラフ構造上の対応するエッジのコストとして利用します。

経路ごとの走行時間は経路上の混雑状況によって大きく変化します。これは経路上

に多くの人（ランダムに動き、かつロボットが衝突を回避する必要のあるもの）がいることで、ロボットの急停止が繰り返され、停止なく走行した場合に比べて多くのイレギュラーな走行時間を要するためです。これはグラフ上での最適経路探索でも同様のことがいえ、最適経路および正確な所要時間の見積りを実現するためには、混雑状況に応じた経路選択が必須になります。所要時間予測技術は環境や時間変化を考慮した配送時間の見積りにより、実測値と見積り値の乖離を抑制し、正確な所要時間を用いた運行計画の立案を実現します。

■店舗の積込作業時間予測技術

店舗の積込作業時間予測技術の概要を図3に示します。商品準備からロボットへの積込までの一連の作業時間は、注文された商品の特徴や店舗の混雑状況によって大き

く変化します。そこで注文された商品の基本情報（名前、説明文等）を基に、例えば温める必要があるカテゴリやドリンクホルダ等で固定化する必要があるカテゴリといった商品の積込作業に影響を与える特徴別に分類を行い、当該特徴と店舗の混雑状況を基に積込作業時間を予測します。予測した積込作業時間はグラフ構造上の各店舗に対応したノードのコストとして利用します。

積込作業時間予測技術は注文された商品の特征に応じた作業時間の算出が可能となり、実測値と見積り値の乖離を抑制します。

■グラフ上での最適経路探索技術

グラフ上での最適経路探索技術は、上記2種類の技術で算出したコスト付きグラフを用いて、走行時間が最小となる経路を算出します。注文情報に基づき配送されるタイミングでのグラフを予測・作成し、配送

にあたって経由する地点（待機地点、積込地点、受取地点、待機地点）のそれぞれの間で最短となる経路をグラフから算出します。なお、もし複数の注文が同時にあった場合は、配送先が近い注文を順にグループ化していき、各ロボットに割り当てた場合の最短経路・走行時間を算出し、合計時間が最小化するように割り当てを行います。

図4に概要を示します。

グラフ上での最適経路探索技術は環境や時間変化を考慮し、複数ある経路の中で最適な経路を選択し、無駄のない運行計画を立案します。

■ロボット競合解消のための優先制御技術

最後に、ロボット競合解消のための優先制御技術の概要を図5に示します。複数ロボットを同一のエリア内で運行させるため、各ロボットが計画している走行経路の重複・競合を回避する必要があります。例えば図

では2台のロボットが地点Cから地点Nに移動するにあたり複数の重複個所が存在しています。それぞれが同一時間に同じ経路を通らないように、迂回経路を採用したり待機時間を設定したりすることで経路競合を解消します。これにより最小の追加時間でロボットどうしの衝突やスタックを回避した最適な経路を算出することができます。ロボットが3台以上ある場合も同様の手順で競合を解消していきます。

ロボット競合解消のための優先制御技術を用いることで、複数のロボットを同時に稼働した際に発生する走行経路の重複・競合とそれに伴う走行時間の遅延という、グラフ上での最適経路探索では抑制できない運行計画の遅延要因を抑制することができます。

実証実験と評価

ロボット最適制御技術を活用したロボット配送サービスの検証として、オフィスビルを対象に実証実験を実施しました⁽¹⁾。ロボット最適制御技術を構成する4つの要素のうち、経路の所要時間予測技術、グラフ上での最適経路探索技術の2点に関して実証をとおして評価を行いました。

実証では、当該ビルに勤務するワーカーを利用者として、専用のモバイルオーダーサービスを用いてビル内の飲食店の商品を注文できるシステムを構築しました。ロボットはエレベータと連携して階をまたがった移

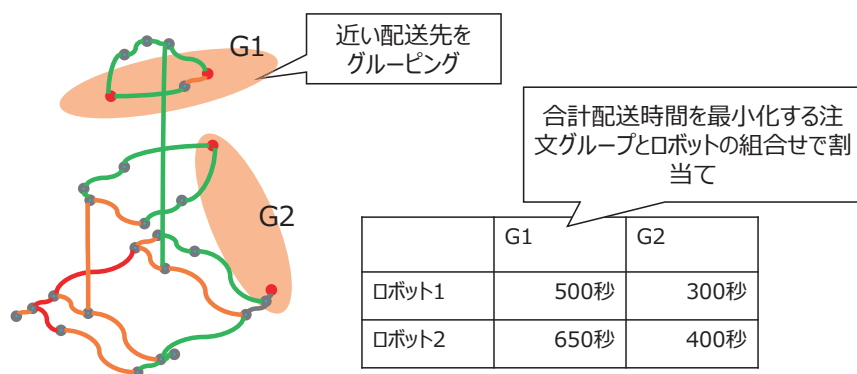


図4 複数注文があった場合のグルーピング

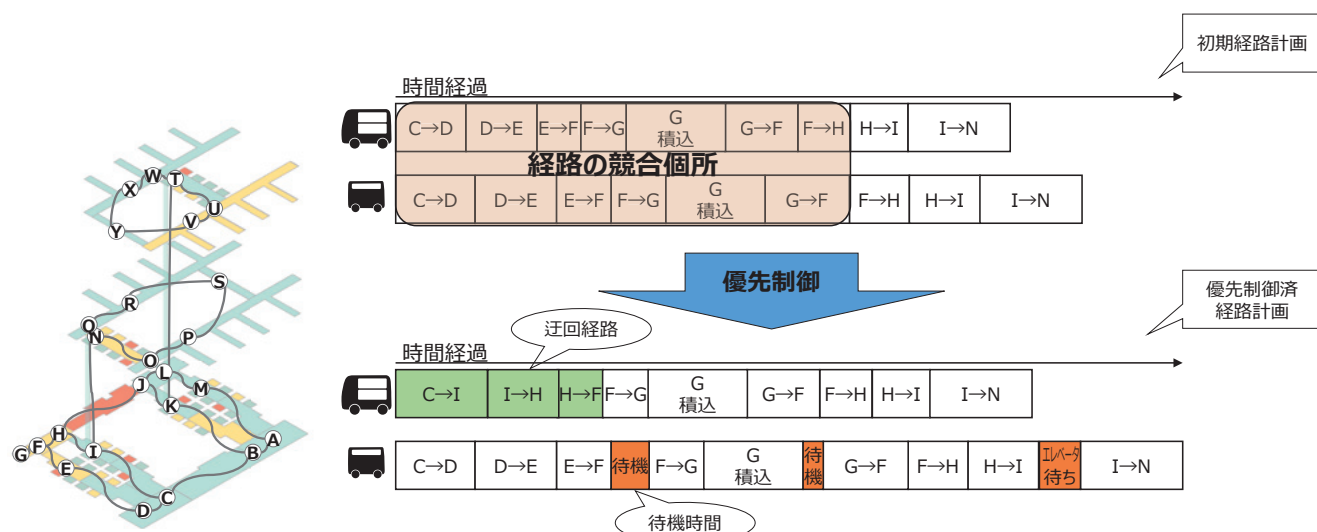


図5 ロボット競合解消のための優先制御技術

表 各パターンにおける予測値と実測値の比較結果

予実比較	パターン 1	パターン 2	パターン 3
	ロボット設定	誤差抑制	下振れ抑制
MAE	215.0	25.8	49
RMSE	226.3	43.1	58.6
下振れオーダー数（予定より到着が遅くなったオーダー数）	190	99	25
1分以上の下振れオーダー数	177	19	4

動が可能となっており、飲食店前の積込地点から利用者が勤務するフロアの受取地点までロボットが自立走行可能となっています。ロボットが受取地点に到着して10分経過しても商品が受け取られなかった場合、利用者が受取不可の状態であると判断してロボットは店舗に戻ります。店舗に戻った商品は店舗での置き置き状態となり、以降は利用者が直接店舗に受け取りに行くこととなります。

注文形態として希望時間配送と即時配送の2パターンを用意しました。希望時間配送は、1日を30分間隔で分割して1スロットとして扱い、希望のスロットを選んで注文を行う形態となります。即時配送は配送可能なもっとも早いスロットを自動的に選んで注文を行う形態となります。ロボット配送サービスは上記2種類の注文を受け取った後、ロボット最適制御技術を用いて最適な経路探索し、ロボットがそれに従って動作するようスケジューリングするとともに、予想された所要時間を基に到着予定時間を算出して利用者に前もって提示します。

混雑状況はサーモパイル型センサを利用して取得しました。サーモパイル型センサは非接触の温度センサを内蔵しており、人の放射熱を検知・測定することができます。天井に設置されたサーモパイル型センサから真下の検知範囲内の人数を計測し、当該地点における混雑度として利用しました。

実証は2022年10月から2023年3月にかけて行いました。期間を前半と後半に分け、前半は主に基礎データ収集と店舗の運用フロー確認および利用者のヒアリングに、後半は実際に利用者から注文をしてもらいながら評価を行いました。

評価では利用者に提示する予測した到着時間と実際の到着時間の比較を行いました。

下記の3種類の比較パターンを用意しました。

- ・パターン1：ロボットベンダが初期設定時に設計した走行時間を基に算出した到着時間と実際の到着時間を比較したパターン。ロボット最適制御技術を適用しなかった場合の参考として評価。
- ・パターン2：単純に誤差を少なくするようチューニングしたモデル（誤差抑制モデル）を用いて予測した到着時間と実際の到着時間を比較したパターン。
- ・パターン3：予測値が実測値よりも小さくならないようにチューニングしたモデル（下振れ抑制モデル）を用いて予測した到着時間と実際の到着時間を比較したパターン。

利用者視点では提示された到着時間に受け取りに行くようプランを立てるため、予定時間前にロボットが到着する分には問題ないという声を受けてパターン3の下振れ抑制モデルを用意しました。パターン3はパターン2の誤差抑制モデルに比べて誤差は大きくなるものの、予想到着時間にはロボットが到着しており商品の受け取りができる可能性が高いモデルとなります。

結果を表に示します。

パターン1とパターン2の比較により、誤差（MAE）が215秒から25.8秒に、さらに予定より到着が遅くなって利用者を待たせることになった下振れオーダー数が190件から99件とロボット最適制御技術を用いることで大幅に改善しました。

またパターン2とパターン3の比較により、下振れ抑制モデルを利用することで誤差は大きくなるものの、下振れオーダー数を4分の1程度に削減することができると判明しました。状況に応じて誤差抑制モデルと下振れ抑制モデルのどちらを採用するか選ぶことが重要となりますが、利用者視点

では下振れ抑制モデルのほうが待ち時間が少なく有効なことが多いと考えられ、運用者視点では誤差抑制モデルのほうがより無駄なくロボットの運行計画を立案できると考えられます。

今後の展望

ロボット最適制御技術を用いることで正確に走行時間を予測し、最適な経路探索が可能となることが分かりました。今後は店舗の積込作業時間予測技術およびロボット競合解消のための優先制御技術に関しても実証実験をとおした評価・改善を行い、さらに最適化されたロボット最適制御技術の実現をめざします。

また、配送用ロボットのみならず清掃や警備など異種複数のロボットを統合基盤上で制御することで、街区全体で最適化・省力化を実現します。

参考文献

- (1) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/10/03/221003a.html>



（左から） 應治 沙織 / 福本 佳史 / 松浦 伸彦

ロボット最適制御技術を用いて異種複数のロボットを活用することで、最適化されたロボットの運用とそれに伴うユーザの体験価値の向上に貢献することができ、今後は異なる用途のロボットの最適制御や街区全体でのロボットの最適制御により、さまざまなサービスを提供し、人々の生活をより豊かにしていくことをめざします。

◆問い合わせ先

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所 /
NTTスマートデータサイエンスセンタ
E-mail sdsc@ntt.com



SDSCの要素技術を集約し価値化を加速するAI価値基盤

私たちNTTスマートデータサイエンスセンタ（SDSC）が取り組んできたさまざまな産業ドメインの成果を集約し、そのコアパーツを利用して価値化を加速するためのAI（人工知能）価値基盤を開発しています。分析事例をカタログ化することで問題設計を支援するほか、集約した実データの加工技術を自動的に試行し、データ分析の初期の試行錯誤を短期化することで、価値化を加速します。本稿では、AI価値基盤の実現に向けた取り組みを紹介します。

キーワード：#AI価値基盤、#データ分析、#数理最適化

はた 秦	たかひろ 崇洋	こだま /児玉	みどり 翠
ふじしま 藤島	みほ 美保	あだち /安達	ゆう 悠
ふくだ 福田	けんいち 健一	よこはた /横畑	ゆき 夕貴

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所/
NTTスマートデータサイエンスセンタ

はじめに

私たちNTTスマートデータサイエンスセンタ（SDSC）では、街づくりDTCの実現のため特に生活・消費・移動・物流・資源などの分野において、お客さまの課題を引き出し、実データを用い、課題解決してきました（図1）。

こうした実績を顧みると、実世界（Physical Space）における価値の源泉は現実に課される制約条件の下で取得できる実データに基づき、Cyber Space上のデジタルツイン（DT）で最適な状態を計算し、その結果を実世界の制御やレコメンドとして返却するCPS（Cyber Physical System）（図2）の仕組みで説明できることが分かってきました。ここで、もっとも重要な役割

を果たす最適化は複雑で巨大なモデルも研究されていますが、AI（人工知能）・機械学習の技術が発展した現在では、豊富で整ったデータを十分な計算時間で学習すれば解けるようになってきました。一方で、実世界の価値化では計測条件・運用条件・コストなどの現場ごとのさまざまな制約条件を満たす必要があり、計測したままの生のデータ（raw data）はそのままでは利用できないことがよくあります。

こうした状況の下、PhysicalとCyberのギャップを埋めて街づくりの領域でデータに基づいて実世界へ価値を還元するデータ価値化を加速することを目的に、SDSCでは自ら解決してきた街づくりDTCの各種ドメインにおけるソリューションから、コアとなる技術や知見を集結したAI価値

基盤を開発しています。

AI価値基盤は、実産業ドメインにおけるAIによる新たな価値を定義、具現化し、1つひとつの価値を実産業ドメインの業務やお客さま価値として実感いただけるサービスとして具現化しています。その中には、実データ加工や予測・最適化機能といったデータ分析機能と、実際にデータ連携に必要な機能、価値を業務における活用やお客さま個人に体験いただけるインタフェースも含まれます。AI価値基盤では、コアとなるAI機能を含むパーツを複数の産業ドメインで提供されるサービスの中でも有機的に利用できるようにしています。実現価値の特性に合わせて、それらのパーツを組み合わせて使えるようにすることで、新規のサービスに対しても、サービスプロ



図1 これまで取り組んできたドメイン例

ダクトに必要な機能の選択を容易にしたり、初期に必要なデータ加工を自動化したり、試行錯誤を最小化することが可能となり、価値化を加速することができます。

本稿では、このAI価値基盤機能の中で価値化を加速するさまざまな工夫のうち、(a)これまでの実績から、実社会で運用できるように工夫した問題設計を集約しリファレンスとして提供する、(b)これまでの実績から、最適化の前段階であるデータのクレンジングや未来予測などの前処理を共通分析機能として切り出し、他のデータへ適用できるようにする、の2点について主に紹介します。

AI価値基盤が提供する効果

ここでは、前述の(a)、(b)が価値化のプロセスにどのような点で貢献をするか説明します。

SDSCの価値化プロセスは、図3に示す典型的なデータ分析の手順に沿って進むものがほとんどです。①の課題設計フェーズでお客様の抱える問題と、その問題を取り巻く周辺知識を分解し、最適化問題へと帰着させます。②のデータ分析フェーズでは、実環境でデータを計測し最適化手法をDTで実現します。これらの手順で効果が見込めると判断すれば、③の実証フェーズにおいて実際の機器を操作し運用するフィールド実証へと進みます。(a)と(b)の工夫は、特に課題設計フェーズとデータ分析フェーズの加速をねらっています。これは価値化を加速するだけでなく、お客様の協力が必要不可欠な実データを用いるSDSCの取り組みにおいて、机上の結果を示す①と②を加速しいち早く結果を示すことにも貢献します。なお、AI価値基盤はそれ自身をDTとして利用することも想定

して開発していますが、本稿で紹介する(a)、(b)とは異なる領域の議論となりますので、ここでは割愛します。

(a) 最適化の問題設計の事例をリファレンスとして提供する

実世界での課題解決は、現実のさまざまな制約条件を満たして特定の指標を最小化（または最大化）する数理最適化問題に帰着できる場合が多くあります。SDSCが解決してきた課題を例に挙げると、

- ・空調のエネルギー消費を削減するために、来館者の快適性を保ちつつ1日の空調運転の総消費エネルギーを最小化したい
- ・より多くの顧客の元に時間どおりに商品を届けたいので、複数台のロボットの商品配送をもっとも多く、より早く配達できるルート計画を立案したい
- ・緊急通報に迅速に対応するために、救急車の待機する消防署を変更して現場到着所要時間を最小化したい

など、いずれも制約条件付きの数理最適化問題でした。ところが、このように現実の困りごとを問題に帰着させることは実は難しく、価値化でもっとも重要かつ困難なプロセスといえるでしょう。

この問題設計は、お客様の抱える問題や取り巻く環境などを正しく理解して分解し、解決に許された時間内に解くことができる手法と、うまく対応付けて再設計する能力が必要です。この問題設計が実用可能であるためには、

- ・誤差や遅延、欠損などを許容したデータ計測

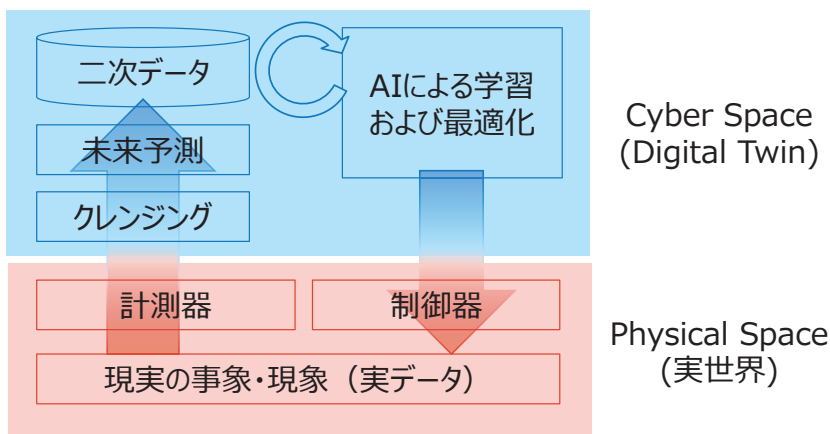


図2 Cyber Physical Systemの概念図

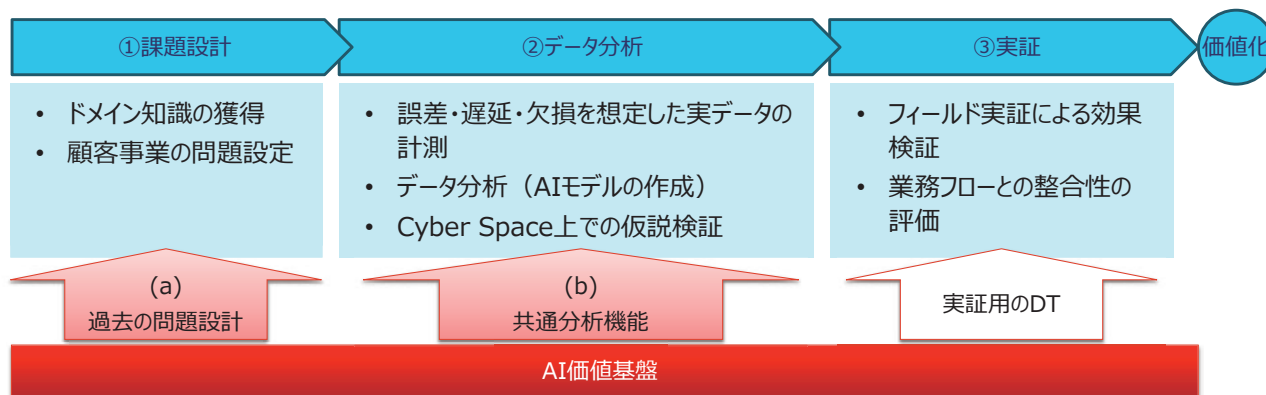


図3 価値化の流れとAI価値基盤の貢献

- ・計測データから最適解を導出する分析ロジック
- ・分析結果の実行までの間に許容できる時間内の制御
- ・その実行手順を業務フローに落とし込む運用

などの点をすべて解決する必要があります。もちろん、これらを最初から完全に見通して1度の試行ですべて解決できることは稀で、実際には何度も問題設計を行い実際に運用してみて、さまざまなフィードバックを受けて必要な箇所を見直す、というサイクルを繰り返す必要があります。

データ分析の経験を多く積んだデータサイエンティストは、計測・分析・制御・運用の各工程で起こり得る問題をさまざまなシチュエーションで経験し、成功あるいは失敗の事例を数多く知っているため、少ないサイクルで現実的な解決手段に到達できます。またこうした経験豊富なデータサイエンティストになるためには、自身が多くの経験を積むことのほかに、経験者のアドバイスを受けることや過去の検討資料を洗うことなど、先人の試行錯誤を追体験する何らかの手段が有効です。そしてこれが、最適化の問題設計事例をリファレンスとして蓄積することのねらいです。

AI価値基盤は、これまでデータサイエンティストが実際に解いてきた問題設計を蓄積し、新たな問題に直面した際にリファレンスとして参照できるようにすることをめざしています。これは、新たな問題に直面したデータサイエンティストが過去の実例を追体験する手段を提供します。たとえ異なるドメインであっても、問題の分解の仕方や数理最適化問題として帰着させる工程を自身の直面した問題の価値化プロセスの中で参照することができれば、実用的な問題設計を迅速にできるようになると期待しています。

- (b) 最適化の前処理を共通分析機能化し他のデータに適用できるようにする

実世界の温度や明るさ、その場所の空調の設定温度、その場所にいる人の数などは、計測器を通じて数値化されデータとなります。このデータを基に実世界の現象を理解あるいは予測し、それに対して最適な機器

の制御や行動のレコメンドを行うことで、現実で起こるさまざまな現象を最適化します。しかしセンサが故障したり、センサが移動されたり、センサの前に荷物を置かれたり、イベントにより普段は来ない数の人が殺到したり、といった非常にさまざまな原因によって、データには本来の現象との誤差や、値が取得できないという欠損、二度と起こらない異常値などが入り込みます。こうした誤差・欠損・異常値は、実世界の現象の理解を阻害し予測精度を低下させるため、最適化の前にこれらを取り除くデータクレンジングにより、最適化に適したデータへ加工します。

また、データとして計測できるのは現在より前、すなわち過去の現象です。そのため、過去のデータから機器制御や行動レコメンドをしても、機器や人が動くときには最適ではないこともあります。例えば、ビル空調では空調が管理する空間が広いために、設定温度や風量の変化が温湿度の変化として空間に反映されるには、数10分～数時間の時間を要し、その間に混雑時間帯が終わり過剰な空調となってしまうといったことがよくあります。これを防ぐために、最適化の結果が反映されときの状況を予測することも、前処理の一種といえるでしょう。

さらに、SDSCでは最適化手法として大量のデータを必要とするAIを利用することがあります。しかし実世界では並列実験や加速実験ができず、大量データの収集が難しい領域でもあります。SDSCの実例によれば、こうした場合は次のような機械学習に特有のデータ加工技術を利用していることが分かりました。

- ・少ないデータ量を補うための、さまざまなデータ拡張手法
- ・正例・負例の極端な頻度の差を補うリバランス
- ・現象が少数多種でデータ不足に陥る場合の、事象の類型化（クラスタリング）

これらの処理技術も、事前に計測したデータを基にして二次データを生成するという意味で最適化の前処理といえるでしょう。

前処理で行うべき内容は、(a)で紹介した問題設計にも依存しますが、計測器自体や

計測環境、そして計測したデータ（現象）の特性にも依存します。これはすなわち、問題設計が異なる場合でも効果が期待できることを意味しており、AI価値基盤では前処理部分を共通分析機能として切り出すことにした理由です。共通分析機能を同じ形式で実行できるようパーツ化しておくことで、新たなデータを分析する際にさまざまな手法を一度に試行して結果を比較することができ、前処理に適した手法を素早く選択することができます。

このようにして、(a)、(b)により、SDSCの価値化プロセスを支援し加速します。

従来技術との違い

さまざまな実世界の現象をデジタル化できるようになった現在、データ分析は多くの人や企業において取り組まれる課題です。そのため、たくさんの分析技術、ライブラリやそれらを集約したプラットフォームが提供されています。本稿では、一般的なデータ分析プラットフォームや各種ライブラリ等とAI価値基盤の違いについて説明します。

ここでは代表的な分析環境の例として、R⁽¹⁾、Python⁽²⁾を例に、その特徴を解説します。

Rは、もともとAT&Tで開発されたSという言語環境を参考に開発された統計分析に優れた言語およびソフトウェア環境です。対話的に処理できるインタプリタ環境でありながら、大量のデータを高速に処理することができるほか、多くの統計的手法が実装されているため、導入してすぐにデータ分析を始めることができます。また、外部のパッケージを導入することで標準では実装されていない高度な処理もできます。

Pythonは手続型の汎用プログラミング言語です。Pythonのプログラミング言語としての側面は本筋ではないので割愛しますが、Rと同様に標準ライブラリへ多くの統計処理やベクトル・行列計算が実装されており、インタプリタでありながら高速な数値計算ライブラリが評価されているように思います。汎用プログラミング言語であるため複雑な処理の実装にも適しており、またGPU (Graphics Processing Unit)

への対応も充実していることから、ニューラルネットワークを利用した深層学習など高度な機械学習の実装にも非常によく利用されており、外部のライブラリを導入することで最先端のアルゴリズムを利用することができます。そのため、データ分析の実装を考える際には必ず選択肢に挙げられます。

代表例として2つの環境を紹介しましたが、このほかにも多数のプログラミング言語や、それらに実装されたアルゴリズムを集約した分析プラットフォームがあります。さらにデータをさまざまな側面から可視化するBI (Business Intelligence) ツールや、データを蓄積しつつ集計機能も備えたりレーショナルデータベースなども、広い意味では分析環境と呼べるでしょう。

これらの環境についてここで注目したい共通点は、データ形式やドメインを限定しない汎用的な分析機能を備えていることです。これは分析ソリューションの提供という目的では当然のことです。しかし、こうした汎用分析環境を利用して実世界の課題を解決したい場合、問題設計および前処理の知見を有するデータサイエンティストが時間・工数を費やして多数の分析手法から適切な手法を選択する必要があります。CyberとPhysicalのギャップを解決し実用可能なかたちで最適化するためには、問題設計と前処理は価値化のプロセスに必要であり、試行錯誤による時間と労力の大きくかかる部分であることは変わりません。そこでAI価値基盤では、現実の課題を解いた実績のある前処理をパーツ化しておくことで、この試行錯誤を加速します。このように、汎用的な分析環境では支援の難しいこれらのプロセスに対して支援することを目的に開発されているという点が、従来技術と大きく異なる点です。

AI価値基盤の設計方針

ここまで紹介してきた考え方を踏まえたAI価値基盤の設計方針(図4)を紹介します。

(a) 過去の問題設計事例のリファレンス提供

ここまでで述べてきたように、現実の問題を数理最適化問題に帰着させるためには、

多くの制約を解消し問題設計してきたという経験が必要です。そしてAI価値基盤は分析者への支援として、過去の問題設計を体験させることで、経験に代えて問題設計を支援します。つまり、この機能で提供したい知見は、数理最適化問題を歪めないかたちで実世界の制約条件をどのように解消するか、というものです。具体的にはAI価値基盤では、過去の実例を数理最適化問題として分析し、

- ・目標→目標に対して設定したKPI→最適化問題としての定式化
- ・計測データ→実施した前処理
- ・最適化問題→最適化アルゴリズム

という実世界の制約と採用した手法を組として一覧し、参照や検索を可能とすることをめざしています。

このとき、特に重要なのは失敗事例よりも成功事例だと考えています。失敗から教訓を得るということもありますが、価値化の加速を目的としたAI価値基盤の場合は、うまくいった事例を真似て同じように試行するのが一番の近道です。SDSCの取り組みには一見すると全く異なるさまざまなドメインの問題を解いているようにみえますが、本質的には実世界は人の社会活動により成り立っているという共通点があり、この共通点が計測データの特性や解決手法の

満たすべき運用条件を形成するために、異なるドメインであっても過去の事例を活かすことができると考えています。

(b) 前処理の共通分析機能化

先述の共通点は、実空間における制約条件を解消する前処理でも同様のことがいえます。

SDSCで取り組むデータ価値化は、いずれも実空間の現象を時系列数値データとして取り扱い、時刻・日・曜日・週など人間社会の周期でとらえ、周期性や類似性を利用し、平滑化や欠損補間、データ拡張などを実現しています。また、温度や明るさ、消費電力、人数など物理的現象を計測する手段は、ドメインによらず物理現象に依存した同様の手法を利用します。こうした共通点が利用できる前処理は、SDSCが解いてきた実例を分解することで抽出することができます。AI価値基盤は、このように実効性のある前処理を同じ形式で動作するようパーツ化することで、新たなデータに対して一斉適用が可能となり前処理の試行錯誤を加速します。

事業化への取り組み

前述のとおり、SDSCではお客さまの具体的課題に対してデータの前処理・未来予

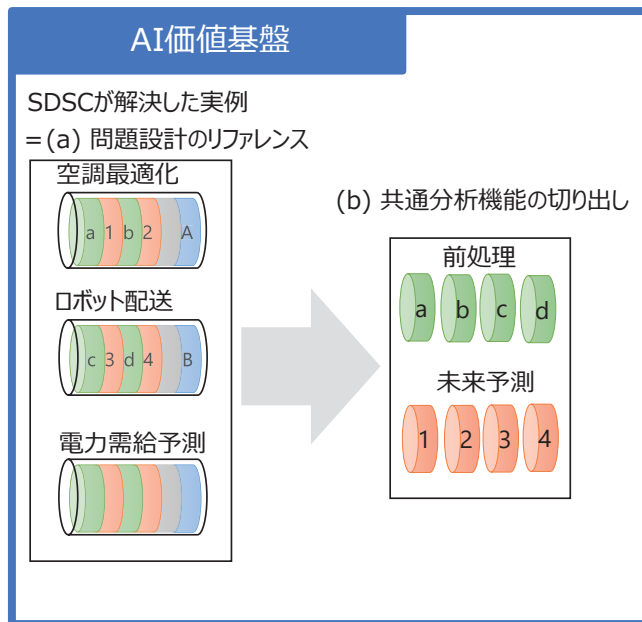
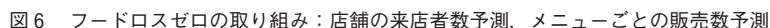
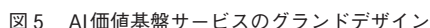


図4 AI価値基盤の構築イメージ

この取り組みをお客さまの施設で実施する場合は、来店者数を計測するカメラやセンサ、POSデータ（メニューごとと販売数）などを用いることで、上記のような結果を素早く得ることができます。サービスに必



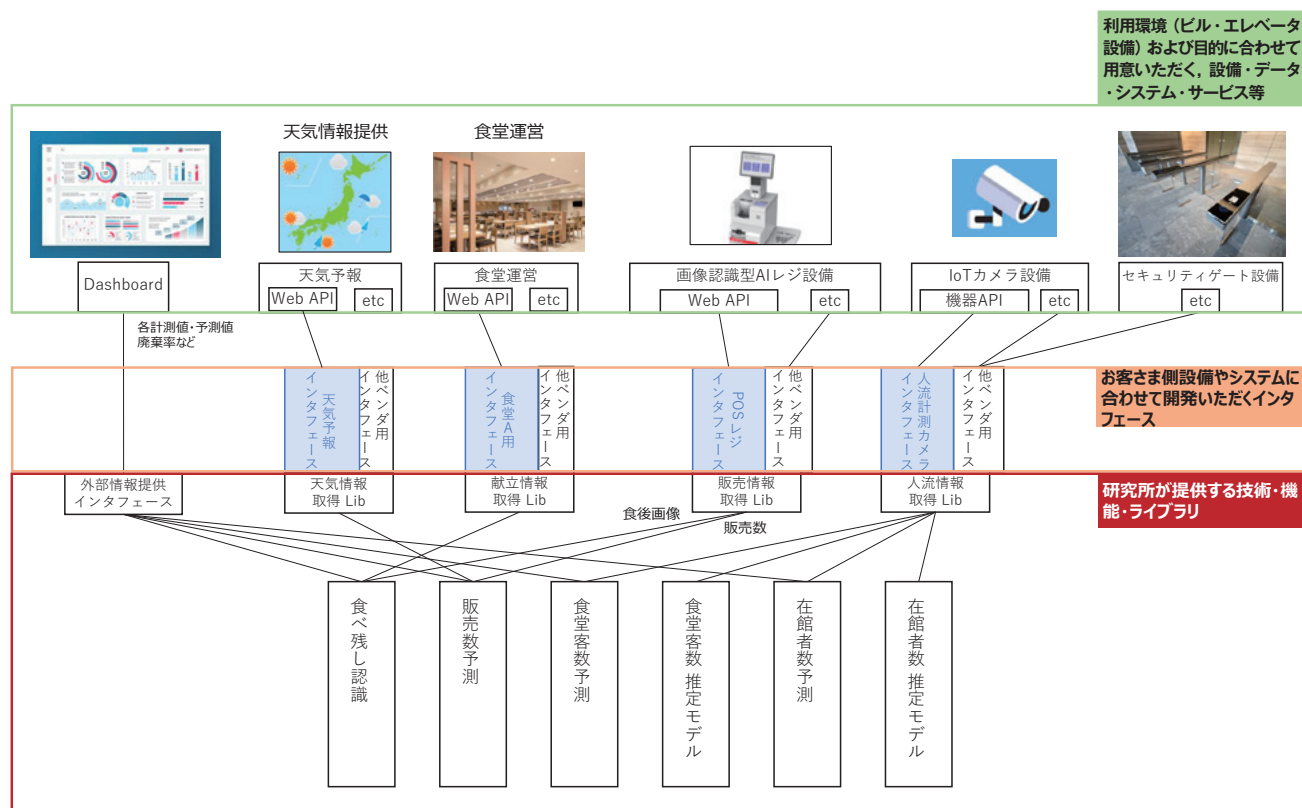


図7 フードロスゼロの施策を実施するシステムイメージ

要なデータや分析機能についてまとめたものが図7です。

SDSCではこれまで、図1のように省エネと快適性を両立する空調制御、オフィス内のパーソナル空調、飲食店のフードロスゼロ、顧客行動解析を用いた店舗運営の効率化、効率的な配送を実現するロボット配送、救急隊の配置最適化、高精度な発電量予測や需給マッチング、交通渋滞の検知と予測、農産物流通の全国規模での最適化、行動先読みによるスマートホームや街中におけるおもてなしサービスなど、データから価値を創出するデータ価値化に取り組んできました。価値化を支援するAI価値基盤により、人々の快適な暮らしを飛躍的に向上させた、未来社会の実現に貢献します。

AI価値基盤の課題と展望

本稿では、解決してきた事例の知見をAI価値基盤へと集約し、新たなデータ価値化を支援しようとしていることを紹介しました。しかしAI価値基盤へ知見を集約する

にはいくつか課題があります。

1つは、実際の課題で用いる機能は、その事例の中でもっとも効率的なかたちで実装されており、共通機能として切り出すには1つひとつの機能を他ドメインに適用した場合を想定し、同じように実行できるように再設計する必要があります。もう1つは、共通分析機能が増えてくれば、適用する分析機能を選別する必要があり、そのためには、データの特性や意味などを理解できる一種のセマンティクスのようなメタ情報が必要です。またこのメタ情報は、新規ドメインが加わるごとに見直す必要があるかもしれません。2023年度はまず最小限の実装を完了し、実際に使用した方のフィードバックを基に改良し、これらの課題にも対応していきたいと考えています。

■参考文献

- (1) <https://www.r-project.org>
- (2) <https://www.python.org>



（上段左から）秦 崇洋 / 横畑 夕貴 / 児玉 翠
（下段左から）藤島 美保 / 安達 悠 / 福田 健一

AI価値基盤では実際のお客さま課題から得た知見をかたちにすることにこだわって取り組んでいます。本取り組みにより、少しでも多くのお客さまへ具体的な価値を提供することをめざしていきます。

◆問い合わせ先

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所 /
NTTスマートデータサイエンスセンタ
E-mail sdsc@ntt.com



仮想市場を活用した農産物流通の効率化

NTTでは、農産物流通の効率化を目的とし、農産物の需要や供給の情報を集約し、全国規模で商流と物流を最適化できる仮想市場の構築に取り組んでいます。これにより、物流の2024年問題や農産物流通にかかわる分野での人手不足の解消、流通にかかる時間やコストの削減などの経済効果、温室効果ガスの排出削減やフードロスの削減などの環境負荷の軽減を実現します。

キーワード：#農産物流通、#仮想市場、#2024年問題

ば ば としひろ ひ き ち たかふみ
馬場 俊宏 / 引地 孝文
とよしま し お り ひ ら の やすひろ
豊島 詩織 / 平野 泰宏
はなかご やすし い そ だ あきら
花籠 靖 / 磯田 暁
とみた じゅんじ
富田 準二

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所/
NTTスマートデータサイエンスセンタ

農産物流通の現状

市場を経由する農産物流通の現状を図1に示します。現在、野菜など青果の約8割は卸売市場を経由して取引されています⁽¹⁾。その大部分は東京や大阪などの大都市の市場に出荷されています。しかし、市場の原理から考えると、農産物が過剰に集まると価格が低下します。そして、大都市の市場へ出荷が集中することにより、地方の市場には物が集まらないという問題も起きており、大都市の市場の余剰分が地方の市場へ転送され、鮮度が落ちてしまい廃棄されるものもあります。また、出荷者としても各市場の需要を把握できないため、近隣の市場で需要があるにもかかわらず、遠くの市場に出荷するという配送の無駄も発生しています⁽²⁾。実際、同じ農産物でも、九州で採れた野菜を東京に出荷し、北関東で採れた野菜を大阪に出荷するというねじれも起こっています。

一方で小売り業者からすると、市場に集まる量が分からないため入荷する直前まで入荷量が決定しないという状況が起こり、入荷量によっては加工や販売の計画を変更しなくてはなくなってしまう。

また、農産物流通に関係するさまざまな個所で業務のデジタル化が進んでおらず、需要と供給の総量や配送ルートなど全体を把握することが困難です⁽³⁾。さらに、このような現状の中、農産物の流通に限った話ではありませんが、物流の2024年問題の影響もあります。物流の2024年問題とは、働

き方改革により、ドライバーの労働時間に上限が課せられることで生じる問題の総称のことです。トラックドライバー1人当りの1日の走行距離が短くなり、長距離を運ぶことが難しくなってくると、一部の産地では長距離を運ぶ流通は難しくなります。また、大都市近辺の産地においても輸送コストの増加から、配送距離や時間の短縮などより効率的な輸送が求められるようになります。

実現したい未来、仮想市場

このような農産物流通の課題を解決するために、DTC (Digital Twin Computing)*を用いて、全国の農産物流通に関するデータに基づいて未来の需要と供給の量を予測し、市場に農産物が運び込まれる前に仮想空間上で売買を完了させる図2のよ

うな仮想市場の構築に取り組んでいます。

仮想市場では農産物にかかわる受給調整や取引等の商流は仮想市場上で完了させ、物流は仮想市場での売買の結果を基に最適なルートでの配送を実現します。農産物を産地から動かす前に、どこに送るのが最適なかを検討することで、市場間での需給バランスのズレによる転送を未然に防ぐとともに、他の品目や近くの産地からの農産物を集約して無駄のない配送を実現できるようになります。仮想市場によりさまざまな関係者に提供できる価値の一例を以下に示します。

- ① 生産者：予測による需給バランスの調整により、供給過多による価格低下を

* DTC：現実空間のさまざまなデジタルコピーをサイバー空間で表現し、データ分析や未来予測などのシミュレーションする技術。

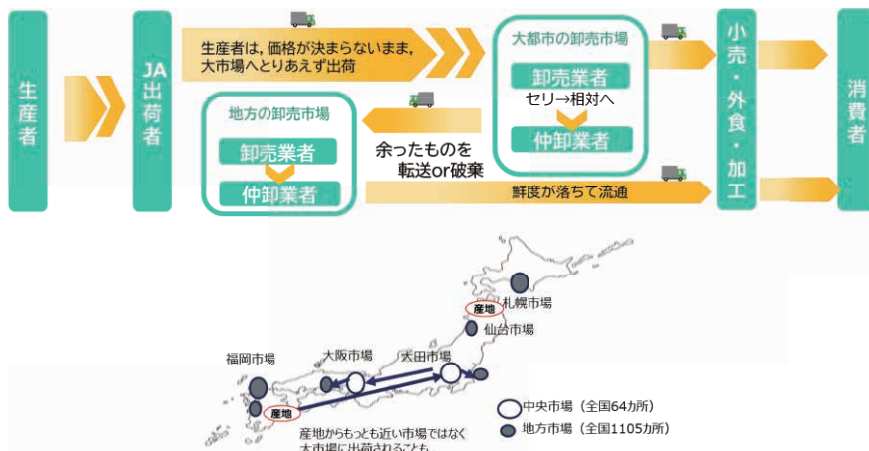


図1 市場を経由して取引される農産物流通の現状

避けられるようになります。また販売可能なより近い市場に出荷することで、配送コストや廃棄される農産物が削減され、新鮮で高価値な野菜の提供により収入増につながります。

② 卸売市場：予測による需給バランスの調整により、売れ残りの転送や、品不足による近隣市場からの調達などのコストが削減されます。また、アナログな取引をデジタル化することにより人手不足が解消されます。

③ 物流事業者：最適な経路での配送により、一度の配送距離が短くなります。また、出荷量の予測により、配送計画がより正確に立てられ、人員やトラックの手配などができるようになります。

④ 仲卸業者や小売業者：今までは直前まで分からなかった入荷量の予測が可能になることで、事前に農産物の加工に必要な材料や人員の手配などができるようになります。

⑤ 消費者：流通にかかる時間が短縮されることで、今まで以上に新鮮な農産物を手にすることができます。

仮想市場に向けた課題とアプローチ

仮想市場の実現に向けては大きく3つの課題があります。それぞれの課題について、取り組みの方針を含めて紹介します(図3)。

■課題(a)「データ収集とノウハウのデジタル化」

農産物流通にかかわる多くの場所で業務のデジタル化が進んでいません。産地と卸売市場と仲卸という農産物流通にかかわる関係者の間においても、電話・FAXと紙をベースにしたアナログ取引が主流のため情報が分断され、多くの無駄な時間と労力が発生しています。また、現状では取引に関するデータのデジタル化ができていないことから、情報の収集や分析が難しい状況です。さらに、業務が属人化し、ノウハウも暗黙知となっている部分も多く存在します。将来の仮想市場での取引に備えて、業務をデジタル化しながらデータを集める仕組み

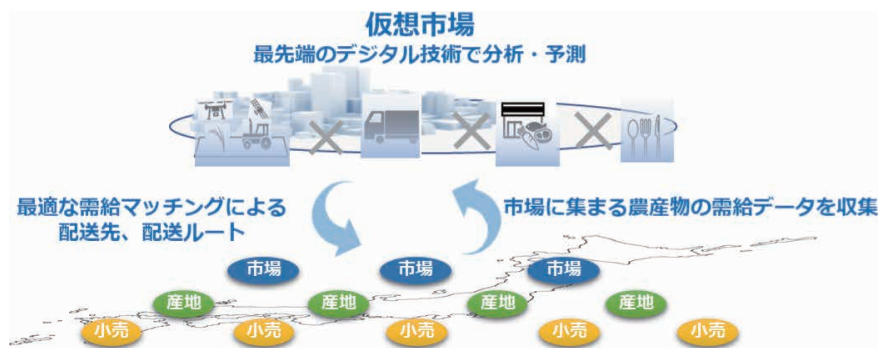


図2 仮想市場のイメージ

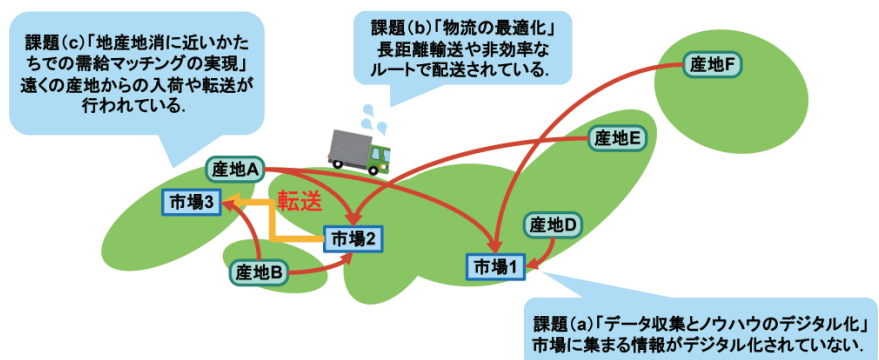


図3 取り組むべき課題

をつくり、集めたデータを蓄積し、分析していくことで、将来の予測や、暗黙知である業務ノウハウをデジタル上で再現できるようにする必要があります。

■課題(b)「物流の最適化」

現在、遠隔地にある産地では、大都市の卸売市場までの長距離輸送が行われています。しかし、2024年問題を受け、一度に運べる距離の短縮や、荷物の積み下ろしにかかる時間の短縮が求められるようになります。そのため、各産地では集荷拠点に集まった農産物を目的地まで最適な方法で運ぶ必要があります。走行ルートや経由地、1つのトラックに混載が可能な品目、積み下ろしにかかる時間など、複合的に関係し合うさまざまな要素から最適なものを検討することが求められます。また、配送のために確保できるトラックやドライバーが減少するため、より効率的な積載も求められるようになります。

■課題(c)「地産地消に近いかたちでの需給マッチングの実現」

情報をデジタル化して仮想市場に収集したとしても、従来の出荷先を変えないままの配送の最適化とマッチングのデジタル化では、多少の配送や業務の効率化は望めるかもしれませんが、大都市の市場への出荷集中は解消されず、余った農産物の市場間転送や、遠くに出荷するという無駄が残ってしまいます。仮想市場を用いてめざしたい最適な需給マッチングは、需要と供給を生産地に近い消費地でマッチングさせる、地産地消に近い状態にすることです。そのためには、1つの市場の情報だけでなく、複数の市場の情報を仮想市場に集め、市場間の融通を事前に考慮し、複数市場の需給量と配送コストの情報も加味した最適な需給マッチングを実現することが必要です。

現在の取り組み状況

仮想市場の実現に向けては、農産物卸大手で複数の青果卸売市場をグループ内に有している神明グループとともに、各課題について段階的に検討、取り組みを進めています。直近では課題(a)「データの収集とノウハウのデジタル化」について実証実験を行っています。この実証実験では、市場に集まる注文（需要）と供給のデータと、分荷と呼ばれる需給のマッチング業務のデジタル化に取り組んでいます。

■分荷デジタル化の全体像

現在の業務のフローと、分荷デジタル化を行った将来像の業務フローを図4に示します。現状の業務フローでは、産地からの入荷情報も、仲卸からの注文情報も電話やFAXなどでやり取りされています。さまざまななかたちで入ってくる需給の情報を、分荷担当者が紙のメモやエクセルなど自分の慣れた方法でまとめています。このとき、事前に需給調整がされているわけではないので、産地や等階級別の需給はもちろん、需給の総数もぴったりとは合いません。そこで、個別の注文や仲卸ごとに、どのくらいであれば産地や等階級、数量の違いが許容されるのかという、注文票には書かれていない分荷担当者のノウハウを基に、その時々状況に合わせて分荷を実施します。また、卸売市場には「全量引き受け」という原則があり、入荷した農産物はすべて引き受けなければなりません。ですので、注文より多い数であっても追加で引き受けしてくれる仲卸を探し、入荷したものをすべてを手作業で分荷します。

分荷デジタル化を行った後は、需給情報はツール上に集約され、ツールを確認することで需給の状況が一目で分かるようになります。また、1つひとつ手作業で分荷先の候補を探し、分荷案を作成していたところを、ツールを使うことで、自動で分荷案を作成できるようになります。将来的には集約された需給情報からボタン1つで分荷が完了する自動分荷をめざしており、その自動分荷の結果を手動で修正する場合も、

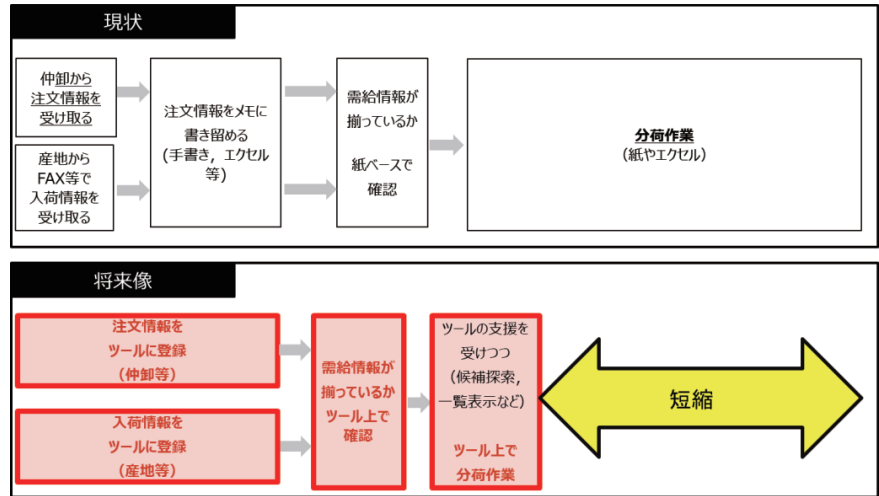


図4 分荷ツール導入前後の分荷業務の業務フロー比較

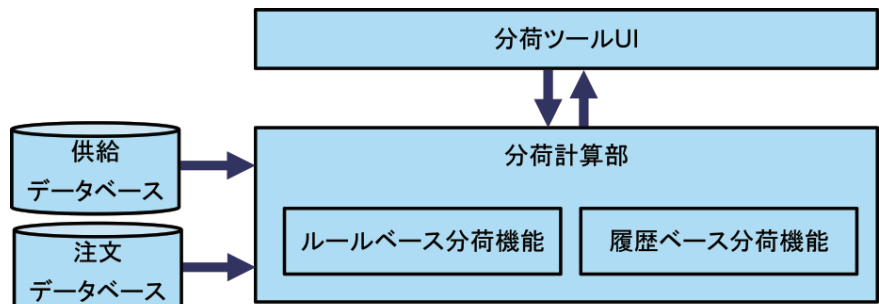


図5 分荷ツール機能ブロック図

簡単な操作でどの注文と供給を紐付けるか、等階級や産地など条件を付けて候補を探せるようになるなど、分荷にかかっていた業務時間を大幅に短縮できるようになっています。

■分荷ツールの機能ブロック

分荷ツールは図5で示す機能ブロックにより構成されます。

この分荷ツール利用時の流れは次のとおりです。

- ① 産地からの供給情報が供給データベースに、仲卸からの注文情報が注文データベースに登録されます。
- ② 分荷計算部にて、登録された供給情報と注文情報を基に、ルールベース分荷機能と、履歴ベース分荷機能呼び出し、分荷案を作成します。
- ③ 作成された分荷案を、UI（User Interface）で確認し、必要に応じて分荷

担当者が手動で修正を行います。

- ④ 最終的に確定された分荷結果は履歴ベース分荷機能にて、その分荷結果を収集し、解析され、学習された内容は、次回以降の自動分荷案生成に反映されます。

■分荷計算部に必要とされる要件

自動分荷に求められる要件は、分荷担当者が実際の業務を通じて行っているさまざまな判断を反映することです。分荷担当者が判断、考慮している内容としては、例えば、以下のようなものがあります。

- ・数量の確保を最優先にしたマッチングを行う。
- ・産地や等階級について注文の指定どおりのマッチングを行う。
- ・必ずしも注文どおりではなく、分荷担当者の想定でマッチングを行う。
- ・等級、階級の呼び方が出荷者によりまちまちであり、注文とも異なる場合が

ある。これらを正しく扱ってマッチングさせる。

これらを完全に実現するのが理想ですが、実際には分荷担当者が時期や天候などによって変わる供給量や、特売やフェアなどの条件の異なる注文などさまざまな状況に応じて臨機応変に判断をしています。また、仲卸によっても考慮しなければならない条件は変わってきます。このような、分荷担当者が考慮するさまざまな条件や想定を適切に反映できる方法を検討しています。

■自動分荷のアルゴリズム概要

まず、注文と供給に同様の属性を持たせ、注文と供給の比較を行います。例を表1、2に示します。

また、数量を必ず満たす必要がある注文については、その条件を表す数量必須フラグを持たせます。例えば注文1にそのフラグがあった場合は、注文1としては、注文の数量「10」を満たす分荷結果が出せるようになります。

次に、分荷担当者が、産地が合っていることを重視してマッチングを行うのか、それとも数量を満たすことを優先するのか、といった異なる判断基準を考慮できることを、注文1の例を用いて説明します。

① 産地が条件と合致することを優先して分荷を行う場合：注文1は、数量を満たさないが産地の条件を満たす供給1へ割り当て、数量は6とする。

② 数量を満たすことを優先して分荷を行う場合：注文1は、産地は異なるが数量の条件を満たす供給2へ割り当て、数量10とする。

③ 産地が条件と合致することを優先し、数量必須フラグがある注文に分荷を行う場合：注文1は、産地の条件を満たす供給1へ割り当て、数量は6、さらに、産地は違うが供給2の数量4を割り当てることで数量10とする。

このように、自動分荷によって、分荷担当者が考慮するさまざまな判断基準（暗黙知となっているノウハウ）に応じた分荷結果を出力できるようになります。このようなデータを用いたマッチングのアルゴリズム

表1 供給情報

供給	産地	等級	階級	数量
供給1	栃木県	A	L	6
供給2	熊本県	A	M	10

表2 注文情報

供給	産地	等級	階級	数量
注文1	栃木県	秀	L	10
注文2	愛知県	A	L	10

ムとしては、上記の条件をルールとして表現する方法のほか、マッチングの好ましさをパラメータ表現し、これを用いてマッチングを最適化する方法の検討を進めています。

また、分荷担当者の持つノウハウのデジタル化には履歴ベース分荷機能も活用します。この機能では、ツールが作成した分荷案を分荷担当者がそのまま利用したのか、修正したのか、修正した場合はどのように修正したのかの結果を蓄積し学習します。ルールベースでは表現しきれない分荷担当者のノウハウをこの機能により学習し、考慮した分荷結果を出力できるよう取り組んでいます。

今後の展望

現在はまだまだ仮想市場の実現に向けた一歩目に過ぎません。本取り組みは、従来の農産物流通の仕組みを変え、物の流れとお金の流れを分けた、新しい仕組みをつくることになるので、実現には関係者の理解と協力が必要となります。技術以外にも解決していかなければならない課題はありますが、仮想市場を通じて、日本の農産物の流通を大きく変え、生産者から消費者までかわる多くの人により良い価値の提供をめざして取り組んでいきます。

■参考文献

(1) <https://www.maff.go.jp/j/shokusan/>

- sijyo/info/attach/pdf/index-165.pdf
 (2) https://journal.ntt.co.jp/wp-content/uploads/2022/11/nttjnl1201_20221201.pdf
 (3) https://agri.mynavi.jp/2022_03_11_186303/



(上段左から) 富田 準二/ 馬場 俊宏/
引地 孝文

(中段左から) 豊島 詩織/ 平野 泰宏

(下段左から) 花籠 靖/ 磯田 暁

農産物流通に関係ないと考えられる方も多いかと思いますが、仮想市場が実現すると、私たち農産物の消費者として、スーパーなどの小売店や飲食店でより新鮮な農産物を手にすることができるようになります。仮想市場には私たちの生活をちょっと良くしてくれるという一面もありますので、実現を楽しみにお待ちください。

◆問い合わせ先

NTT コンピュータ&データサイエンス研究所/
NTT スマートデータサイエンスセンタ
E-mail sdsc@ntt.com



電力安定供給に向けた日射量予測による 太陽光発電計画の精緻化

環境負荷削減のために、再生可能エネルギー比率を高めた電力の需給調整が求められています。広く普及している太陽光発電では、全天日射量と発電量に強い相関関係があることから、発電計画を作成する際に全天日射量が主な変数として活用されています。しかし、全天日射量は観測誤差、および予測誤差が大きく、それゆえに発電計画の誤差が大きいため電力の安定供給や需給調整コストなどの点で問題が生じています。私たちは、気象情報と発電実績を組み合わせることで全天日射量を高い精度で予測する技術を確認したことで、太陽光発電計画の精緻化を実現しました。

キーワード：#太陽光発電、#発電量予測、#全天日射量

まき 榎 俊孝 / 松井 一真
ふじなみ たかし くらさわ ひさし
藤波 崇志 / 倉沢 央
とみた じゅんじ
富田 準二

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所/
NTTスマートデータサイエンスセンタ

はじめに

社会・経済システムの発展に伴い、個人の多様なニーズに対応した技術・サービスが誕生し豊かな社会生活を送ることができるようになりました。しかし、その一方で地球温暖化・気候変動の問題が顕在化しており、カーボンニュートラルが大きなテーマになっています。

NTTグループは、2021年9月に「事業活動による環境負荷の削減」と「限界打破のイノベーション創出」を通じて、環境負荷ゼロと経済成長を同時実現する、新たな環境エネルギービジョン「NTT Green Innovation toward 2040」を策定しました。カーボンニュートラル実現に向けた主な取り組みとして、「再生可能エネルギーの利用拡大」、および「IOWN導入による電力消費量の削減」があります⁽¹⁾。「再生可能エネルギーの利用拡大」では、他社から再生可能エネルギーの電源を調達するだけでなく、自社グループでPV (Photovoltaics: 太陽光発電) をはじめとする再生可能エネルギーを開発し、パートナー様やNTTグループ各社での利用を進めています⁽²⁾。

再生可能エネルギーの利用拡大を進めるためには、電力の安定供給が不可欠です。再生可能エネルギーは、発電量が自然条件によって変化するので、いつ、どこで、どれだけの発電量が得られるのかを計画することが難しい電源です。これまで、発電

事業者は、再生可能エネルギーの発電計画を作成しなくてもFIT (Feed-in Tariff: 固定価格買取) 制度^{*1}により安定的に売電収入を得ることができ、再生可能エネルギーの開発や利用を積極的に進めることができました。しかし、FIP (Feed-in Premium) 制度^{*2}の導入により、発電事業者は、再生可能エネルギーの発電計画を作成し、その計画に基づいて電力市場などでの取引が必要になりました。

再生可能エネルギーには水力や風力、太陽光などのさまざまなものがありますが、経済効率性や環境適合 (適地) などの観点から日本国内では特にPVの利用拡大が進んでいます。PVは、発電量 (出力) と全天日射量に強い相関があり、正確な発電計画を作成するためには全天日射量を正確に観測し予測する必要があります。

本稿では、まず、再生可能エネルギーの利用拡大にあたって基本となる電力の安定供給について広く述べます。次に、計画誤差の問題が顕在化しているPV出力予測の改善に向けた全天日射量の観測、および予測の誤差低減方法について述べます。

電力の安定供給に必要なこと

電力の安定供給とは、端的にいうと停電しないように電力の需要量と供給量を完全一致させることです。供給量が需要量よりも多かったり、逆に少なかったりすると、さまざまな電気製品が動作不良を起こし、

最悪のケースでは停電してしまいます。そのため、電力システムを支える電気事業者は、電力の安定供給に最大限に努める義務が課せられています。具体的には、日本では「計画値同時同量制度」が導入されており、発電事業者や小売電気事業者は1コマ30分単位で電力量の計画と実績を一致させる義務があり、全体として発電計画と需要計画が一致するように運用されています。電力システムは、図1に示すように発電事業者や小売電気事業者、一般送配電事業者によって構成されています。計画と実績を一致させる義務は発電事業者、および小売電気事業者に課せられており、やむを得ず計画と実績に乖離 (インバランス) が生じた場合は、一般送配電事業者が調整力を利用してインバランスを解消します。ただしこの場合、インバランスの量に応じて後日清算が必要になり、基本的にはスポット市場 (一日前市場) や時間前市場 (当日市場) などの電力市場で需給調整した場合よりもコストが増大する傾向にあります。そのため、発電事業者や小売電気事業者は、事業リスクの低減や収益の最大化のためにもインバランスが生じないように正確な計画の

*1 FIT制度: 再生可能エネルギーにより発電された電力を電力会社が固定価格で買い取る制度のこと。

*2 FIP制度: 再生可能エネルギーにより発電された電力を事業者自ら電力市場などで売電し、その売電価格に対してプレミアム (補助額) を上乗せる制度のこと。

作成が不可欠です。

一般的に、発電事業者によるインバランスのことを発電インバランスと言い、小売電気事業者によるインバランスのことを需要インバランスと言います。また表に示すように、それぞれのインバランスの状況に応じて2種類のインバランスが存在します。例えば、発電計画よりも発電実績が下回った場合は不足インバランスと言い、不足分の電力量を一般送配電事業者が補填し後日請求されます。逆に発電計画よりも発電実績が上回った場合は余剰インバランスと言い、余剰分の電力量を一般送配電事業者が買い取ります。余剰インバランスの場合は発電事業者に損失が生じないようにもみえますが、買取料金は後日に判明しますし、いずれにしても一般送配電事業者に対して調整量に応じた対価の支払いが生じます。繰り返しになりますが、発電事業者や小売電気事業者は、事業リスクの低減や収益の最大化のためにもインバランスが生じないように正確な計画の作成が不可欠です。

PV出力予測の課題

正確な発電計画を作成するためには、発電量の正確な予測が必要です。再生可能エネルギーは、自然変動電源とも呼ばれるように、発電量の出力が気象条件や季節、時間帯などによって大きく変動します。PV出力は、太陽光パネルの表面に降り注ぐ全天日射量の強度により大きく変化します。基本的には、全天日射量の強度に加え、地形や建物などによる影の影響、太陽光パネルやPCS（Power Conditioning System）^{*3}の特性、太陽光パネル表面の水滴・汚れの状況などが分かればPV出力を正確に予測可能です。しかし、PV出力予測に関する既存の技術・サービスは誤差が大きく、各社とも誤差低減に向けて予測技術にさまざまな工夫を取り入れたり、発電バランシンググループの構築や再エネアグリゲーションにより誤差をならしたりして、誤差低減を図っています。また、系統蓄電池の導入により発電インバランスを抑制する取り組みも実施されています⁽³⁾。しかし、これらによるならし効果には限界があり、また、系統蓄電池を利用するにして

もインバランスを吸収できるだけの容量を確保する必要があります。発電事業者の立場において、再生可能エネルギーの導入拡大を進めるためには発電インバランスが小さいこと、およびコストメリットがあることが前提になりますので、PV出力予測の誤差低減が不可欠です。

PV出力予測における誤差の原因は、主に全天日射量の観測誤差、および予測誤差にあることから、これらの誤差を低減することが重要です。

全天日射量の観測は、一般的に気象衛星により観測されており、地上観測値と衛星観測値では図2(a)に示すように大きな誤差があることが分かります。仮に地上観測値と衛星観測値が完全一致していれば赤い直線上に点がプロットされますが、実際はかなりの誤差が生じています。地上観測の全天日射量が真値なので、地上観測の全天日射量を利用できることが望ましいのですが、全天日射量を地上観測している気象台は全国に約50カ所しかなく、広範囲の全天日射量を均一に観測することができません。アメダスで観測されている日照時間のデータなどを用いて疑似的に全天日射量を観測する技術・サービスも存在しますが、全天日射量と日照時間は別物であり、また、日照時間を観測可能なアメダスの観測地点も全国に約690カ所⁽⁴⁾しかなく、任意地点の正確な全天日射量を得られにくいのが実情です。

全天日射量の予測は、主に数値モデルと統計モデルの2つの手法が用いられています。数値モデルは、物理法則に基づいて太陽放射や大気放射、雲やエアロゾルなどの要素を計算し、未来の全天日射量を予測するものです。統計モデルは、過去の観測データや衛星画像などを利用して全天日射量と他の変数との関係性を解析し、未来の全天日射量を予測するものです。数値モデルと統計モデルを組み合わせたアンサンブルモデルや、最近では深層学習モデルにより予

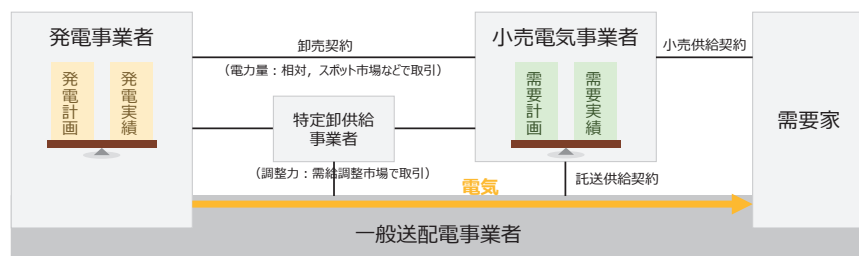


図1 電力システムの概略

表 インバランスの種類

	計画>実績	計画<実績
発電事業者	不足インバランス 計画を下回った発電量となっており、電力が不足している状態	余剰インバランス 計画を上回った発電量となっており、電力が余っている状態
小売電気事業者	余剰インバランス 計画を下回った需要量となっており、電力が余っている状態	不足インバランス 計画を上回った需要量となっており、電力が不足している状態

*3 PCS：太陽光パネルで発電された直流電力を交流電力に変換するシステムのこと。

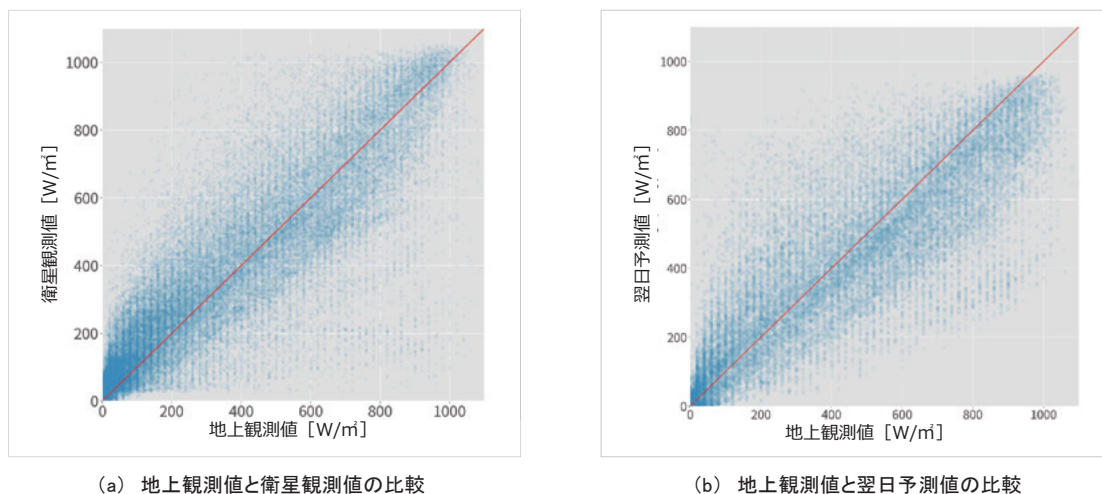


図2 全日射量の観測誤差, および予測誤差の例

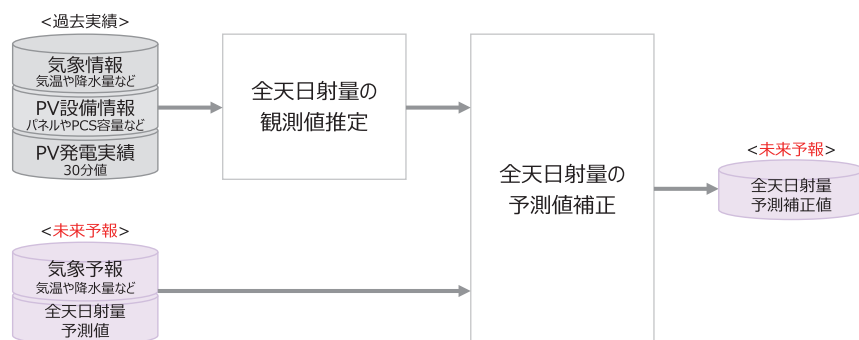


図3 提案手法の概略

測する手法が提案されています⁽⁵⁾。ただし、現在広く利用されている数値予報モデルによる全日射量の予測値は、雲量や気圧などのさまざまな気象要素を予測した後に最終的に算出されることが一般的であり、各種要素の予測誤差が全日射量の予測誤差につながるため、図2 (b)に示すように全日射量予測でも大きな誤差が生じています。同図は、全日射量の地上観測値と、気象会社が提供する翌日の予測値との関係性を表したものであり、ここで示されている誤差が直接的にPV出力予測の誤差として表れます。

そのため、PV出力予測の誤差低減のために、全日射量の観測誤差を低減して高品質のPV出力予測モデルを構築し、また、

全日射量の予測誤差を低減して高精度なPV出力予測ができるようにします。

PV出力を用いた全日射量の観測・補正技術

本技術は、図3に示すように全日射量の観測値推定、および予測値補正の2つの機能から構成されます。これらの機能により、全日射量の観測値と予測値の誤差を低減します。

■全日射量の観測値推定

全日射量の観測誤差を低減するためには地上に日射計を高密度で設置することが理想ですが、設置費や維持費などの観点から現実的な手段ではありません。そのため、

遠隔監視が可能なPV出力を利用して全日射量を高精度に観測します。従来からPV出力を用いて全日射量を観測する技術は存在しますが、太陽光パネル出力だけを用いていたり、近隣建物や地形の影響、太陽光パネル表面の水滴・汚れの状況などを考慮していなかったりと、サービス開発までは至っていない状況でした。

そこで私たちは、複数地点の気象情報やPV設備情報、発電実績を活用することで、間接的に近隣建物や地形の影響などを考慮し、高精度に全日射量を観測できる手法を提案し、社会実装まで達成しました。

本手法は、図4に示すように(a)全日射量観測モデルの構築、および(b)観測モデルを用いた全日射量の観測値推定の2つのフェーズが存在します。

(a)では、全日射量を地上観測している気象台や自社観測の地点周辺のPV設備を選択し、気象情報やPV設備情報、発電実績を説明変数とし、また、地上観測の全日射量を目的変数として全日射量観測モデルを構築します。具体的前処理方法については割愛しますが、例えば、太陽光パネル表面の水滴・汚れの状態を考慮し観測精度を高めるために、数日前から当日の降水量やPV出力の傾向などを説明変数としてつくり込んでいます。また、PV出力は

PCS容量^{*4}以上の出力が得られず、全天日射量とPV出力が無相関になることがあるので、観測時間帯前後のPV出力などを説明変数としてつくり込むことで、PV出力が頭打ちになっている状態でも精度良く全天日射量を推定できます。

(b)では、(a)と同じ説明変数の構造で別地点・メッシュ^{*5}における各種データを説明変数として組み込むことで、全天日射量を地上観測していない地点であっても地上観測相当の全天日射量を高精度に推定することができます。

10地点（北海道や福島、群馬など）にお

いて性能評価を実施したところ、本手法による観測は、従来の気象衛星による観測と比べて誤差が50%程度小さいことを確認しました。

■全天日射量の予測値補正

全天日射量の予測誤差を低減するために、過去の全天日射量の観測値と予測値の誤差を解析し、また、予測時刻直近の最新の全天日射量を用い、全天日射量の予測値を補正することで誤差低減を実現しました。

全天日射量の予測値は、たとえ1時間先の予測値であっても大きな予測誤差が生じています。予測誤差の低減のために、気象

衛星により観測した最新の全天日射量を用いて補正する技術・サービスも存在しますが、全天日射量の観測値そのものにも大きな誤差が含まれており、補正の効果が十分に得られていないような状況でした。

私たちは、全天日射量観測モデルにより得られた地上観測相当の全天日射量を使用し、全天日射量の予測値を補正しています。本手法は、図5に示すように(a)予測値補正

*4 PCS容量：直流・交流変換の最大容量のこと。
*5 メッシュ：網の目（メッシュ）に区分けされた地域。

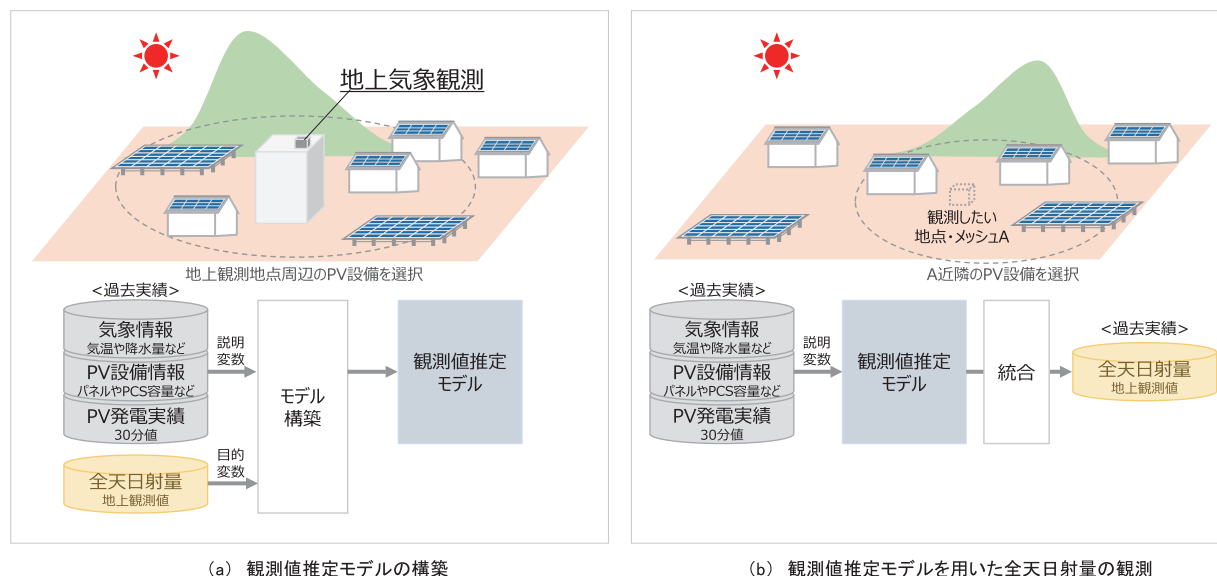


図4 全天日射量の観測値推定

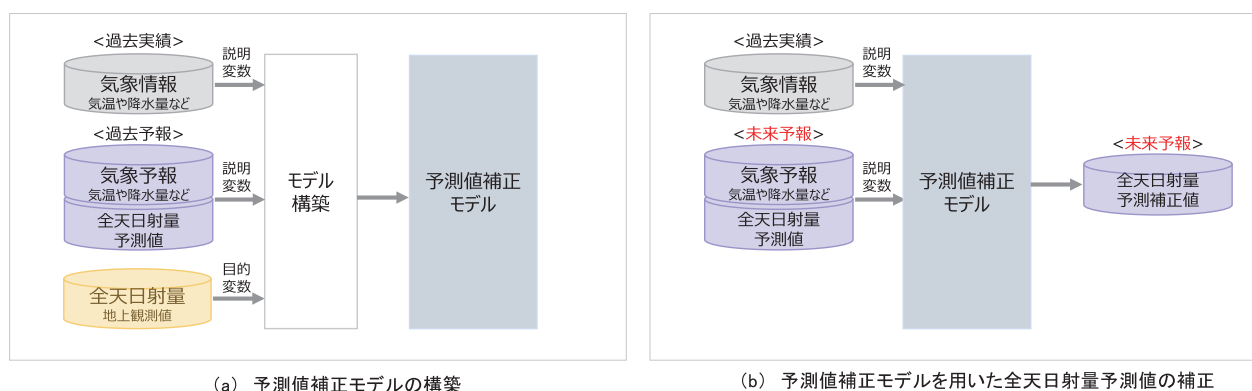


図5 全天日射量の予測値補正

モデルの構築、および(b)予測値補正モデルを用いた全天日射量予測値の補正の2つのフェーズが存在します。

(a)では過去の気象情報、気象予報、および過去の全天日射量観測値、予測値を用いて予測値補正モデルを構築します。予測値の補正は、①気象状況に連続性があること、②地域固有の気象特性が存在すること、③予測値は実績値よりも低めの値が出やすいことの3点を考慮しています。

①では、例えば現在の天候が曇りの場合、数時間先も曇りであることが往々にしてあります。そのため、現在の全天日射量を考慮して数時間先の全天日射量を補正することで誤差が低減することがあります。

②では、例えば神奈川県は晴れの時間数が多く、秋田県は晴れの時間数が少ないといった地域固有の気象特性が存在します。また別の観点では、例えば標高や地形などの影響から同じ東京都内であっても日が出ている時間数で30分程度の地域差が生じることがあります。このような地域固有の気象特性を考慮し補正することで誤差が低減することがあります。

③では、観測と予測のメッシュサイズの違いによって、予測値が実績値よりも全体的に低い値が出ることがあります。例えば、観測は1 kmメッシュ単位、予測は数値予報モデルの仕様都合などにより5 kmメッシュ単位で実施されていることがあり、この場合では予測値が実績値よりも全体的に低い値が出ることがあります。このようなメッシュサイズの違いによる値の乖離を考慮し補正することで誤差が低減することがあります。

以上の3点を考慮することで、全天日射量の予測値を実績に近い値に補正することが可能になります。

(b)では、最新（未来）の気象予報を補正モデルに入力することで、補正された未来の全天日射量を得ることができます。

本手法は、当日数時間先における全天日射量予測値の補正だけではなく、翌日・翌々日における全天日射量予測値の補正にも成

功しており、補正効果に地域差はありますが従来比25%程度の誤差低減を実現しています。

今後の展望

再生可能エネルギーの主力電源化を達成するためには、電力の安定供給や事業リスクの低減などが必要であり、再生可能エネルギーの発電インバランスを低減がすることが不可欠です。そこで私たちは、PV出力予測の誤差を低減するために、誤差の本質的な原因となっている全天日射量の観測、および予測の誤差低減手法を提案し、実フィールドでの効果を確認しました。しかし、気象会社が提供する全天日射量予測値の誤差が大きい場合、補正による誤差の低減効果が小さいことが分かっています。

そのため、気象会社が提供する全天日射量予測によらない新しい予測技術の検討を実施していく予定です。また、発電量の予測だけでなく、デジタルツイン（DT）によって電力の供給量と需要量を考慮して需給マッチング全体を最適化し、脱炭素社会における電力の安定供給をめざして研究開発を進めています。これにより、持続可能な社会の実現に向けて貢献していきます。

参考文献

- (1) 吉松・八木・松尾・朝倉：“NTTグループの新たな環境エネルギービジョン「NTT Green Innovation toward 2040」,” NTT技術ジャーナル, Vol.33, No.12, pp.44-47, 2021.
- (2) 角田・桐本：“NTTアノードエナジーのスマートエネルギー事業,” NTT技術ジャーナル, Vol.33, No.12, pp.56-59, 2021.
- (3) https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2022/pdf/3_3.pdf
- (4) <https://www.mlit.go.jp/common/001043841.pdf>
- (5) A. M. Assaf, H. Haron, H. N. A. Hamed, F. A. Ghaleb, S. N. Qasem, and A. Albarrak: “A Review on Neural Network Based Models for Short Term Solar Irradiance Forecasting,” MDPI, Appl. Sci., Vol. 13, No. 14, p. 8332, 2023. <https://doi.org/10.3390/app13148332>



（上段左から）倉沢 央／ 榎 俊孝／
松井 一真

（下段左から）富田 準二／ 藤波 崇志

再生可能エネルギーの主力電源化を達成するためにはさまざまな問題を解決する必要があります。私たちは、電気事業者やその他の関係会社と協力・連携し、DTやデータサイエンスを駆使して課題解決に積極的に取り組んでいきます。

◆問い合わせ先

NTTコンピュータ&データサイエンス研究所/
NTTスマートデータサイエンスセンタ
E-mail sdsc@ntt.com



NTT未来ねっと研究所
上席特別研究員

李 斗煥 Doohwan Lee

約100年前に登場した理論を掘り起こして、世界トップデータを実現

スマートフォンの登場で一気に普及が進んだ移動通信。そして、高速・大容量、低遅延、他端末同時接続等の特長がある5G（第5世代移動通信システム）サービスも広まりつつあり、さらに、国際標準化機関である3GPP（3rd Generation Partnership Project）では6G（第6世代移動通信システム）についての初期検討も始まっています。こうした移動通信の発展を技術的基盤として支えているのが、無線通信技術です。サブテラヘルツ帯を用いて合計1.44 Tbit/sの大容量無線伝送に世界で初めて成功した、NTT未来ねっと研究所 李斗煥上席特別研究員に、世界トップデータを出した技術、「電波を使い切る」研究、「研究で社会や人を幸せにするためには、自分が幸せになる必要がある」という思いを伺いました。



無線技術における高速・大容量化の限界に、OAM技術によりブレークスルーを引き起こす

現在、手掛けていらっしゃる研究について教えてください。

私は、学生時代からNTT入社後も無線通信に関する研究を行ってきました。無線通信の研究といっても、電波伝搬に関する研究、干渉の抑制や制御に関する研究、電波に信号を載せる方式の研究等、その分野は広範にわたっています。その中で、無線による高速・大容量通信に関して追究してきました。

無線技術で高速・大容量をめざすには、MIMO（Multiple Input Multiple Output）のような空間多重数の増加、伝送帯域幅の広帯域化、変調多値数の増加といった技術で対応してきましたが、変調多値数の増加技術は、ほぼ限界にきており、数10%の改善は見込めるものの、10倍、100倍といった改善は望めそうもありません。そこで、空間多重数の増加技術において、新たな発想が必要と考え、OAM（Orbital Angular Momentum：軌道角運動量）の概念を無線通信へ適用したOAM多重伝送に着目しました。

OAMとは、電波の性質を表す物理量の1つであり、電波の進行方向の垂直平面上で位相が回転しながら進行することで、分かりやすくいうと同一位相の軌跡が進行方向に対してらせん形状に現れます（図1）。そして一般的に、この位相の回転数をOAMモー

ドと呼びます。例えば、図1の左側の図は、上から、OAMモード1、OAMモード2、OAMモード3の同一位相の軌跡を表します。OAMの性質を持つ電波は、送信時と同じOAMモードを持った受信機を使うことで受信することができます（例えばボルトとナットの関係のようにらせん構造の合ったものどうしでなければ受信できません）。また、異なるOAMモードを持つ複数の電波を同時に送信しても、それぞれの送信時のOAMモードに合った位相の回転数を持った受信機を用意すれば、それぞれの電波を互いに干渉することなく分離することができます。したがって、それぞれのOAMモードにデータを載せることで、複数の異なるデータを多重伝送することができます⁽¹⁾（図1右側）。そして、OAMモードは理論的に無限に増やせることができるため、多重数を無限大に増やすことができます。一方、OAMの性質を持つ電波は、電波の進行により電力が空間的に広がる性質があり、OAMモードが高くなるほど（位相の回転数が多くなるほど）これが顕著になります。電波の広がりにより、受信アンテナサイズが一定の場合、伝送距離が長いほど受信できる電力が低下することから、OAMモードが高いほど伝送距離が伸びず、伝送距離の限界となります。

さて、OAMは、20世紀初頭には机上の理論として登場しているのですが、実現手段がなかったことから、実際の環境における検証は行われてきませんでした。近年になり、高周波数帯における無線通信技術の成熟につれ、ミリ波帯での広い帯域幅を用いたOAM多重伝送が実現してきました。実験室レベルの結果としては、米国の南カリフォルニア大学により、2014年に28 GHz帯で、

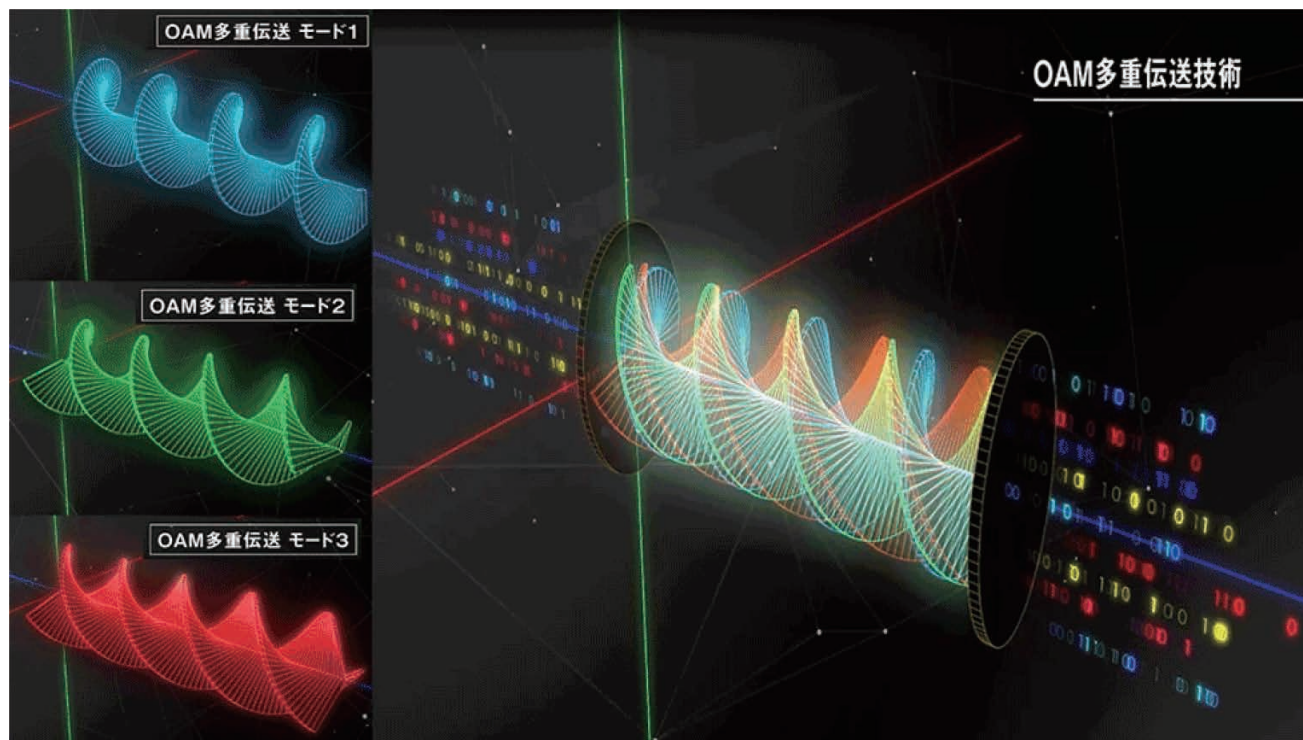


図1 OAM多重伝送技術の原理

2016年に60 GHz帯を用いてそれぞれ32 Gbit/sの伝送が報告されています。そして、2018年にはNTTにおいて、ミリ波帯などを用いて世界で初めて100 Gbit/sの容量を10 mの距離でのOAM多重伝送を実現し、2020年に100 mの距離での伝送に成功しました。

OAM多重伝送により世界で初めてサブテラヘルツ帯において1.44 Tbit/s無線伝送に成功したそうですね。

私たちは、伝送距離を少しでも伸ばすために高いOAMモードを利用することなく、かつ、異なるOAMモード間で互いに干渉しない性質を維持しつつ、複数セットのOAM多重伝送を同時に行うことにより大容量化を図るために、広く利用されているMIMO技術を融合させたOAM-MIMO多重伝送技術を考案し、28 GHz帯で無線伝送を行える送受信装置を試作しました（図2）。この送受信装置は、5つのOAMモードの電波を送受信ができる円形アレーアンテナ（UCA）を4個、中心にアンテナ素子1個を備えています。中心の1つのアンテナで構成されるUCA#0以外のUCA#1～4は、それぞれOAMモード-2、-1、0、1、2を生成し、5つのOAMモードの電波を多重することができます。同一のモード内で多重された信号は、受信機でMIMO技術により分離します（図3）。これらの素子を介して、合計最大21のデータ信号の同時伝送が可能です（図3の構成の場合）。

この送受信装置を用いた、100 Gbit/s級の伝送容量を達成するための信号処理技術は、各信号の受信品質を考慮して変調多値数とチャネル符号化率を適応的に判断する適応変調符号化技術

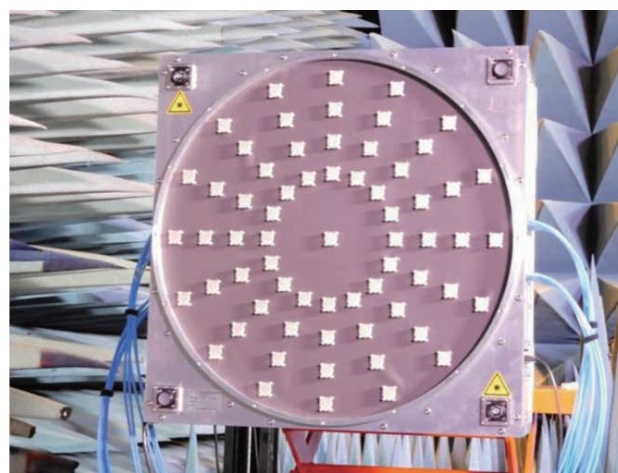


図2 送受信装置の試作機

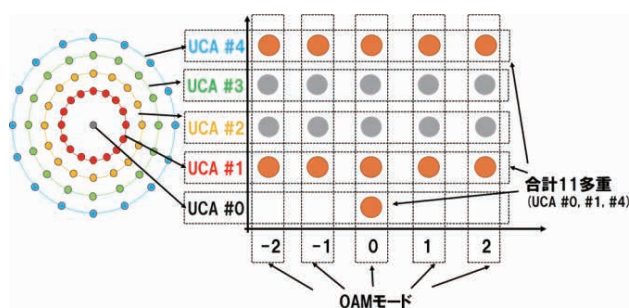


図3 OAM-MIMO多重伝送技術の構成例

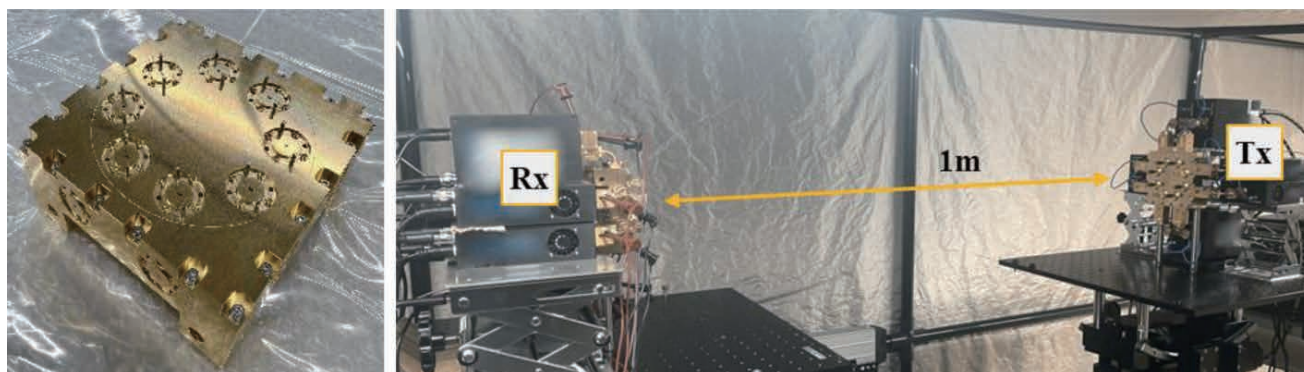


図4 サブテラヘルツ帯で開発されたアンテナ一体型Butler回路と伝送実験の様子

(AMC : Adaptive Modulation and Coding), 送信電力制御技術, 受信側の信号分離技術から構成されます。これらを活用し, 多重数10を超える多重伝送により100 Gbit/sのデータ信号をエラーなく伝送するエラーフリー伝送を10 mの距離で実現し(2018年), さらに100 mの距離で実現しました(2020年)。

さらに私たちは, 1 Tbit/sを超える大容量通信において, 異なるOAMモードの電波間の干渉を除去するための膨大なデジタル信号処理を低減することができる, Butler Matrixと呼ばれるアナログ回路(Butler回路)を用いて複数のOAM波を多重処理することにより, 空間多重数を増加させるアプローチを採用し, 広帯域かつ低損失で動作するアンテナ一体型Butler回路を開発することに成功しました(図4)。このアンテナ一体型Butler回路は, 135 GHzから170 GHzの周波数において非常に広い帯域で, 8個の異なるOAM波を同時に生成および分離できるように設計されており, これを用いることで8個のデータ信号を多重して伝送することができます。

ところが, Butler回路により8つのOAM波を同時に伝送するためには, 電波の位相を極めて高い精度で制御する必要があります。電波の位相の進み方は周波数によって異なるため, アナログ回路によって広帯域にわたり位相を均一に制御することは非常に困難です。そこで, 自由空間とは異なる導波路内の特有の電波伝搬を解析し, 理論的に広帯域にわたって位相の進み方を均一にそろえることが可能な位相回路を考案しました。そして, 性能劣化要因である回路の平面交差をなくし, すべての経路が電氣的に等しい長さになるように, 先述の位相回路を含む多層立体経路(図5)を設計することにより, 35 GHz幅以上にわたって各OAMモードに必要な位相を与えることができるButler回路を試作し, 8個のデータ信号を多重して伝送することを可能としました。さらに, 異なる2つの偏波でそれぞれOAM多重伝送を行うことで, 互いに干渉することなく2倍の16個のデータ信号を同時に多重して伝送できます。

このアンテナ一体型Butler回路を用いて伝送試験を実施し, 135.5~151.5 GHzと152.5~168.5 GHzのサブテラヘルツ帯を用いて合計1.44 Tbit/sの大容量無線伝送に世界で初めて成功しました(2023年3月)。これにより, 光伝送系に匹敵する広帯域かつ高速

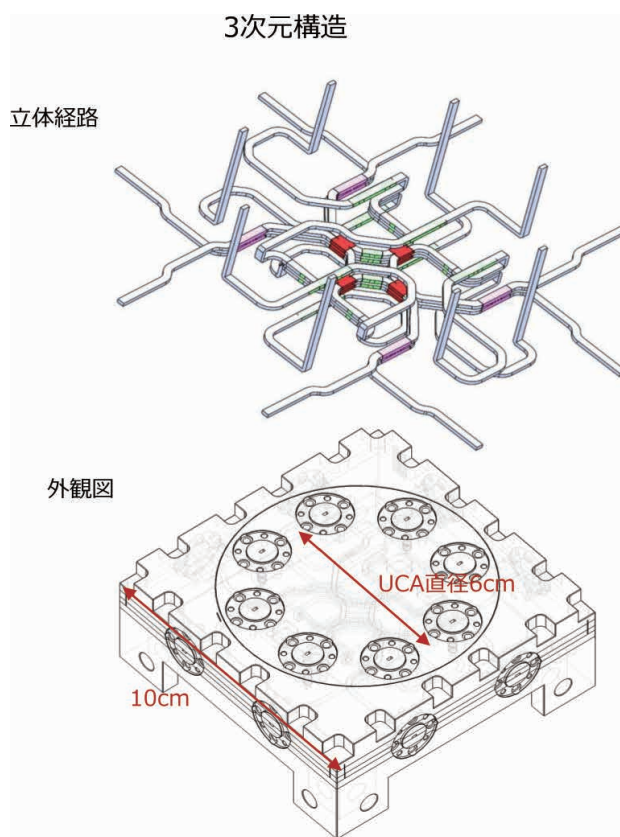


図5 Butler回路の立体構造および外観図

な無線伝送を実現するとともに, OAM波の多重処理をアナログ回路が担うため, 多重処理のための複雑なデジタル信号処理システムを要することなく, シームレスに無線伝送系と光伝送系を接続可能とすることをめざします。

今後は, 100 mを超える長距離での実証実験に取り組み, さらに伝送距離を伸ばすことで, 移動通信基地局間の無線バックホール・フロントホールや中継伝送などへの応用等により, IOWN (Innovative Optical and Wireless Network)・6G(第6世代移動通信システム)時代に対応する無線通信技術として, VR(仮想現実)・AR(拡張現実)や高精細映像伝送, コネクティッドカー,

遠隔医療など、将来の多様なサービスの創出および普及を支えていくことが期待されます。



「電波を使い切る」究極の研究者をめざす

過去の理論を掘り起こして世界トップデータを記録するとは、面白いアプローチですね。この先、どのような研究者をめざしているのでしょうか。

OAMについては、約100年前の理論を近年になって実証できるようになり、今後の実用化に向けた展開が期待されるところです。電波の物理的な特性で今まで使われていない、あるいは着目されてこなかった別の特性も多々あり、それを使うことでさらに無線の使い方の自由度を上げる、無線技術の幅を広げることをテーマにしたいと考えています。

例えば、電波には直進性があるので、進行方向の先に障害物があるとそこで止まってしまう。これを何とか回避して障害物の先に進めるようにする、回折という特性もあるのですが、一部が漏れて障害物の裏に回り込むだけなので、そうではなく電波のビームそのものを曲げて障害物を回避する技術が考えられます。また、電波には広がる特性があるので、これが受信電力を弱める原因になっていますが、逆にこれを現在のビームよりもさらに絞り込むことができれば、受信電力を高めることができます。光は電波の周波数が極めて高くなったものですが、光にはレーザのようにビームがかなり絞り込まれたものが存在するのですが、電波ではまだ実現していません。また、干渉は無線通信においては厄介者といった扱いを受けることが多いのですが、逆にこれを利用して通信効率を上げることができるのではないかと、ふと考えただけでもいくつかあります。

こういった研究を極めることで、これまでの発想にない無線通信が可能になると思います。こうしたことを繰り返していくうちに、まさに「電波（の特性を）を使い切る」「電波を支配する」といったような究極の世界に到達できるのではないのでしょうか。そして、その残された最後の特性を私が使い切るという役割を担いたいと思っています。



いいアイデアは余裕が生み出す。余裕は自分が Well-being であることで生まれる

研究者として心掛けていることを教えてください。

研究者として第一人者となるためには、常に研究のことを考えてそれに没頭する、生活の中でも研究を意識することが必要だというイメージを持つ人がいると思います。研究者として研究に取り組む中では、研究に没頭することが必要な場合やタイミングもありますが、そればかりだと壁にぶつかった場合、そこですべてが終わってしまいます。私はむしろ、研究は余力から生まれると

思っています。自分の生活や体力、時間等に余裕がなくて、非常に不安な状況では研究に関するアイデアも出ません。身体的にも心理的にも、そしてプライベートでも仕事でも、余力・余裕があってこそ、研究アイデアにつながると考えています。入浴中にいいアイデアが出たような話を聞いたことがありますが、まさに入浴中はリラックスしている人が多いと思いますので、余裕があるときのなのです。私も余力・余裕といえるかどうか分かりませんが、歯磨きをしているときに特許につながるアイデアが出たことがあります。

そのために私は、余力が出るような生活を送ろうと心掛けています。ワークライフバランスを考えた勤務時間を励行し、運動もしっかりやろうとしていますし、家族やプライベートもしっかり守ろうとしています。自分の状況が非常に落ち着いて、余力が出るようにすると、自分のプライベートな人生も幸せになるし、そこから自然に研究アイデアも出るようになると思いますので、自分を極端に追い込まないようにしています。似たような話ですが、6Gのユースケースとして Well-being 関連が研究されていますが、自分が Well-being にいないと、Well-being の研究もできないのではないかと思います。研究の成果は終局的には、社会や人を幸せにするものと思っており、人を幸せにする研究は、自分が幸せでないとできないのです。まず自分が Well-being を楽しんで、自分が幸せになることが大切で、そこから人を幸せにする研究ができるのではないかと考えています。

後進の研究者へのメッセージをお願いします。

前述のとおり、自分が Well-being とか、豊かな生活、幸せであることを経験する中で、研究も豊かで充実したものになり、その結果自分も満足し、豊かに、幸せになるという正のスパイラルが出来上がってきます。こうすることで、研究を楽しみながらできるようになります。とはいえ、時間は限られており、期限という概念もあります。そこで、仕事の順番や進め方を工夫することで、時間的な余裕が生まれ、それを Well-being なことに回せば、それがまさに正のスパイラルにつながるのです。

ただ、自分にとっての Well-being とは何か、自分の生活のリズムはどのようなものなのかといったことは、個々人で異なるため、正のスパイラルは全員が同じものではなく、あくまでも1つのイメージです。そこで、自分としての正のスパイラルをつくっていくうえでも、自分にとっての Well-being とは何か、自分の生活のリズムはどのようなものなのかといったことを一度考えてみる必要はあります。自分のことは自分にしか分かりません。自分は自分に対する専門家なのです。

参考文献

- (1) 李・笹木・八木・山田・加保・清水：“NTTがめざす5Gの次世代を実現する伝送技術,” 電波技術協会報 FORN, Vol.10, No.328, p p.22-25, 2019.
- (2) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2018/05/15/180515a.html>
- (3) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/03/30/230330a.html>



NTTドコモ

クロステック開発部 担当部長

檜山 聡 Satoshi Hiyama

スマートフォンのデータとAIで、医療・ヘルスケア分野における社会課題解決にチャレンジ

高齢化が進む日本の社会において、介護サービスや医療サービスを利用する人が増加傾向にあり、健康保険等の医療費の高騰が社会課題となっています。また、医師不足や偏在、過重労働も医療を取り巻く社会課題となっています。一方で、スマートフォンが身近な端末として利用されていますが、その中のセンサ等から収集できるデータには、健康状態の推定や健康改善に資するものも数多くあります。AI（人工知能）により健康状態や、生活習慣・行動の分析・予測を行い健康改善につなげることで、医療・ヘルスケア分野の社会課題解決をめざすNTTドコモ クロステック開発部 檜山聡氏に、「HealthTech 基盤」を活用して実現されるサービス、そして社会課題解決にチャレンジする思いを伺いました。



スマートフォンのデータから健康状態をAIで推定し、健康改善に向けたアドバイスを実施

現在、手掛けている技術の概要をお聞かせいただけますか。

NTTドコモには9700万人を超える会員基盤があり、そのほとんどがスマートフォンの利用者です。スマートフォンを通じて得られる位置情報や各種センサ等からの情報を、お客さまから許諾を得たうえで利用して、お客さまの健康状態や疾患の発症リスクをAI（人工知能）により推定し、その結果に応じて健康改善アドバイスを行うサービスを提供しています。ここで利用する情報は、お客さまが能動的に入力するのではなく、スマートフォンを日常利用するだけで収集可能なことが大きなポイントと考えています。こうしたサービスは、「HealthTech 基盤」⁽¹⁾と呼ばれるプラットフォーム上に搭載された各種AIを、API（Application Programming Interface）を通じて提供するかたちで実現されています（図1）。現在、開発中も含めて、「HealthTech 基盤」で提供されるサービスラインアップとして、ストレス状態の推定⁽²⁾、脳の健康状態チェック⁽³⁾、フレイルと呼ばれる高齢者の心身虚弱状態の推定⁽⁴⁾、血圧を上昇させる生活習慣の推定⁽⁵⁾、免疫力の変化の推定⁽⁶⁾、歯周病判定⁽⁷⁾等があります。

まずはじめに、健康管理や健康増進を目的としたヘルスケアAIの具体事例として、「フレイル推定AI」⁽⁴⁾を紹介します。加齢とともに体力が衰え、それに伴い心の働きも弱くなり、それが進むこ

とで要介護状態に陥ってしまいますが、その前段階をフレイルといい、フレイルをいかに早く検知して対策するか、が重要となります。厚生労働省（厚労省）もこれに注目しており、アンケートや握力測定等を通じたフレイルの検知に取り組んでいますが、健康診断等の機会を利用して年に1回程度しか実施できておりません。また、このようなイベントに参加しない人のフレイル検知は特に難しく、フレイルリスクが高い住民を効率的かつ早期に発見することが自治体の課題となっています。

フレイルは社会的に孤立したり、身体的な活動量が減ったり、生活習慣が乱れたりするとリスクが高まることが知られており、生活に密着したスマートフォンの普通の使い方からフレイルリスクを推定できないかと着想しました。電話やメールの発着信頻度、SNSの利用頻度等から社会的孤立度を推定し、位置情報や歩数等から身体的な活動量を推定、さらに就寝時刻や起床時刻、睡眠時間、外出時間等から生活パターンと規則正しさを推定して、そこからフレイルリスクを算出する、「フレイル推定AI」を開発しました（図2）。AIのモデルは、フレイルチェックリストと呼ばれる厚労省が定めているアンケートの回答を被験者実験にて正解データとして取得し、その正解データとスマートフォンのログとの相関を基につくりました。したがって、アンケートの実施や利用者によるデータ入力を行うことなく、スマートフォンのログだけでフレイルリスクを推定することができます。

このフレイル推定AIサービスは、「健康マイレージ」というアプリ上で、主として自治体向けに提供しており、これまで自治体職員が一軒一軒、高齢者の住民を訪問して声掛けを行うことでフ

- ・健康状態や疾患発症リスクを推定するAIエンジンをAPIで利用可能なHealthTech基盤を商用開発
- ・ドコモのサービスに限らず、多様な分野のパートナーと協業し、HealthTech基盤を利用したサービスを展開

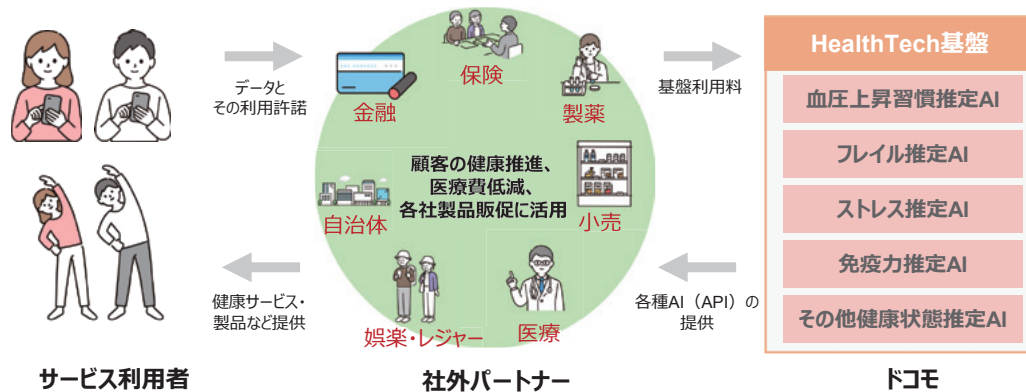


図1 HealthTech基盤の開発

東京都の公募事業、愛知県豊田市の先進技術実証事業に採択され、フィールド実証を通じてAIの推定精度を確認。ドコモの自治体・企業向け健康増進サービス「健康マイレージ」にて2022年9月より商用提供開始

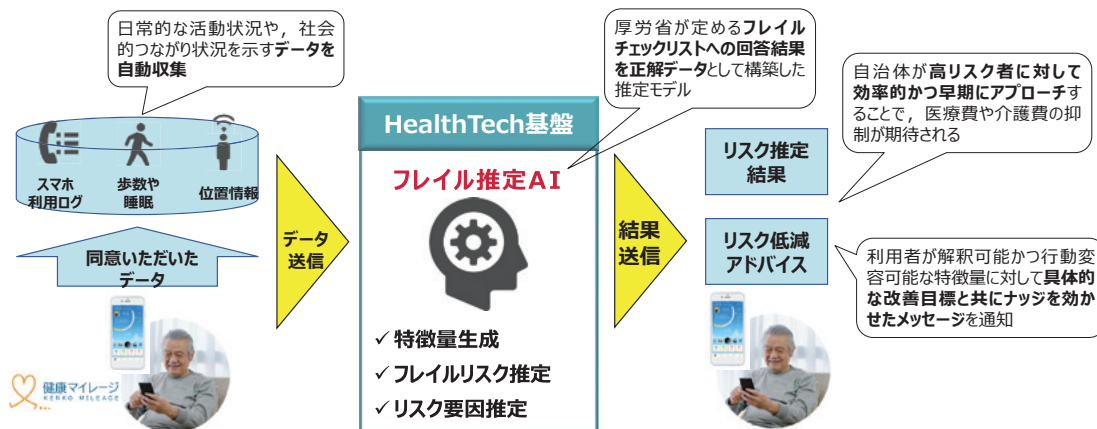


図2 フレイル推定AIの開発

レイルの兆候を確認していたものが、このサービスによりフレイルリスクが高い住民から訪問でき、大幅な効率化が期待されます。また、フレイルリスクを高めている生活習慣の改善に向けて、利用者ごとに具体的な数値目標を伴う改善アドバイスをフィードバックすることで、フレイルになるリスクを低減できることを東京都の公募事業にて実証できました。こうした成果と技術の革新性が認められ、ウェルエイジング経済フォーラムが主催する「Well-being & Age-tech 2023 Award」において優秀賞を受賞しました。

次に、病気の診断や治療を目的とした医療機器になるメディカルAIの具体事例として、「歯周病発見AI」⁷⁾を紹介します。歯周病は自覚症状が少ないため、自分ではなかなか発見がしにくく、重症化してから歯科を受診する事例も少なくありません。20歳代でも約6割はすでに歯周病に罹患しているといわれている一方で、実際に歯周病検診を受ける方が非常に少ない状況で、厚労省もこれを問題視しています。さらに歯周病が原因となって全身疾患に

陥ることもあり、糖尿病や心筋梗塞、脳梗塞等の原因にもなる等、非常に大きなインパクトがあるので、いかに早く歯周病を検知し、歯科への受診勧奨を行うことが重要です。

この歯周病検知をAIにより行うのが「歯周病発見AI」で、現在、東北大学の歯科の先生方と共同開発を行っています。スマートフォンのカメラを使って口の中、特に歯茎を撮影してもらい、AIを使って画像分析することで歯1本1本に対応する歯茎ごとに歯周病の罹患可能性を画像判定するAIです（図3）。

主な使い方としては、自治体や企業の医科の健康診断のオプション検査項目として導入し、歯周病の罹患可能性が高い結果が出た場合に、歯科への受診勧奨を行う展開を考えています。

現在、厚労省が国民皆歯科健診という、歯科健診を半ば義務化して、早期発見・治療をめざす国策の導入を検討しています。歯科医が全国民の歯科健診を行うことは非現実的であるため、厚労省主導で「歯周病等スクリーニングツール開発支援事業」が立ち

スマートフォンで歯肉を撮影するだけで口腔疾患を発見できるAIの 社会実装に向けて、研究開発中



図3 歯周病発見AIの開発

上がっています。NTTドコモは、本事業に採択され、厚労省と連携を取りながら医療機器開発を進めています。なお、「歯周病発見AI」のような医療機器となるAI製品の設計、開発、販売を行うことを可能とするため、2022年2月に第二種医療機器製造販売業の許可を取得し、医療機器製造業の登録を完了しています⁽⁸⁾。あまり知られていないかもしれませんが、NTTドコモは医療機器メーカーの一員でもあるのです。

「HealthTech基盤」には、他にどのようなサービスがあるのでしょうか。

主なものとして、「血圧上昇習慣推定AI」⁽⁵⁾と「免疫力推定AI」⁽⁶⁾があります。

高血圧症患者は約4300万人と推計されており（厚生労働省、平成28年度国民健康・栄養調査）、そのうち約1400万人が「未治療・認知なし」と推計されています。これは、健康診断時など一時的な血圧測定では高血圧の見逃しが発生し、診察で検知できないケースが多いことを示唆しています。そのため、家庭での継続的な血圧測定・把握が重要となりますが、血圧計を持っていない、持っても測定が面倒で続かないといった声が多く聞かれるため、能動的なアクションを必要としない、より手軽な手法が必要となります。これに対して、「血圧上昇習慣推定AI」は血圧を測定することなく、スマートフォンの日常使いから血圧を上昇させる生活習慣の存在を推定し、生活改善アドバイスをフィードバックするものです。広島県神石高原町の公募事業に採択され、50代以上の住民50名を対象としたフィールド実証を2022年12月から3カ月間実施し、実証期間内で血圧上昇リスクが改善した参加者が76%、血圧上昇リスク高の参加者の92%がリスク低に改善したという結果を得て、「血圧上昇習慣推定AI」の導入効果が確認されました。2023年8月より「健康マイレージ」サービスを通じて商

用提供を開始しています。

「免疫力推定AI」は、スマートフォン利用ログと気象データを基に利用者の生活習慣・環境情報を特徴量化し、生体内の免疫力変化を予測するAIです。免疫力推定AIは、「IgA」というウイルスや細菌などさまざまな病原体が体内に侵入することを防ぐ「抗体」に着目しています。IgAの分泌量が減ると病原体に感染しやすくなり、その分泌量は運動や睡眠などの生活習慣と関連している医学的事実が報告されています。この事実に基づき、生活習慣情報等とIgAの日常的变化との関係性を学習させることで、免疫力推定AIの開発を実現しました。普段知ることのできない自身の「免疫力の変化」を、唾液採取や採血等を行うことなくスマートフォンを日常利用するだけで推定可能で、免疫力のスコアリングや免疫力ケアに向けたアドバイスが可能となります。2023年11月より「健康マイレージ」サービスを通じて商用提供を開始しています。

「あなたとあなたの大切な人たちを1つの間にか健康で幸せにするため」の開発

技術者としてスキルの維持、スキルアップはどうしていますか。

私は2000年にNTTドコモに入社以来、研究所をはじめとしたR&D部門に在籍しています。この間、モバイル通信にかかわるネットワーク制御やモビリティ制御に関する研究開発を行っており、医療ヘルスケア分野は2004年ごろにプロジェクトを立ち上げたときからです。私自身、大学では通信工学が専攻であり、当時の社内には医療やヘルスケアに関する専門家もおらず、自ら専門性を極めないとはいけなと考え、会社の支援制度を活用して、生命科学分野の博士号を取得しました。それをベースに、自身の研究開発テーマを進めながらチームメンバーの育成を行ってまいりました。

「HealthTech基盤」に関しては、医療ヘルスケア分野のほかAIやクラウド関連のスキルも必要になります。これらの領域は日進月歩なので、高いアンテナで技術や市場の動向を自ら積極的に収集したり、学会に参加したりしています。

一方で、医療ヘルスケア分野といっても、医療とヘルスケアでは法制度をはじめ、取り巻く環境が大きく異なります。特に、医療機器を扱うためには、薬機法をはじめとした法令や各種省令・通知を熟知しておかねばならず、外部のセミナー等も活用しながら勉強の日々です。医療機器を設計、開発、販売を行うには業（免許）が必要であり、業取得に際しては、経験やノウハウを持っている人材が当時の社内にはおらず、手探りのスタートで苦労しましたが、医療機器メーカー出身者で薬事対応や医療機器開発の経験者を中心にキャリア採用してチームを立ち上げ、比較的短期間で業を取得できました。このほか、大学医学部・歯学部との共同研究を通して、業界に対する理解を深めてきました。

開発において大切にしていることは何でしょうか。

私が兼務している事業部門であるヘルスケアサービス部では、「つなぐ。寄り添う。育む。あなたとあなたの大切な人たちのいつの間にか健康で幸せにするために」というパーパスを掲げています。この中で特に大事なのが、「いつの間にか健康で幸せにする」という部分です。日本は国民皆保険制度になっているために、欧米と比べて自身の健康に対して投資して病気を予防するという意識が低いので、健康維持・増進のために能動的なアクションを求めることが難しいと感じています。そのため私たちは、「スマートフォンを日常利用するだけで、いつの間にか健康で幸せになる」という世界観を実現したいと思い開発に取り組んでいます。

そのためにも、お客さまや営業現場で求められていることに迅速に対応していくことは重要ですし、そこを人任せにしてしまうとなかなか意思が伝わらない部分もあるので、現場も自分の目で見て感じる事が大事だと思っています。同様に、システム開発も外部の業者に丸投げしては良いものではないと思っていますので、しっかり開発現場も見つつ、ある程度自分たちでも内製できるようにチームをマネージしています。幸いにも、私が事業部門と兼務しているので、新しい技術を使ったサービスやプロダクトの企画から開発、そしてお客さま提供まで、一気通貫で手掛けられることは非常にありがたいです。

社会への貢献という観点では、先に説明した開発AIを健康増進ツールとして利用することで医療費や介護費の低減、AIを医師の補助ツールとして利用することで医師不足や医療の地域格差の是正、医師の負担軽減に役立つのではないかと考えており、社会課題の解決を意識した開発を進めています。

誰でも最初は初心者。トライ・アンド・エラーでチャレンジ

将来的に何をめざして開発を続けたいのでしょうか。

現在、「歯周病発見AI」や「脂質異常症患者の生活習慣改善を支援する治療用アプリ」⁹⁾をはじめとするソフトウェア医療機器開発において、スキルもノウハウも全くないところからチャレンジしていますので、試行錯誤の連続で苦労しながらも、医学的な意義やエビデンスをしっかりと示して、これら製品を何とか世の中に出していきたいと思います。そしてそれらを礎にして、医療分野におけるAI活用を拡大していきたいです。

今後は、HealthTech基盤を通じた、さまざまな業界におけるAI導入事例を量産し、ビジネス規模もスケールするところまで取り組んでいきたいと思っています。

社内外の技術者、パートナーへのメッセージをお願いします。

研究開発を進める中で、机上でいくら考えても分からないということがあります。そのようなときに、実際にその分野や現場に足を運んでみると気付くことが多々あります。さらに自分で手を動かしてみる、アクションを起こしてみるにより、見える景色も変わってきます。そしてそれが次のアクションにつながります。

ところが、最初の一步を踏み出すことは勇気のいることでもあり、躊躇もあるかもしれません。頭の中で初めから1から10まで全部考えようとすると、ますます一歩が出なくなります。誰でも最初は初心者なので、失敗することもあると思います。その場合は、やり直せばいいのです。トライ・アンド・エラーを繰り返すつもりで「まずはやってみる」ことが重要だと思います。

そして、自分たちだけでできることも限られていますので、志を同じくするパートナーの皆さまとコラボレーションすることも欠かせません。医療ヘルスケア領域における社会課題の解決に向けて、一緒にチャレンジしませんか。

参考文献

- (1) https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2022/09/26_02.html
- (2) 山本・濱谷・落合・田中・深澤：“スマートフォンログを用いたストレス・注意機能推定技術の開発,” NTT DOCOMOテクニカル・ジャーナル, Vol.28, No.4, pp.31-38, 2021.
- (3) https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/info/news_release/topics_230126_00.pdf
- (4) 山内・熊谷・小林・山田：“スマートフォンログによる要介護リスク低減を目指したフレイル推定AI,” NTT DOCOMOテクニカル・ジャーナル, Vol.30, No.4, pp.46-52, 2023.
- (5) 池添・山本・山内・荒川：“スマートフォンログを用いた血圧上昇習慣推定AIの開発,” NTT DOCOMOテクニカル・ジャーナル, Vol.31, No.4, 2024.
- (6) https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/info/news_release/topics_230508_00.pdf
- (7) https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/info/news_release/topics_230929_01.pdf
- (8) https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2022/02/16_01.html
- (9) https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/info/news_release/topics_240115_02.pdf



NTT社会情報研究所
特別研究員

高橋 順子 Junko Takahashi

光情報処理基盤の安全を支える 「光論理ゲートで構成する光暗号回路技術」

NTTが推進する6G（第6世代移動通信システム）/IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）時代では、光技術を駆使した次世代通信ネットワークが実現されます。しかしそこで問題になっているのが暗号化の技術です。たとえ光回路が実現されたとしても、暗号演算が現在のままでは遅延や無駄な電力消費が発生してしまい、光技術のメリットを十分に活かすことができません。NTTではこの課題を解決するため、従来電子で行われていた暗号演算の複雑な処理を光に置き換えようとする研究に取り組んでいます。今回は、IOWN時代に対応した「光演算法」を考案して「光暗号回路」を実装した高橋順子特別研究員にお話を伺い、光暗号技術研究の現在と未来の見通しについて語っていただきました。

◆PROFILE：2004年早稲田大学理工学部物理学科卒業。2006年同大学大学院理工学研究科物理学及応用物理学専攻修士課程修了。同年、日本電信電話株式会社入社。2012年電気通信大学情報理工学研究科博士課程修了。博士（工学）。専門はハードウェアセキュリティ。これまでサイドチャネル攻撃対策技術、自動車セキュリティ技術、組み込みセキュリティ技術の研究に従事。現在はNTT社会情報研究所にて光暗号回路の研究に従事。産業技術総合研究所サイバーフィジカルセキュリティ研究センター客員研究員。電子情報通信学会会員。情報処理学会会員。2023年より特別研究員。



革新的な暗号技術で、APNの安全性を実現

■はじめに、「光論理ゲートで構成する光暗号回路技術」とはどのような技術でしょうか。

私が研究している「光論理ゲートで構成する光暗号回路技術」とは、従来は電子で行われていた暗号演算を光で実現する技術です。この研究を開始したきっかけは、2019～2020年ごろに当時NTTがIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想を大々的に提唱したことにあります。IOWNの鍵となっている光技術を、私自身がこれまで携わっていた暗号やセキュリティ技術の研究に活用することで、暗号技術をはじめとした革新的なセキュリティ技術を創出できないかと考えたのが本研究テーマの始まりです。

従来では暗号演算のような複雑な処理は電子で行うことが常識でした。一方、IOWNでは、サーバなどのコンピューティング環境やあらゆる電子機器を光技術によるデバイスに置き換えて光ネットワークで結ぶことで、低遅延・低消費電力などの実現をめざしています。演算処理を光技術で実現する中で、もし暗号演算だけが電子回路で実装されていれば、光電変換のために大きなオーバーヘッド（負荷）がかかってしまうため、コンピューティング環境

全体での演算性能が下がってしまいます。そこで新しく研究を開始したのが「光論理ゲートで構成する光暗号回路技術」です。暗号演算も、IOWN構想におけるオールフォトンクス・ネットワーク（APN: All-Photonics Network）の中で、光を使って実装することによって、さらなる低遅延・低消費電力の演算を実現し、環境負荷を低減させることができると考え、光回路を用いた暗号回路の作製・研究を開始しました（図1）。

■実際に研究を進める中で、どのような点に苦労されましたか。

研究を開始した当初は、単純に既存の光演算素子を組み合わせで実装すればよいと考えており、電子回路の回路設計・作製と同等の期間で容易に実現できると想定していました。しかし実際に研究を進める中で、理論とは異なるさまざまな物性的課題があることが判明したのです。まず暗号演算を行うために必要な光演算素子は、世界中でもまだ発展段階で、現在利用可能な光演算素子にも利用方法の制限がありました。

本来暗号を光回路で実現するためには、暗号処理を複数の論理演算で構成する必要があります。しかし現在利用可能な光演算素子には、複数の論理演算を行うことができないなどの制限があったのです。また遅延や消費電力といった性能面でもまだ発展段階で、APNが掲げる数値目標には到底届かないという現状があり

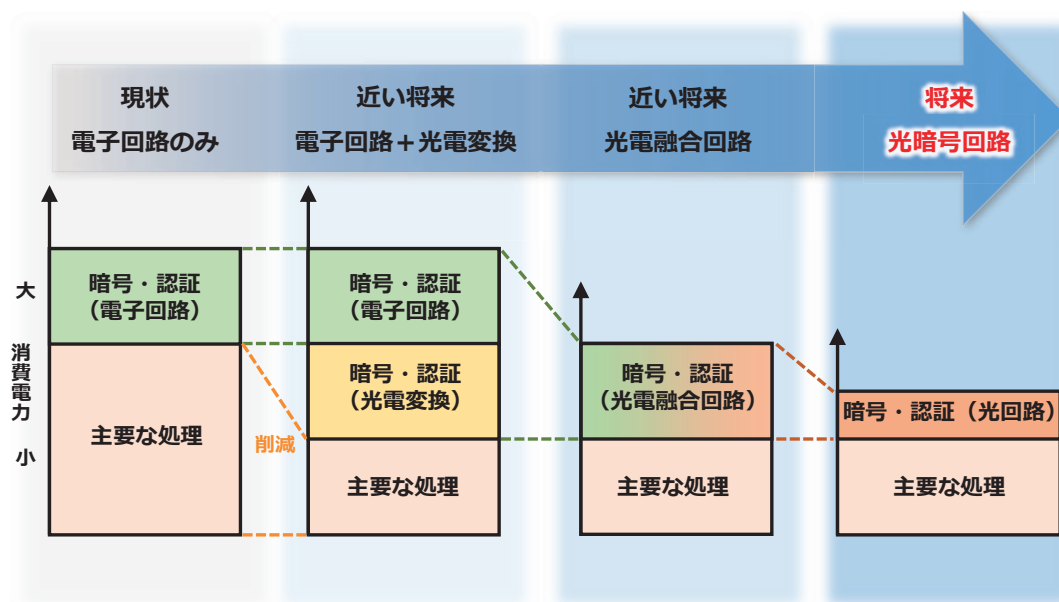


図1 光を用いた暗号回路の研究概要

ます。そのため本研究では、演算に制限がある光演算素子を用いて既存の複雑な暗号関数をどのように構成するか、というところが難しい点でした。加えて暗号演算を行うために必要なメモリやレジスタといった周辺回路も、まだ光技術で実現されていないため電子回路で実現する必要がありました。そのため低遅延・低消費電力実現に向けて、光回路と周辺回路の組合せをどのように行えば最大のパフォーマンスを発揮できるのかというところに非常に苦労しました。

また光デバイス作製上の課題として、設計図・回路チップ・周辺回路の作製といった工程をすべて行うのに1年単位といった非常に長い時間が必要になってしまう点も、研究を開始するまで予想していなかった大きな障壁でした。このため、短期間で製造が可能な素子を見極めて、その中で良い性能を導き出す必要があります。また回路チップは一度作製したら修正を行って後戻りすることができないため、どのように回路を構成してどういった方法で製造するかを慎重に見極めなければいけません。さらに性能の良い光演算素子を使うと全体的な回路規模が大きくなってしまいう傾向があるため、これをどのように抑えるかが大きな課題でした。

■現在までのご研究の成果を教えてください。

現在までの研究では、one-hot エンコーディングという手法を

用いて、暗号演算の主要な関数である非線形関数を実現する演算手法を考案しました。具体的には4ビット入出力のテーブル変換を行う関数を対象に、シリコンフォトリクス技術を基にした光暗号回路を作製しています。このone-hot エンコーディング手法では、基本的に光配線を基にして演算を行っています。光配線は電子回路とは異なり配線抵抗がないため、低遅延の演算が可能です。また通常の暗号演算ではビット（「0」または「1」）の表現を用いて演算を行います。one-hot エンコーディング手法を利用するためにはビット表現を16進数の表現（16通りの表現）に変換する必要があります。この変換にマッハツェンダ光変調器という、光演算素子の中でも比較の実装が容易なものを用いて、さらにその光変調器と光配線を組み合わせることで、暗号の非線形関数の光回路チップを世界で初めて実装しました。

加えて光回路チップの演算動作を検証するために、光回路チップと電気部分を組み合わせた光デバイスを作製し、非線形関数が本当に正しく演算できているのかを確認しています。この光デバイスは、光変調器を制御する電気信号（非線形関数の入力信号）が入力された後、数10ピコセカンドという非常に低遅延で演算することが可能という特長を持ち、APNの目標に大きく貢献していると考えています。



研究と関係がないようにみえる場所にこそ、「光」が射している

■これからのご研究の展望を教えてください。

これまでに研究開発した回路では入力電気信号で出力が光信号のため、光電融合回路となっています。しかし現在ではより低遅延・低消費電力の演算をめざし、論理演算が可能なYゲートやψゲートという光演算素子を用いて、入出力が光信号の非線形関数を実現する新たな光回路チップを作製中です。この光回路も正しく演算ができることを実験で確認しており、APNの未来に向けて着実に歩を進めていることを実感できています。

今後の展望としては、2030年代にハードウェアリソース分散を行う「光ディスアグリゲータッドコンピューティング基盤」が確立される際に、光暗号演算回路を実装して、新たな通信基盤を誰もが安全に利用できるコンピューティング環境の実現をめざしています（図2）。目標数値としては、従来の電氣的な暗号演算回路と比較して「遅延は1000分の1」「消費電力は100分の1」で動作可能な回路作製を掲げて日々研究に取り組んでいます。さらに将来的には、地上のコンピューティング環境だけでなく宇宙でのコンピューティング環境（宇宙統合コンピューティング・ネットワーク）で利用可能な光暗号回路を作製し、新時代の通信基盤に貢献

する大きな技術に発展させていきたいと考えています。

私が取り組むこの研究は前例がなく、研究を開始した当初の周囲からの反応は「そんな魔法のようなことができるのか」と懐疑的な反応ばかりでした。確かに研究を開始した2019年ごろには、やはりネットワーク部分だけが光通信と思っている方が大半で、一部演算は光で実現されていたものの発展途上の段階でした。そのような状況でもともとデジタル回路に設計されていた暗号回路を光に置き換えることに疑問を持つのは当然です。しかし初めて光を用いて暗号演算を実証して発表したとき、多くの方の好意的な反応をいただき、「今まで不可能だと思われた常識を少しでも変えることができた」と嬉しかったことを覚えています。現在は、暗号回路をすべて光で演算することはかなっていませんが、これからも徐々に光回路の可能性を示していくことで、より多くの方に納得いただける研究に取り組んでいきたいと思っています。

■NTT研究所にはどのような印象をお持ちでしょうか。

私が所属するNTT社会情報研究所は、基礎的な暗号技術だけではなく、ネットワーク・IoTシステムに対するサイバー攻撃対策技術や、秘密計算技術・AIセキュリティといったデータ保護技術などのセキュリティに関する研究、さらにはWell-beingといった人々の幸福をめざした研究や法制度・倫理に関する研究など、

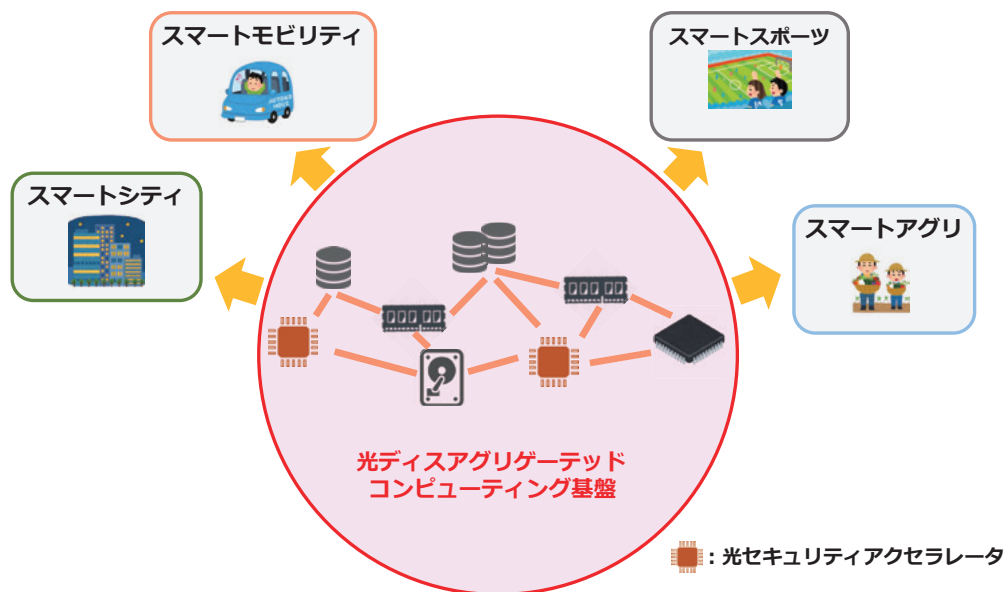


図2 描く未来：安心安全・低遅延・低消費電力のコンピューティング基盤に貢献

社会システムに関する幅広い研究テーマを扱っています。私自身は本研究を開始する前に暗号技術に関する研究とは離れて6年間ほどサイバー攻撃対策技術の研究に従事していました。このようにNTTでは社会システムに関するさまざまな研究テーマに携わることができ、私のように暗号関連の研究テーマを実施した後にサイバーセキュリティの研究に携わり、再び暗号関連の研究へ戻るなど、研究テーマを行き来することが可能なのびのびとした風土が醸成されており、多分野に興味のある研究者にとっては非常に魅力的な環境だと感じています。

またさまざまな研究テーマを扱っているNTT社会情報研究所では、研究を進める中で自身の専門外の問題に当たった際にも、身近な研究者に簡単に相談できるという強みがあると感じています。私は以前、研究を進める中で法律や倫理に関する問題に当たり、解釈を検討しなければいけない場面に直面したことがあります。当然専門外の内容だったため非常に困ったのですが、そのとき所属研究所に法律や倫理に関する研究テーマを扱う研究者が身近にいたためすぐに相談・解決することができ、円滑に自身の研究を進めることができました。このように自身の研究範囲外の問題が出てきた際にすぐに解決する手段があるのもNTTの強みであり、スピード感を持って研究を進められる環境はとてありがたいものだと感じています。

■最後に研究者・学生・ビジネスパートナーの方々へ向けてメッセージをお願いします。

一般的に研究業務というと、論文執筆・学会発表・特許執筆やビジネス化に向けた開発が主な仕事であると考えられるかと思いますが、しかし私は、研究を進めるうえで発生する研究以外の業務の地道なプロセスも、すべて自ら実施することを入社してからずっと大切にしています。例えば数年前に自動車のサイバー攻撃対策技術を実施していたころ、自動車に特有の機能をセキュリティの観点から評価するために、特定の年代に製造された、ある運転に関する機能が付いた自動車の入手が必要でした。新車としてはすでに販売されていない車種であったことから、日本全国の中古業者に自らアクセスしようやくの思いで見つけた中古業者に、自分たちで出向いて交渉と手続きを行いました。そしてその後はもちろん自動車の日々のメンテナンスも自分たちで実施しました。またそういった研究を行ううえで必要な関連装置も自ら選定して、日本国内で唯一設置された場所へ出向いて見学し、設置業者への交渉や社内での設備工事に関する手続きも含めて設置に必要なことを自分たちですべて行ったこともあります。

確かにこのようなプロセスは、一見すると直接的に研究業務と関係ないようにもみえます。しかし自分で汗をかき、すべてに取り組もうとすることで、その業界の裏や全体像がみえてくることがあるかと思います。特に自身の研究分野などとは異なる業界の研究分野へ飛び込む際には、その業界の裏にある默示的な「常識」や「作法」を知る必要もあり、それを知っているだけで他分野の方との交流がスムーズに進むこともしばしば起こります。そのため私は研究を行ううえでいつも「最大限できることはすべて取り組む」ことを実施して研究を進めています。

現在取り組んでいる光論理ゲートを用いた光暗号回路の研究は、暗号の理論的検討をはじめ、光回路チップの設計・作製、光回路チップと電気回路による光デバイスの作製、周辺回路の作製、回路チップの原理検証を行うための環境構築、といったたくさんプロセスが必要で、すべてを自らの手により取り組むこともできないので、本当に多くの方に携わっていただきながら研究を進めています。理論からデバイスまで多くの専門家がそろったNTT研究所は、これからも自分の考え・思いを具現化できる環境が整っていてとても心強いです。そういった環境で、これから1人でも多くの研究者・学生・ビジネスパートナーの方々と一緒に、IOWN時代の安全な情報基盤を構成する基礎となる技術を提供していきたいと思っています。もしこれを読んでご興味のある方がいらっしゃれば、ぜひ共に手を取って新しい未来に向けて一緒に挑戦していきましょう。



(今回はリモートにてインタビューを実施しました)



テルウェル西日本株式会社

<https://www.telwel-west.co.jp/>

NTT 西日本グループ テルウェル西日本

扱い商材が豊富な“非通信領域における総合商社”

テルウェル西日本は、1952年2月に発足した「財団法人電気通信共済会」に起源を持つNTT西日本グループの発展へ貢献するべく事業展開を図っています。2001年4月の独立・会社設立以来、オフィス物品・サプライの販売から、清掃や設備管理、BPO（Business Process Outsourcing）サービスへと業容を拡大し、“非通信領域における総合商社”としてロボットを活用したビジネス展開へと進化し続けています。ロボットを活用して、清掃関連業界のデジタルトランスフォーメーション（DX）に取り組む山田邦裕社長に話を伺いました。



テルウェル西日本
山田邦裕社長

お客さまに「快適さ」「便利さ」と「安心・安全」を提供し、社員が「明日もこの職場で働きたい」と思える会社を実現

■設立の背景と会社の概要について教えてください。

1952年2月11日に「財団法人電気通信共済会」が発足し、「電気通信事業の発展と生涯福祉に貢献する事業体」として、主として電電公社向けに相互扶助や福利厚生、そしてオフィス物品で、机や椅子、コピー機などを中心とした物販を行い、ストーブ用の薪や石炭を販売していたこともありました。テルウェル西日本は、この「財団法人電気通信共済会」を母体としています。1998年に財団法人の物販による営利行為が禁止されたことを契機に2001年4月に「財団法人電気通信共済会」から物販部門が分離して、テルウェル西日本が設立されました（同時にテルウェル東日本も設立）。2007年2月にNTT西日本グループの会社となり、物販や清掃に加えて設備管理等へ事業領域を広げてきました。

現在は、NTT西日本のエリアをベースとして、6支店および22営業支店を構え、約4400人の社員を擁し、「One Telwel to Future 皆さまの仕事・暮らしと共に 未来へ」をビジョンに、お客さまに「快適さ」「便利さ」と「安心・安全」を提供することをおして、地域社会の課題解決とNTT西日本グループの発展に貢献するとともに、テルウェル西日本グループ各社で働く社員が、「明日もこの職場で働きたい」と思える会社の実現をめざしています。

■具体的にどのような事業展開をしているのでしょうか。

現在はロボットを活用したハイブリッド清掃事業や設備管理、電力ピーク制御サービスなどの省エネソリューションを展開する

「総合ビルマネジメント事業」を中心として、中小企業向けのDX提案、オフィスプランニング、PC・什器等オフィス商材の販売を行う「オフィスソリューション事業」、幅広くBPO（Business Process Outsourcing）サービスを展開する「アウトソーシング事業」のほか、非常通報機や電柱広告など、多岐にわたる商材を扱い、“非通信領域における総合商社”としてお客さまのさまざまなお困りごとと解決を行っています。これらの事業は、NTTグループからの受託事業と一般市場向けの事業に大別されますが、一般市場のお客さまからの収益拡大にフォーカスし、さまざまなアライアンスパートナーとともに、新たなお客さまとの接点拡大、つながりをいただいたお客さまを大事にさせていただき、つながりをさらに広げ・深めていくことに注力しております。私どもは、新たな価値の創造に努めるとともに、お客さまに信頼されるパートナー企業であり続けることをめざし、当社の変革のスピードも一層加速し、社員一丸となって、次の時代につながる「挑戦」に取り組んでいきます。

ロボットの導入によるDXに業界全体として取り組む

■特に注力しているのはどのような事業でしょうか。

ロボティクス・ソリューションによるビル管理効率化を実現する「ロボット＆ロボット制御プラットフォーム」と電力ピーク制御サービスを中心とした「省エネソリューション」に注力しています。

「ロボット＆ロボット制御プラットフォーム」は、SDGs（持続可能な開発目標）への貢献、ビルメンテナンス業界の課題（人員不足・高齢化）解決に向けたソリューションとして、「ヒト」と「ロ

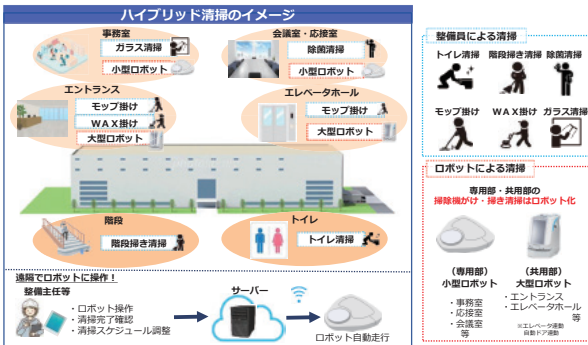


図1 ハイブリッド清掃



図2 清掃ロボット

✓デマンド制御機が自動的に空調制御や室外機への散水を実施し、最大デマンド値の抑制を図ることで、毎月の電力消費量削減を支援するサービスです。

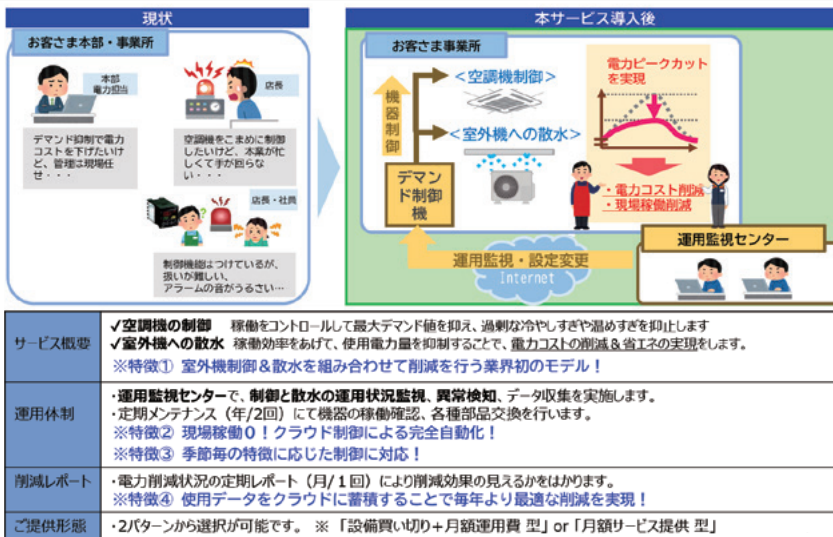


図3 電力ピーク制御サービス

「ロボット」の融合による「ハイブリッド清掃（図1）サービス」としてビジネス展開しており、ICTを活用したスマートビルメンテナンスを導入し、人×AI×利用状況に応じた最適なロボット（図2）をコーディネートした清掃サービスを提供しています。こうした清掃ロボットに加え、配膳ロボットや警備ロボット等の異なる役割を担うロボット群がデータ連携により同一空間で協調して稼働し、効率的なビル管理を実現する世界を見据え、NTT西日本と当社で「地図シェアリング技術」を共同開発しました。2023年11月にはugo株式会社と共同実証実験に取り組みました。実験では、清掃ロボットと清掃員がプラットフォームを通じて受信した、清浄度データを活用した清掃活動の実施や、マルチユースな点検・警備ロボットが施設内の巡回警備、消防、照明設備点検、紛失物確認等の複数業務をしながら、環境センサで清浄度の測定等を行っており、その結果を活かしてロボットを効率的に運用するICT基盤であるプラットフォームの構築をめざしています。

「省エネソリューション」については、電力使用量の管理・削減をととして省エネルギー化による環境保護への貢献に資するサ-

ビスとして、空調の無駄を減らし、コスト削減と環境への配慮で地球の未来に貢献する「電力ピーク制御サービス（図3）」を提供しています。お客様の導入障壁を軽減した「ESCO型（お客様の初期投資“0”モデル）のサービス提供を2023年秋より開始し、一層の省エネ・カーボンニュートラルビジネスの拡大に取り組んでいます。さらには、お客様の環境に合わせ、このサービスに他社の提供する省エネ商材を組み込むことで省エネ効果を最大化する等、より効果の高いソリューションを提供しています。

■今後の展望についてお聞かせください。

清掃や警備などのビル管理業務は、労働集約的業務であり、慢性的な人材不足

および高齢化がビル管理業界における大きな課題となっています。こうした課題解決に向けて、清掃ロボットや警備ロボットの導入によるデジタルトランスフォーメーション（DX）に業界全体として取り組んでいます。しかしながら、各分野においてロボットが個々に導入されており、それぞれのロボットの相乗効果を得るための効率化は図られていないのが現状です。そこで、先述の共同実証実験では、複数のサービスロボット導入がスタンダードになる時代を見据え、ugo社の「ロボットハードウェア機能」、NTT西日本と当社の「ロボットサービス・地図シェアリング技術」を組み合わせ、より効率的なビル管理の実現をめざしています。また、ロボットのみならず、人手不足、省エネ、DX推進等、お客様が必要とされるソリューションをご提案して、お客様の課題解決に努める、お客様に選ばれ続ける企業になっていきます。

「人」と「ロボット」を融合させた「ハイブリット清掃」を展開

総合ビルマネジメント部
商品開発担当 担当課長

栗田 真也 さん

■担当されている業務について教えてください。

総合ビルマネジメント部において、ビルメンテナンス（ビルメン）業務に関係する商材の発掘および新規プロダクト開発を担当しています。

社会課題（ビルメン業界）である人財不足・人件費高騰等の対策としてロボットの導入が必須となっていることから、その企画・開発に取り組んでいます。

具体的には大手メーカーと連携して業界初の国産クラウド型小型清掃ロボットの開発をして「ロボ★メン」としてサービス化を図ったり、長年NTTビルの清掃で培った高い清掃品質を活かしてさまざまなメーカーから出されている清掃ロボットの特長とお客さまの清掃現場をマッチングさせ、お客さまにとって最適なロボットを選定（目利き）をすると同時に、新しい清掃のカタチとした「人」と「ロボット」を融合させた「ハイブリット清掃」を展開しています。

単純なロボットの機器販売ではなく、お客さまのニーズ（お困りごと）と実際の運用を想定したお客さまごとの提案ができるように「開発社（メーカー）の目線」と「ロボット運用実績のあるビルメン会社の目線」の2つを上手く活用しています。

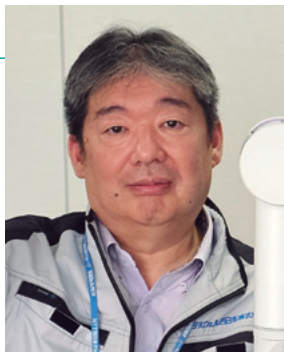
しかし、まだロボットを導入することを受け入れられない企業

様が多いことから、どのような開発・企画が必要かを考えながら日々精進しています。

■今後の展望について教えてください。

さらなるロボットの導入を加速させるために、稼働削減・各種ロボットを一元的な管理ができるようにNTT西日本と共同研究している屋内地図を変換・統合できる「地図シェアシステム」の展開と、各社展開しようとしているロボティクス基盤との「ロボ★メン」を含めた連携させ、社会課題の解決に努めていく考えでおります。またビルメン業界全体で品質を無視した「価格ありき」で清掃を受託している状況から脱却するならいもあり、飲食業界で実施されているミシュラン評価をビルメン業界で導入すべく、「清掃コンサル」の展開を始めたところです。これにより、お客さまへさらなる快適な環境の提供と建築物の価値向上・延命につなげることが可能となります。また、価格の適正化を図ることで、ビルメン業界全体の活性化が実現でき、ロボット群の導入が加速すると考えます。

最終的には清掃関連の業界イメージである3K（きつい・汚い・危険）から脱却させて、新たな3K（キレイ・かっこいい・高収入）を構築して業界全体を変えていければと思います。



テルウェル西日本 ア・ラ・ワ・ル・ト

■「第18回 全国ビルクリーニング技能競技会」で大会史上初の2連覇

2023年11月15～17日に東京ビッグサイトで開催された、「ビルメンヒューマンフェア&クリーンEXPO 2023」の2日目に開催された、「第18回 全国ビルクリーニング技能競技会」において、全国9地区からの代表・18名が競い合う中、近畿地区代表として出場したテルウェル西日本の天谷泰久社員が厚生労働大臣賞（優勝）に輝いたそうです（写真）。この大会は2年に1回開催されており、前回、厚生労働大臣賞を獲得したテルウェル西日本の長田千宏社員に引き続き、大会史上初の2連覇を達成したとのことです。



写真 全国ビルクリーニング技能競技会で優勝した天谷泰久社員



建物安全度判定サポートサービス「揺れモニ[®]」の展開

東日本大震災をきっかけとして、地震後に建物安全度を評価する構造ヘルスマonitoringが注目を集めるようになりました。NTTファシリティーズでは、独自に構築した地震観測ネットワークから収集・蓄積した強震データ（強い地震動の観測データ）とそれらを活かした知見を基に構造ヘルスマonitoringシステムを開発、建物安全度判定サポートサービス「揺れモニ[®]」として提供しています。ここでは、「揺れモニ[®]」の概要と近年のトピックについて紹介するとともに、今後の展開について報告します。

ニーズが高まる構造ヘルスマonitoring

東日本大震災を引き起こした2011年3月の東北地方太平洋沖地震において、発災直後に建物管理者が建物を継続して使用してもよいかの判断に窮したことから、特に超高層ビルが林立する首都圏では帰宅困難者が大量に発生する一因となりました。地震後に建物の状態を目視点検し安全性を確認するには多くの労力と時間がかかることから、被災直後における建物の安全性把握方法・体制整備は、企業や行政機関などにとってBCP（事業継続計画）上の大きな課題となっています。また、地震直後に建物が「安全」であることを一刻も早く把握し、建物の利用者に伝えることで不安感を解消し不要な混乱に至らせないことも、建物の管理者にとっては大変重要です。こうした課題の解決やニーズにこたえる技術として注目されているのが、地震観測を応用した構造ヘルスマonitoring技術です。

通常、建物の構造体（骨組み）は内外装等の仕上げが施されているため、地震動による被害を直接目視などで確認できる範囲は限られています。構造ヘルスマonitoring技術は、加速度計などのセンサを建物の構造体に設置し、地震による揺れの計測データを分析することにより、仕上げを撤去することなく、構造体における損傷の有無や度合い、あるいは損傷発生の可能性を評価する技術です。構造ヘルスマonitoring技術は1990年代より研究や技術開発が盛んに行われましたが、当時はセンサが比較的高価だったことや、建物所有者の理解が進んでいなかったことなどの理由で普及は進みませんでした。しかし、振動計測技術の進歩に伴いセンサのコストが低下し、度重なる大地震の発生により地震災害に備える対策のニーズが高まり、近年導入が増加しています。

建物安全度判定サポートサービス「揺れモニ[®]」の特徴

NTTファシリティーズでは、電電公社の時代から「通信を途絶させない」という使命を果たすために、全国70カ所あまりのNTTグループの建物を対象とする地震観測ネットワークを構築し、およそ半世紀にわたり地震観測データを蓄積してきました。その蓄積してきた地震観測データを基に、当社が保有する3次元振動試験システム「DUAL FORCE[®]」や、構造解析技術を駆使することで、地震時における建物安全度の評価手法や指標の妥当性を検証し、建物安全度判定サポートサービス「揺れモニ[®]」を提供して

います。現在は、NTTグループの建物に限らず、一般企業の超高層オフィスビルや商業ビル、地方自治体の庁舎など、全国の約200ビル（2023年末時点）に導入され、稼働しています。

構造ヘルスマonitoringシステムは、地震で観測された建物の加速度データから層間変形角^{*}を算出し、建物の設計情報に基づいてあらかじめ設定した基準値（しきい値）と比較して、建物の安全度（もしくは被災度）を推定するのが一般的です。他社のシステムでは、高価なセンサを階飛ばしに間引いて配置し、建物各階の層間変形角をシミュレーションや補間によって推定する手法を用いていますが、センサを間引いた階の状態変化が検知されにくく、安全度評価の確度が下がってしまいます。

一方、「揺れモニ[®]」は、比較的低価なセンサをすべての階に配置し（図1）、加速度データを実測し、層間変形角を算出するこ

* 層間変形角：地震時における建物の当該階の水平変位を階高で割った値。建物構造種別によって建築基準法上、守らなければならない制限値が定められています。

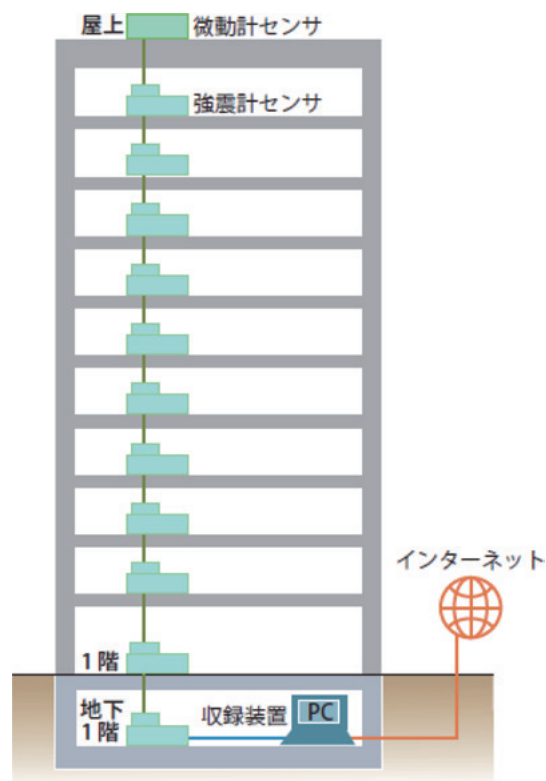


図1 「揺れモニ[®]」のセンサ設置イメージ

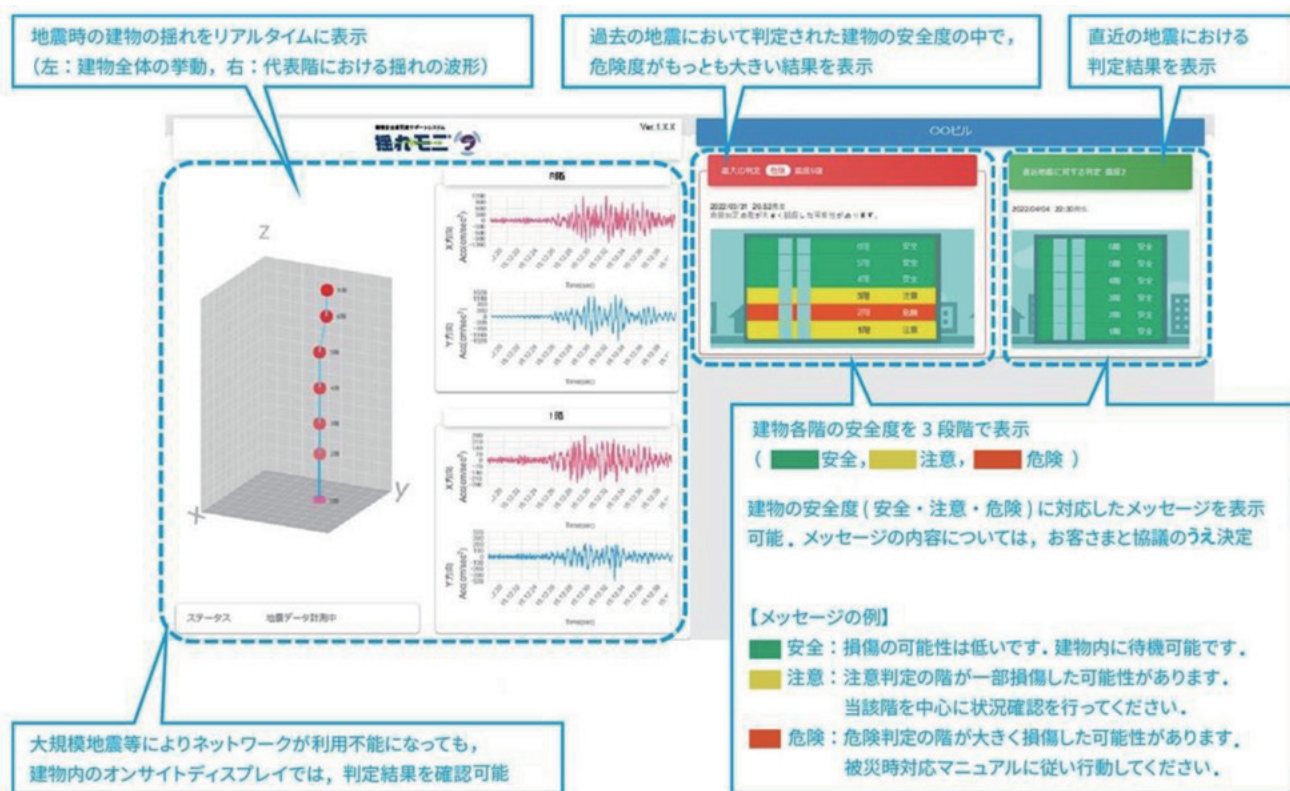


図2 「揺れモニ®」イメージ

とで、計測システムの構築コストを他社と同程度に抑えつつ、確度の高い建物安全度の評価を可能としていることが特徴です。また、鉄筋コンクリート造建物など層間変形角のみで安全度を評価することが適切ではない建物については、揺れの強さや揺れ方など複数の指標を用いて多角的な分析をすることで安全度を適切に評価しています。

「揺れモニ®」による安全度評価と情報の利用

「揺れモニ®」は、建物の構造体を速やかに3段階で評価し、その結果をディスプレイに表示します(図2)。また、専用のポータルサイトからWeb上でも評価結果を確認できるほか、あらかじめ登録された関係者に対して地震直後に評価結果をメールで通知することもできます。地震発生後、建物管理者は客観的なデータに基づく建物安全度の評価結果から、建物の利用者に対して安全性に関する情報を提供したり、一時待機や退去等の行動を促したりすることができます。また、建物の階ごとに安全度が評価されるため、復旧段階においては損傷の可能性が高い階を優先的に対応するといった意思決定の判断材料になります。

「揺れモニ®」では地震による建物の安全度について「安全」「注意」「危険」の3段階で評価しますが(図3)、これらは確定的な情報ではないということに留意する必要があります。建物安全度は、計測によって得られたデータと構造計算書などに基づいて設定した基準値(しきい値)とを比較することにより評価しますが、

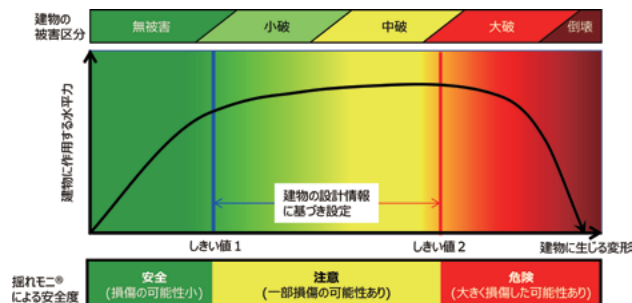


図3 地震による建物の安全度評価

建物安全度の評価結果と建物の実被害との間に乖離が生じる場合があります。これは、構造計算書などから得られる情報が設計時のものであり、かつ材料の特性や施工品質等によるばらつきが不可避であるといった事情によるためです。また、「揺れモニ®」に限ったことではなく、現在市中に提供されている構造ヘルスマニタリングシステム全般においていえることです。

構造ヘルスマニタリングシステムの利用に際しては、実被害との乖離が生じ得るという点を理解しておく必要があります。「揺れモニ®」の導入提案やサービス提供においても、利用者となる建物所有者あるいは建物管理者に対し、利用にあたっての留意点として説明しています。「揺れモニ®」はあくまで地震直後の意思決定を支援するツールであり、継続使用などの最終的な意思決定は利用者の判断が必要となります。

公的機関による「揺れモニ[®]」の技術評価

2023年3月、「揺れモニ[®]」は一般財団法人日本建築防災協会による「応急危険度判定基準に基づく構造モニタリングシステム技術評価」⁽¹⁾を取得しました。公的機関である日本建築防災協会では、構造モニタリングシステムを活用することにより大規模地震時に各自治体が行う被災建築物応急危険度判定の迅速化・効率化を図るべく、判定に適用する構造モニタリングシステムの信頼性を確保するため、技術評価制度を2021年度から開始しました。「揺れモニ[®]」は、被災建築物応急危険度判定への適用に必要とされる技術水準を満足するシステムとして認定されました。

安全度評価精度の向上とモニタリングデータの活用

構造ヘルスモニタリングシステムにおいて、建物安全度の評価結果と実被害との間に乖離が生じ得ることは前述のとおりですが、その乖離をできる限り小さくする研究への取り組みも重要です。そのためには、継続的に地震による建物の揺れを観測し、被害が生じた際にはその観測データとの相関性について分析し、構造ヘルスモニタリング自体の有効性を検証することが必要です。今後、当社における観測データに加え、実大三次元震動破壊実験施設「E-ディフェンス」をはじめ、社外機関により公開されている実験データなども活用し、「揺れモニ[®]」における建物安全度の評価精度向上に取り組んでいきます。

また、「揺れモニ[®]」で収集したモニタリングデータを活用した新たなソリューションへの展開も進めています。一例として、地震において計測された加速度データを活用した新しい耐震補強設計の手法を考案し、当社イノベーションセンター（東京都江東区）に適用しました⁽²⁾。当該建物に導入した「揺れモニ[®]」のモニタリングデータを用いて、地震時の建物における揺れの特性を把握し、それに基づきダンパーを増設することにより、当該建物の耐震性能を向上させました（図4）。

今後も「揺れモニ[®]」の普及を推進するとともに、構造モニタリングデータを活用した新たな技術開発を通じて安全・安心な社会の実現に貢献していきます。

おわりに

本稿執筆のさなかの2024年1月1日に、石川県能登半島を震源とする最大震度7の地震が発生し、大きな被害をもたらしました。

本地震により被災された皆様には心からお見舞い申し上げます。また、被災地の一日も早い復興を心よりお祈り申し上げます。

今回の地震では、全国約145ビルにおいて「揺れモニ[®]」により地震の揺れを検知し、安全度評価が行われました。震度5強（気象庁発表）の揺れに見舞われた金沢市内に立地する建物や、震源から離れていて地震の揺れが小さく検知されなかった建物も含め、「揺れモニ[®]」が導入されているすべての建物において正常に機能

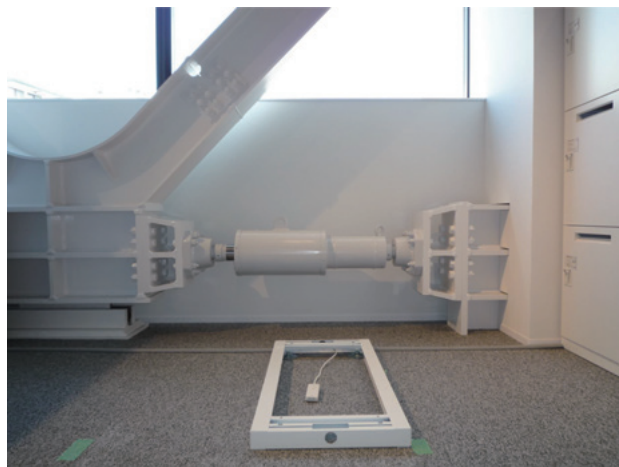


図4 モニタリングデータに基づいたダンパーの増設

し、安全度を評価することができました。元日に発生した本地震では、各建物における関係者の多くは休暇中だったと考えられますが、駆けつけることなく「揺れモニ[®]」によって地震の影響を把握することができ、地震直後における適切な初動対応にもつながり、真価が発揮されたものと思われます。

今後も当社技術が地震防災・減災に広く貢献できるよう、研究開発に一層取り組んでいきます。

■参考文献

- (1) <http://www.kenchiku-bosai.or.jp/evaluation/monitoring/>
- (2) 杉村・渡辺・吉海・鈴木・元樋・千葉：“耐震補強設計における地震観測記録活用に関する検討（その1, 2）,” 日本建築学会大会梗概集, pp.911-914, 2016.

◆問い合わせ先

NTTファシリティーズ
研究開発部 研究開発部門 建物ソリューション担当
TEL 03-5669-0765
FAX 03-5669-1650
E-mail tsuzak22@ntt-f.co.jp