

NTT 技術ジャーナル

5 M A Y
2021
Vol.33 No.5

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

ディスアグリゲータッドコンピューティングが 世界を変える

トップインタビュー

是川 幸士
NTTライフサイエンス 新医療リアルワールドデータ研究機構 代表取締役社長

グループ企業探訪

ネクストモード

from NTTファシリティーズ

補強部材の設置が容易で通路も設けられる耐震補強技術の開発

特別連載

ムーンショット・エフェクト
——NTT研究所の技術レガシー



NTT 技術ジャーナル

5 MAY
2021
Vol. 33 No. 5

CONTENTS

4 トップインタビュー

戦略や戦術は情熱の上にある
データ活用で健康経営を促進し、医療分野の
社会課題を解決する

是川 幸士 NTTライフサイエンス
新医療リアルワールドデータ研究機構 代表取締役社長



8 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

- 10 バイオデジタルツインが創造するデータ駆動型の医療健康支援
- 14 生活習慣病・要介護に関係するリスクと要因分析の取り組み
- 18 プラスな心的変化をもたらす行動変容支援技術
- 22 体内リズムの可視化をめざしたウェアラブル深部体温センサ技術
- 27 生体音と心電信号の新たな計測と解析の技術
——パーソナル心臓モデリングによる心疾患の
早期発見・リハビリ応用に向けて
- 32 医療健康の未来を拓くバイオニクス技術
- 37 主役登場 田中 雄次郎
(NTT物性科学基礎研究所)



38 特集

ディスアグリゲータッド コンピューティングが 世界を変える

- 40 IOWNを支えるディスアグリゲータッドコンピューティング
- 45 ディスアグリゲータッドコンピューティングのための光電融合技術
- 50 ディスアグリゲータッドコンピュータに向けた
メモリセントリックアーキテクチャ
- 54 光ディスアグリゲータッドコンピュータにおいて
電力効率最大化を実現する
パワーアウェア動的配置制御技術
- 58 主役登場 田仲 顕至
(NTT先端集積デバイス研究所)



59 **特別連載** ムーンショット・エフェクト
——NTT研究所の技術レガシー

第9回 バリアフリー道案内技術MaPiece®(まっぴーず)

64 **from★NTT DOCOMO**
テクニカル・ジャーナル

ドコモのパブリッククラウド活用とCCoEの果たす役割

70 **挑戦する研究者たち**

阿部 正幸

NTTセキュアプラットフォーム研究所
上席特別研究員



研究には「塞翁が馬」の視点と姿勢で臨む。
影響を与え合える関係性の構築も研究活動である

84 **明日のトップランナー**

安部川 直稔

NTTコミュニケーション科学基礎研究所 特別研究員

運動学習には「眼と腕の位置関係を
一定に保つ」ことが重要。

運動に関する脳内の働きを解き明かす
「感覚運動生成」の研究



76 **グループ企業探訪**

ネクストモード株式会社

クラウドで新しい働き方を

お客さまと一緒にデジタルイノベーション
の実現をめざす



80 **from NTTファシリティーズ**

補強部材の設置が容易で通路も設けられる

耐震補強技術の開発

87 **ソリューションサービスの今**

ニューノーマル時代におけるマイバトラー誕生秘話

読者の声 90

6月号予定

編集後記

NTT技術ジャーナルはWebで閲覧できます。

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

本誌掲載内容についての
ご意見、ご要望、お問い合わせ先

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

本誌ご購入のお申し込み、
お問い合わせ先

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

企画編集

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

発行

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

©日本電信電話株式会社2021

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます●

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

View from the Top



NTTライフサイエンス
新医療リアルワールドデータ研究機構
代表取締役社長

是川 幸士

PROFILE :

1994年日本電信電話株式会社に入社，2001年NTT西日本人事部人事第二部門，2004年NTT第一部門，2007年NTT西日本法人営業本部企画部，2010年NTT西日本中国事業本部担当部長，2011年NTTビジネスソリューションズMCS代表取締役社長，2014年NTT研究企画部門医療健康チーフプロデューサー，2019年NTT総務部門メディカル事業推進室長，NTTライフサイエンス代表取締役社長，2020年新医療リアルワールドデータ研究機構代表取締役社長。

戦略や戦術は情熱の上にある

データ活用で健康経営を促進し、

医療分野の社会課題を解決する

日本の平均寿命と健康寿命の間には9から12歳の差があります。寿命と健康寿命の乖離は社会課題であると同時に個人のウェルビーイングにも影響するため、国民の健康意識を高め、予防や早期診断・治療を促進することが求められています。こうした社会課題の解決に健康・医療ビッグデータの活用で臨むNTTグループが2つの戦略的ヘルスケア会社を立ち上げました。是川幸士NTTライフサイエンス、新医療リアルワールドデータ研究機構代表取締役社長にトップの心構えと社会課題解決に臨む事業展開について伺いました。

2つの戦略的ヘルスケア会社のトップに就任

NTTライフサイエンス、そして新医療リアルワールドデータ研究機構と2つの会社の代表取締役となられました。設立の背景やミッション等を教えてください。

2つの会社ではライフサイエンスやヘルスケア分野においてビッグデータを活用したプラットフォーム事業を展開します。NTTライフサイエンスは100% NTTの出資会社、そ

して新医療リアルワールドデータ研究機構株式会社（PRiME-R）は京都大学との合併会社です。

2021年度（令和3年度）の国の一般会計歳出予算において社会保障は3割を占めています。少子高齢化が進み、生産年齢人口の予測や医療給付費の予測からも社会保障給付は社会の高齢化とともに上昇すると考えられます。また医科診療費の内訳（2016年度）は30.2兆円で、うち生活習慣病が10.4兆円と35%を占めています。さらに平均寿命は男性80.98歳、女性は87.14歳ですが、健康寿命はそ

れよりも9から12歳も低いのです。

こうした状況にかんがみると、少子高齢化、医療費の増大、生産年齢人口の減少、生活習慣病、そして寿命と健康寿命の乖離は日本の社会課題であることは明らかです。解決には個々の健康意識を高め、予防や早期診断・治療に取り組んで健康寿命を延ばすこと、医療費や介護費など老後の心配を減らすことが大切です。また、企業には従業員等の健康管理を経営的な視点で考え、戦略的に実践する「健康経営」を推進して生産性を向上するとともに、医療費を適



正化することが求められています。

ところが、自身の健康上のリスクを十分に理解し、自分事としてとらえる方は多いとはいえませんし、健康診断や人間ドックは受けていても、その結果を受けて継続的に健康管理をしている人は少ないことが前述の数字からも推測できます。企業側も健康経営の重要性は分かっているものの具体的な方策が見出せておらず、定期健診データの活用も十分にできていないというのが現状です。こうした現状を打破するため、NTTグループのICTと健康・医療関連のビッグデータを活用したソリューションを提供します。

NTTグループが参入する意義や価値、展望等を詳しく教えてください。

NTTグループの強みはICTであり、さまざまなデータを活用して新たな価値創造をできるのがNTTグループです。例えば、NTTはグループのビジョンとして“Your Value Partner”を掲げ、事業活動を通じてパートナーの皆様とともに社会課題の解決をめざしています。ICTを駆使して多種多様なデータを蓄積し、それらを活用して既存の仕組みを改善したり、新たなシステムや技術、サービスを構築したり導入したりすることで、社会が直面しているさまざまな課題を解決し、より良い環境をつくり出していくSmart Worldの実現

をめざしています。さらに、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想では従来のインフラの限界を克服する革新的なネットワーク・情報処理基盤の構築をめざしています。

その中でヘルスケアに関連する分野において、2020年11月にはIOWN構想の構成要素であるデジタルツインコンピューティングによって人それぞれの身体および心理の精緻な写像（バイオデジタルツイン：BDT）を実現し、これを通じて心身の状態の未来を予測し、人間が健康で将来に希望を持ち続けられる医療の未来へ貢献していくとする『医療健康ビジョン』を公表しました。

このようなビジョンや取り組みに呼応して、医療・ヘルスケア関連の取り組みを具体的に展開していくために、この2つの戦略的な子会社が設立されました。

新しいマーケットを創造するという熱い思いや期待にこたえたい

2つの会社の具体的な取り組みを教えてください。

NTTライフサイエンスは予防医療の観点から病気になる前の方々を対象に、そして、PRIME-Rは治療フェーズに入った通院されている方々を対

象にサービスを展開していきます。

NTTライフサイエンスが取り組むのは、企業等の健康診断データ（検査値・問診結果）に加えて遺伝子検査による遺伝子データを掛け合わせて予防や健康行動の提案を行う健康経営サポートサービス『Genovision（ゲノビジョン）』です。多くの病気には「遺伝的要因」よりも生活習慣などの「環境要因」が大きく影響するといわれているため、人体の設計図といわれる遺伝子情報を基に「体質」や「将来の疾患発症リスク」を理解することで、日々の生活習慣を見直す取り組みにつなげたいと考えています。

一方、PRIME-Rは電子カルテなどの臨床現場におけるさまざまな情報（リアルワールドデータ：RWD）の活用を目的とした入力支援システムCyberOncology®によるサービスを提供します。サービスの背景には日本において電子カルテ等の臨床情報を十分に活かしていないという現状があります。電子カルテ等を中心としたRWDは、日常的な医師の診断支援に加えて、医学研究、医薬品・医療機器等の臨床研究や開発に活用することが注目されているにもかかわらず、電子カルテは単なる電子的な記録媒体としてつくられており、多くのデータが構造化されずに医師による自由記述で記載・記録されるため、データ解析に利用することが困難な状況にあるのです。そこで私たちは電子カルテ等への入力を支援するシステムを構築しました。システムはプルダウンメニュー形式で、リストから標準化された医療情報を選択して入力でき、データを構造化して蓄積することができます。また、本システムの導入によりがんゲノム情報管理センター（C-CAT）への臨床情報登録などの各種作業の省力化にもつながります。さらに、本システムへ蓄積したデータを統計処理するなど、患者個人を特定できない状態により個人情報保護に配慮して、他の医療機関や製薬企業等へ統計データを提供するサービスを開始す

る予定です。

いずれもこれまでにない発想による取り組みで、提供する医療の格差縮小や新薬など医療系開発費の低減、医療崩壊の抑止、新しい治療法の開発といった価値創造につながると考えています。

滑り出しは順調ですか。

NTTライフサイエンスのGenovisionは2020年4月からサービスをスタート、PRiME-Rも同時期に本格的な事業をスタートさせ、1年の節目を迎えました。おかげさまで、Genovisionは2万人の方々に同意、受検いただきました。取り組みへのご賛同をいただけたことに感謝し、2021年は飛躍の年としていきたいです。PRiME-Rは製薬会社等との共同研究もいくつか開始しており、新たなデータを収集する仕組みを確立していきたいと考えています。

また、2つの事業のスタートと新型コロナウイルス感染症(COVID-19)のパンデミックが重なり、両社とも社員が一堂に会することは1年を通してありませんでした。両社とも営業はまだまだの状況にはありますが、ありがたいことに多くの方々から、この両社の取り組みに高いご関心をお寄せいただいています。また、電



子カルテを扱うPRiME-Rの営業先である医療機関にはCOVID-19の拡大防止のためにお訪ねすることができませんので、オンラインでお話をさせていただいています。電子カルテをお使いいただきたい医師の方々は非常に時間の調整が難しいのですが、オンラインの特性を活かして全国各地の先生方とタイムリーにつながることができました。オンラインでの営業が容認される社会の風潮が味方となり、苦しい状況ではありませんが私たちにとって良いこともありました。

トップに求められるのは情熱と責任

新しい会社でさまざまな新しい取り組みに臨むトップとしての心境を教えてください。

私の前職はNTT研究企画部門で、医療健康プロデュースに携わっていました。当時、職務を通じて感じた医療領域における課題意識をNTTグループ各社の幹部と共有することができ、それが出発点となってNTTライフサイエンス、PRiME-Rという会社により、医療分野における社会課題の解決に向けて歩み始めることができたことに大変感謝しています。

設立から1年が経過し会社としての輪郭が整ってきたところではありますが、新しい分野であるだけに毎日さまざまなドラマと対峙しています。こうしたドラマの展開に対して決断し、ルールをつくり上げることで、会社のめざすところに向けて着実に歩を進めているところで、その責任の重さをひしひしと感じています。

両社とも小規模ですから社員と課題、意識を共有することもきめ細かくでき、一体感を持って仕事に臨むことができています。とはいえ、企業の大きさ、キャリアにかかわらずトップには決断する責任が伴いますし、事業を成功させるためにはビジョンが必要だと考えます。私はこの2

つの会社をこれからの医療、ヘルスケア分野の土台となる企業へ成長させたいと考えています。新しいマーケットを創造するというNTTグループ内外の熱い思いや期待にこたえられるよう、日々精進しているところです。

日々の判断、決断の基準や指針はどんなものでしょうか。

基本的にはビジョンやめざすゴールがどんな効果をもたらし、影響を及ぼすのかを検討することです。また、何事にも失敗はつきもので、新しい分野なので何が成功で何が失敗かさえも分からないことも多々あります。会社が小さいからこそ、日々の出来事や世の中や会社の変化に対して感性鋭く、スピーディに対応していくことを心掛けています。そのために、私はぶれない姿勢をつくることやビジョンを明確にするための会話を大切にしています。会話の相手としては、まず医療分野の専門家です。私たちはICTのプロであっても医療分野ではアマチュアですから、最先端の医療、トップランナーの先生方との触れ合いや、その道のプロの方々とのコミュニケーションは欠かせません。共同研究をしている東京大学、京都大学の先生方との対話を通じて知識を得ることや業界の流儀や文化の理解に常に努めています。医療の現場にはさまざまな規制もありますし、専門外の人間には理解できていない価値観もあります。ハードルも壁も高ければ高いほど面白いし、だからこそやりがいがあるところでもあります。

私は事業を展開するだけではなく、何事においても情熱、強い思いがないと前進できないし、戦略や戦術は情熱の上にあると考えています。NTT入社以来27年間、見習いや下積みしながら自立することや責任の重さを学んできました。こうした経験の中で、医療、ヘルスケア分野の社会課題の解決に臨もうと強く思いを抱いたのは、NTT研究企画部門でプロデューサーになったところで、この



技術者の皆さんに一言お願いいたします。

社会のためになる研究・開発を手掛けていただきたいですね。私たちの事業にはデータ解析、活用、収集とトレンド分野であるセキュリティ、AI（人工知能）、データサイエンスのテーマが非常に多くあります。

1つずつの研究や技術が強くなければグローバル市場で勝ち抜くことはできません。情熱を持って先端的な技術を極めることにチャレンジしてください。そして、自分自身の研究テーマに自信を持ってください。私たちの事業において皆さんの成果をいち早く社会実装していきたいと考えています。ぜひ一緒に頑張りましょう。

（インタビュー：外川智恵／撮影：大野真也）

※インタビューは距離を取りながら、アクリル板越しに行いました。

分野における自分なりのビジョンを持つことができ、挑戦を始め、この2つの会社の設立によってその道が拓けてきました。

今は共同研究をしてくださっている先生方との打ち合わせは新鮮で常にドキドキしていますし、お話をするための準備も非常に楽しいです。営業先である一般企業の幹部、医療機関の先生方やコンサルティング会社の方々と社会課題の解決について議論することも価値ある時間で、支

えていただいている感謝と働く喜びを実感しています。両社ともようやくスタートラインから歩き出したという状況ですが、これからさらに知見、経験、サービス、そして人材といったリソースを充実させていながらゴールをめざしていこうと考えています。まだ実績がないので偉そうなことをいえる立場ではありませんが、とにかく決断のスピード感と責任を心掛け、感謝の気持ちを忘れないようにしたいと思います。

インタビューを終えて

一度に2つの新規事業の立ち上げを成し得た是川社長。PRIME-Rの本社があり共同研究をしている京都大学、自宅のある大阪、そしてNTTライフサイエンスの本社がある東京と、休む間もなく駆け回る生活を送っていらっしゃると思います。24時間、仕事への情熱を傾けていると聞き、お疲れにならないのだろうかと何うと「仕事のリフレッシュにつながりますし、モチベーションは事業への責任感です。今はプレッシャーもモチベーションにできていますよ」と笑顔でこたえられました。実はこの情熱は今に始まったことではなかったようです。仕事への姿勢として大切にいらっしゃる

るのは誠意と誠実さで、これまでお世話になった、また、お世話になっている上司や仲間の皆さんへの感謝の気持ちがそうさせているのだといいます。「ここまで引っ張っていただいたのもすべて上司だった方々のお力添えあってですし、今になって思うと、陰でいろいろな支え（働きかけ）をしていただいていたんだと、つくづく思います」とこれまでの歩みを振り返っておられました。今はトップとして諸先輩方に倣い、部下を思い、支える是川社長。ペイフォワードのスピリット、NTTグループのDNAを実感するひと時でした。



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は、2020年11月に医療健康ビジョンをリリースし、

バイオデジタルツインの実現に向けた研究開発を推進している。

本特集では、国内・海外に新たに設立した研究所の組織体制を紹介するとともに、

将来のバイオデジタルツインの要素技術となる、

生体情報の取得・分析・予測の最新技術について概説する。

疾病リスク予測

行動変容

非侵襲センサ

心疾患検知

バイオニクス

Bio Digital Twin

バイオデジタルツインが創造するデータ駆動型の医療健康支援 10

医療健康ビジョン，およびバイオデジタルツインの要素技術である，生体情報の取得・分析や体内での治療の実現に向けた最新の技術内容について紹介する。

生活習慣病・要介護に関係するリスクと要因分析の取り組み 14

生活習慣病を対象としたゲノムデータ分析と要介護の要因として注目されているロコモティブシンドローム（ロコモ）を対象としたコホート調査データ分析を紹介する。

プラスな心的変化をもたらす行動変容支援技術 18

生活習慣改善をユースケースとしたその人らしさに合わせたアドバイス提示による行動変容支援技術について紹介する。

体内リズムの可視化をめざしたウェアラブル深部体温センサ技術 22

熱の流れに着目し，体にセンサを貼るだけで深部体温を測定可能とする技術の概要，および現在の研究の進捗状況について紹介する。

生体音と心電信号の新たな計測と解析の技術 27

——パーソナル心臓モデリングによる心疾患の早期発見・リハビリ応用に向けて

装着型音響センサアレイによる生体音の計測，およびhitoe®によるテンソル心電図等の新たな計測・解析技術と，それらを用いた信号処理・機械学習技術を紹介する。

医療健康の未来を拓くバイオニクス技術 32

生体情報の取得に向けた生体機能デバイス技術，およびハンディキャップ支援に向けたサイバネティクス技術の取り組みについて紹介する。

主役登場 37

田中 雄次郎（NTT物性科学基礎研究所）
バイオデジタルツインに向けた非侵襲生体センシング技術

バイオデジタルツインが創造する データ駆動型の医療健康支援

今、人類は過去に類をみない新型コロナウイルス感染症のパンデミックを経験しています。そこでNTTは、心身の状態の未来予測を通じて、未知なるリスクを回避し、健康で将来に希望を持ち続けられる医療の未来の実現に貢献するため、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」を発表しました。本特集では、医療健康ビジョン、およびバイオデジタルツインの要素技術である、生体情報の取得・分析や体内での治療の実現に向けた最新の技術内容について紹介します。

医療健康分野の新たな期待

人類は新型コロナウイルス感染症のパンデミックの真ただ中にあり、日常生活や医療、社会システムに深刻な打撃を受けています。感染者の症状は、重症度、致死率や予後に地域差や個人差が大きく、生体の未知な領域の広さと深さを改めて思い知らされています。今もなお、市民と医療従事者の安全確保、市民生活の維持が喫緊の課

題となっています。

私たちNTTは、人類が未知なるリスクを乗り越え、安心・安全な生活を送り、自分らしく幸福な人生を歩んでいくために、心身の健康に加えて、将来への希望を持ち続けられることが重要であると考えています。これらの実現には、未知なるリスクによる生体の異常を早期にとらえ、病気の発症や重症化の因果関係を踏まえた予防・治療とともに、要介護者や障がい者支援の

個別化・最適化がこれまで以上に求められていると考えています。

医療健康ビジョン「バイオデジタルツインの実現」

そこでNTTでは、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) の構成要素の1つである、デジタルツインコンピューティングによって人それぞれの身体および心理の精緻な写像（バイオデジタルツイン：BDT）を実現することをめざしています（図1）。BDTを通じて心身の状態を予測し、人間が健康で将来に希望を持ち続けられる医療の未来への貢献をビジョンとして定めました。BDTは個人ごとの写像だけでなく、不特定多数の個人の集合体の写像を形成することも可能であると考えられます。また、ここで述べる医療には、医療従事者によって提供される医療のほか、ヘルスケア、介護、障がい者支援などが含まれます。

心身の未来を予測するためには、①臓器機能のデジタル写像化が必要で



図1 バイオデジタルツインのイメージ図

なかしま
中島

ひろし
寛^{†1}

はやし
林

かつよし
勝義^{†1, 2}

ごとう
後藤

ひでき
秀樹^{†3}

NTT 物性科学基礎研究所^{†1}

NTT 研究企画部門^{†2}

NTT 物性科学基礎研究所 所長^{†3}

す。今後、患者数が急増すると予測され、発症すると著しくQoL (Quality of Life) が低下する心疾患に着目し、心臓のモデル化の検討から着手しています。また、生体は環境や負荷に対応して時々刻々と変化しています。そこで、②心電、心音、血糖値などバイオマーカーの生体情報は、心身に負担が小さく、常時もしくは適時に測定することが必要となります。さらには、③人の行動メカニズム、心理、複数の臓器が関連した疾患など、複眼的な心身状態の予測シミュレーションが必要となります。加えて、未来の予測だけではなく、具体的な治療や支援につなげていく必要があると考えており、④体内の超マイクロ領域での診断・治療、⑤介護や障がい者支援につながる、中枢神経系からの信号に沿った四肢動作の制御にも着目しています。これら5つの各ゴールに到達するために、人それぞれをデジタルツイン化する技術、人それぞれの個性をとらえる心身の非侵襲リアルタイムセンシング技術、心身の状態の未来予測技術、思考や行動の分析技術、生体適合性の高い材料を用いたインプラントブルデバイス・バイオマイクロロボット技術、生体内における情報伝達・制御技術などの研究開発を進めています。例えば、心臓のモデル化では、心臓の右房圧や肺動脈圧等のデータ入力により、中心静脈圧や心排出量などを出力する血行動態モデルをベースとして、心血管系が自律神経や血液容積などを瞬時に制御する機能

のシミュレーションを行っています。この知見を基に、生活習慣や日常のストレス等による長い時間軸での負荷の調節など、重層的に働いて全身の恒常性を保つ機構に着目して検討を進めています。

またBDTは、本人の同意の下に個人情報を用いて構築されます。個人情報には、前述したリアルタイムに収集されるセンシングデータのほか、ゲノムやタンパク質のような臓器機能の分子生物学的な情報や、生理状態に影響を与える運動や食事、行動履歴などの情報が含まれます。このため、NTTグループ各社のアセットを活用して、個人データの収集・活用に取り組むとともに、注意深くプライバシーや倫理面への配慮を行っていきます。さまざまな情報を基に構築されたBDTを用いることで、その人の思考や取り巻く環境の影響等も踏まえた、過去から未来にわたる心身の状態の評価が可能となります。個人人では対処が難しい未知なるリスクをも予測し、回避できるのではないかと考えています。ほかにも、投薬の効果や手術の事前シミュレーションによる治療効果の最大化や、健康のために食事等を無理に抑制せず、個人人の行動メカニズムから導き出される無意識下での自然な生活習慣の改善などが期待できます。さらに、高齢者のその人らしい自立した生活支援など、さまざまなユースケースで活用されることを目標としています。

NTT 医療健康分野の研究開発体制と取り組むテーマ

医療健康分野は、ICT化やAI (人工知能) 分析の導入が進みつつあり、遠隔・非接触・日常・在宅での最先端の診断・治療技術を取り入れながら大きく変革しようとしています。また、日々手軽に自分のからだの調子を知ることができるウェアラブル型のヘルスケアデバイスは、端末にさまざまな計測機能が追加され、IoT (Internet of Things) 時代の訪れとともに世界的に競争が激化しています。そのような背景の中、NTT 研究所では医療健康分野の国内研究拠点として、2019年7月にバイオメディカル情報科学研究センター (BMC) を設立しました。ICTやAI技術を活用したデータ駆動型の医療やヘルスケアを創造することをミッションとし、医療健康ビジョン実現に向けて、関連研究所と横断的に連携しながら研究開発を推進しています。

NTT 研究所では、バイオデジタルツインの構成要素となる「心身の未来予測技術」「生体センシング技術 (ウェアラブル・遠隔・非侵襲)」「心臓異常検知・予知技術」「体内マイクロ治療技術」などのテーマを柱に、基礎から応用研究まで幅広く取り組んでいます (図2)。また、同じく2019年7月に設立された海外研究拠点のNTT Research, Inc. 生体情報処理研究所 (MEI Labs.) とともに、世界的視点も取り入れて研究開発を加速し、グ



図2 NTT医療健康ビジョン

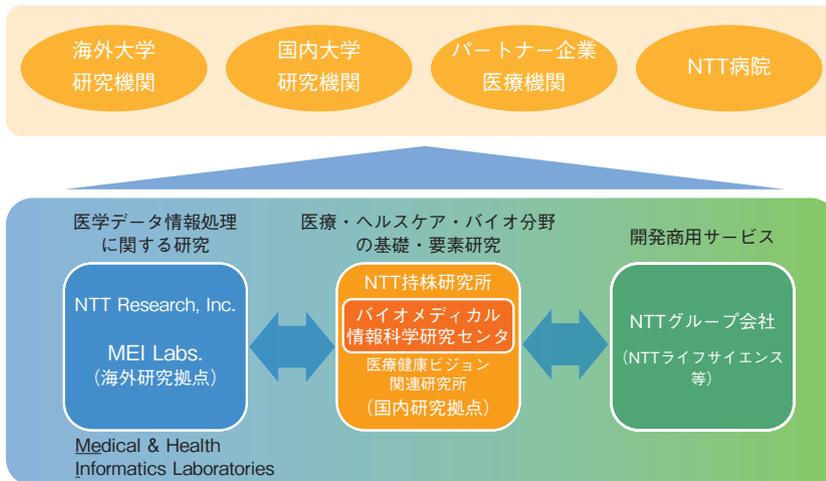


図3 メディカルサイエンス・事業を支えるフォーメーション

だけでは医療系技術の確立や社会的・臨床的・先進的ニーズの把握が困難な面もあります。そこで、国内・海外の医療機関・研究機関・大学やパートナー企業、NTTグループが保有する病院などと協業・共創しながら研究開発を進めていきたいと考えています(図3)。本特集における医療健康ビジョンの実現に向けた具体的な研究開発内容は、各記事をご参照いただき、ここでは各テーマの概略を紹介します。

まず、『生活習慣病・要介護に係るリスクと要因分析の取り組み』⁽¹⁾では、個人の性質や生活習慣に合わせた保健指導などをめざして、機械学習やAIを用いた疾病発症リスクの予測や要因分析について紹介します。今回は主に、ゲノム情報を考慮した疾病発

ローバルパートナーとのコ・イノベーションを推進しています。さらにNTTグループ会社と深く連携し、医療健康分野での商用サービスの領域拡

大を図っていきます。進歩の速い医療健康分野において、スピーディに成果をあげ、医療健康ビジョンに即した社会実装をめざすためには、NTTグルー

症の要因分析と、要介護予防のためのロコモ度予測について概説します。続いて、『プラスな心的変化をもたらす行動変容支援技術』⁽²⁾では、医療費削減などの社会課題の解決に向け、生活習慣改善などによる健康増進が課題となっている点に着目しています。その人らしさに合わせたアドバイス提示による生活習慣改善（行動変容）に向けた研究開発テーマについて紹介します。『体内リズムの可視化をめざしたウェアラブル深部体温センサ技術』⁽³⁾では、風邪や感染症の指標や、不眠・うつなどの体内リズムの指標となる、からだの深部体温の生体センシングについて紹介します。これまで簡便な測定が困難であった深部体温の日常連続モニタリングを、体への負荷のないウェアラブルデバイス技術で実証しています。次に、『生体音と心電信号の新たな計測と解析の技術——パーソナル心臓モデリングによる心疾患の早期発見・リハビリ応用に向けて』⁽⁴⁾では、装着型音響センサアレイによる生体音の計測の手法や、hitoe[®]によるテンソル心電図等の新たな生体信号計測・解析技術を紹介し、将来のバイオデジタルツインの核技術となるパーソナル心臓モデリングや心臓の異常検知・未来予測技術、およびリハビリテーションへの応用について展望します。最後に、『医療健康の未来を拓くバイオニクス技術』⁽⁵⁾では、将来の体内ミクロ治療技術を見据え、生体系と工学系の分野を橋掛けする生体工学（バイ

オニクス）技術に着目しています。①生体系の知識を工学系に活用し、生体の形・動きを模倣するソフトマテリアルデバイス技術、②工学系の知識を生体系に活用し、生体信号を処理して再び生体へ還元して動かす生体人工頭脳学（バイオサイバネティクス）技術について紹介します。生体模倣デバイスは、臓器モデルや多臓器連結モデルを細胞・生体材料レベルから再現・評価可能なことが期待され、一方バイオサイバネティクスでは、リハビリやハンディキャップ支援に向けての技術提供価値が高く、双方とも挑戦的な研究であると考えています。

前述のように、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、さまざまな技術分野の研究開発テーマに取り組み始めています。今後も精力的にNTTグループ関係者の皆様、外部パートナーの皆様と深く連携・共創しながら、研究開発の側面から人と社会全体のウェルビーイングの向上に貢献していきたいと考えています。

■参考文献

- (1) 千葉・麻野間・東・藤野・青木：“生活習慣病・要介護に関するリスクと要因分析の取り組み,” NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 5, pp. 14-17, 2021.
- (2) 阿部・佐藤・有賀：“プラスな心的変化をもたらす行動変容支援技術,” NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 5, pp. 18-21, 2021.
- (3) 松永・田中・田島・瀬山：“体内リズムの可視化をめざしたウェアラブル深部体温センサ技術,” NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 5, pp. 22-26, 2021.
- (4) 中野・渋谷・柏野・塚田・小笠原：“生体音と心電信号の新たな計測と解析の技術——パーソナル心臓モデリングによる心疾患の早期発見・リハビリ応用に向けて,” NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 5,

pp. 27-31, 2021.

- (5) 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.



(左から) 中島 寛/ 林 勝義/
後藤 秀樹

バイオデジタルツインは、NTTグループだけでは到底実現できません。このビジョンをさまざまなパートナーの皆様と共有し、そしてこれまで以上に連携を図り、研究開発等の具体的なアクションを通じて着実に目標に近づいていきたいと考えています。

◆問い合わせ先

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

生活習慣病・要介護に関係するリスクと 要因分析の取り組み

健康な生活を続けるためには、疾病リスクにできるだけ早く気づき、対策を講じていくことが大切です。NTTは、健康な生活の実現のために、健康診断結果のデータやゲノム情報、大規模なコホート調査で得られたデータなどから機械学習を用いて疾病リスクを予測し、その要因を分析する技術の研究開発に取り組んでいます。本稿では、生活習慣病を対象としたゲノムデータ分析と要介護の要因として注目されているロコモティブシンドローム（ロコモ）を対象としたコホート調査データ分析を紹介します。

その人に合った健康な生活の実現 に向けて

なるべく病気にかかりたくない、元氣な老後を過ごしたいという願いは、多くの人が抱いていると思います。しかしながら、実際には、生活習慣病の1つである糖尿病が強く疑われる人の割合は男性19.7%、女性10.8%であり⁽¹⁾、75歳以上で要介護の認定を受けた人の割合は、23.3%で年々その人数は増加している状況です⁽²⁾。

生活習慣病や要介護を予防するためには、できるだけ早くそれらのリスクに気づき、対策を考え、実行することが必要です。NTTは、これらのステップそれぞれに対して、ICTを用いて貢献することをめざしています。これまでに、まずリスクに気付くために、診療情報を活用した糖尿病患者の重症化リスク予測⁽³⁾や、健康診断結果を活用した生活習慣病の発症リスク予測⁽⁴⁾に取り組んできました。そして、現在、リスクに気付いた人に対して、対策を講じることを支援する技術の研究開発

を進めています。

対策を考えるためには、その人固有の性質や過去の病歴、現在の生活習慣などのリスク因子と疾病の関連を知る必要があります。本稿では、その人固有のゲノムデータと生活習慣病との関係性を分析する取り組み、ならびに要介護予防に向けた生活習慣を含むコホート調査*データとロコモとの関係性を分析する取り組みについて紹介します。

個人の特性に応じた要因分析

まず、ゲノムデータ分析に関する取り組みを紹介します。NTTは、東京大学医科学研究所と2019年7月に「ゲノム予防医学社会連携研究部門」を設置し、ゲノム情報を基にした疾患リスク因子の解明や、疾患予防に向けた望ましい行動や生活習慣を可視化するための共同研究を開始しました⁽⁵⁾。本共同研究において、遺伝子検査で得られるゲノム情報に加えて、企業従業員の健康診断結果のデータや生活習慣に関する時系列データを、各個人の研究

参加の同意に基づき収集、解析を行う⁽⁶⁾データ基盤を整備しています。これにより、ゲノムのような個人が生まれながらに持っている先天的な要因と、健康状態に影響を与える生活環境等の後天的な要因の両面から研究を行うことができるようになります。このような共同研究の枠組みの中において、NTTは健康維持におけるスーパーヒーローの特性分析に取り組むことにしました。

ここでいうスーパーヒーローとは、遺伝子情報上の生活習慣病のリスクが高いが、それを発症せずに健康維持している人のことを指しています。遺伝子検査サービスを提供しているNTTライフサイエンスが提唱しているモデルです（図1）。スーパーヒーローをデータから見つけ出すため、まず先行研究ですでに分かっている疾患にかかわる1つ以上のSNP（Single Nucleotide Polymorphism：個人

* コホート調査：ある集団に対して、定期的に健康診断などを実施して、疾病の発症状況などを追跡する調査。

ちば あきひろ
千葉 昭宏^{†1}

あすま しょうぞう
東 正造^{†1}

あおき しゅんすけ
青木 俊介^{†3}

あさのま なおき
麻野間 直樹^{†1,2}

ふじの あきのり
藤野 昭典^{†1}

NTT 物性科学基礎研究所^{†1}

NTT 総務部門^{†2}

NTT 研究企画部門^{†3}

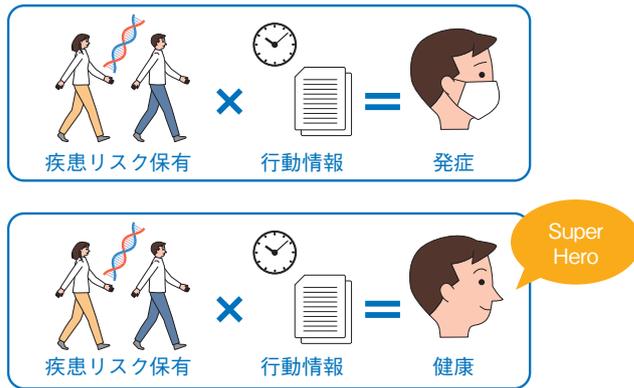


図1 スーパーヒーローモデル

間のDNA塩基配列における1塩基の違い)の情報から、遺伝子的に疾患リスクの高いグループと低いグループを特定します。さらに別の軸として、疾患の発症・未発症の状態グループを分け、それらをかけ合わせたグループの間で、データ特性に差分がないかを統計的な手法で分析するというのが大まかなデータ分析の流れです。遺伝子検査結果と健診結果のデータの分析から割り出したスーパーヒーロー特有の身体状況や行動の特性を応用すれば、健康維持の要因の特定や、健康改善のためのアドバイス提供が可能となると考えており、効果的な行動変容や疾病リスク回避につながると目論んでいます。

また、NTTで研究開発した生活習慣病リスク予測技術⁽⁴⁾を応用することにより、遺伝子情報と健診結果の時系列データを用いて、その人の個人の特性に応じた疾患発症のリスク予測や要因分析ができると考えています。生活習慣病リスク予測技術では、打ち切りを考慮したランキング学習により、将

来の疾患発症までのリスク(発症確率)の予測を可能とします。このリスク予測のモデルの情報と遺伝子的な疾患リスクの情報を組み合わせることで、さらに詳細な健康維持のための要因分析ができると考えています。

生活習慣等を考慮した要因分析

次に要介護予防に関する取り組みを紹介します。要介護予防は、社会医療費の抑制だけでなく、介護する側・される側のQOL(Quality of Life)向上につながるなど、超高齢化社会の日本にとって重要な社会課題です。私たちは、この要介護予防の実現に向けて、これまでに蓄積してきた医療健康データの分析技術、ノウハウを活かして、要介護に至る要因の解明やリスクの定量化に取り組んでいます。データ分析によって要介護予防を実現するために、多くの高齢者のデータと医学的な知見が必要になります。そこでNTTは、2020年4月に東京大学医学部附属病院22世紀医療センターに社会連携講座「ロコモ予防学講座」を設置

し、共同研究を開始しました。この共同研究では、コホート調査によって収集された約4400名、約15年間のデータから、要介護に関連する疾患の要因解明や介入方法を検討しています。厚生労働省の調査によると要支援・要介護に至った原因でもっとも割合の多い疾患は認知症⁽¹⁾。しかし、骨折・転倒と関節疾患という、運動器や移動機能の低下に関連する疾患をまとめると、その割合は認知症を上回り最大となります。この共同研究においても、まずは運動器や移動機能の低下に着目しています。

運動器や移動機能の低下を表す概念としてロコモがあります。ロコモは、「運動器の障害のために移動機能の低下を来し、進行すると要介護のリスクが高くなる状態」と定義され、要介護予防にとって重要な概念です。ロコモは、ロコモ度と呼ばれる指標でもっとも軽度なロコモ度1からロコモ度3に分類されます⁽⁷⁾。立ち上がりテスト、2ステップテスト、ロコモ25というテストの結果から判定されます(図2)。例えば、高さ40cmの台に座った状態から片足で立ち上がれない場合、ロコモ度1となります。これは、日頃座っている椅子から片足で立ち上がれない場合、移動機能の低下が始まっている状態であることを意味しています。

ロコモは要介護予防にとって重要な概念でありながら、ロコモの認知度は43.8%程度(2020年4月時点)です⁽⁸⁾。特に若い世代は、活動的であり、ロコモのリスクを感じるが少ないことも一因であると考えられます。しかし、

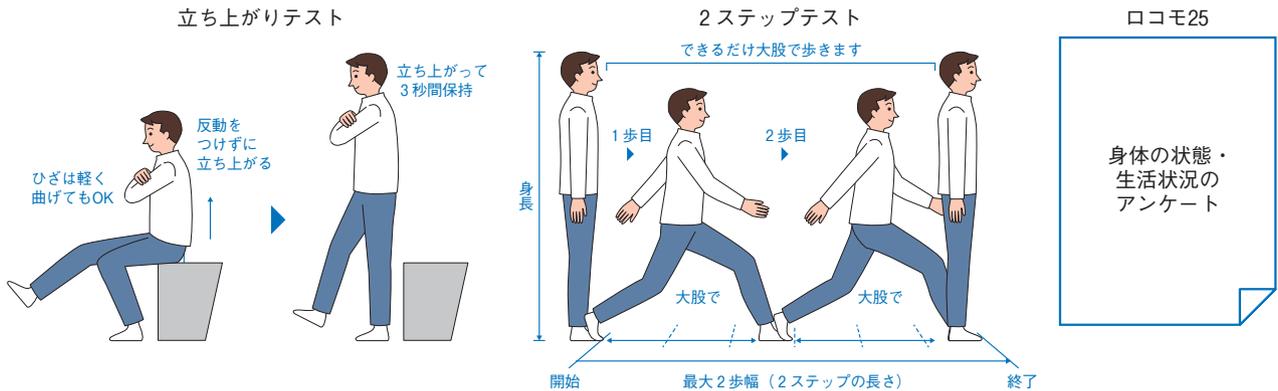


図2 ロコモ度テスト



図3 ロコモ度予測アプリの画面

若年層のうちから移動機能低下のリスクを把握し、早期の行動変容に取り組むことにより、ロコモのリスクを低下させて、最終的には要介護のリスクを低下させることができると考えられます。そこで、多くの人に簡単にロコモのリスクを把握してもらうために、コホート調査で得られた膨大なデータを分析して、将来のロコモ度を予測するモデルを構築し、研究用アプリに実装しました(図3)。ユーザは、年齢や

体重、生活習慣に関するアンケートなど約20の質問にアプリで回答すると、将来3年後にロコモ度1以上になるリスクを予測することができます。

通常のコホート調査では、調査に参加する方から1000を超える分析要素が健康診断やアンケートで収集されています。一般に多くの要素を使って分析したほうが予測精度は高くなります。本研究においても、コホート調査のすべての要素を使えば、予測精度が高く

なると考えられます。しかし、アプリの利用者の立場からすれば、なるべく少ない質問に回答するだけでリスク予測結果が分かることが望ましいと考えました。そこで、私たちはアプリの使いやすさを重視し、予測精度を保ちつつ、少ない要素でも予測可能なモデルを構築しました(図4)。

その工夫点として、要素間の相関関係に応じて、必要となる要素を最適化しました。例えば、拡張期血圧と収縮期血圧のように、互いに強く相関する要素が含まれる場合、これらの要素のうち予測対象であるロコモ度との相関が低いほうの要素を削除しました。これにより、ユーザが類似する質問に回答することがなくなり、効率的に予測に必要な情報を入力できるよう改善しました。次に、実際にアプリに入力する要素として、ロコモ度との相関係数の大きな約20個の要素を抽出しました。相関係数を使うことで、抽出された要素の中でどの行動がロコモ度上昇に寄与するのかを把握でき、ロコモ予防のための対策を講じることが可能に

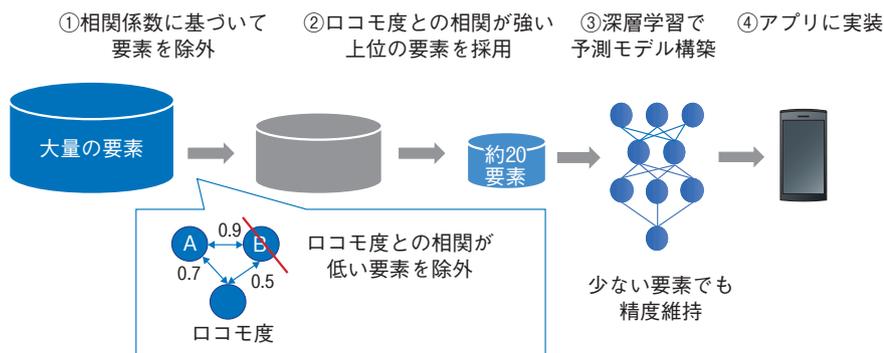


図4 データ分析からアプリ化までの手順

■参考文献

- (1) <https://www.mhlw.go.jp/content/000710991.pdf>
- (2) <https://www.mhlw.go.jp/topics/kaigo/osirase/jigyoku18/index.html>
- (3) 倉沢・藤野・林：“医療健康支援技術の研究開発と糖尿病患者の血糖コントロール不良予測への適用,” NTT技術ジャーナル, Vol. 30, No. 6, pp. 19-23, 2018.
- (4) <https://www.ntt.co.jp/news2018/1805/180516a.html>
- (5) <https://www.ntt.co.jp/news2019/1906/190627b.html>
- (6) <https://www.ntt.co.jp/news2020/2009/200928a.html>
- (7) https://locomo-joa.jp/assets/pdf/index_japanese.pdf
- (8) <https://www.bjd-jp.org/wp/wp-content/uploads/2020/05/2020.pdf>

なります。最後に、深層学習を使ってロコモ度を予測する多層ニューラルネットワークを学習し、予測モデルを構築しました。これによって、少ない要素でも一定の精度での予測が可能となりました。学習済みの予測モデルをアプリに組み込み、PCやスマートフォンで手軽に実行できるため、例えば、健康診断の会場などでもリスク予測を実施可能です。

一連の分析の結果、絞り込まれた要素には運動習慣に関する要素を基本的に、痛みに関する質問項目なども含まれます。これまで医学的にあまり重要視されていなかった要素を見出し、本コホート調査データからの分析の価値を確認することができました。今後、アプリの活用による要介護予防のための健康教育の実施や、その効果の検証など、有効性を検証していきたいと考えています。

ICTを使った健康支援の今後

本稿では、生活習慣病や要介護予防を例に、リスク予測とその要因分析について紹介しました。機械学習や人工

知能によって、将来を予想することは、現在の行動を見直すきっかけとなると考えています。そして、その将来を変え得る要因を分析することは、人々の行動変容に役立つと思います。今後、電子カルテデータや、日常生活で計測した血圧などのヘルスケアデータ、ウェアラブルデバイスで計測された生体情報など、さまざまな医療健康に関する情報が収集されるようになると思われます。1つひとつのデータでは、その人の健康の一部しか表現できませんが、それらのデータを連結することで、人を多面的にとらえることが可能になります。その結果、大規模なデータと医学的な知見を融合させて分析することで、体内で起きている複雑な事象をシミュレーションし、デジタル空間に再現できると考えています。今後、リスク予測に関する技術を発展させていき、その人全体のシミュレーションが可能になるバイオデジタルツインの実現に貢献し、体内の未知なる事象の予測や複雑な事象の理解を実現していきたいと思っています。



(左から) 千葉 昭宏/ 麻野間 直樹/
東 正造/ 藤野 昭典/
青木 俊介

データは、計測し、蓄積した後、分析することによって新たな価値を発揮します。私たちは、これからも医療健康分野のデータ分析を通じて、人々の健康に資する価値を提供できるよう研究開発を続けたいと思います。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
バイオメディカル情報科学研究センター
TEL 03-6712-9934
FAX 03-6712-8372
E-mail akihiro.chiba.sy@hco.ntt.co.jp

プラスな心的変化をもたらす 行動変容支援技術

医療費削減などの社会課題に対して、生活習慣改善などによる健康増進が解決策の1つとなっています。本稿では、生活習慣改善をユースケースとしたその人らしさに合わせたアドバイス提示による行動変容支援技術について紹介します。

あべ なおと さとう たえ
阿部 直人 佐藤 妙
あるが れいこ
有賀 玲子

NTTサービスエボリューション研究所

医療費削減などの社会課題の解決に向け、生活習慣改善や社会環境整備、予防医療等による健康増進が求められています。また、長寿社会に突入し、人生100年といわれる時代において、マルチステージな人生設計が今後必要になるといわれており、仕事や人間関係においても多様性が求められると同時に、いかに健康で過ごせるかが重要となります。そのために、私たちは1人ひとりのその人らしさに合わせたプラスな心的変化をもたらす行動変容支援が重要と考えており、1人ひとりの持つ価値観や大事にしていることといったより深い部分まで理解し、その人に寄り添う行動変容支援技術をめざしています。行動変容支援技術は、日常利用可能な健康アドバイス提示システムへの導入やソーシャルサポートサービス*1などの支援システムへの導入が可能となるでしょう。

本稿では、これまでの取り組みと、新たに上げたナラティブ型行動変容支援技術について紹介します。

通知内容・タイミング・表現に関する行動変容研究

まず、これまでの取り組みである、健康アドバイス提示による生活改善のための行動変容研究について紹介します。現在、スマートフォンやスマートウォッチを介して、健康のための行動を促すアドバイスを通知するサービスが提供されています。例えば、強いストレス状態が続いたタイミングをとらえ、深呼吸を促すサービス⁽¹⁾や、座った状態が続くと立ち上がって体を動かすようにメッセージを通知するサービス⁽²⁾があります。しかし、メッセージを受け取った本人においては、タイミングが合わない、内容が具体性に欠ける等、さまざまな理由で取り組む意欲が湧かない場合、運動等の行動を実施する可能性は低下します。そのため、メッセージを受け取り、行動を起こすためには、通知内容やタイミング・表

現をその人に合わせる事が重要であると考えられます。

そこで、食事や運動、休憩に関する具体的なアドバイスをオフィスワークに提示する実験を実施しました。具体的にはスマートウォッチアプリからさまざまなメッセージを通知し、実際に実施したかどうかを実験期間中に記録し、実験終了後に各メッセージに関して実施率を算出しました(表1)。表1の結果から、簡単に実践できる内容であれば、実施率が高いことが分かりました。一方で、アドバイスを実施できなかった理由としてもっとも多かったのが、打合せ中にアドバイスが送られてきた等による「実施できる場面・環境がなかった」でした(図1)。この結果から、ユーザの生活パターンを事前に把握し、かつコンテキストに合わせた提示を行えば、その人に時間があるから試してみようという心的変化をもたらす、行動変容につながると考えられます。

また、メッセージの表現に関する検討も行いました。同じ行動をアドバイ

*1 ソーシャルサポート：社会的なつながりの中で人間関係によりもたらされる支援。情緒的サポート、情動的サポート、道具的サポート、評価的サポートがあります。

表1 アドバイスと実施率

| アドバイス文 | 実施率(%) |
|---------------------------------------|--------|
| お手洗いや昼休み等の休憩の際、早歩きで目的地に行く | 94 |
| お手洗いや等の休憩の際、普段より大股で、早歩きをする | 87 |
| デスクワーク中、腹筋に力を入れ、姿勢を正すことを意識する | 71 |
| お手洗いや等の休憩の際、普段より大股で歩く | 68 |
| デスクで出たゴミをこまめにゴミ箱に捨てに行く | 67 |
| エレベータの待ち時間等、ちょっとした隙間時間に、踵上げを5回する | 61 |
| 階段で、3フロア分以上、上る | 61 |
| お手洗いや等の休憩の際、軽く太ももを上げながら目的地に行く | 57 |
| 階段を1フロア分以上、上る | 54 |
| ちょっとした隙間時間に、スクワットを5回する | 5 |
| 階段を2フロア分以上、降りる | 37 |
| 通勤の電車などで、踵上げを20回する | 36 |
| 昼休みに、2フロア分、階段を一段飛ばしで上る | 35 |
| エレベータの待ち時間等、ちょっとした隙間時間に、20回踵上げを2セット行う | 3 |
| 昼休み、10分間散歩をする | 2 |
| 休憩時に自分にとって負荷の強いスクワットを5回、2セット行う | 2 |

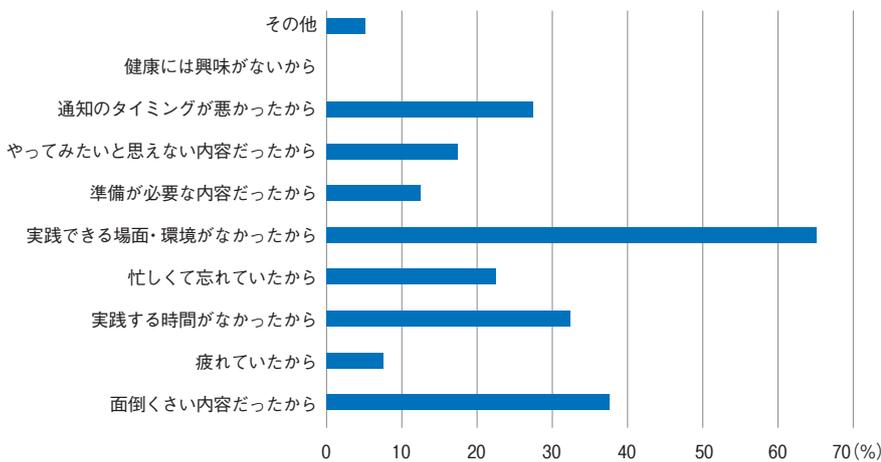


図1 アドバイスを実施できなかった主な理由

これらは、フェスティンガーによって提唱された認知的不協和という心理現象⁽³⁾と将来の健康に関する時間選好^{(4),(5)}に着目し、健康行動の心理的価値を高めるための介入メッセージパターンを考案したものです。実験では、ある基本メッセージに対し、4つの基準によって表現を変えたものの用意しました。対象の被験者は30～60歳代の過去に生活習慣病の治療のための指導歴がなく、体重を減らす意志があり、運動や食生活に関する行動変容ステージ⁽⁶⁾が維持期ではない人となりました。さらに、被験者集団が性格特性(big5)^{*2}、思考特性(時間選好)の観点でおおよそ均等になるようにスクリーニングを行い、162名を抽出しました。アンケート調査では、被験者に「自宅で半日程度の時間を持って余っていて、目的なくTVを見ている。また、体調にも問題はなく、30分程度の運動(その準備時間も含む)であればその後の予定があったとしても影響はない」という場面を想定してもらい、「あなたは、[介入メッセージ]と伝えられたとき、あなたが行いやすいと答えた運動について、実施してみようと思いますか?」と質問し、6件法(1点:全くそう思わない～6点:非常にそう思う)で回答を得ました。点数の高いメッセージを調べたところ、将来健康価値向

*2 性格特性(big5):ビッグファイブ理論における人の性格を表す5つの要素、外向性、協調性、自律性、繊細性、開放性を指します。

スするにしても、やってみようという心的変化をもたらす表現はどのような表現か、という問いを立て、メッセー

ジを受け取ったときに健康行動への動機付けが行われるパターンとして、図2の4つの基準があると考えました。

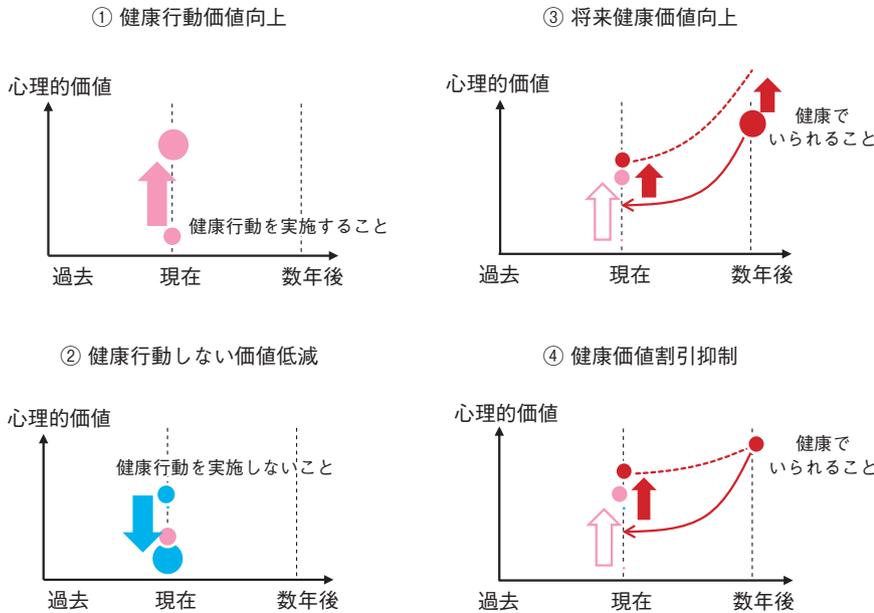


図2 心理的価値を高める4つの基準

上に関するメッセージの点数が高いことが分かりました(表2)。

このように、推奨行動に関するメッセージについて内容やタイミング、表現を変えることで、受け取った人への影響度合いが変わり、行動変容につながる可能性があると考えられます。

ナラティブに着目した行動変容支援

前述の取り組みは、ユーザが行動できそうな場面で「できそうだ」「やってみよう」という気持ちを引き出して行動に移すため行動変容支援、すなわちナッジ(直訳では「肘をつつく」であり、そっと背中を押すアーキテク

表2 被験者からの点数が高かったメッセージ

| 動機付けメッセージ | 平均点数 | 基準 |
|--|------|----|
| 10年後を想像してください。生活習慣病を発症すると、あなたが暮らしの中で今楽しんでいること(例えば、旅行、お酒を飲むこと、ラーメンを食べること、スポーツなど)が脅かされます。例えば、糖尿病になって、日々の血糖測定、インスリン注射に苦労している人や、糖尿病腎症による腎不全になって週15時間の透析治療を受けている人がいます。今日は、「あなたが行いやすいと答えた運動を30分」をしてみるのはいかがでしょうか。 | 4.60 | ③ |
| 10年後を想像してください。健康でいられると、あなたが暮らしの中で今楽しんでいること(例えば、旅行、お酒を飲むこと、ラーメンを食べること、スポーツなど)が継続してできます。「あなたが行いやすいと答えた運動を30分」をしてみるのはいかがでしょうか。 | 4.50 | ③ |
| 「あなたが行いやすいと答えた運動を30分」行くと、なんとなくTVを見ているのと比べて、約4倍もカロリー消費できます。 | 4.49 | ① |
| 「あなたが行いやすいと答えた運動」中に腕を軽く曲げた肘をやや大きく後方に引くと、大胸筋を使い、肩こり予防にもなります。 | 4.49 | ① |
| メタボリックシンドロームを放置して38歳で糖尿病を発症、50歳で透析治療を開始した人が「食事と運動はちゃんとやらないと私みたいな状態が待っているの、こうなる前の人には「今なら間に合います!」と言いたい。」と言っています。今日は、「あなたが行いやすいと答えた運動を30分」をしてみるのはいかがでしょうか。 | 4.48 | ③ |
| 「お風呂に入るたびにお腹が気になってたけど、運動を週3回くらい2週間続けていたら、体重も減ったし体が引き締まって自分の体にほれほれしてきた。」と言っている人がいます。今日は、「あなたが行いやすいと答えた運動を30分」をしてみるのはいかがでしょうか。 | 4.41 | ③ |
| 「あなたが行いやすいと答えた運動を30分」を行い毎日100 kcal消費すると、72日で脂肪1kg=7200 kcalを落とすことにつながります。 | 4.40 | ③ |
| 大腿筋など大きな筋肉を使う「あなたが行いやすいと答えた運動」は、エネルギー代謝が増えます。 | 4.40 | ③ |

チャ)⁽⁷⁾に基づく行動変容支援と呼べます。一方、冒頭で述べた「1人ひとりの持つ価値観や大事にしていること」といったより深い部分まで理解して寄り添う行動変容支援」を確立するためには、これまでの行動変容支援に加えて、1人ひとりをより深く理解することが重要になります。そこで、私たちは、医療や福祉で実践されているナラティブに着目しました。ナラティブはその人の「語り」であり、ある出来事をその人の視点でとらえた語りです。その語りの中にはその人の出来事への解釈が含まれ、その人が大事にしていること、嫌なこと等が見出せると考えられます。また、その人が語っている間の表情や身振りといった非言語的な情報も、その人の感情や価値観の強弱を反映していると考えられます。以上のことから、1人ひとりから「語り」を引き出し、引き出された「語り」について、言語情報、非言語情報を総合してとらえ、それらの情報からその人らしさを理解し、行動変容支援に活かそうと考えています。私たちは、このようなアプローチからもたらされる行動変容支援をナラティブ型行動変容支援技術と呼んでいます。

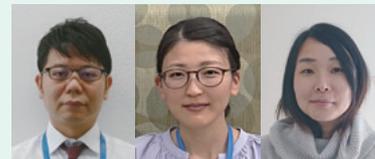
ナラティブ型行動変容支援技術の確立に向けて

現在、保健指導における保健師とクライアントの間での面談において、クライアントの語りをナラティブとしてとらえ、行動変容支援に役立つその人

らしさを抽出できるか試みています。具体的には、クライアントの行動変容をうまく引き出すことに長けた保健師の面談の中で、保健師がどのように語りを引き出していくのか、また、健診・問診データや面談中のクライアントからの回答（語り）の内容・表情等に対してどのような着眼点によりクライアントをとらえているか、とらえたクライアントの特徴を踏まえてどのようなアドバイスを提示するのか、について仮説を立て検証を進めています。今後の予定として、整理した着眼点を保健師とともに精密化し、オンラインも含めた保健指導の中でその人らしさをとらえたアドバイス提示により、行動変容を引き起こすことやソーシャルサポートへの適用が可能か検証する予定です。

■参考文献

- (1) <https://mlt.jpn.com/garmin-healthcare-vol-1/>
- (2) <https://www.apple.com/jp/watch/close-your-rings/>
- (3) 阿部：“フェスティンガーの認知的不協和理論に関する一考察,” 青森公立大学経営経済学研究, Vol. 2, No. 2, pp. 144-153, 1997.
- (4) 筒井・佐々木・山根・グレッグ：“行動経済学入門,” 東洋経済新報社, pp. 31-50, 2017.
- (5) 佐々木・大竹：“医療現場の行動経済学：意思決定のバイアスとナッジ,” 行動経済学, Vol. 11, pp. 110-120, 2018.
- (6) J. O. Prochaska and W. F. Velicer: “The Transtheoretical Model of Health Behavior Change,” Am J Health Promot. Vol. 12, No. 1, pp. 38-48, Sep-Oct, 1998.
- (7) Richard H. Thaler, and Cass R. Sunstein, “Nudge Improving Decisions About Health, Wealth, and Happiness”, Yale University Press, 2008.



(左から) 阿部 直人/ 佐藤 妙/
有賀 玲子

行動変容やナラティブ・アプローチ等に興味、関心があれば是非ご意見をお寄せください。長寿社会における人のWell-beingへの貢献に向けて研究に邁進します。

◆問い合わせ先

NTTサービスエボリューション研究所
サイバネティックインテリジェンス
研究プロジェクト
TEL 046-859-2620
E-mail ci-narrative-p@hco.ntt.co.jp

体内リズムの可視化をめざしたウェアラブル深部体温センサ技術

深部体温は医療現場でも用いられる重要なバイタルサインですが、近年、体内リズムを反映する指標としても注目されています。深部体温は体の核心部の温度であるため、測定を精確に行うためには体腔内にセンサを挿入する必要があり、負担が大きいことが課題です。NTT物性科学基礎研究所では、熱の流れに着目し、体にセンサを貼るだけで深部体温を測定可能とする技術の研究を行っており、本稿では現在の研究の進捗状況について紹介します。

まつなが だいち 松永 大地
 たじま たくろう 田島 卓郎
 たなか ゆうじろう 田中 雄次郎
 せやま みちこ 瀬山 倫子

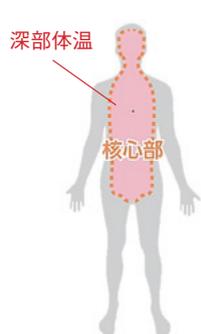
NTT物性科学基礎研究所

深部体温測定が実現する高度な健康管理

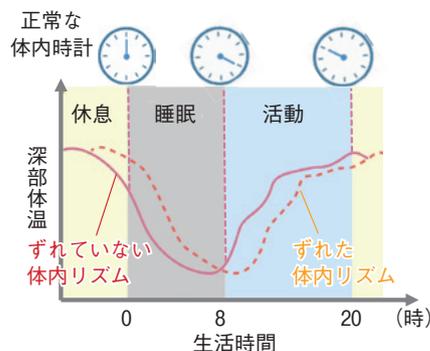
深部体温は、図1(a)に示すように

脳や臓器など体の核心部の温度を指し、これらの働きを守るため外の環境の影響を受けにくく、全身でもっとも高い温度に保たれています。深部体温

は熱中症や感染症などの炎症反応の結果として上昇し、低体温治療や低体温症などの発症で下降するため、医療分野では重要なバイタルサインとして利



(a) 核心部と深部体温



(b) 深部体温測定で可視化される体内リズム



(c) 深部体温測定を用いたヘルスケアシステムの例



(d) 深部体温測定の活用分野例

図1 深部体温とその活用方法

用されています。一方で、深部体温は平熱の範囲内でも約1日周期に1℃程度の小さな変動があります。この深部体温の変動は、体内リズムと連動していることが知られています⁽¹⁾。ヒトの体内リズムは睡眠や運動の質、疾患の発症等、私たちの体の状態と密接に関連していることが近年の研究から明らかとなっています。人々の生活習慣が多様化する現代社会においては、体内リズムと就寝・起床時刻をはじめとした生活時間との間でずれが生じやすく、それがさまざまな社会問題となっている疾患と関連することが知られてきています。

個人の体内リズムを把握するために、血液を採取してホルモン成分などの時間変化を調べる方法が確立されていますが、それ以外では深部体温の測定が有効な方法です。図1(b)に示すように、体内リズムと生活時間にずれがない場合、深部体温は睡眠の数時間前から下降し始め、睡眠後半からは上昇に転じます。しかし、不規則な生活などで体内リズムと生活時間での睡眠・覚醒タイミングとのずれが生じている場合、睡眠の質が悪化します。このような状態はソーシャルジェットラグと呼ばれ、時差ボケのような状態になります。これが続くと、寝付きが悪い・眠りが浅い・朝起きるのがつらい・日中眠くなるといった睡眠障害につながり、心身の健康および社会的活動に悪影響を及ぼします⁽²⁾。一方で、体内

リズムは、光照射をはじめとした外部刺激で改善されることも知られています。そこで、深部体温の測定が負担なく行え、自分自身の体内リズムを手軽に把握できるようになると、図1(c)に示すように、個人に応じたヘルスケアシステムが構築できます。その結果、体内リズムと関連した図1(d)に示す睡眠管理や、介護、労働管理などのさまざまな分野への貢献が期待されます。

NTTでは、1日のうちで1℃程度のわずかな深部体温の変動を見逃さない、高い精度で、かつ体への負担が小さい深部体温センサデバイスの開発に取り組んできています。本稿では、まず深部体温の既存の測定方法を紹介します。NTTが取り組む非侵襲な深部体温の原理について述べ、現在の研究の進捗状況について紹介します。

既存の深部体温の測定法と課題

深部体温の測定方法は、その侵襲性によって大きく2つに分類できます。

1つは、体腔内に温度計を挿入して測定する方法です。舌下温度計は、呼吸や食事の影響を受けないよう口を閉じて保った状態を一定時間、維持することで深部体温が測定できます。鼓膜温度計は、耳穴へ挿入したセンサで鼓膜から放射される赤外線を計測して鼓膜温度を測定します。鼓膜温度は、近傍にある頸動脈の温度を反映することから、深部体温相当を測定することがで

きます。手術中においては、厳格な深部体温の管理に向けて、センサを挿入して測定する直腸温度や、カテーテルを挿入して肺動脈温度の測定が実施されています。これらの測定法は侵襲的であるため、体温計自体は外部環境の影響を受けにくく、測定される温度には信頼性があります。一方で、体温計を体内に設置するため負担が大きく、衛生面で注意が必要にもなります。

もう1つは、体の表面に接触させて測定する体温計です。衛生的ですが体温計自体が外部環境とも接触することから、測定面での制限が出てきます。腋窩体温計ではしっかり腕を閉じて5分程度測定することで、深部体温を反映した温度が測定できます⁽³⁾。しかし、その状態を長時間維持することは困難です。そこで、体に張り付け、外部環境に体温計が晒される状態にあっても、深部体温を推定する手法として、熱流補償法を用いたセンサが知られています。額部にセンサを張り付け、体内から表面への熱の流れ（熱流束）をキャンセルするように、センサ内のヒータで熱を加えることで深部体温を測定します。この熱流補償法のセンサは、生体の加熱を伴うため原理的に比較的大きな電力が必要です。また、利用の際の環境にも制限があり、手術中の深部体温の管理に用いられるものです。そこで、低電力で利用環境にも制限が少ない方法として、体の表面に張り付けて熱流束を測定し、加熱

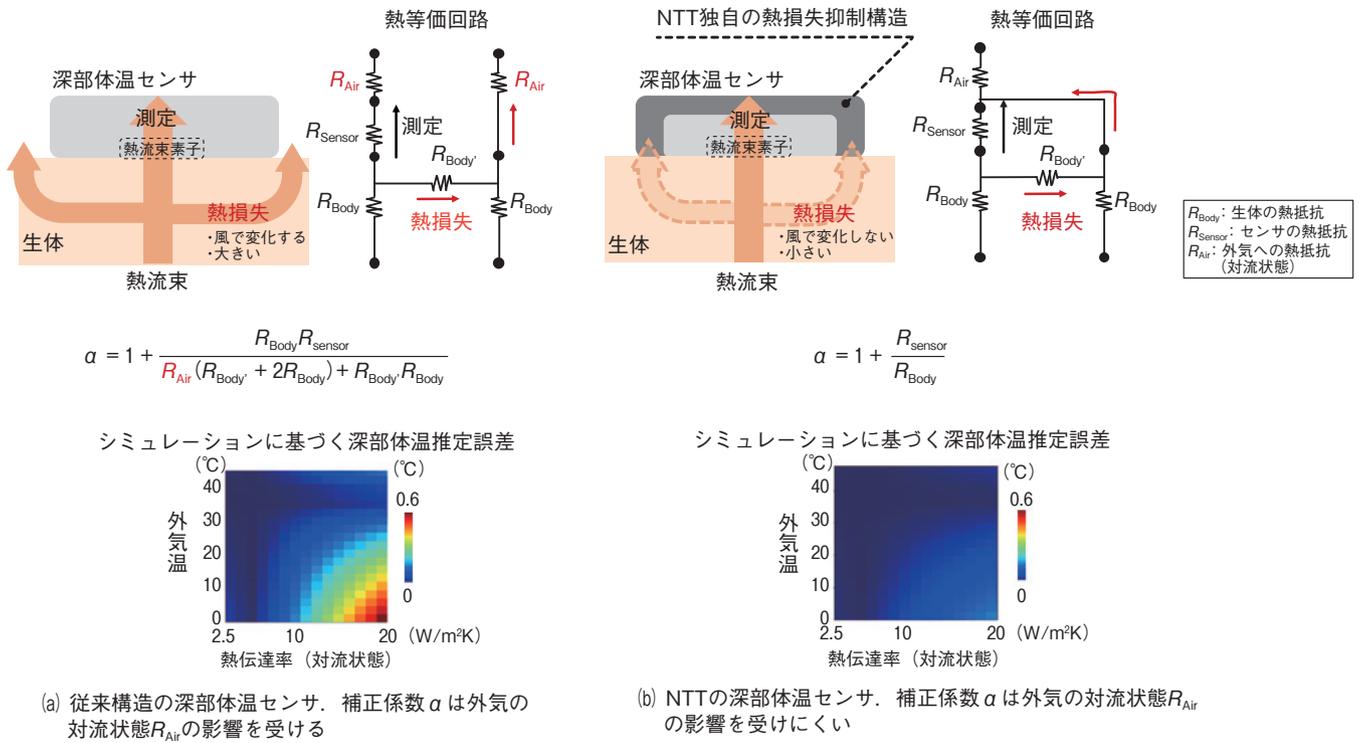


図2 深部体温センサの構造と推定誤差

を伴わず深部体温を推定するセンサの技術が重要となります。しかし、熱流束を測定するセンサでは、風のような外部環境の変化や、人の発汗の状態の変化により測定誤差が生じやすい課題があります。そこでNTTでは、体の表面に貼るだけで負担が少なく、非侵襲的な測定方法で上記の課題の解決を図っています。

非侵襲での深部体温測定とNTTセンサの特徴

体の表面に貼るだけで、非侵襲で深部体温を測定する方法の概要を図2に

示します。深部体温は、体の核心部にある深部体温領域から生体組織を経て皮膚温度として現れます。この皮膚温度は、深部体温と比較すると、通常の快適な環境下では、外気への熱の放散によって低くなっています。体の表面で測定した皮膚温度から深部体温へ換算するためには、体の中の深部体温が存在する領域から深部体温センサが貼り付けられている体の表面までの温度分布を求めます。つまり皮膚温度が深部体温からどれだけ冷えたかを算出し、深部体温の真の値を推定して測定します。この方法は、熱流束法と呼ば

れます⁽⁴⁾。これまでの熱流束法を用いた深部体温センサ研究例では、図2(a)の従来構造の概略図とシミュレーション結果に示すように、風が全くないような実験環境下においては、深部体温を正確に推定することができます。

一方で、実際の生活環境では無風ということはほとんどなく、対流が存在しています。体の表面に深部体温センサを設置すると、センサが被覆した部分の皮膚温度は、被覆されないセンサ周囲の皮膚温度と比べると高くなります。そのため図2(a)の矢印で示すように、熱がセンサ周辺に流出してしま

う現象がおきます。この“熱損失”はセンシング部分で計測できない熱となるため、図2(a)のシミュレーションに示すように、深部体温の推定の誤差の原因となります。この“熱損失”について、あらかじめ熱流束センサで測定される熱流束と熱損失の比として事前に補正係数 α を校正し、深部体温を推定する方法があります⁽⁵⁾。しかし、この補正係数 α もまた対流状態の変化によって影響を受け、測定誤差が生じます。

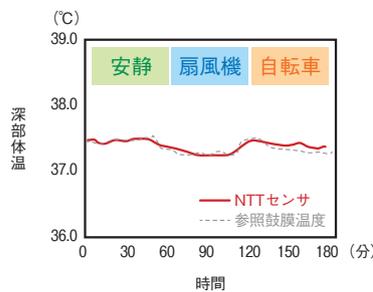
そこでNTTでは、補正係数 α が対流状態の影響を受けにくいセンサ構造を考案しました⁽⁶⁾。その概要を図2(b)に示します。従来構造では、漏れた熱流束はセンサを介さずそのまま外気へと放散され、熱流束センサで測定される熱流束と漏れた熱流束の比である補正係数は対流状態に依存します。NTTのセンサ構造では、センサの周囲を熱が通りやすい高熱伝導材で覆うことで、漏れた熱流束は高熱伝導材を伝わり、熱流束センサで測定された熱流束と合流して外気へ放散します。これにより補正係数 α は対流状態に依存せず、深部体温の推定誤差を低減することができます。この構造を熱損失抑制構造と呼んでいます。NTTでは熱損失抑制構造の形状を最適化し、熱損失自体も小さく抑えることで、センサの小型化と精度向上の両方を実現しています。この最適化したセンサを用いると、図2(b)のシミュレーション結



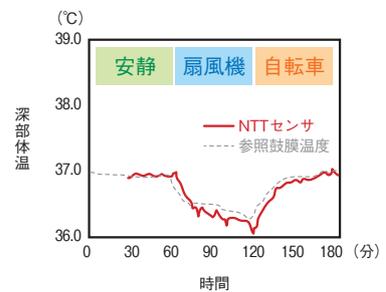
図3 NTTが研究開発を行う深部体温センサ



(a) 測定プロトコル



(b) 実験参加者1の結果



(c) 実験参加者2の結果

※(b),(c)は異なる実験参加者による結果

図4 深部体温測定の場合

果に示すように、エアコンの風よりも強い5 m/sの風が吹いた場合でも、深部体温の推定誤差を0.1℃以内に抑制できることとなります。

NTTの深部体温センサと測定結果の例

最適化した熱損失抑制構造を有するセンサからなる深部体温センサを図3

に示します。センサ部（白いプローブ）は直径30 mm、厚み5 mmで、ペットボトルの蓋の厚みを3分の1にしたものと同程度のサイズです。センサで測定された皮膚温度と熱流束は、ロガー一部でデジタル変換され、Bluetoothで測定用アプリに転送、記録されます。

この深部体温センサを用いて生体適用実験を行った測定結果の例を図4に示します。実験参加者の前額部にセンサを装着し、扇風機で風を当てる実験と、低強度の運動（自転車をこぐ）を行った実験を実施しました。どちらの場合でも、精度良く参照温度（市販の鼓膜センサの温度）へ追従することを確認しました。これらの結果から、エアコンなどで対流が存在する環境においても、高精度に深部体温を測定可能であることを実証しました。

今後の展望

本稿では、体の表面に貼るだけの非侵襲な深部体温計の実現に向け、熱流束を用いて深部体温を推定する技術について紹介しました。従来では困難であった、日常生活での高精度な深部体温測定が実現すると、健康管理システムへの応用や、時間薬理学といった新たな医療への応用が期待されます。さらに、深部体温の変動から体内リズムを可視化し、生活リズムとのずれを把握することができるようになると、スマートホーム等と連携した環境制御に

より、体内リズムを適切に保つアプリケーションの実装が期待されます。

日常生活における長期間のモニタリングでは、装着性や連続計測等のユーザビリティや、データを収集・可視化するスマートフォンとの連携も重要です。今後はセンサとロガーを一体化したデバイスによる長期間の連続測定に向け、研究開発に取り組んでいきます。

参考文献

- (1) A. Cagnacci, J.A. Elliott, and S.S.Yen: "Melatonin: a major regulator of the circadian rhythm of core temperature in humans," *Journal of Clin Endocrinol Metab*, Vol. 75, No. 2, pp. 447-452, August 1992.
- (2) 橋本・本間・本間: "睡眠と生体リズム," *日薬理誌*, Vol. 129, No. 6, pp. 400-403, 2007.
- (3) J.Y. Lefrant, L. Muller, J.E. Coussaye, M. Benbabaali, C. Lebris, N. Zeitoun, C. Mari, G. Saïssi, J. Ripart, and J.J. Eledjam: "Temperature measurement in intensive care patients: comparison of urinary bladder, oesophageal, rectal, axillary, and inguinal methods versus pulmonary artery core method," *Intensive Care Med*, Vol. 29, No. 3, pp. 414-418, Feb. 2003.
- (4) K. Kitamura, X. Zhu, W. Chen, and T. Nemoto: "Development of a new method for the noninvasive measurement of deep body temperature without a heater," *Med. Eng. Phys.*, Vol. 32, No. 1, pp. 1-6, Jan. 2010.
- (5) J. Feng, C. Zhou, C. He, Y. Li, and X. Ye: "Development of an improved wearable device for core body temperature monitoring based on the dual heat flux principle," *Med. Eng. Phys.*, Vol. 38, No. 4, pp. 652-668, April 2017.
- (6) D. Matsunaga, Y. Tanaka, M. Seyama, and K. Nagashima: "Non-invasive and wearable thermometer for continuous monitoring of core body temperature under various convective conditions," *Proc. of EMBC*, pp. 4377-4380, July 2020.



（上段左から）松永 大地/ 田中 雄次郎
（下段左から）田島 卓郎/ 瀬山 倫子

今回紹介した非侵襲での深部体温測定以外にもさまざまな物理現象や生理現象に着目し、新たな生体センサの研究開発を進めています。これらのセンサを活用し、より高度な健康管理アプリケーションによる高付加価値なサービス創出をめざしていきます。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
バイオメディカル情報科学研究センター
TEL 046-240-2819
FAX 046-240-4728
E-mail daichi.matsunaga.ye@hco.ntt.co.jp



生体音と心電信号の新たな計測と解析の技術 ——パーソナル心臓モデリングによる心疾患の 早期発見・リハビリ応用に向けて

人の身体や心理の状態を知るうえで、生体音と心電信号は非常に重要な手掛かりとなります。本稿では、装着型音響センサアレイ（テレ聴診器）による生体音の計測、および hitoe® によるテンソル心電図等の新たな計測・解析技術と、それらを用いた信号処理・機械学習技術を紹介し、パーソナル心臓モデリングによる疾病の早期発見への可能性や発症後のリハビリテーションへの応用を展望します。

| | | | |
|---------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| なかの 中野 | まさひろ 允裕 | しぶえ 渋谷 | りょうへい 遼平 |
| かしの 柏野 | くにお 邦夫 | つかだ 塚田 | しんご 信吾 |
| おがさわら 小笠原 | たかゆき 隆行 | | |

NTT 物性科学基礎研究所

生体音による心身の状態の推定

生体を計測して得られる生体情報には、生体の機能・形態・動特性などが反映されています。私たちはさまざまな生体情報を信号としてとらえ、信号処理や機械学習の技術を用いて、観測された信号を元に人それぞれの身体や心の状態をモデル化し、疾病の早期発見をはじめとするウェルビーイングの向上をめざす「バイオデジタルツイン」構想を掲げて研究開発を進めています。以降ではその中から、まず、生体から発生する音に注目した取り組み事例を紹介します。

■テレ聴診器

医師や看護師は聴診により異常の有無や緊急度などを判断します。熟練した医療者は、呼吸、心臓の弁の動き、血流などといったさまざまな生体音の発生や伝達の様子を頭の中でイメージすることができるともいわれています。このような医療者による聴診にヒントを得て、またそれをさまざまなかたちでサポートすることもめざして、私た

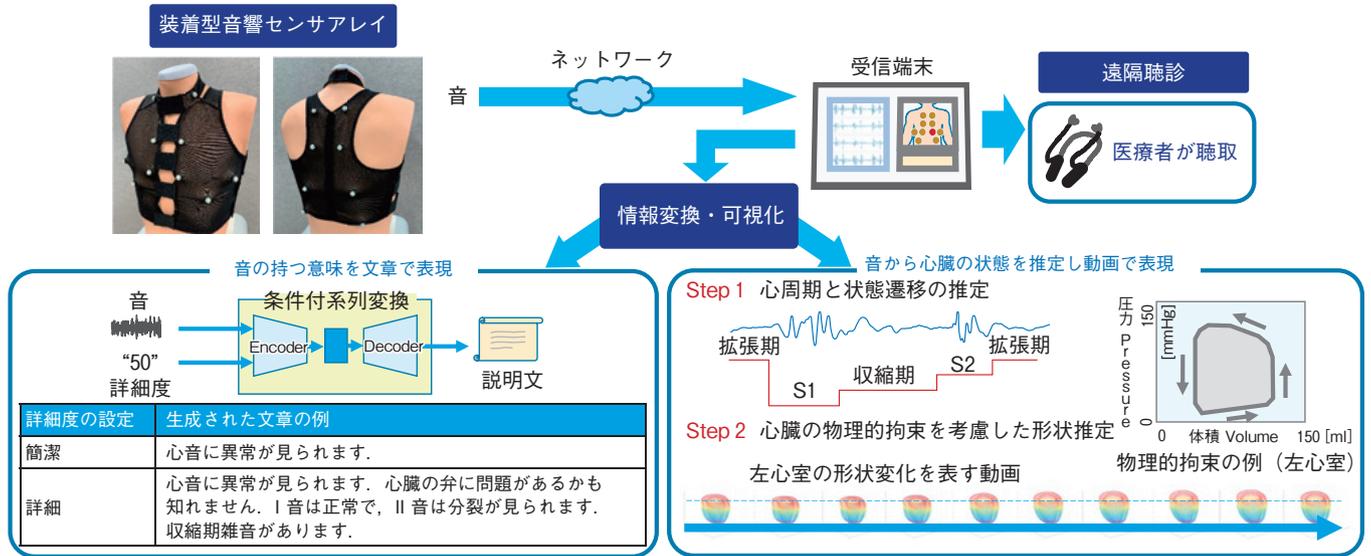
ちは「テレ聴診器」と呼ぶウェアラブルデバイスの研究開発を進めています（図1左上）。

テレ聴診器は多チャンネルのマイクロフォンからの生体音（音響信号）と心電を取得することができるウェアラブルデバイスです。取得した音響信号と心電はネットワークを介して遠隔地にある端末に送信することができます。端末では、画面上の操作によって、さまざまな個所の音を聴くことができます。テレ聴診器が実用化されれば、医療者は患者と直接対面することなく離れた場所から聴診することができるので、感染症の患者の診察や、遠隔（在宅や医療過疎地など）の患者に対する緊急性の判断などに有用であると考えられます（図1右上）。また、生体音の記録や共有が可能であるため、オンラインで繰り返し聴診したり経緯を追ったりすることも可能です。このように医療者の方の使用に加えて、次に述べるように、一般の方による健康のセルフケアなどでの使用を想定した研究も進めています。

■テレ聴診器による心音への説明文付与

非専門家にとって、生体音だけを聴いて生体の情報を知るのは容易なことではありません。しかし、信号処理・機械学習技術を用いると、生体音を多くの人が理解しやすいかたちに変換することができます。その1つとして、生体音を直接文章に変換（翻訳）することを試んでいます（図1左下）。

もっとも端的な説明の方法は、生体音が「正常である」「正常でない」という分類を示すことでしょう。しかし、「正常でない」と分類された場合、どのような異常があるのか、すぐに病院に行くべきなのか、など、より詳細な説明が望ましい場合もあるでしょう。そこで私たちは、生成する説明文の詳しさを表す「詳細度」という数値を指定できるようにして、条件付き系列変換と呼ぶ手法を提案しました⁽¹⁾。これにより、例えば心音と詳細度をシステムに入力すると、望みの詳しさで説明文を出力することができるようになりました。



左上：テレ聴診器の概観
 左下：心音への説明文付与

右上：テレ聴診器による遠隔での心音の聴取
 右下：心音からの心臓の三次元形状モデルの推定

図1 テレ聴診器と心音への説明文付与・三次元形状推定

■テレ聴診器による心音からの動画推定

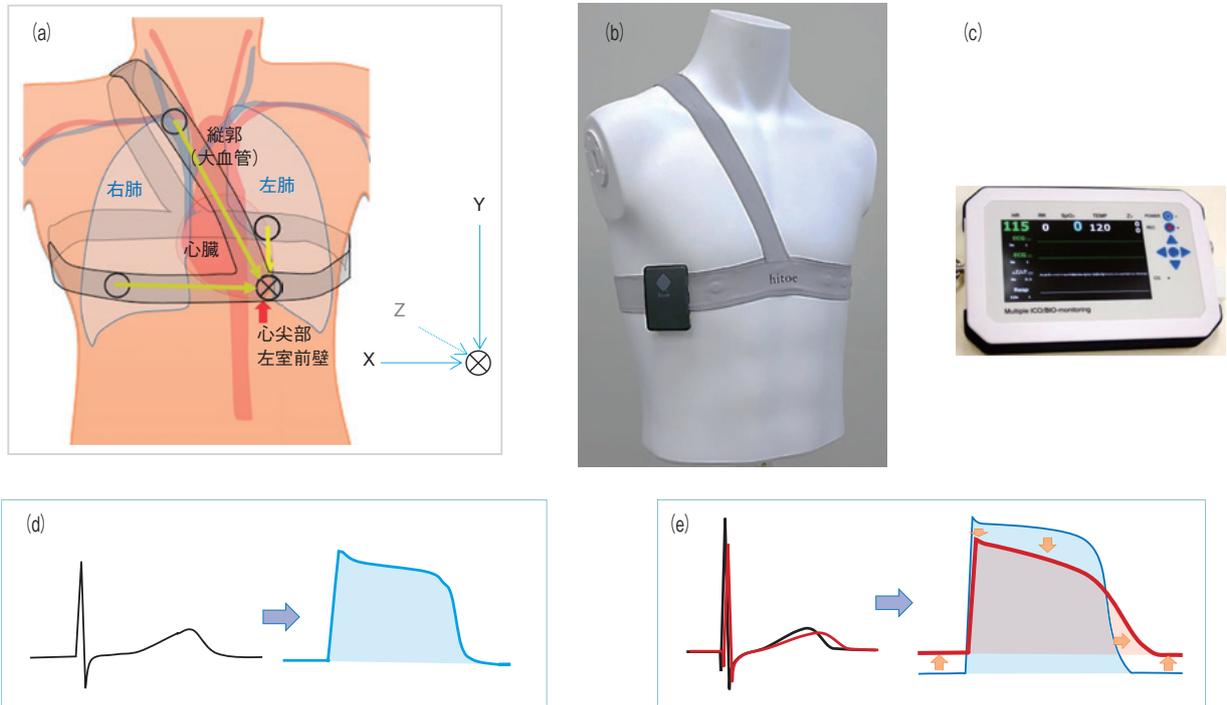
生体音を分かりやすいかたちへ変換するためのもう1つの試みは、生体の機能をリアルタイムに表現する動画の生成です(図1右下)。これまでに、心音からの心臓の動きの再構成を試みています。正常な心臓は周期的な動きをすることが知られており、心房収縮期、等容性収縮期、駆出期、等容性拡張期、充満期の順に状態が遷移します。そこで、心音の観測から心臓の遷移状態を推定し、三次元形状の動きを推定・再構成することをめざしています。心臓は全身に血液を送るポンプの役割を果たしていますので、状態遷移を通じて、その圧力と体積とは物理的に特定の関係を保っています。私た

ちはこの物理的性質に着目し、心音から推定される状態遷移に連動する心臓の動きを心臓らしい動きに従うように拘束しながら三次元形状の動画を構成する手法を考案し、精度の良い形状推定を可能にしました⁽²⁾。

個々人の身体や心理の状態を、音に代表されるような観測しやすい身近な生体情報から精度良く推定したり予測したりするためには、このほかにも、多くの新たな工夫が必要になると考えられます。今後も音の情報や、後述する心電の情報をはじめとして、生体の機能や動態を多面的にとらえるための信号処理・機械学習技術の研究開発を進めていきます。

新しい誘導と解析を用いたモバイル立体心電図：テンソル心電図

心電図は心臓の生理機能検査として、医療機関における診断、バイタルモニタ、健診、AED(自動体外式除細動器)など広く活用されています。心電図はインターネット、スマートフォンなどのICTの発達と機械学習等の情報処理技術の進歩により、ヘルスケアなどの新たな領域に活用を広げつつあります。さらに超高齢化社会における心疾患の増加により、心電図を活用した在宅・遠隔医療(テレメディスン)のニーズは急速に高まっています。私たちはhitoe[®]を用いたウェアラブル心電計の開発経験を活かし、臨床心電図に関する医学的な知見と近年の情



(a) 心尖部（左室前壁）を基準とした線形独立な3軸の双極誘導の電極の配置。心臓と肺と縦郭大血管の位置を示す。
 (b) 立体的な誘導法に対応したベルト型のホルター心電計*。右肩のベルト、ウエストベルトの内側に複数の電極を配置する。
 (c) 3ch心電図とインピーダンス血流の同時計測、Bluetooth無線通信機能を有する計測機器*
 (d) 体表面で記録される心電図（黒）の元となる心起電力は、台形のプラトー相を特徴とする心筋の活動電位（青）である。信号処理により心電図から心筋の活動電位を推定する。
 (e) 心不全の心電図（赤）は正常（黒）から微細に変形する場合がある。心電図から心筋活動電位への変換により歪が明示される。
 * 薬機未承認品 研究用

図2 新しい誘導と解析を用いたテンソル心電図の概要

報処理技術を組み合わせて、心電図の常時計測・解析システムの構築に取り組んでいます⁽³⁾。

長期記録に適した立体的な心電図誘導

心電図は、四肢および胸の表面の規定の位置（標準12誘導）に設置した複数の生体電極から取得した電位差（スカラー量）とその心電図の形状（パターン）を基に判定を行っています。心電位をより立体的に記録する方法として

3軸の直交座標を用いたベクトル心電図では、胸部、頭部、下肢の電極と抵抗の補正回路を用いています。標準12誘導もベクトル心電図も四肢に電極を設置するため、体動の影響を受けやすく安静状態の計測が基本となります。一方、胸部の電極は体動の影響を受けにくく比較的大きな心電位が得られるためホルター心電図、運動負荷心電図、スポーツ心拍計に用いられています。

私たちは、立体的な心電図を長時間

安定記録する目的で、心臓が胸郭ともっとも近接する心尖部領域（心尖部一左前壁）を基準点とし、ほぼ線形独立な3方向に対極を備えたウェアラブル心電計を考案しました⁽⁴⁾（図2(a)）。水平方向の2つの誘導*¹は胸郭の反対側に、垂直方向の誘導は心起電力の

*1 誘導：心電図は心臓内の電気の流れを記録するものですが、このとき心臓を挟んで電極を取り付けることにより、マイナス電極からプラス電極に電気の流れをつくることを誘導といいます。

基軸^{*2}に合わせ右上前胸部に設置した双極誘導^{*3}により、立体的な心電位を安定記録します(図2(b))。電極と配線は伸縮性のベルトと一体化し、肩ベルトとウエストベルトを締めるだけで簡単に装着できます。さらにこの立体心電図とともに心拍出力・深部血管脈波の同時計測機能を備えたポリグラフ(心機図)を開発しました(図2(c))。

■新しい心電図の解析法

心電図の異常には定型的な異常波形(パターン)が示されるだけではなく、形状のわずかな歪や電位の変化にとどまる場合も少なくありません。このような非定型的な心電図の異常を定量的に評価する方法は確立しておらず、疾病やパターンごとに個別に基準を設けて対応しているのが現状です。

心電位の起電力は心筋の集成的な活動電位であり、脱分極の持続するプラトー相(3相)を有しますが、体表面の心電位には通常プラトーは認められません。私たちは活動電位の0相から4相の各周期の膜電位の分子生物学・生理学的な制約を利用し、体表面の心電位から心筋の集成的な活動電位の推定(逆問題)を行っています(図2(d))。活動電位への変換により、非定型的な歪は拡大され、明瞭に可視化されます

*2 心起電力の基軸：心臓は立体的構造物のためにその電気変化もまた時々刻々と立体的に変化します。心電図は心臓全体に発生する起電力を記録するものだととらえることができ、その起電力ベクトルの方向を基軸といいます。

*3 双極誘導法：2点の電極を用いて心電図を取得する方法を指します。

(図2(e))。心筋の活動電位への変換の際に得られるパラメータが心電図の複雑な異常パターンや微細な歪を定量化し、統一的に評価する際の指標として有効であるかを検証しています。

マルチモードのデータ計測・解析を特徴とする、このテンソル心電図が心不全や虚血性心疾患、心臓突然死と関連する不整脈の診断に役立つことを期待しています。

ウェアラブルデバイスのリハビリ応用

ウェアラブルデバイスは、疾病の早期発見や正確な診断への応用にとどまらず、発症後においても有効です。その一例が、2017年から藤田医科大学、東レ株式会社と取り組んでいるリハビリテーション品質向上のためのシステム開発ならびに医学検証です⁽⁵⁾。脳卒中リハビリは、発症後の訓練機会が多ければ多いほど良好な経過が期待できます⁽⁶⁾。しかし、療法士との訓練機会には限りがあるため、患者はベッドからの離床や自主トレなどを通じて、日常をできるだけ活発に過ごすことが望ましいとされています。しかし、片麻痺をかかえる身体に自ら精神的に負荷をかけることは容易ではなく、より良い回復を実現するには支援が必要で

す。こうした背景から、私たちはウェアラブルデバイスにより脳卒中患者の活動データを24時間スケールで精緻にモニタリング可能なシステムを開発しました(図3)。このシステムでは、

片麻痺の患者でも独力で着脱できるウェアを身に着けると、スマートフォンやゲートウェイといった中継器を介して、データが自動的にサーバに集約されます。データを処理するアルゴリズムに特徴があり、活動の特徴を保持しつつ病院施設のネットワーク負荷を避ける高度なダウンサンプリングと、データの一部欠損を想定した補償処理を備えています。また、それらの処理によって最終的に得られる指標の医学的検証が進められています。

このシステムは3種類のアウトプットにより活用されています。1番目は、患者ご本人やご家族向けのレポートです。活発に動ける時間が次第に延びていく様子が数値で記録されており、回復過程を具体的に伝えることができます。毎回の進展に合わせてイラストが変わるので、「今回はここまで来ました」といった会話を療法士と交わしながら、次の訓練につなげます。2番目は、医療チームの会議などで用いられる詳細な計測結果です。大勢の患者を担当する医療者は、特定の個人の様子を追い続けることはできません。しかし、このシステムによる24時間の記録を閲覧すれば、チーム全員が患者の生活活動の変化を共有することができます。3番目は、計測データの一覧情報です。医学研究では、多数の計測結果から導かれる統計的な確からしさの検証によって事実が明らかになります。しかし、24時間の活動データは量が相応に大きいため、前処理を自

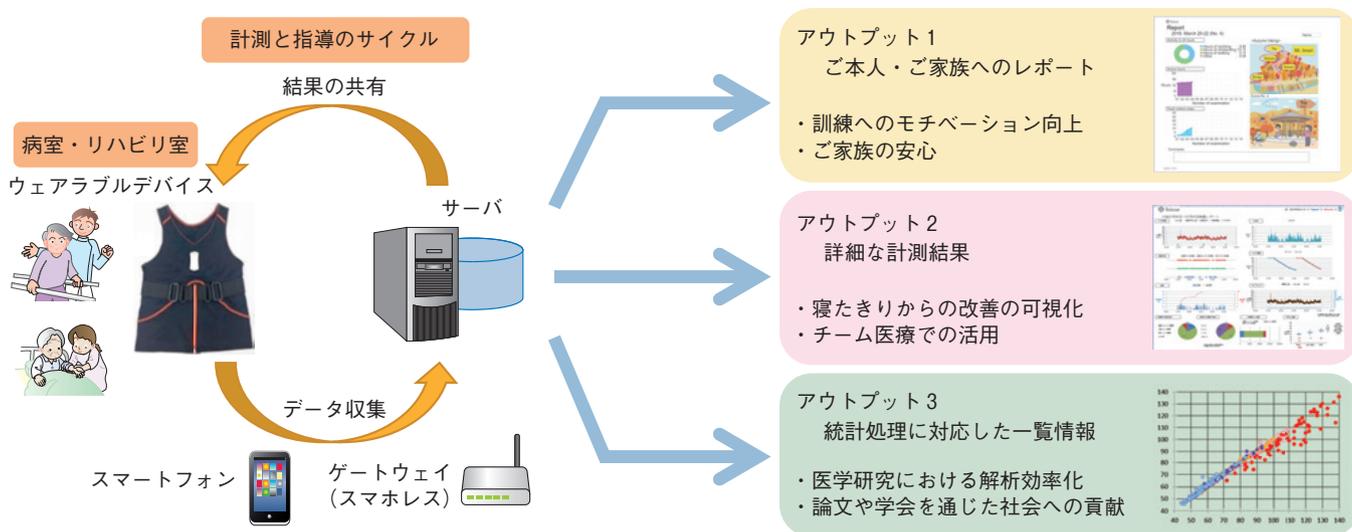


図3 リハビリ支援システムの概要

動化することで医学研究に活用しやすいよう設計しています。また本システムは6分間歩行試験などのリハビリ医療で広く用いられる検査に対応しています。これにより既存の検査アプローチと24時間活動モニタリングの結果が容易に照合され、新たな比較研究が可能となっています。本システムは医学研究用途ですすでご購入され、実用されていますが、今後は機械学習などの発展的な機能を組み合わせることで、より良い回復を実現するさらなる貢献が可能となっていくと考えています。

■参考文献

(1) S. Ikawa and K. Kashino: "Neural audio captioning based on conditional sequence-to-sequence model," Proc. of DCASE 2019 Workshop, New York, U.S.A., Oct. 2019.

(2) M. Nakano, R. Shibue, K. Kashino, S. Tsukada, and H. Tomoike: "Gaussian process with physical laws for 3D cardiac modeling," Proc. of EUSIPCO 2020, pp. 1452-1456, Amsterdam, Nederland, Jan. 2020.

(3) Y. Tsukada, M. Tokita, H. Murata, Y. Hirasawa, K. Yodogawa, Y. Iwasaki, K. Asai, W. Shimizu, N. Kasai, H. Nakashima, and S. Tsukada: "Validation of wearable textile electrodes for ECG monitoring," Heart Vessels, Vol. 34, No. 7, pp. 1203-1211, 2019.

(4) S. Tsukada: "Wearable Textile Electrodes for Long-term Vector ECG monitoring "Tensor Cardiography", " ISMICT 2020, Nara, Japan, May 2020.

(5) T. Ogasawara, K. Matsunaga, H. Ito, and M. Mukaino: "Application for rehabilitation medicine using wearable textile "hitoe", " NTT Technical Review, Vol. 16, No. 9, pp. 6-12, 2018.

(6) M. Yagi, H. Yasunaga, H. Matsui, K. Morita, K. Fushimi, M. Fujimoto, T. Koyama, and J. Fujitani: "Impact of rehabilitation on outcomes in patients with ischemic stroke: A nationwide retrospective cohort study in Japan," Stroke, Vol. 48, No. 3, pp. 740-746, March 2017.



(上段左から) 中野 允裕/ 渋江 遼平
(下段左から) 柏野 邦夫/ 塚田 信吾/
小笠原 隆行

生体信号の新しい計測法と信号処理・機械学習技術の発展は融合領域としての高い親和性から急速な発展を遂げています。人の身体や心理をより理解するための技術の発展とその応用をめざしていきます。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
バイオメディカル情報科学研究センター
TEL 046-240-4029
FAX 046-240-3145
E-mail masahiro.nakano.pr@hco.ntt.co.jp

医療健康の未来を拓くバイオニクス技術

工学の技術や理論を駆使することで生体の構造や機能を解明し、新しい技術として応用する学問を生体工学（バイオニクス）と呼びます。生体系と工学系を双方向的につなぐ技術の確立は、バイオデジタルツインの実現や医療・ヘルスケアに対する新たな技術の創出にとって重要です。本稿では、NTT 物性科学基礎研究所とNTT サービスエボリューション研究所がそれぞれ展開しているバイオニクス技術について紹介します。

たかはし りく たなか
高橋 陸^{†1} 田中 あや^{†1}
やまくち ますみ こいけ ゆきお
山口 真澄^{†1} 小池 幸生^{†2}

NTT 物性科学基礎研究所^{†1}

NTT サービスエボリューション研究所^{†2}

生体情報の取得に向けた 生体機能デバイス技術の取り組み

バイオニクスの潮流には2つの方向があります。1つは生体から工学へ向かう流れであり、生体の機能や構造の人工的な再現を目的としています。近年、半導体の微細加工技術や3Dプリンティング技術の進展により、ナノ・マイクロメートルの微小スケールにおいても生体を模した表面形状や立体構造を再現できるようになってきました。こうした微細構造と種々の細胞を組み合わせ、臓器の機能や構造の一部を実現する技術として、生体模倣システム（Microphysiological Systems：MPS）が注目されています。微細加工によって細胞培養の足場構造をつくり出すことで、生体内の微小な空間や、血流や伸縮運動による機械刺激といった生理的環境を人工的に再現することができます。その結果、従来の培養方法では実現できなかった高次なin vivo（生体内）機能を、高精度で多角的な観察や評価が可能なin vitro（生

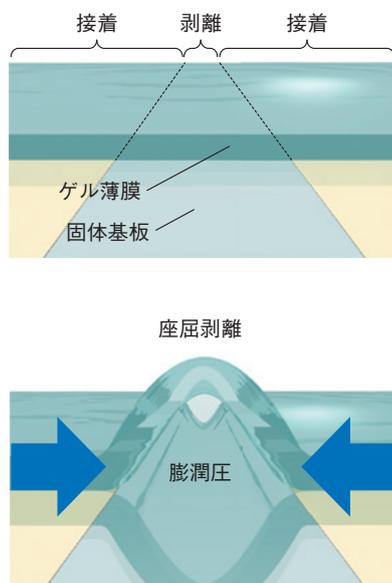
体外）で発現できることが期待され、これまでに心臓、肝臓、腎臓などを模倣したデバイスが報告されています⁽¹⁾。単一臓器の完全再現モデルや、多臓器の連結による異種臓器間の相互作用モデルの構築は、臓器に対する正確な薬物動態予測といった創薬分野での応用はもちろん、バイオデジタルツインの実現に求められるパーソナライズされた生体情報を分子・組織・臓器レベルごとに取得・解析することが可能な技術として限りない可能性を秘めています。

既存のMPSデバイスの多くは、ポリジメチルシロキサン（PDMS）と呼ばれる、加工性・透明性・酸素透過性に富んだゴム状の材料を基材としています。一方で、より高次の機能を長期間安定して細胞に発現させたり、細胞が分泌・吸収する分子を通じて外界と相互作用させたりするためには、材料のレベルから生体環境に近づけることが重要であると考えられます。そこでNTT 物性科学基礎研究所では、より生体に類似した素材である「ハイド

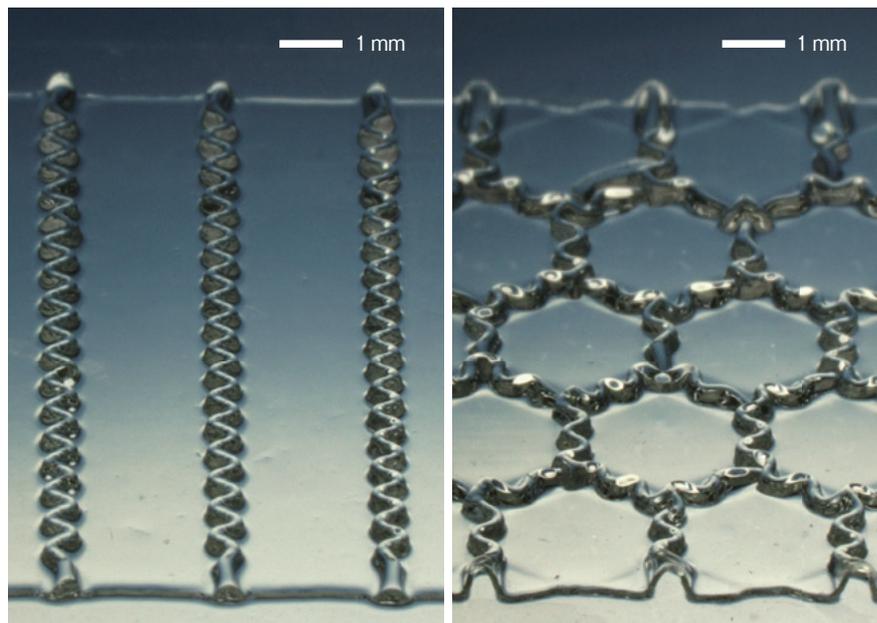
ロゲル」に着目しました。コンタクトレンズに代表される本材料は、ポリマー（低分子化合物がつながったもの）や分子の集合体がジャングルジムのような網目構造を形成しており、その内部に多量の水を保持することができます。本構造は生体内における細胞の足場である細胞外基質に類似しており、高い生体親和性を示します。加えて、水を媒介とした低分子の透過性や水分の流入による体積変化など、通常の固体材料にはない特異的な機能を備えています。本稿ではまず、物質の出入りや形状変化といった生体内環境のダイナミクス環境をも再現可能なMPSデバイス実現に向けた、ハイドロゲルの加工技術について紹介します。

座屈剥離に基づくハイドロゲルの 3次元構造形成

水を多く含む柔らかい材料であるハイドロゲルを、血管や腸管のように薄膜かつ中空な管状構造へと自立させる技術として、「座屈剥離」と呼ばれる物理現象に着目しました。机の上に置



(a) メカニズム模式図



(b) 光学顕微鏡写真

図1 ハイドロゲル薄膜による座屈剥離構造の形成

いた紙を両端から圧縮すると、中央部が湾曲しつつ盛り上がり、アーチ状の構造へと変形します。これが、たわみながら（座屈）はがれる（剥離）という座屈剥離現象であり、私たちはハイドロゲル薄膜へ本現象を適応させる手法を考案しました⁽²⁾。その例を図1に示します。まず、汎用的なリソグラフィ技術*を用いて固体基板上に接着分子をパターンニングすることで、剥離個所を規定します。次に、その基板上でハイドロゲルを作製することで、固体基板とパターン状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水を吸って膨らむ膨潤が生じます。これにより、ハイドロゲル薄膜は膨潤圧によ

り圧縮され、非接着部位において特異的に座屈剥離が誘起されます（図1(a)）。形成される構造は、ハイドロゲルの硬さ・厚み・膨潤度や非接着部位の幾何構造などの物理パラメータで制御され、さまざまな3次元形状へと加工可能です（図1(b)）。

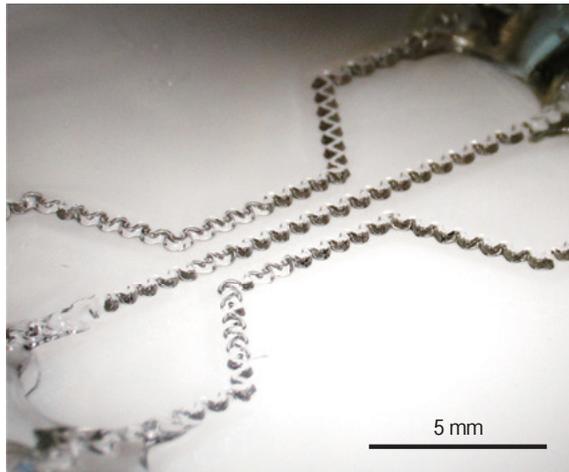
ハイドロゲル加工技術の今後の展開

本技術の3つの特徴を用いたデバイス展開について図2に示します。1番目は、大面積に所望の接着・非接着部位の2次元パターンを描くことで座屈剥離構造を再現性良く誘起できる点です。これにより、蛇行・平行・合流といった流路構造を自在に作成することができ、ハイドロゲル薄膜を基材とするマイクロ流体デバイスとして使用することができます⁽³⁾（図2(a)）。2番目は、ハイドロゲルと固体基板のヘテロ（異なる2種の）構造によりそれぞれ

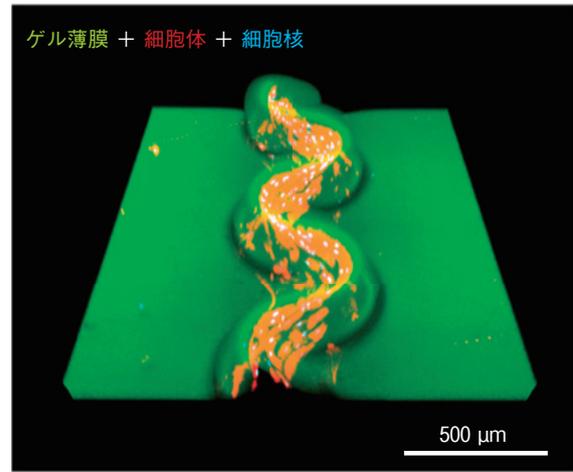
の機能を個別に設計できる点です。ハイドロゲル側の機能として、流路内での細胞培養や流路外への物質拡散が可能です（図2(b), (c)）。将来的に、固体基板側へセンサ素子を導入することで、生体を模倣した環境をリアルタイムで測定するデバイス展開などが期待されます。3番目は、普遍的な物理現象に基づく加工方法であるため、さまざまな種類のハイドロゲルに適応でき、機能を付加できる点です。例として、熱刺激に反応して水分量の調節が可能な刺激応答性ゲルを基材とすることで、刺激に応じた構造の動的な制御が可能です（図2(d)）。

こうした要素技術を発展・複合させていくことで、生体機能をデバイス上で再現しながら、多角的なデータ取得の可能なNTT独自技術として発展できるものと考えています。

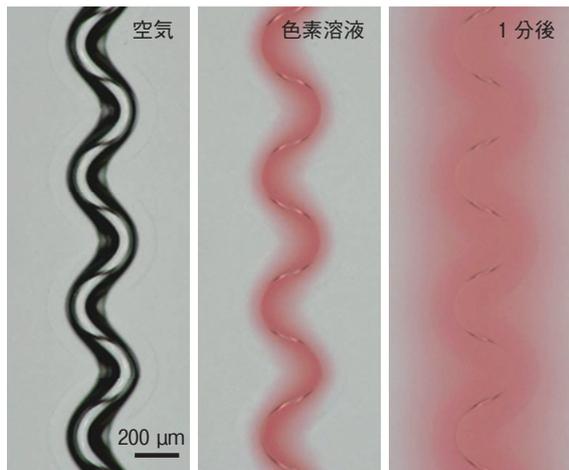
* リソグラフィ技術：感光性の物質を塗布した基材の表面を、パターン状に露光することで、露光された部分とされていない部分からなるパターンを生成する技術。半導体デバイスにおける電子回路の作製等に多用されます。



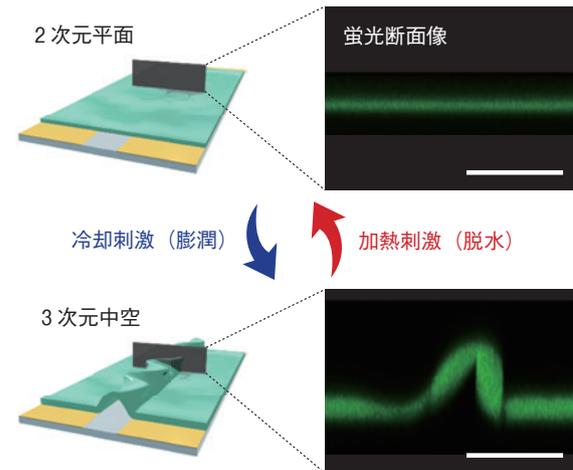
(a) ハイドロゲル流体デバイス



(b) 培養した細胞の蛍光画像



(c) 流路内からの色素拡散



(d) 刺激応答性ゲルを用いた形状制御

図2 座屈剥離構造のデバイス展開

ハンディキャップ支援に向けたサイバネティックス技術の取り組み

バイオニクスのもう1つの潮流は工学から生体へ向かう流れであり、通信理論や制御理論を体内での情報伝達や制御の仕組みに応用することを目的としています。特に1948年にノーバート・ウィーナーが提唱した「サイバネティックス」⁽⁴⁾は、生体と機械における通信と制御を統一的に扱おうという考え方であり、近年においても重要であり続けています。NTT サービスエ

ポリューション研究所ではこの考え方に改めて着目し、サイバネティックス技術の取り組みとして、人の運動能力を支援・拡張する技術開発に取り組んでいます(図3)。

人体における運動制御は、感覚器で受けた刺激が脳によって知覚・認知され、脳内での行動計画に基づき発された運動の指示が運動器に伝達され、運動器である筋肉が収縮することで実行されます。また、その結果が新たな刺激として感覚器が受容するサイクルが繰り返されます。サイバネティックス

技術の取り組みとして、人体における感覚器から脳、脳から筋骨格への通信やそれらを通じた運動制御に対し、脳波や筋電等の生体信号や運動結果のセンシングと、振動等触覚刺激や筋電気刺激、外骨格などによる感覚器や運動器へのフィードバック(刺激、介入)によりこのサイクルに介入し、運動状況の把握・改善に関する取り組みを実施中です。併せてセンシングした生体信号の解析と、望ましい運動を実現するフィードバックの生成にも取り組み始めています。

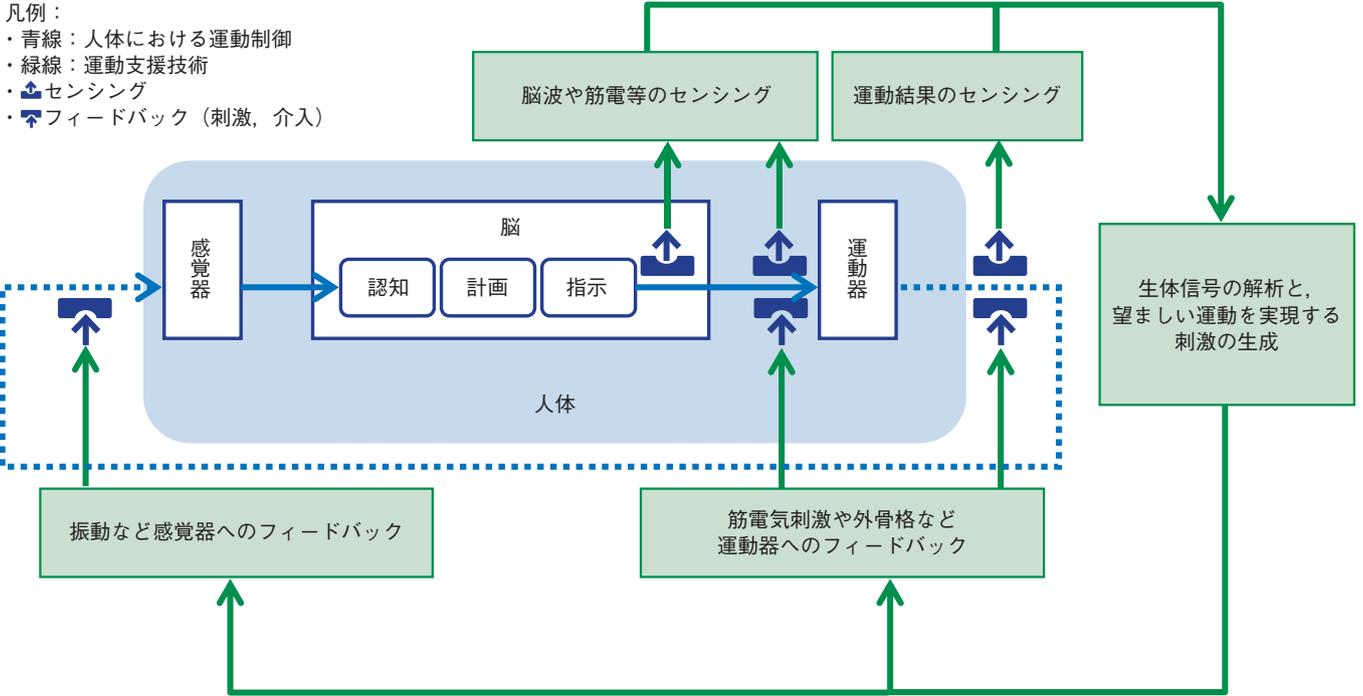


図3 人体における運動制御と運動支援技術

生体信号を活用した運動支援・拡張

生体信号のセンシング・解析とフィードバックによる、生体信号を活用した運動支援・拡張のコンセプトについて紹介します。

誰でも、日常動作や各種技能における運動機能を、他者（熟練者）や過去の自分の運動を基に、自分自身をより良く運動制御できる世界をめざすことです。運動の再現およびその体験により、能力の一時的・恒久的な拡張をめざします。例えば、熟練者の動きの自身での再現、およびそれを繰り返すことによる効果的な訓練や、若いころの運動体験を基にした今の身体状況に合わせたリハビリなどの可能性があるのではないかと考えています。

例としてピアノのトレモロ演奏（音程が離れた音を交互に弾く奏法）における運動支援⁵⁾について述べます（図

4）。初心者は指を動かすことを意識して演奏するが、熟練者は手首を回転させることを意識して演奏するといわれています。これに対し、初心者（訓練者）と熟練者の生体信号として筋電をセンシングし、両者を比較することで両者の筋活動の差を解析します（筋肉種別ごとの強度差など）。次に熟練者の筋活動を再現するようなフィードバックを算出します（外部からの筋電気刺激による筋肉収縮など）。そして初心者（訓練者）の体にフィードバックを行います。図中の写真では手首を回転させる筋（回外筋、回内筋）に筋電気刺激を提示して手を動かし、熟練者の動きを体験している様子を表しています。この体験を通じ効果的な訓練が実現できるのかの評価を進めています。

この例では筋電に着目した取り組みとして紹介しましたが、脳波など筋電以外の生体信号も含め検討を進めてい

ます。

サイバネティクス技術の今後の展開

手を伸ばす、物をつかむ、ボタンを押す、立つ、歩く、などさまざまな運動が日常生活や社会参画、また自己表現において重要です。一方で、障がいや加齢によって運動において制限された生活を強いられる場合があり、これらハンディキャップに対する運動面での支援への期待が大きいと考えています。

脳波や筋電などのセンシングや、筋電気刺激や外骨格などのフィードバックの取り組みはさまざまに存在しており、今後も高度化が進むと想定しています。例えば、ハンディキャップ支援として日常的に利用するため特定部位・特定動作に対して確実な動作を期待する技術・製品（義手など）が、部位の拡大や複雑な動作への対応を求め

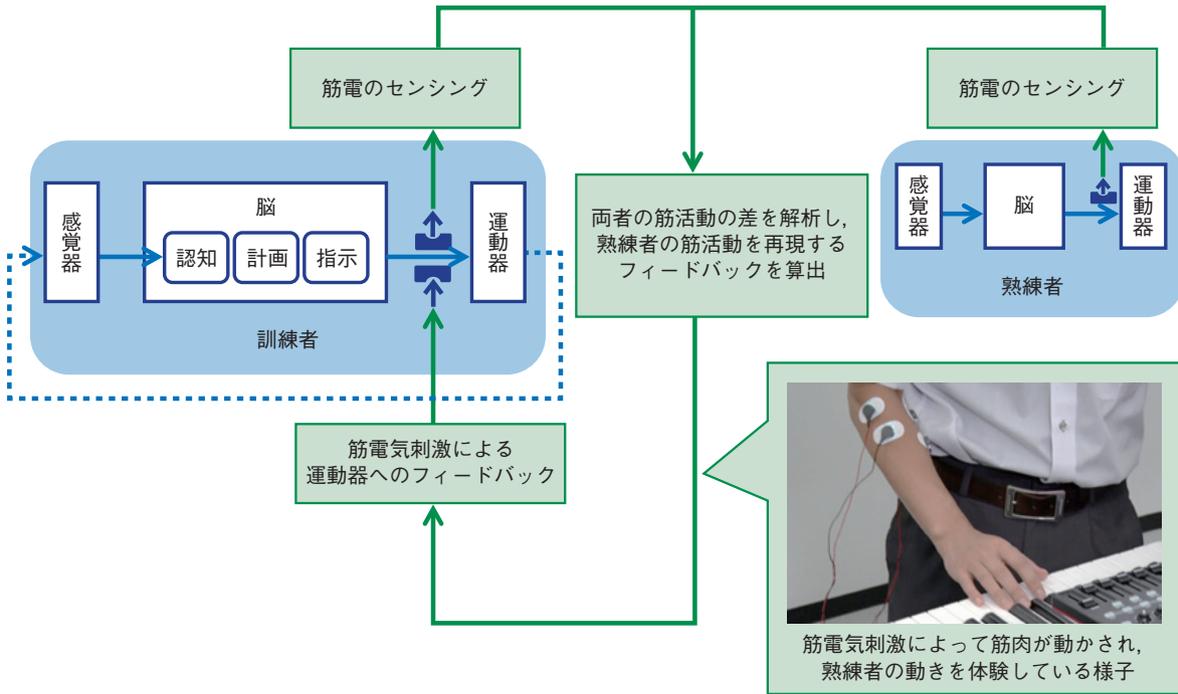


図4 生体信号の取得・解析とフィードバックによる運動支援の例

られることとなるでしょう。その際には扱う生体センシング情報や、フィードバックのための制御情報は今以上に情報量が多くなり、複雑化するうえ、前述の例のようにそれらの情報を連携し扱う必要が出てくるはずだ。

NTT サービスエボリューション研究所では、これまでも筋電等の生体センシング技術⁽⁶⁾や触覚刺激や筋電気刺激を用いた人体へのフィードバック技術、またハンディキャップ支援に取り組んできました。これまで培ってきた生体センシング技術、フィードバック技術など、蓄積された技術的強みを活かすことで、部位の拡充や複雑な動作への対応をICTの観点から補助・支援できるのではないかと考えています。サイバネティクス技術の取り組みをハンディキャップ支援に向けたトレーニングやリハビリテーションへの適用をめざし検討を進めていきます。

■参考文献

- (1) D. E. Ingber : “Reverse Engineering Human Pathophysiology with Organ-on-Chips,” Cell, Vol. 164, No. 6, pp.1105-1109, March 2016.
- (2) R. Takahashi, H. Miyazako, A. Tanaka, and Y. Ueno : “Dynamic Creation of 3D Hydrogel Architectures via Selective Swelling Programmed by Interfacial Bonding,” ACS Applied Materials and Interfaces, Vol. 11, No. 31, pp. 28267-28277, July 2019.
- (3) 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, March 2021.
- (4) ウィーナー：“サイバネティクス——動物と機械における制御と通信,” 岩波文庫, 1962.
- (5) A. Nijima, T. Takeda, R. Aoki, and Y. Koike : “Reducing Muscle Activity when Playing Tremolo by Using Electrical Muscle Stimulation,” Proc. of AHS 2021, Feb. 2021.
- (6) T. Isezaki, H. Kadone, A. Nijima, R. Aoki, T. Watanabe, T. Kimura, and K. Suzuki : “Sock-Type Wearable Sensor for Estimating Lower Leg Muscle Activity Using Distal EMG Signals,” Sensors, Vol. 19, No. 8, April 2019.



(上段左から) 高橋 陸/ 田中 あや
(下段左から) 山口 真澄/ 小池 幸生

生体にアプローチする方法として、バイオニクス技術は大変重要と考えています。今後、いち早くバイオデジタルツインや医療・ヘルスケアに向けた新技術を創出できるよう、各研究所と協力して研究を推進していきます。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
 多元マテリアル創造科学研究所 分子生体機能研究グループ
 バイオメディカル情報科学研究センター
 TEL 046-240-3123
 FAX 046-270-2364
 E-mail riku.takahashi.fv @ hco.ntt.co.jp

主役登場

バイオデジタルツインに向けた 非侵襲生体センシング技術

田中 雄次郎

NTT 物性科学基礎研究所
研究員



バイオデジタルツインの実現に向けて、コンピュータ上に私たち1人ひとりの体を再現し、健康状態や疾患を未来予測する取り組みにおいて、まずは私たちの体の状態を測ることがもっとも重要になります。そこで、私が注目したのは“代謝の状態”です。私たちは食べたものを化学変化させてエネルギーに変換して生きています。この変換過程が代謝です。癌、糖尿病、統合失調症をはじめとする心身の不具合の背景は、代謝異常が原因となります。代謝に異常が生じると血液等の成分や体の中枢の温度（深部体温）が上昇や下降、あるいは、その変化のパターンやリズムに異常が生じます。私は日常生活の中で、非侵襲でこうした成分や温度変化をモニタして代謝の異常を可視化できればさまざまな疾患の早期発見や、これまで未知であった疾患の原因解明ができるのではないかと思います。生体センシング技術の研究開発を始めました。

日常生活の中でモニタするには、時計型やTシャツ型のウェアラブルセンサのように、ユーザが負担なく簡単に測れることが最適ですが、一般に血液成分や深部体温を測るには注射器による採血や直腸などの体腔へセンサを挿入するためユーザの負担が大きくなります。この問題を解決するために私が着目したのが、非侵襲で計測できる光と音、そして熱です。光は体を傷つけることなく体内に侵入し、

特定の成分（例えば、ブドウ糖）に吸収されると局所的な熱膨張を起し音波を生じます（光音響効果）。この音波は体の中を伝わりやすいので体表面で測定でき、その音波の特性から成分濃度を調べることができます。さらに、体表面で温度と熱を測ることで深部体温を調べることができます。生体センシングの研究では、こうした測定原理やセンサデバイスの検討だけでなく、体を模擬したセンサ評価装置も試行錯誤を繰り返し検討しました。現在は試作したセンサデバイスを用いて、大学や医療機関との共同研究によりヒトを対象とする臨床実験を行っています。これまでに糖質成分を摂取した後の血糖値変化を可視化することに成功しています。また、深部温度の測定も同様に臨床実験により、その有意性を示すことができました。まだ技術的に改良が必要な点がありますが、これらの結果は対外的にも評価を受け、実用化に向けた検証を進めています。

生体センサの研究開発は、数学、物理、生化学、医学など幅広い専門分野を横断した検討が必要となところが難しい点であると感じています。しかし、こうした学際的な検討は、新しい発見につながる可能性が高いと思っています。このセンサの研究開発を通して、新たな治療、疾患の機序解明、物理現象の解明に貢献できるように、これからも精力的に研究開発を進めていきます。

特集

ディスアグリゲートッド コンピューティングが 世界を変える

NTTが提案するディスアグリゲートッドコンピューティングについて、
NTT先端集積デバイス研究所,NTTソフトウェアイノベーションセンタ,
NTTネットワークサービスシステム研究所の取り組みを紹介する。

I O W N

ディスアグリゲートッド
コンピューティング

光 電 融 合

共 有 メ モ リ

省 電 力 化

Disaggregated Computing

IOWNを支えるディスアグリゲータッドコンピューティング 40

光を活用した新たなコンピュータアーキテクチャである「ディスアグリゲータッドコンピューティング」の全体概要と基本コンセプトについて紹介する。

ディスアグリゲータッドコンピューティングのための光電融合技術 45

光電融合技術のコンセプト、およびディスアグリゲータッドコンピューティングに光を導入することがなぜ有効なのかを示し、さらに検討中の低消費電力デバイスについて紹介する。

ディスアグリゲータッドコンピュータに向けたメモリセントリックアーキテクチャ 50

CPUを中心として発展してきた既存のソフトウェアの問題を示し、ディスアグリゲータッドコンピュータ実現に向けた新たなデータ交換モデルとして、メモリセントリックアーキテクチャについて紹介する。

光ディスアグリゲータッドコンピュータにおいて電力効率最大化を実現する パワーウェア動的配置制御技術 54

オフローディングやコンピューティング基盤制御により光ディスアグリゲータッドコンピュータにおける省電力化・電力効率最大化を実現するパワーウェア動的配置制御技術について紹介する。

主役登場 58

田中 顕至 (NTT先端集積デバイス研究所)
The network is the computer

IOWNを支えるディスアグリゲータッドコンピューティング

IOWNの実現のためには、これまでと比較にならない大量のデータを効率良く処理できる高度なコンピュータが求められます。NTTでは、この要求にこたえるために、光電融合技術を最大限活用した画期的なコンピュータアーキテクチャについて検討を行っています。本稿では、この新たなコンピュータアーキテクチャである「ディスアグリゲータッドコンピューティング」の全体概要と基本コンセプトについて説明します。

おかだ 岡田 ありあ 顕^{†1} きはら 木原 せいじ 誠司^{†2}
 おかざき 岡崎 よしかつ 義勝^{†3}

NTT先端集積デバイス研究所 所長^{†1}

NTTソフトウェアイノベーションセンタ 所長^{†2}

NTTネットワークサービスシステム研究所 所長^{†3}

IOWNが求める コンピューティング能力

あらゆるものがネットワークにつながり、社会・経済・文化のあらゆる活動にICTによる変革をもたらされつつある近年においては、数々のデータを相互につなげることにより、個々のデータだけでは得られない新たな価値を生み出していくことが重要となっていくと見られます。このようなスマートな社会の実現のために、高速にデータを転送する広帯域ネットワークや、これまでにない高い処理能力を持つ情報処理装置が求められます。

NTTではこのようなスマートな社会を実現するために、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想を提案しています⁽¹⁾。また、IOWNの実現に向けて、想定されるユースケースを議論し、これらユースケースを実現する主要技術の検討を進めるための仲間を募り、IOWN Global Forumを設立しました⁽²⁾。IOWNは、それがもたらす世界観とサービス、さらには

それを実現するためのネットワークおよびシステムまでを含む広大な構想です。

これらIOWNの世界を実現する技術の構成を図1に示します。高速・低遅延に光を最大限活用したデータ伝送を行うオールフォトニクス・ネットワーク (APN)、大量なセンシングデータを基にデジタル空間に実世界を再現するデジタルツインコンピューティング (DTC)、伝送からアプリのレイヤまで統合的に制御を行うコグニティブ・ファウンデーション (CF) という3つの技術分野を定義し、それぞれの検討を始めています。

これらIOWNを支えるAPN、DTC、CFのすべての技術分野に求められるのが、高い処理能力を持つコンピュータです。DTCでは、膨大なセンサ等のデータ源から、これまでと比較にならない精度・粒度の大量のデータを吸い上げ、それらを処理・加工するために、現状から桁のオーダーで高いコンピュータの処理能力が求められます。またルータや携帯基地局のような、専用装

置で実現されていた機能も含めてソフトウェアで実現されるIOWNの時代になると、高いパケット処理能力やスケジューリング能力が求められるAPNを構成する各ノードにおいても、高いコンピューティング能力が必要となります。さらにCFでは、コンピューティングリソースを適切に制御し、さらにコンピューティングリソースとネットワークを統合的に制御するという、これまでになかった新たな制御・マネジメント能力を提供する必要があります。そのためには大量のネットワークやコンピュータへの要求を集約・分析し、適切な帯域・波長、さらにはコンピューティングリソースを高度なリアルタイム性で割り当てる、極めて高い処理能力が求められます。従来のコンピュータアーキテクチャでこの高い処理能力を実現するためには、大量のコンピュータが必要となり、電力消費が著しく増加してしまいます。IOWNの実現にあたっては、環境負荷を高めることなく所望の高い処理能力が得られるよう、電力当りの処理能力が極めて

Innovative Optical and Wireless Network (IOWN:アイオン)

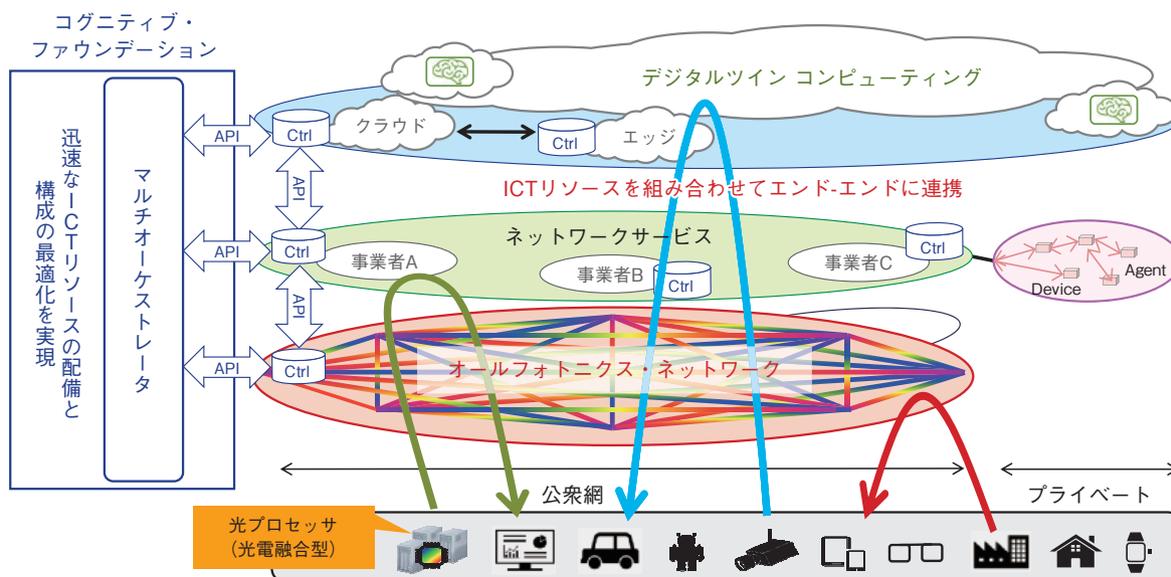


図1 IOWNの全体像

高いコンピュータが必須となります。NTTではこの課題を解決するため、光電融合技術を活用した新しい「ディスアグリゲータッドコンピューティング」という概念を提案しました。

現在、NTT先端集積デバイス研究所（先デ研）、NTTソフトウェアインベージョンセンタ（SIC）、NTTネットワークサービスシステム研究所（NS研）の3つの研究所が連携し、このディスアグリゲータッドコンピューティングの実現に向けたコンピュータアーキテクチャの研究を始めています。

IOWNを支えるディスアグリゲータッドコンピューティング

「ディスアグリゲータッドコンピューティング」と名付けた新しいアーキテクチャの概念を図2に示します。新しいアーキテクチャは、光の持つ高速性・低消費電力性・低損失性を最大限引き出す物理構成（ハードウェアアーキテ

クチャ）、論理構成（ソフトウェアアーキテクチャ）、制御方式を組み合わせ、これまでのコンピュータと異なる圧倒的な高い性能をねらうものです。箱に閉じた「コンピュータ」をネットワークでつなぐこれまでのサーバオリエンテッドな概念から、CPU（Central Processing Unit）やメモリ等のリソースを直接光で接続、光の高速性・優れた伝送特性を活かし、ラックスケールやデータセンタスケールの1つのコンピュータとして扱う概念へのパラダイムシフトです。

その基礎を支えるのは、エレクトロニクスからフォトリクスへの流れの中、電気インタフェースでは不可能だった大容量・長距離・低消費電力化を実現する光電融合技術です。

図2(a)に示す従来の物理サーバオリエンテッドな概念では、サーバ内で完結しない処理を実行するために相互のサーバ間でデータのやり取りが必要

になった際には、外部ネットワークでデータ送受を行う必要があります。コンピュータ間を接続するネットワークは、汎用的なデータ伝送手段としてリーチャビリティ確保、パスやセッション管理等、ネットワークやサービス機能提供のための深い階層のプロトコルスタックを持つよう進化してきたため、サーバ間の通信はプロトコルスタック処理のオーバーヘッドが大きくなっています。

これに対し、図2(b)のディスアグリゲータッドコンピューティングでは、光電融合技術を利用したインターコネクタ（Photonic Fabric）を介して数多くのCPUやGPU（Graphics Processing Unit）、FPGA（Field Programmable Gate Array）などの演算リソースが接続されています。このためリソース間の通信にプロトコル変換を行う必要がなく、従来アーキテクチャでは避けられなかった通信オー

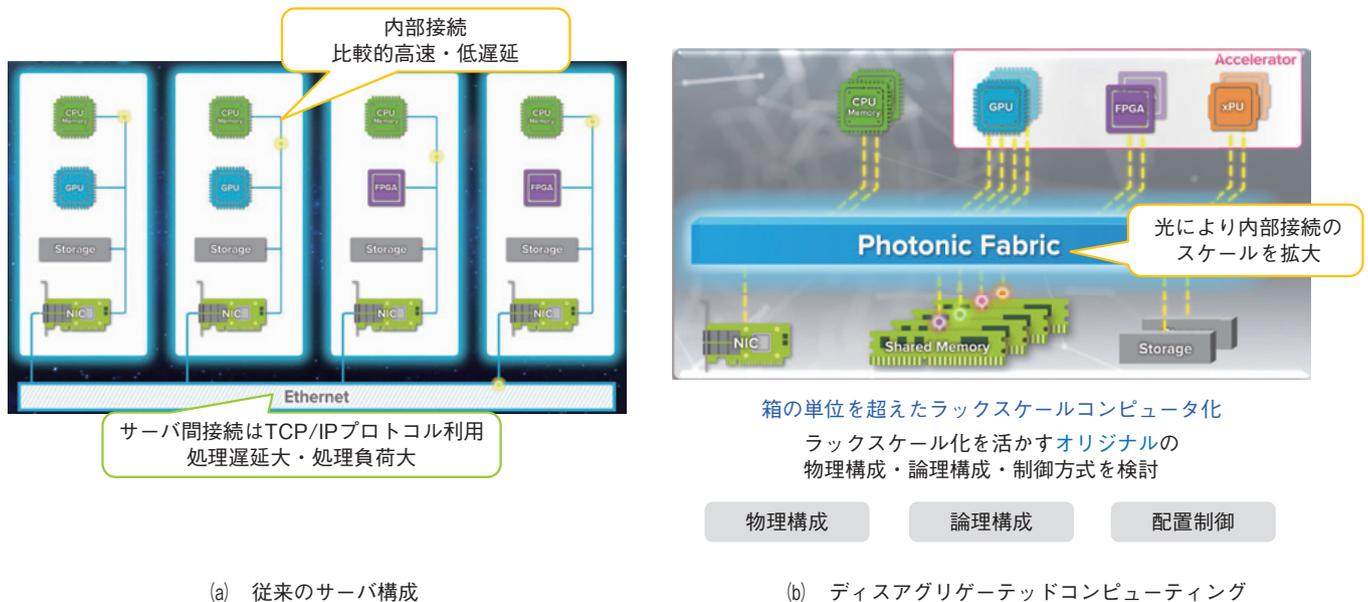


図2 ディ disaggregated コンピューティングの概念

バヘッドを大きく削減できます。さらに従来構成ではサーバ単位で電力制御やハードウェアの追加を行っていたのに対し、ディ disaggregated コンピューティングにおいては、より細かいリソース単位で電力制御・ハードウェア追加が行えるようになるため、より柔軟性の高いコンピューティング環境の提供が可能となると考えられます。

今回提案するディ disaggregated コンピューティングの3つのキーポイントのうち、物理構成を先デ研、論理構成をSIC、制御をNS研が中心となり、相互に密に協力しつつ新たなアーキテクチャの追求を進めています。

次に、各キーポイントの詳細を説明します。

■物理構成

ディ disaggregated コンピューティングの物理構成の要点を図3に示します。

電気信号では高周波になるほど伝送

路での減衰が大きくなるという物理原則のため、1本の信号線で100 Gbit/sを超えるような高速信号においては、大きな電力を消費する高出力ドライバ回路や、減衰で劣化した信号を補償する複雑な回路が必要となり、それらを用いたとしても数10 cm程度しか伝送できないという問題があります。これに対し光信号では、光ファイバで1 km伝送しても光のパワーの損失はわずか0.2 dB (4.5%)程度であり、高速な信号を電気よりも遠くまで飛ばせるという利点を持ちます。

そのため、ディ disaggregated コンピューティングにおいては、LSI (大規模集積回路) の真横に高密度、広帯域、低消費電力の小型光電融合デバイスを搭載、LSIからの電気出力をすぐ光信号に変換する構成とします。これによりLSIからの電気信号は隣接する光電融合デバイスまでの最短距離に抑えることができ、そこから先の伝送は低消費電力の光電融合デバイスが

担うことで、LSIの高速I/O (Input/Output) の消費電力を大きく削減しつつ、コンピュータ内部インタフェースの広帯域化を実現することができます。先デ研ではこの用途に向けた光電融合デバイスの研究開発を進めており、その詳細を本特集記事『ディ disaggregated コンピューティングのための光電融合技術』⁽³⁾にて説明します。

光電融合デバイスを用いたディ disaggregated コンピュータの全体像をイメージしたのが、図4のモックアップです。アクセラレータやCPUなどを載せたカードが光配線を備えたバックプレーンで相互に接続されており、各カード上では小型・高密度な光電融合デバイスによりLSI直近で光化され、光コネクタを介しバックプレーンに接続されています。

このような構成によって、これまでの電気信号が届く箱の単位を超えたコンピュータのラックスケールの大規模

化が可能となり、カード単位での機能追加などフレキシブルかつ効率的な運用が可能になります。

■論理構成

ディスアグリゲータードコンピューティングの論理構成を図5に示しま

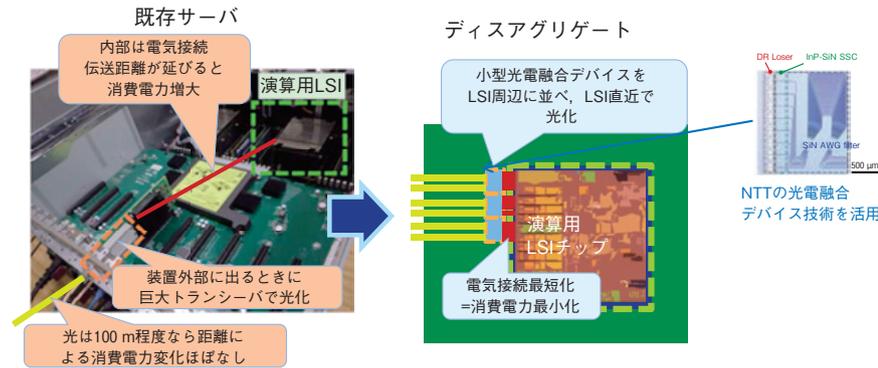


図3 ディスアグリゲータードコンピューティングのキー技術1…物理構成の概要



図4 ディスアグリゲータードコンピュータのモックアップ

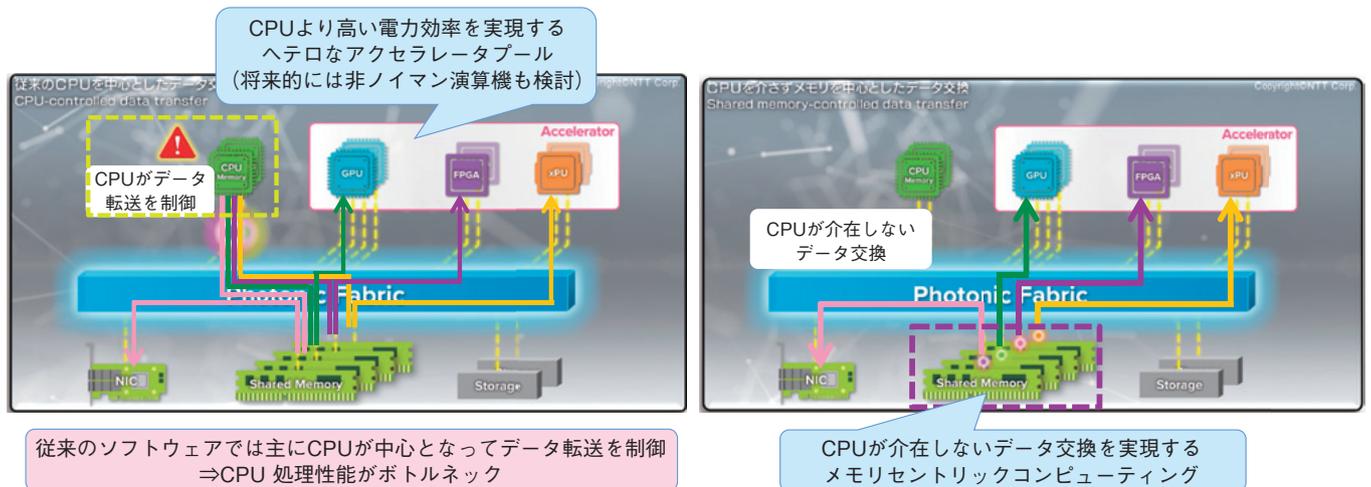


図5 ディスアグリゲータードコンピューティングのキー技術2…論理構成の概要

す。CPUは汎用的であらゆる処理をフレキシブルに実行できる利点はあるものの、その汎用性ゆえに特定処理に特化したアクセラレータと比較すると電力効率が劣るという欠点があります。そのため、ディスアグリゲータードコンピューティングにおいてはCPUへの依存率低減をねらい、特定用途に特化したアクセラレータを準備し、頻度が高い処理はこのアクセラレータで実行するかたちで電力効率を高める構成を考えています。光接続により従来のサーバより大規模化できるディスアグリゲータードコンピュータにおいては、コンピュータ全体で高頻度に行われる処理を効率良くアクセラレータに集約できるため、数多くの異なる処理に特化した複数の異なるアクセラレータを備える「ヘテロなアクセラレータプール」が実現でき、これにより電力効率を高められます。

ただ、この場合でもアクセラレータ間でのデータのやり取りにCPUの介在が必要だと、結果的にCPU負荷が高まりアクセラレータに処理をオフロードする効果がなくなってしまいま

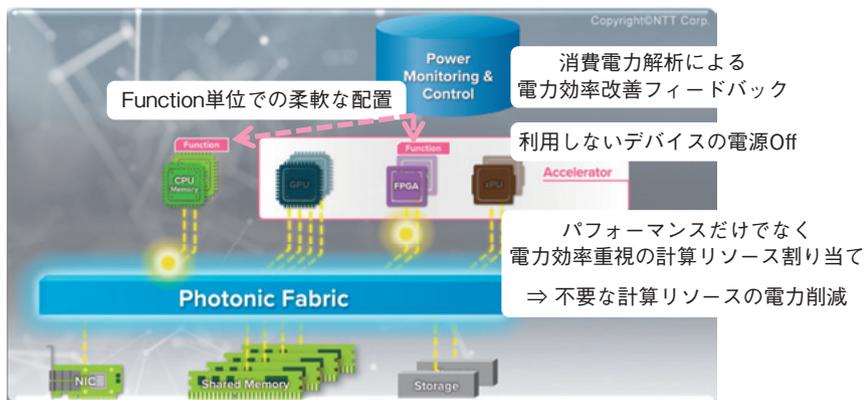


図6 ディスアグリゲートドコンピューティングのキー技術3…配置制御の概要

す。そのため、CPUの介在なしにデータ交換を行うメモリスントリック化によって、CPU負荷を大きく下げる検討をSICが中心となり進めています。このアクセラレータプール化と、アクセラレータ間のデータ交換のメモリスントリック化により大きくCPU処理を削減し、電力効率の改善をねらいます。詳細は本特集記事『ディスアグリゲートドコンピュータに向けたメモリスントリックアーキテクチャ』⁽⁴⁾にて説明します。

■配置制御

これら物理・論理構成を備えたディスアグリゲートドコンピュータを活かすためには、このアーキテクチャを最大限活かすようにソフトウェアを配置制御することが重要になります。そのため、NS研が中心となり、ソフトウェアの特性に基づいてCPUや各種アクセラレータ等の計算リソースの最適な活用をねらう「パワーウェア動的配置制御」を提案しています。

この概念図を図6に示しますが、ソフトウェアを細かなファンクション単位に分割し、消費電力を最小化するように各ファンクションで利用するアクセラレータ・CPU等のデバイスを動

的に選択し、最適なリソースにソフトウェア機能を柔軟に割り当てることで電力効率を重視した計算リソース割当てを実施します。さらには、ノーマリオフデバイスを利用して必要なときだけ電源を入れるイベントドリブ的な制御も行います。詳細は本特集記事『光ディスアグリゲートドコンピュータにおいて電力効率最大化を実現するパワーウェア動的配置制御技術』⁽⁵⁾にて説明します。

今後の展開

NTT研究所では、これまで述べたような画期的なアーキテクチャに基づくディスアグリゲートドコンピューティングを提案しています。今後は、画像推論といった代表的なアプリケーションとの組合せによる評価機の作成と評価を進め、提案アーキテクチャの定量的な実証を行っていきます。

さらに長期的には、LSIチップ内部への光の導入や、光を演算そのものに使った光演算デバイスといった最新の研究結果も取り込み、さらに先進的なアーキテクチャへの発展も検討していきます。

■参考文献

- (1) https://www.rd.ntt/_assets/pdf/techreport/NTT_TRFSW_2020_JP_W.pdf
- (2) <https://iowngf.org/>
- (3) 坂本・佐藤・瀬川：“ディスアグリゲートドコンピューティングのための光電融合技術,” NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 5, pp. 45-49, 2021.
- (4) 石崎・山部：“ディスアグリゲートドコンピュータに向けたメモリスントリックアーキテクチャ,” NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 5, pp. 50-53, 2021.
- (5) 金子・藤本・岩佐：“光ディスアグリゲートドコンピュータにおいて電力効率最大化を実現するパワーウェア動的配置制御技術,” NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 5, pp. 54-57, 2021.



(左から) 岡田 顕/ 木原 誠司/
岡崎 義勝

NTTの3つの総合研究所にまたがる研究所が力を合わせ、これまで光通信で培ってきたデバイス技術・制御技術・ソフトウェア技術を活かした高い電力効率を持つ画期的な情報処理基盤の実現に向けて取り組んでいます。

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所

TEL 046-240-2022

FAX 046-240-4328

E-mail sende-kensui@hco.ntt.co.jp

ディスアグリゲータッドコンピューティングのための光電融合技術

NTTでは、ディスアグリゲータッドコンピューティングを実現するための光電融合技術について検討を行っています。本稿では、光電融合技術のコンセプトについて説明し、ディスアグリゲータッドコンピューティングに光を導入することがなぜ有効なのかを示し、さらに検討中の低消費電力デバイスについて紹介します。

さかもと
坂本

たけし
健

さとう のりお
佐藤 昇男

せがわ
瀬川

とおる
徹

NTT先端集積デバイス研究所

IOWNのコンピューティングを支える光電融合技術

本特集記事『IOWNを支えるディスアグリゲータッドコンピューティング』⁽¹⁾で説明したように、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) の実現のためには、これまでと比較にならない大量のデータを効率良く処理できるコンピュータが必要となります。この大量のデータを効率良く処理する画期的なコンピュータ

を支える重要な技術が、光電融合技術です。

光電融合デバイスのロードマップを図1に示します⁽²⁾。シリコンフォトリソグラフィ技術を利用したコンパクトな光モジュールを中央のLSI（大規模集積回路）の周囲に配置する形態のSTEP1から始まり、LSIの直近にレーザや光受信器等の光伝送用素子が配置されるSTEP2、そしてLSIチップ内も光配線で接続するSTEP3と、世代が進むごとに小型化・短距離化が進んでいき

ます。STEP1ではコンピュータ間をつなぐ通信をターゲットとして開発が始まりますが、STEP2、STEP3と進化するにつれ適用領域が装置内・ボード内インターコネクタへ移り、コンピュータ内部への光の導入が進んでいくと考えられています（図2）。

ディスアグリゲータッドコンピュータで考えているラックスケールのコンピュータ内接続では、数mを超える伝送距離が必要となります。これを電気接続で実現しようとした場合、高速

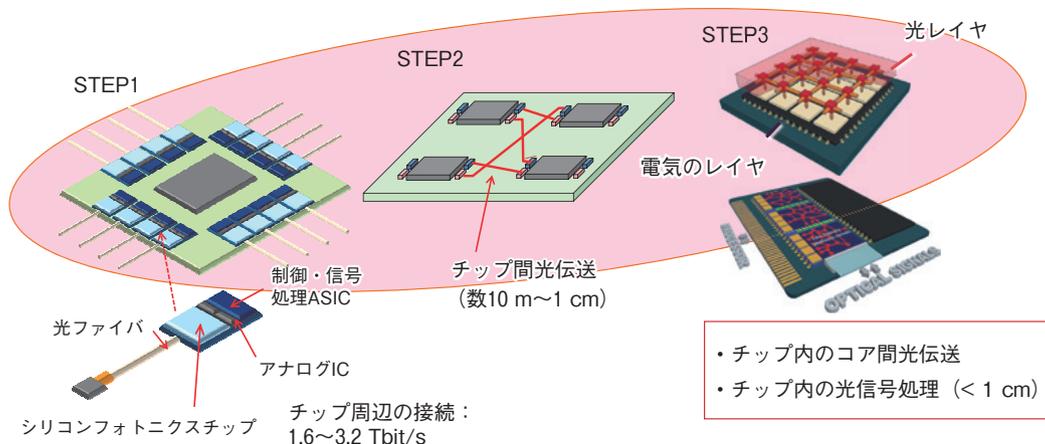


図1 光電融合デバイスのロードマップ

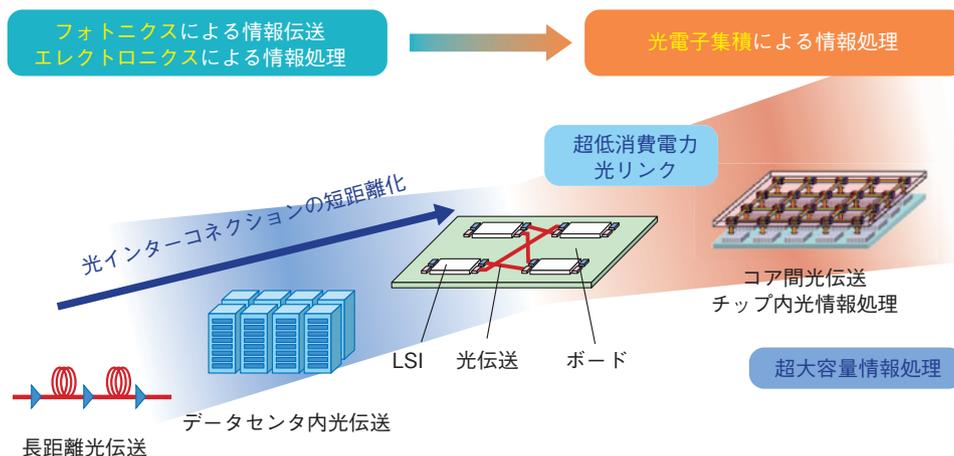


図2 光電融合技術の適用領域の変遷

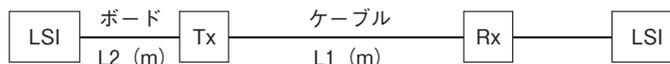
化・長距離化のために爆発的な電力増加が伴い、実現は困難です。STEP2やSTEP3の高速・高密度・低消費電力の光電融合デバイスによりLSI直近で電気を光に変換することで、電気伝送の限界に縛られることなく、高い処理性能を持つコンピュータをより低い消費電力で実現できます。

本稿では、ディスアグリゲータッドコンピュータの低消費電力を実現するための光電融合デバイス技術について詳しく説明します。

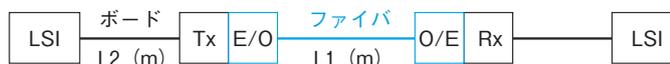
光インターコネクットの必要性

装置内のボード間接続、そしてボード内のLSI間接続に、電気ではなく光を使う必要性についてインターコネクットモデルを用いて説明します。図3(a)はすべて電気のモデルで、LSIがボード上に搭載され、LSIのクロック周波数から変換された高速信号がボード上の電気配線を通して途中の送信器(Transmitter: Tx)につながります。その後、同軸ケーブルを経由してボードに形成された受信器(Receiver:

(a) 電気ボード+電気ケーブル



(b) 電気ボード+光ファイバ



(c) コパッケージドオプティクス+光ファイバ



図3 インターコネクットモデル

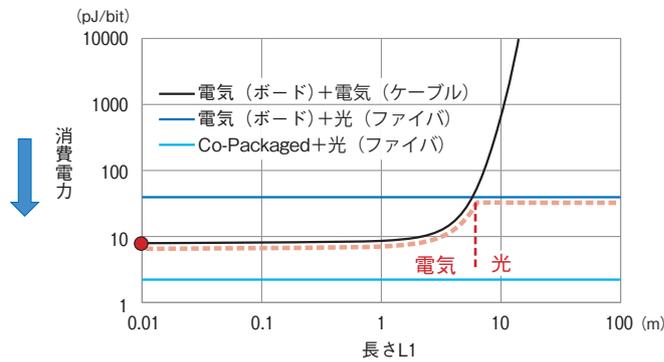
Rx)で受信されてLSIに送られます。このとき、ボード間をつなぐケーブルの長さをL1(m)、1つのボード上での配線長をL2(m)とします。図3(b)は、送信器の後に電気-光変換器(Electrical-to-optical converter: E/O)を配置して光信号にし、同軸ケーブルの代わりに光ファイバを用いた場合です。図3(c)は、送信器と電気-光変換器をLSIの近傍で同一パッケージ内に集積した場合で、この形態はコパッケージドオプティクス(Co-Packaged Optics: CPO)と呼

ばれ図1および図2に対応します。

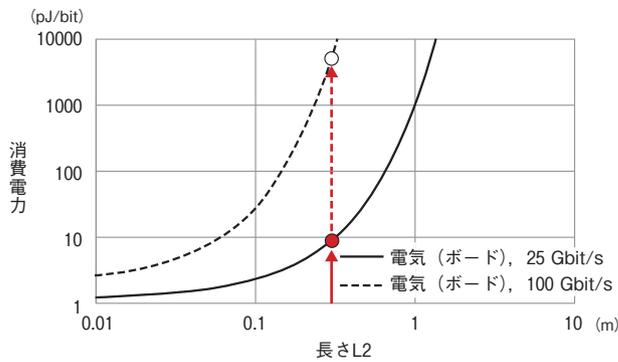
ボード(プリント基板)、同軸ケーブル、光ファイバを高速信号が伝搬するときの単位長さ当たりの損失値を表に示します。25 Gbit/sの信号については製品の値を参照しています。ボードや同軸ケーブルは光ファイバに比べて伝搬損失が大きいことが分かります。例えば、同軸ケーブルで3 dB/mというのは、信号が1 m伝搬する間に、大きさが-3 dB、すなわち半分になるということです。100 Gbit/sの信号については測定が難しいので、一部

表 伝搬損失値

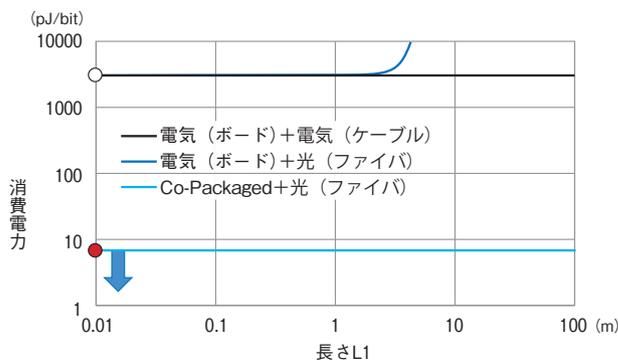
| 損失 (dB/m) | | 伝送容量 | |
|-----------|------|-----------|------------|
| | | 25 Gbit/s | 100 Gbit/s |
| 電気 | ボード | 28 | 113 (外挿) |
| | ケーブル | 3 | 9 (外挿) |
| 光 | ファイバ | 0.0003 | 0.0003 |



(a) L1依存性 (25 Gbit/s)



(b) L2依存性



(c) L1依存性 (100 Gbit/s)

図4 消費電力効率の見積り

外挿した値を示しています。現在は1チャンネル当り25 Gbit/s (12.5 GHz)程度の信号を基に各種多値化の技術が用いられていますが、将来的にもCMOSテクノロジーの速度の限界は100 Gbit/s程度と考えられます。信号が高速になるほど電気での損失は増加することが分かります。

これらを用いて、消費電力と距離の関係を見積もった結果を図4に示します。図4(a)の縦軸は、消費電力(mW)を伝送容量(Gbit/s)で割った値(mW/Gbit/s = pJ/bit)を指標にとり、値が小さいほど効率が良いことを示します。横軸は、ボード間の距離L1(m)としました。このときに現在製品化されている25 Gbit/s × 4チャンネルのプラガブルトランシーバを参考に計算した結果を示します。電気の場合と、光ファイバを用いた場合を比較すると、5 mを境に電気が有利な領域と光ファイバが有利な領域に分かれることが分かります。一方で、電気の場合でも下限(赤丸)があることが分かります。図4(b)にはボード上の配線長さL2(m)と消費電力の関係を示します。25 Gbit/sの曲線でL2 = 0.3 mを伝送させるのに必要な消費電力で決まっていることが分かります。そこで、L2を極力小さくするようなコパッケージドオプティクスを使用すると、図4(a)に示した線(空色)のように、さらに効率を上げることができます。次に、将来的に伝送容量が増えて高速化された100 Gbit/sの場合を想定した結果を考えます。図4(b)の100 Gbit/sの点線に示すようにボードでの損失が桁違いに大きくなり、

ボードが使えなくなることは自明です。仮に25 Gbit/sと同様の試算をしたものを図4(c)に示します。将来的には、可能な限りLSI直近で光・電気変換をするほど、それだけ消費電力を下げられることが分かります。さらに、25 Gbit/sに比べて100 Gbit/sにすると周波数が4倍になるため消費電力も増えています。高速化しながら低消費電力にする光電融合デバイスが必要になってきます。

インターコネクットの製品・研究開発動向

距離や速度に応じて光と電気の適用領域が変わってくることをモデルで示しましたが、ここでは製品や研究開発の動向について説明します。モデルでは単チャンネルの場合を説明しましたが、実際はLSIの辺から複数チャンネルを束ねて出して使います。LSIの単位辺長さ (mm) から何Gbit/sの伝送容量が送受信できるかという辺密度 (Gbit/s/mm) は高いほど良く、また単位伝送量当りの消費電力 (pJ/bit)

は低いほど良いので、前者を後者で割った値、高密度/低消費電力 = (Gbit/s/mm) / (pJ/bit) を性能指標とします。この性能指標を図5の縦軸に、距離(m)を横軸にとっています。製品化済みのインターコネクットの値をプロットすると、光は長距離で適用されているものの、性能指標は電気と比べて2桁程度低い状況となっています。この性能指標を向上させる目的で、複数の研究開発機関から低消費電力・高密度の光送受信器がさかんに提案されています。100 m程度の長距離で使える光技術は10 cm程度の領域にも適用され、ボード上の電気の領域を光に置き換えていくことが期待されます。ディスアグリゲートドコンピューティングでは、さらに物理サーバサイズに閉じ込められていたLSIやメモリなどの間のデータ通信を、ラック間スケール (数10 m) まで拡大することになります。さらに、信号速度の高速化が必要になると電気配線では性能指数の劣化が予測されるため、数cmから数10 mの領域を光を用いて

電気と同等レベルの性能指標で実現することがターゲットとなります。

NTTにおける低消費電力・高密度のデバイス研究開発

NTTでは、前述したターゲット領域に向けた低消費電力・高密度な光送受信器の研究開発を進めています。これまでの到達レベル (送信器チップ) について図5にプロットしました⁽³⁾。特に、光送受信器の中でも電気信号を光信号に変換する半導体レーザーは重要な光デバイスです。NTTで作製した薄膜 (メンブレン) レーザを図6に示します。ボード間伝送といった短距離光通信で現在もっともよく用いられる半導体レーザーに面発光レーザー (VCSEL) が挙げられます。低消費電力で動作可能、低コストという特徴があるものの、その形状から波長多重 (WDM) 技術の適用に向きません。通信容量の増大には、単一モードで発振するレーザーと、高密度集積可能な波長多重回路の集積が求められます。このような背景からNTTでは、短距離光インターコネクット用の光源としてSi基板上に作製したメンブレン直接変調レーザーを開発しています。Si基板上にレーザーを作製することで、波長多重回路や受光素子といった光デバイスを高密度かつ低コストに作製可能なSiフォトリソの技術が適用できます。さらに、屈折率の低いSiO₂層の上にLDを形成することで、光と注入キャリアとの高い相互作用により、レーザーの小型化と低消費電力化を実現できます。現在までに、VCSELに匹敵するレーザー単体としての消費エネルギー

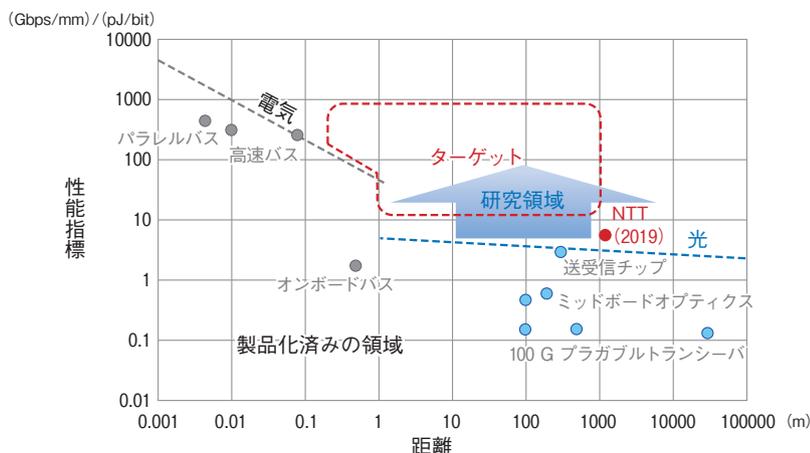
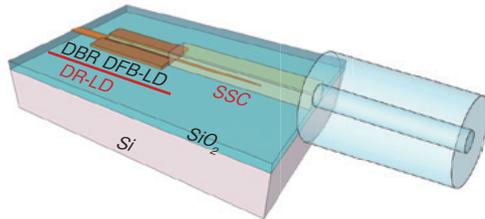
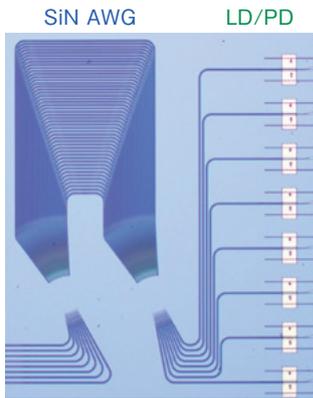


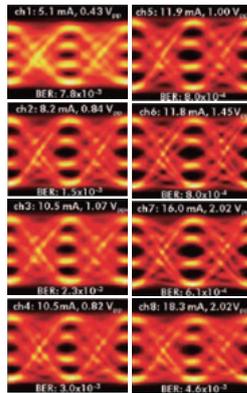
図5 インターコネクットの製品・研究開発動向



Si基板上メンブレンレーザ



素子写真



出力信号波形

波長多重回路と集積したメンブレンレーザ

図6 NTTにおける研究例（低消費電力デバイス）

ギー200 fJ/bitでの25.8 Gbit/s NRZ (Non-Return-to-Zero: 非ゼロ復帰) 直接変調動作を確認しました⁽⁴⁾。さらに、波長多重回路とモノリシック集積した素子による8×56-Gbit/s PAM-4動作を実証しました⁽⁵⁾。また、さらなる低消費電力化と小型化を実現するために、フォトニック結晶を用いたレーザを開発しています⁽⁶⁾。

今後の展開

信号が高速化し伝送容量が増大するにつれて、電気の担っていた部分が光に置き換わり、光がラック間からボード間・ボード内へと入っていきます。これにより、これまで物理サーバ内に閉じ込められていた一つひとつのコンピュータが、ラックスケールでつなが

た1つのコンピュータになります。このパラダイムシフトを光電融合デバイスで支えるために、一歩ずつ研究開発を進めていきます。

参考文献

- (1) 岡田・木原・岡崎：“IOWNを支えるディスアグリゲータッドコンピューティング,” NTT技術ジャーナル, Vol. 33, No. 5, pp. 40-44, 2021.
- (2) 寒川・富澤・岡田・後藤：“オールフォトニクス・ネットワーク, 光電融合技術のめざす未来,” NTT技術ジャーナル, Vol. 32, No. 8, pp. 6-9, 2020.
- (3) T. Kishi, H. Wakita, K. Shikama, M. Nagatani, S. Kanazawa, T. Fujii, H. Nishi, H. Ishikawa, Y. Kawajiri, A. Aratake, H. Nosaka, H. Fukuda, and S. Matsuo: “A 25-Gbps × 4ch, Low-Power Compact Wire-Bond-Free 3D-Stacked Transmitter Module with 1.3- μ m LD-Array-on-Si for On-Board Optics,” OFC 2019, Paper Tu2l.1, San Diego, U.S.A., March 2019.
- (4) T. Fujii, K. Takeda, N-P. Diamantopoulos, E. Kanno, K. Hasebe, H. Nishi, R. Nakao, T. Kakitsuka, and S. Matsuo: “Heterogeneously Integrated Membrane Lasers on Si

Substrate for Low Operating Energy Optical Links,” IEEE JSTQE, Vol. 24, No.1, 1500408, 2018.

- (5) H. Nishi, T. Fujii, N. P. Diamantopoulos, K. Takeda, E. Kanno, T. Kakitsuka, T. Tsuchizawa, H. Fukuda, and S. Matsuo: “Integration of Eight-Channel Directly Modulated Membrane-Laser Array and SiN AWG Multiplexer on Si,” Journal of Lightwave Technology, Vol. 37, No. 2, pp. 266-273, 2019.
- (6) K. Takeda, T. Sato, A. Shinya, K. Nozaki, W. Kobayashi, H. Taniyama, M. Notomi, K. Hasebe, T. Kakitsuka, and S. Matsuo: “Few-fJ/bit data transmissions using directly modulated lambda-scale embedded active region photonic-crystal lasers,” Nature Photonics, Vol. 7, No. 7, pp. 569 - 575, 2013.



(左から) 坂本 健 / 佐藤 昇男 / 瀬川 徹

光電融合デバイスが通信から演算処理に使われるためには一層の低消費電量・高密度化・低コスト化が必要になってきます。将来版のディスアグリゲータッドコンピューティングへの適用によりIOWNの世界を実現するようチャレンジしていきます。

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所
企画担当

E-mail sende-kensui-p@hco.ntt.co.jp

ディスタグリゲータッドコンピュータに向けたメモリセントリックアーキテクチャ

ディスタグリゲータッドコンピュータは、一見ハードウェア検討の割合が大半を占めるようにみえます。しかし、仮にハードウェア資源が物理的にフラットに光で接続された世界が実現されたとしても、既存のソフトウェアを用いるだけでは、効率的なコンピューティングを実現することはできません。本稿では、CPUを中心として発展してきた既存のソフトウェアの問題と、ディスタグリゲータッドコンピュータ実現に向けた新たなデータ交換モデルとして、メモリセントリックアーキテクチャについて紹介します。

いしざき

石崎

てるあき

晃朗

やまべ

山部

よしろう

芳朗

NTTソフトウェアイノベーションセンタ

メモリセントリックアーキテクチャとは

ムーアの法則と呼ばれる、1965年に発表された半導体集積率が18カ月で倍になるという経験則にあるように、CPU (Central Processing Unit) 性能は急速に進化してきました。このCPUの進化と比較して、メモリやストレージ・ネットワークは緩やかな進化をしています。こうした背景から、現在のソフトウェアの多数は「高性能なCPUとその他の低速なデバイス」という前提に立って、可能な限りCPUで演算を行うことで他のデバイス処理時間を短縮するという方針のもとに設計されてきています。

例えば、ストレージI/O (Input/Output) については、メモリ上に蓄積されるI/O対象のデータに対してCPUでI/O単位やリクエスト処理量の調整を行うことで、効率的なI/O処理を実現しています。また、複数のアクセラレータをまたいだ処理についても、処理の仲介をCPUが行うソフト

ウェア処理モデルを取っています。このようなCPUが処理に介在する処理モデルを、CPUセントリックなコンピューティングモデルと呼びます。

このように、一般的なソフトウェア設計として、CPUが処理の仲介を行うようにつくられる一方で、近年はムーアの法則の限界といわれるように、CPUコアの性能の伸びが鈍化してきています。また、高速ストレージである不揮発性メモリや、FPGA (Field Programmable Gate Array) ・GPU (Graphics Processing Unit) などのアクセラレータが急速に進化しており、多様なアクセラレータの性能を引き出すための新たなソフトウェア処理モデルが今後より重要となりつつあります。

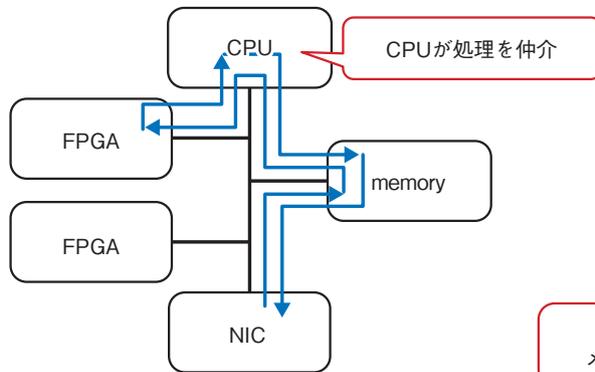
そこで、私たちは多種多様なハードウェアを組み合わせたソフトウェア処理モデルを検討するにあたり、アクセラレータが処理を開始する場所としてのメインメモリに着目し、アクセラレータ連携に際してのデータ交換についてメモリを介して行う、メモリセントリック

アーキテクチャ (メモリセントリック) について検討しています。

メモリセントリックで想定する基本的な動作は、データ送信元の演算器がメインメモリ (共有メモリ) へデータ配置を行うことをきっかけとして、データ受信側の演算器が自律的にデータ取得および演算を行う、メモリを中心としたデータ交換モデルです。例えば、他ノードからNIC (Network Interface Card) を介して受信したデータについてFPGAで処理することを想定した場合、従来はCPUがNICの受信制御やFPGAへの処理実行の制御を行っていたところを、本来のネットワーク受信処理と演算処理を担うNICとFPGAの処理のみで完結するため、処理を仲介するためのCPUリソース消費を抑えるとともにCPU処理にかかわる遅延時間削減が期待できます (図1)。

また、メモリ上に展開されたデータを基に、複数の演算器が並列処理を行うような場合に、データ送信処理は共有メモリ領域へのデータ配置1回のみ

(a) 従来のCPUセントリックの場合



(b) メモリセントリックの場合

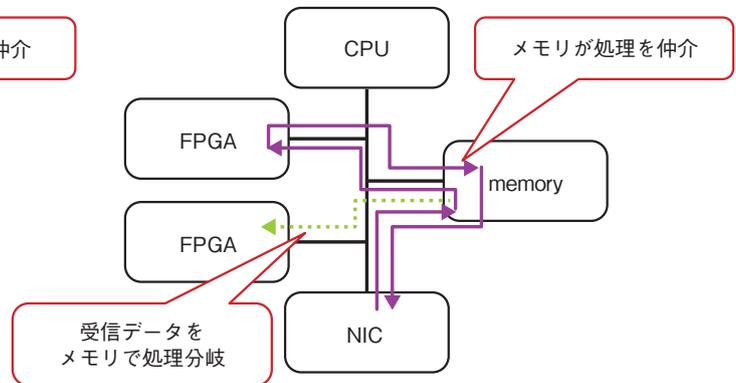


図1 CPUセントリックとメモリスセントリック

で済むことから、より効率的な処理モデルとなっています（図1）。

メモリスセントリックに近いコンセプトとしては、Hewlett Packard Enterprise (HPE) 社のMemory Driven Computing (MDC) があります⁽¹⁾。MDCはすべてのプロセッサの中心に大規模なメモリプールを配置した構成をとるといった、ハードウェアアーキテクチャを起点としたコンセプトモデルです。これに対して、メモリスセントリックでは処理実行時のプロセッサ間のデータ交換にメモリを介して行うための、ソフトウェアによるデータ制御に注目したモデルです。

メモリスセントリックアーキテクチャの有効性評価

メモリスセントリックのデータ交換モデルのコンセプトの有効性評価にあたり、共有メモリを介した多種多様なプロセッサ間での効率的なデータ交換を行うコンセプトに近い既存ソフトウェ

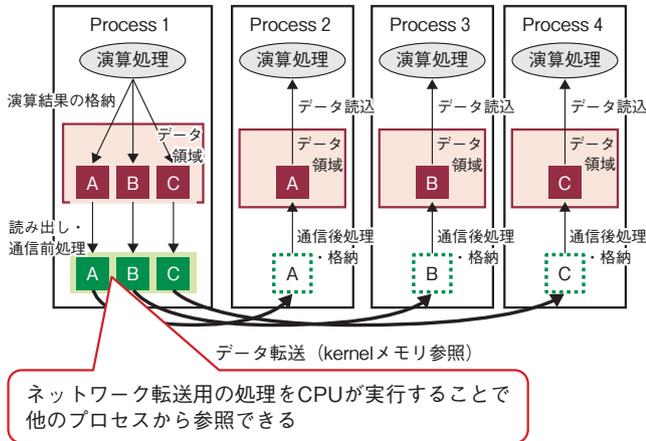
アとして、分散データ処理のオープンソースソフトウェアであるApache Sparkの拡張機能であるSparkle^{(2), (3)}を用いて評価を実施しました。

Apache Sparkは各Workerプロセスでデータ処理を実施するMapフェーズ、Workerプロセスで実行した処理結果について必要とするプロセスに配布するShuffleフェーズ、各Workerプロセスから集めた結果を基に演算を実行するReduceフェーズから構成されています。この中で、Shuffleフェーズは複数ノードに分散したWorkerプロセス間でTCP/IPを利用したネットワーク通信で大量のデータ交換を行う処理であり、ネットワーク通信にかかわるCPU処理の遅延時間やCPUリソース消費の観点から非常に処理コストが大きいことが知られています。この問題を解決することを目的とした、共有メモリを介したShuffle処理を可能とする拡張機能がSparkleです。SparkleはHPE社が

MDCのコンセプト向けに開発したソフトウェアであり、オープンソースとして公開されていますが、評価検討を着手した際には2016年時点で開発が止まっていたため、評価にあたっていくつかのバグ修正を行っています⁽⁴⁾。

図2は1台のサーバ内に複数のWorkerプロセスが起動していることを前提として、従来のSparkとSparkleのデータ交換モデルを比較した図です。従来は、データ交換を行うプロセス間ごとにコネクションを作成するため、計算規模の増加に伴うWorkerプロセス増加により多数のコネクションが作成されることとなります。また、コネクション単位でネットワーク処理を行うことで受信側のプロセスがデータを参照可能になります。しかし、ネットワーク処理を行うためには、転送するためのデータ操作（プロトコルスタックの処理・カーネル空間へのメモリコピー等）を送信側・受信側でともにCPU上で実施する必要があり、この

(a) Sparkのデータ交換 (localhost内のネットワーク通信の場合)



(b) Sparkleのデータ交換 (共有メモリを介したデータ交換)

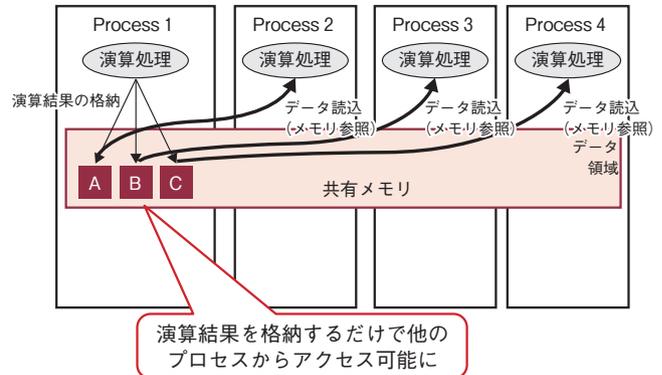


図2 データ交換方法の差

処理が遅延時間増加要因となっています。一方、Sparkleは送信側のプロセスがデータを共有メモリ上に配置することで他のプロセスからは参照可能になるため、受信側のプロセス自身が必要とするメモリ領域を参照することでデータを取得可能となります。つまり、各プロセスは共有メモリに演算結果を配置するだけで、データ転送のみを目的としたCPUによるデータ操作を行うことなく全プロセスがそのデータを参照可能となり、効率的な送受信が可能となっています。

SparkとSparkleの性能測定結果のグラフを図3、4に示します。図3はShuffle処理を含む基本的な5つの処理の性能比較結果です。処理によって処理全体に占めるShuffle処理の比が異なるため性能向上幅は異なりますが、特にReduceByでは約6倍の速度となっており、大幅な性能向上が確認できます。次に、図4はSpark

Streamingを用いてストリーミング処理性能を比較した結果となります。この測定においてSparkleはSparkと比較して約2倍の性能向上が確認され、遅延要件の厳しい処理に対する効果が期待されます。

このように、共有メモリを用いたデータ交換モデルの実現により、効率的なデータ交換および遅延時間の削減が可能となることで改めて確認されましたが、実現にあたってはさまざまな課題があります。その中で特に大きな課題の1つとして、共有メモリ管理に関する課題があります。現在、共有メモリを利用する方法としては同一ファイルを複数のプロセスでメモリマップする方法が一般的となっており、共有メモリ領域へのアクセスは一般的なC言語のポインタアクセスを用いる必要があります。これは一般的なC言語の記法で記述できる反面、複数プロセス間での共有メモリ領域のアクセス制御

や空き領域管理、割り当てなどのメモリ管理はサポートされていません。そのため、アプリケーションプログラマはデータの上書きやメモリ領域の二重確保を発生させないために、各々が独自のメモリ管理機能の実装を行う必要があります。また、共有メモリ自体は、現状では単体サーバ内で利用可能であり、複数サーバをまたがった分散処理を実行するためには、複数サーバにまたがった処理を可能とするための機能の拡張が必要です。

このように、共有メモリの低遅延性を損なわず、かつプログラマがその恩恵を容易に受けられるようなソフトウェアの研究がメモリセントリックの実現に向けた重要な研究課題となっています。

今後の展開

Sparkleの評価結果からCPUに関して、共有メモリを介したデータ交換

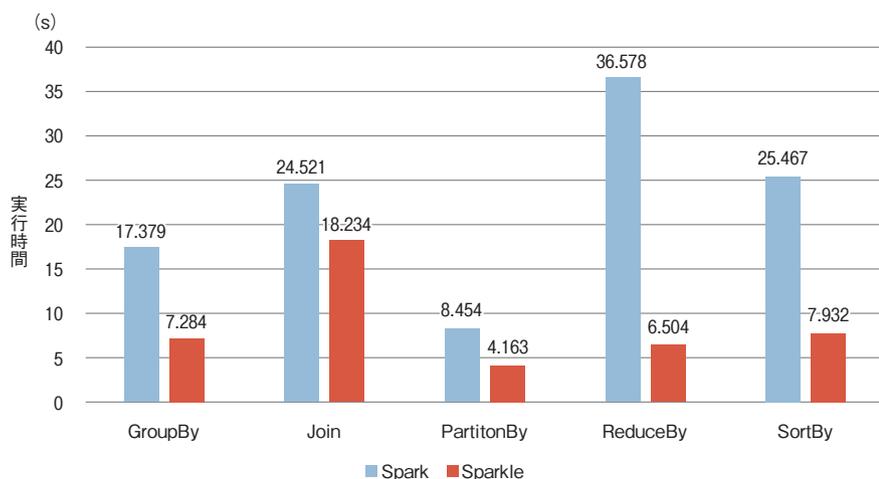


図3 マイクロベンチマークの性能比較

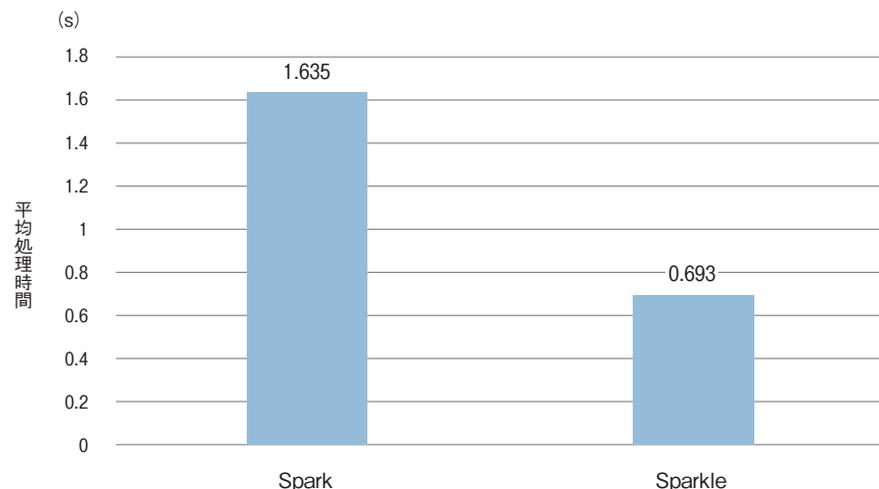


図4 Spark Streamingの性能比較

モデルを利用する効果があることを確認しました。今後は、メモリセントリックの検討として、この共有メモリを介したデータ交換モデルについてFPGA等の他のアクセラレータへの拡張を検討し、将来的には多様なハードウェア処理をつなぐコア技術として、検討を進めていきます。また、本取り組みに

ついては、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network)を支えるディスクアグリゲータドコンピュータに必要な要素技術として、計算機資源をサーバ筐体単位ではなく各々独立に利用とするためのソフトウェア技術として位置付けされており、ソフトウェア制御によりアクセラレータ間について

CPUを介さずにフラットに接続・利用することにより、遅延時間削減とCPU消費量削減による電力効率の高いコンピューティングの実現をめざしていきます。

■参考文献

- (1) K. Keeton: "Memory-driven computing," FAST 2017, Santa Clara, U. S. A., Feb. - March 2017.
- (2) M. Kim, J. Li, H. Volos, M. Marwah, A. Ulanov, K. Keeton, J. Tucek, L. Cherkasova, L. Xu, and P. Fernando: "Sparkle: Optimizing Spark for Large Memory Machines and Analytics," arXiv preprint, arXiv:1708.05746, 2017.
- (3) <https://github.com/HewlettPackard/sparkle>
- (4) <https://github.com/sparkle-plugin/sparkle>



(左から) 石崎 晃朗/ 山部 芳朗

近年のアクセラレータや不揮発性メモリなどのハードウェアの進化に伴い、ハードウェアとソフトウェアの関係性は大きく変化しつつあります。その中で、さまざまなサービスを効率的に動作させるためのプラットフォームとして、基盤ソフトウェアの研究開発を進めていきます。

◆問い合わせ先

NTTソフトウェアイノベーションセンター
 分散処理基盤技術プロジェクト
 TEL 0422-59-3488
 FAX 0422-59-3739
 E-mail teruaki.ishizaki.ph@hco.ntt.co.jp

光ディスアグリゲートドコンピュータにおいて電力効率最大化を実現するパワーアウェア動的配置制御技術

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) により実現される光ディスアグリゲートドコンピュータは広域に分散した多様な計算デバイス (省電力CPU, アクセラレータ等) により構成されます。本稿ではネットワークワイドな処理のオフローディングや電力最適な計算デバイス選択等のコンピューティング基盤制御により、光ディスアグリゲートドコンピュータにおける省電力化・電力効率最大化を実現するパワーアウェア動的配置制御技術を紹介いたします。

かねこ まさし ふじもと けい
金子 雅志 藤本 圭
いわさ えりこ
岩佐 絵里子

NTTネットワークサービスシステム研究所

IOWN時代のサーバシステムにおける電力面の課題

近年IPトラフィックは指数関数的に増加しており2050年には現在の4000倍になると予測されています⁽¹⁾。一方でそれら进行处理するサーバについては、CPU (Central Processing Unit) の性能向上スピードが鈍化していることもあり、現状のサーバハードウェアの延長線上での電力効率で試算するとデータセンタ運用に要する電力も2050年に4000倍になると予想されています。このため、サーバの省電力化・電力効率向上は将来のネットワーク運用に向けた重要な課題になります。

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) においては、オール光ネットワークで接続された計算デバイスによるインネットワークでの高速かつ効率的な処理を可能とするネットワークワイドな新たなコンピュータアーキテクチャとなる光ディスアグリゲートドコンピュータの実現をめざしています。光ディスアグリゲート

ドコンピュータにおいては、光電融合デバイスやメモリセントリックコンピューティングといった新たなデバイスや処理方式の導入により、従来のサーバハードウェアの限界を超える電力性能を実現し、将来にわたる電力面の課題を解決することが期待されます。

光ディスアグリゲートドコンピュータとパワーアウェア動的配置制御技術

光ディスアグリゲートドコンピュータを構成する計算デバイスとしてはCPUやアクセラレータ〔GPU (Graphics Processing Unit), FPGA (Field Programmable Gate Array) 等〕のような多様なデバイスが接続されることを想定しており、分散型のヘテロジニアスコンピューティングが実現されます。そのようなコンピューティング基盤上で、ネットワークを構成する仮想的な機能群であるVNF (Virtual Network Function) を稼働させる場合、VNFを構成するソフトウェアコンポーネント〔従来型

のVNFであれば仮想マシン (VM) 相当〕を各計算デバイスに対して割り当てていく制御機構が必要になります。従来型のVNFでは、アクセラレータを必要とするVMについてはアクセラレータが物理的に搭載されているサーバハードウェアに配置される必要があります。また、一般的なVMではアクセラレータをデバイス (GPUボード、FPGAボード等) 単位で排他的に利用するのが一般的であるため、アクセラレータにオフロードする処理の割合が少ないアプリケーションがデプロイされたサーバにおいては、アクセラレータのハードウェアリソースが有効活用されません。光ディスアグリゲートドコンピュータにおいては、CPUやアクセラレータといった計算デバイスが光パスで接続されることで物理的に離れたデバイス間において高速低遅延でのインタラクションが可能となり、従来のようなサーバのフォームファクタによる構成の制約 (例: ラックマウントサーバに搭載可能な拡張ボード数等) が緩和されます。また、

VNFとアクセラレータの関係を従来のように1対Nではなく、M対Nに柔軟化することができれば、1つのアクセラレータに対して複数VNFの処理を割り当てることが可能となり、アクセラレータのハードウェアリソースが最大限活用可能となります。

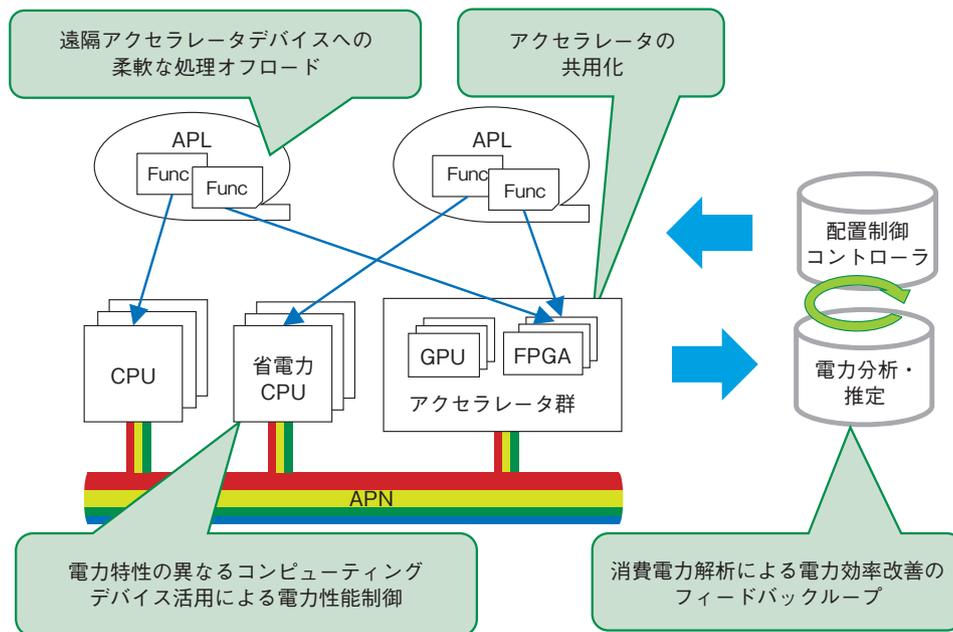
NTTネットワークサービスシステム研究所で研究しているパワーアウェア動的配置制御技術(図1)は、サーバ基盤に対してソフトウェア制御を行うことにより消費電力の低減に貢献する技術です。現在は、分散されたアクセラレータデバイスに対してネットワークワイドでの処理オフロードを可能にすることで、複数CPU上で稼動するソフトウェアコンポーネントからアクセラレータへのアクセスが同時並列で発生した場合に従来のような排他的なアクセスではなく並列での処理受付を可能とすることでアクセラレータデバイスの共用化を実現し、アクセラ

レータの稼働率を向上させる「パワーアウェアアクセラレータ最適活用・高速低遅延技術」、並びに省電力CPUや各種アクセラレータ等の多様な計算デバイスが混在する環境において、デバイス単位・ソフトウェアコンポーネント単位での細やかな消費電力分析と、消費電力を最小化可能なソフトウェアコンポーネント配置および個々のデバイスの省電力制御により電力低減を図るとともに、将来的には地域ごとの再生可能エネルギー発電状況なども考慮したかたちでサーバ基盤の消費電力を調整することで電力需要をコントロールし、不安定な再生可能エネルギー発電から得られる電力を最大限活用可能な「再生可能エネルギー活用型サーバ基盤技術」の技術確立に取り組んでいます。

パワーアウェアアクセラレータ最適活用・高速低遅延技術

近年、データ分析や機械学習のような複雑な計算処理に対してCPUだけでなく、GPUやFPGAのようなアクセラレータを活用するケースが増えてきています。アクセラレータは一般的に処理に対する汎用性が低い代わりに、得意な処理に対してはCPUに対し100倍以上の効率で処理が可能である場合があります。現状、アクセラレータを利用する際にはCPUで実行されているプログラムの一部をOpenCL等のAPI(Application Programming Interface)を通してアクセラレータにオフロードする利用方法が一般的です。この場合、プログラムを処理しているCPUと同一サーバハードウェア上に空き状態のアクセラレータが存在しなければ処理をオフロードさせることができません。

パワーアウェアアクセラレータ最適活用・高速低遅延技術



再生可能エネルギー活用型サーバ基盤技術

図1 パワーアウェア動的配置制御技術

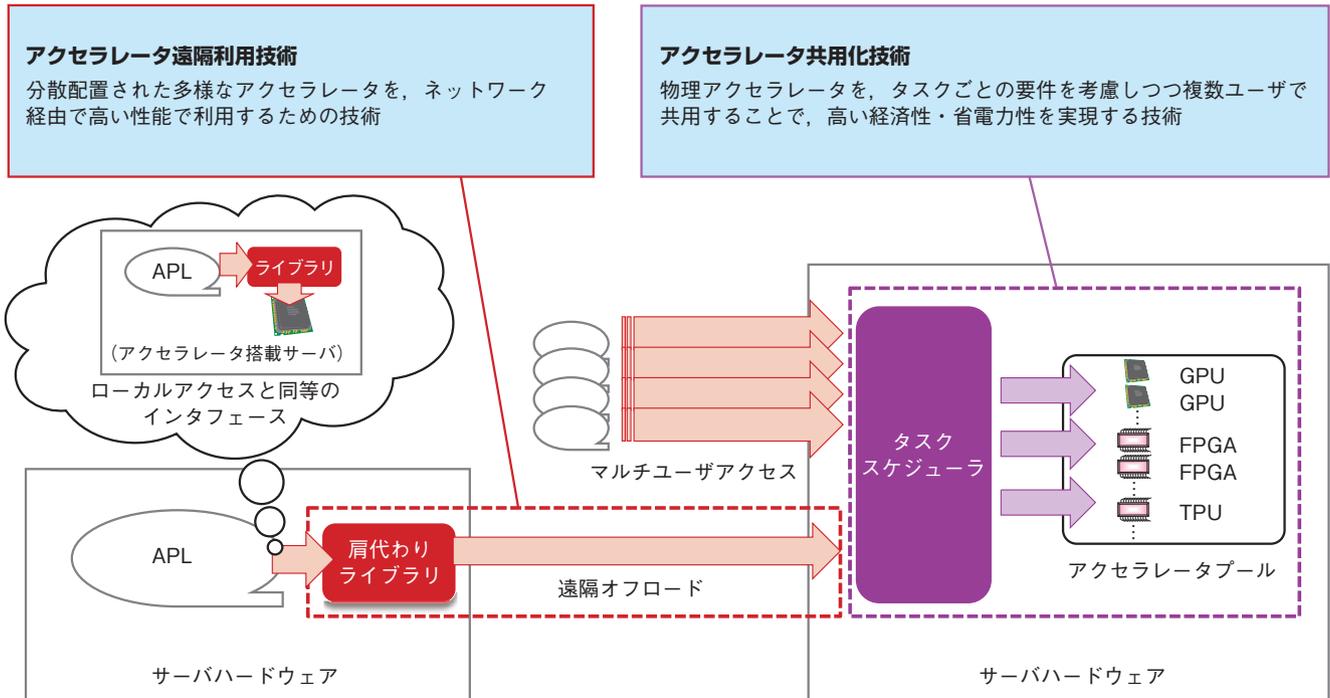


図 2 パワーウェアアクセラレータ最適活用・高速低遅延技術

パワーウェアアクセラレータ最適活用・高速低遅延技術では、従来技術のように物理的な接続構成に縛られず、ネットワーク上に分散配置された遠隔のアクセラレータを、まるでローカルに配置されているように位置透過的かつオーバーヘッドが少なく高速・低遅延に利用可能とすること、および複数ユーザからアクセラレータを共用利用可能とすることでアクセラレータの利用効率をさらに高める技術です(図2)。遠隔のアクセラレータへの処理オフロードにおいては、既存のオフロードAPI(例: OpenCL API)を提供する肩代わりライブラリをオフロード元に組み込み、アプリケーションには従来のローカルアクセスと同等のインタフェースを提供することで位置透過性を実現するとともに、既存アプリケーションのポータビリティ向上を図ることが可能です。

再生可能エネルギー活用型サーバ基盤技術

現在のサーバハードウェアは常時安定的な電力が給電されることを前提に設計されているため、多数のサーバを稼働させるデータセンタでは、常に大容量の電力を安定的に供給する必要があります。近年、データセンタへの給電に再生可能エネルギーを活用する動きがありますが、前述のとおり現状のサーバは常に安定的な電力供給が必要であるため、太陽光発電のような発電量が不安定な再生可能エネルギーのみでの長時間安定稼働は困難です。再生可能エネルギー活用型サーバ基盤技術ではサーバが消費する電力の分析・推定により、計算デバイス単位での電力制御やシステムを構成するソフトウェアコンポーネントの配置制御により、サーバ基盤トータルでの省電力化および給電量に応じた稼働制御を実現します。

一般的なサーバハードウェアは低負荷時でも高負荷時の6~7割程度の電力を消費するといわれていますが、スマートフォンに搭載されるSoC(System-on-Chip)においては低負荷時の消費電力を極力低下させるため、負荷に応じたCPUの電力ステータ制御や周波数制御に加え、低電力稼働に適した専用CPUコアを搭載するなどして、スマートフォンにおける“省電力モード”のような電力供給(バッテリー蓄電)状況に応じた稼働制御を実現しています。サーバ基盤においても、電力供給量に応じて性能を変動させることで電力の需要を調整することができれば、時々刻々と変動する再生可能エネルギー発電を無駄なく利用可能なサーバ基盤を実現することができま。また別のアプローチとして、サーバクラスタにおいて電力性能の異なるサーバを複数種類組み合わせたヘテロクラスタを構成し、稼働状況により最適なサーバを動的に選択することで電

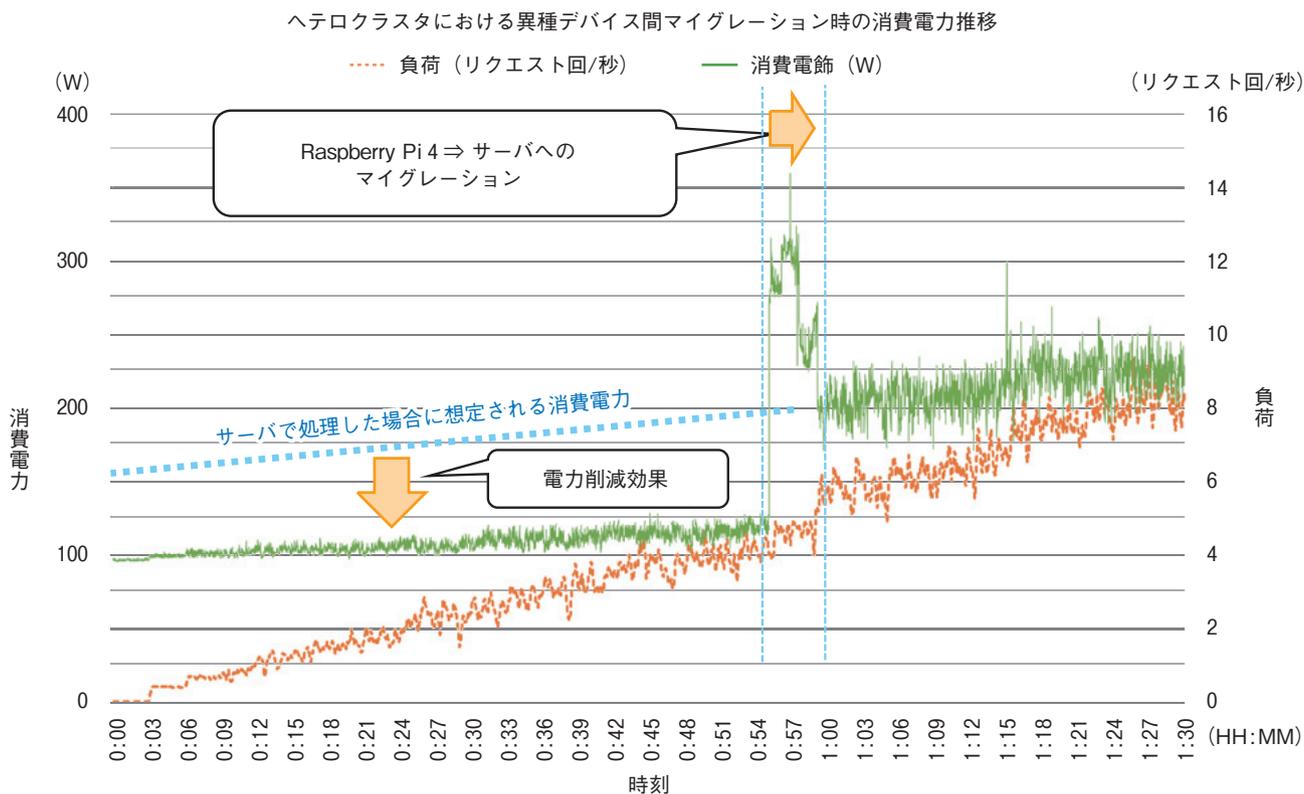


図3 ヘテロクラスタにおける省電力化制御の一例

力効率の向上を図ることが可能となります。一例として、一般的なサーバハードウェアとRaspberry Piのような最大性能は低いものの電力性能に優れたコンピューティングデバイスとを組み合わせたヘテロクラスタを実現し、負荷状態に応じて最適なサーバを選択し、動的にシステムマイグレーションすることで低負荷時の電力向上を図ることができます。図3のグラフは15台のRaspberry Pi 4と1台の1Uラックマウントサーバでサーバクラスタを構成し、負荷に応じてソフトウェアコンポーネントマイグレーションさせたときの消費電力を表しています。Raspberry Piクラスタで処理を行っている低負荷状態（1UラックマウントサーバはOFF状態）では、サーバのアイドル時の電力（およそ150 w）よりも低い電力で処理を実施できていることが分かります。このように、電

力的に特性の異なる複数のコンピューティングデバイスを組み合わせ、負荷に応じたシステムを構成するソフトウェアコンポーネントの配置制御を実施することで、幅広い負荷レンジにおいて電力効率を向上させることが可能となります。

今後の展開

私たちは今後、深刻化が懸念されるITサービスが消費する電力増大の問題に対して、ディスアグリゲータッドコンピュータを効率的に制御することにより解決をめざすパワーアウェア動的配置制御技術の検討を進めています。従来のような性能やコストだけでなく、電力効率や再生エネルギー活用も併せて追求することで社会が求める低炭素社会の実現に貢献できるよう技術開発を進めます。

参考文献

- (1) <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2018-pp-15.pdf>



(左から) 金子 雅志/ 藤本 圭/
岩佐 絵里子

光ディスアグリゲータッドコンピュータの実現を通してオール光ネットワークによる新時代のサービスを実現するサーバ基盤を実現するとともに、電力面の課題を解決することでIOWNが掲げる電力100分の1目標の達成をめざします。

◆問い合わせ先

NTTネットワークサービスシステム研究所
ネットワーク制御基盤プロジェクト
TEL 0422-59-7718
E-mail e2serv-p-ml@hco.ntt.co.jp



主役登場

The network is the computer

田仲 顕至

NTT 先端集積デバイス研究所
研究員

「The network is the computer」—このキャッチコピーをご存じでしょうか。これは1990年代のシリコンバレーを席卷した、サン・マイクロシステムズ（サン）が掲げた考え方です。サンが後世に残したものを少しだけ紹介すると、Javaという言語や、SPARCという計算機命令セットがあります。前者は高等教育で扱われるような一般的なプログラミング言語で、後者は日本のスーパーコンピュータ「京」にも採用されています。この「The network is the computer」という考え方は、メインフレームと呼ばれるような中央集権的な計算機の管理・運用から、パーソナルコンピュータ（PC）と呼ばれるような計算機の分散管理・運用へと変革する中で生まれました。当時、分散管理・運用することでPCの相互接続・運用のコストが急上昇したため、技術的に問題視されていたのです。

その後、サンは2010年にオラクルに吸収合併され、伝説的な歴史に幕が下ろされました。この歴史の節目は「The network is the computer」という考え方が終わったことを告げるのでしょうか。ジェフ・ベゾス（Amazon.comの創設者）に代わり、次期よりAmazonのCEO（最高経営責任者）に着任するアンディ・ジャシー（現Amazon Web Services, Senior Vice President）は「アプリケーションを構築する最小単位がWeb サービスとするならば、そのオペレーティングシステムはインターネットだ」と語っています。

前置きが長くなりましたが、私はIOWN（Innovative

Optical and Wireless Network）時代の計算機を考えるプロジェクトに参画しています。このプロジェクトに参加したころ、（そして今でも、）私は計算機科学を語るには若輩者であり、ネットワーク・通信の会社であるNTTが計算機のことを考えることに疑問を感じていました。そんな中、前述の考え方に出会い、雷に打たれたような感覚を覚えました。私たちの生活を支えるサービスの多くがインターネット・クラウドに接続し、IoT（Internet of Things）や5G（第5世代移動通信システム）の実現により数多のデバイスが相互に接続している今だからこそ、さらには、ムーアの法則の遅滞により計算機が目まぐるしい性能向上に陰りが出てきた今だからこそ、「The network is the computer」を再考する時代が到来していると考えています。

今、私たちは通信と計算の融合を実現するために、現代のCPUの抱えるコンテキストスイッチ、割り込み・ポーリングによって発生するオーバヘッドを突破するための新アーキテクチャに取り組んでいます。さらに、通信と計算の融合によって可能となる計算機リソースがディスアグリゲーションされたアーキテクチャによって、管理・運用コストが劇的に低減できるよう研究開発に取り組んでいます。IOWN時代のコンピュータ開発は、挑戦的なテーマであり、まだまだ萌芽したばかりのテーマです。大きな期待にこたえられるよう努力する所存ではありますが、継続的な温かい支援をよろしく願います。

特別連載

ムーンショット・エフェクト
——NTT 研究所の技術レガシー——第9回 バリアフリー道案内技術
MaPiece® (まっぴーす)

ノンフィクション作家の野地秩嘉（のじつねよし）氏より「ムーンショット・エフェクト——NTT研究所の技術レガシー」と題するNTT研究所の技術をテーマとした原稿をいただきました。連載第9回目は「バリアフリー道案内技術MaPiece®（まっぴーす）」です。本連載に掲載された記事は、中学生向けに新書として出版予定です（NTT技術ジャーナル事務局）。

■光技術を応用する技術のひとつ—MaPiece®

NTTは光技術の実用化で大きく前進する技術サービスを開発している。生体信号を計測するhitoe®ウェアもそのひとつだし、超高臨場感通信Kirari!もそうだ。宇宙通信、AI音声認識もそうだ。

そのなかで、今回、取り上げるのがバリアフリー向け道案内技術のMaPiece®（まっぴーす）である。

NTTサービスエボリューション研究所が開発したバリアフリー向け道案内技術MaPiece®は3種類ある。

- ① 測ってMaPiece
- ② みんなでMaPiece
- ③ 歩いてMaPiece

前2者はタブレットを使い、「歩いてMaPiece」はスマホアプリだ。いずれの技術も特別な知識がなくとも、誰でも容易にデータ収集できる。

収集するデータは段差、階段、道路の幅員、そして、障がい者が利用できるトイレ施設の有無などである。

開発に協力したNTTクラリティに所属する高橋さんに尋ねた。

こうした情報を集めたマップはこれまでにあったのではないかと。

彼は「ええ」と、うなづく。

「似たようなバリアフリー情報は紙の地図でも、いろいろあります。見てみると、各自、自分にとっていちばん使い勝手がいいものを選んで使ってます。僕らが作っているMaPiece®は国土交通省（国交省）のガイドラインに沿って、情報を入力していくようになっています。加えて、実際の写真、周りの障害物も登録しているので、

これまでのものよりわかりやすいと思います。僕自身、仙台、福岡、埼玉、大阪、東京都千代田区、横浜など、7か所くらい、データ収集しているんですけど、日本にはまだまだバリアは多いなあと感じています。普通の道路だとそれほどの段差、傾斜はないのですが、食事を摂るために建物に入っていく時に段差、階段があります。そういうケースが重なると、外出するのが嫌になりますね」。

バリアが多い少ないはその国の成熟度を表しているのではないかと。そして、多様性を容認しようと思えば当然、バリアをなくす努力をしなければならない。けれども道路を平らにしたり、階段をなくしてエレベーターやエスカレーターを取り付けるには多くのコストと時間がかかってしまう。そこで、道路整備を進めながら、MaPiece®というデータ収集技術を普及していく必要がある。

■さまざまな問題

3種類のMaPiece®の開発そのものを担当したのはNTT研究企画部門の深田聡、NTTサービスエボリューション研究所の小西宏志、寺中晶都（さやか）の3人を中心としたチームだ。

深田は「なぜMaPiece®を開発したのか」について、説明を始めた。

「車いすの方々含めたさまざまな方々の移動において、どういう道を通っていけば行きやすいかといったナビゲーションサービスには『これだ』というものはありませんでした。しかし、ニーズはあったのです。

2013年に、東京2020オリンピックパラリンピックの招致が決まり、様相が変わりました。多くの観光客の方々

が来日しますから、当社としても何か取りかからなければいけないとなったわけです。

そこで、私はまずNTTの本社がある大手町から東京駅のあたりを真剣に歩いてみました。すると、東京駅という東京のど真ん中なのに、段差や階段がたくさんあって…。歩いていたら、ベビーカーを押していたママさんが途方に暮れていたので、ベビーカーを抱えて階段を降り、地下通路まで降ろしたこともあります。東京駅の地下って、もっともっと整備しなければ海外からお客さんを迎えられないと思いました」。

繰り返すようだが、バリアフリーのマップはすでに存在していた。ただ、マップを作製すること自体がビジネスになるわけではなかったのが、本格的なそれができなかったとも言える。

そして、バリアフリーマップとは謳っていても、ルートを示すというより、「車いすの方が使えるトイレがあります」「この店は車いすの方が入れます」といった施設情報が優先されているものがほとんどだった。施設情報を集めるのはさほど難しくはない。一方、施設へたどり着くまでの道路の幅員（道路幅）とか傾斜についての情報は調べるのに手間がかかるので、ルートマップは多くはなかったのである。

幅員、傾斜、段差といった情報を集めるには測量技師などプロの力を借りなければならない。さらに、道路は拡幅されたり、舗装の程度が変わったりするので、定期的に情報収集しなければならない。どうしてもコストがかかってしまうのである。

さらに、さまざまな問題が加わる。

通行情報は必要とする人の障がいの程度によって、通ることのできる条件が異なってくる。つまり、介助者が押す車いすに乗っている人は手動の車いすよりもきつい傾斜の坂道を登っていけるのである。また、段差があっても、介助者が押すパワーで乗り越えてしまう。

MaPiece[®]の開発にあたって、深田たちは障がいの程度、種類を分けて考えることにした。まずは手動の車いす、介助者がいる車いす、ベビーカー、杖で歩く人の4種類に分けたのである。

手動の車いすに乗る人にとってのバリアは多い。階段、2センチ以上の段差、5パーセント以上の傾斜、1メートル未満の幅員だった。なお、5パーセントの傾斜とは

100メートル進んだ時、5メートル上がる、もしくは下る道の傾斜で、普通の人にとっては緩い坂道と感じる。

介助者がいる車いすの人の場合は階段と1メートル未満の幅員がバリアだ。段差は8センチまで大丈夫だし、傾斜も10パーセントまでなら何とかなる。

ベビーカー、杖の人については図を見てもらうことになるが、つまり、バリアとは人によって違うので、1枚の紙の地図に記載するとなると、非常に煩雑になってしまうのである。

もっと言えば、車いすやベビーカーにもいくつもの種類がある。手で押すものだったり、電動だったり、軽量のそれだったり…と種類が分かれる。ベビーカーだって双子が乗っているものもある。紙のバリアフリーマップでは、そうした多種の条件や道具について、すべてを記載することは不可能なのである。

深田は付け加えた。

「新型コロナが蔓延する前までインバウンドの方たちがどんどん増えていました。なかには障がいのある方もいらっしゃいました。紙のマップでしたら、言語ごとに作っていかないといけない。それもまた無理です。ところが、デジタルデータであれば使う言語に合わせて容易に情報を出すことができます。それで、私たちはさまざまな方に合わせデジタルデータを多言語で作ることを前提にしてMaPiece[®]の開発に着手したのです」。

深田たち開発者の話を聞いていると、ビジネスのために開発したというよりも社会貢献のための仕事だと感じる。

■ 3種類が必要だ

3つの技術について、まとめておく（図）。

何よりも重要な点はプロ向けの仕様ではなく、誰でもがすぐにデータの収集を始めることができる。特に、3番目の「歩いてMaPiece」はその名の通り、スマホのアプリを起動してルートを歩けば階段があるとか2センチ以上の段差があるといった情報を収集できる。

深田の説明は次の通りだ。

「私たちはICT（情報通信技術）のツールを作って、ボランティア、一般市民がデータを収集できるような形にすることが必要だと思いました。たとえばプロなら段差を精密に測ります。ですけれど、1.75センチという値を計測しなくても、2センチより上か下かだけわかれば実はナビゲーションのためには有効なんです。

■ バリアフリー情報収集技術 (MaPiece®) の確立に向けて、人をセンサとして日常生活の場の状態情報を収集するクラウドセンシングの考え方を基に、特徴の異なる3つの技術開発を推進、情報収集のフェーズに沿って各技術を適用、得られる情報を組み合わせることで、**続可能なバリアフリー情報の収集・更新方法の確立**をめざしてきました

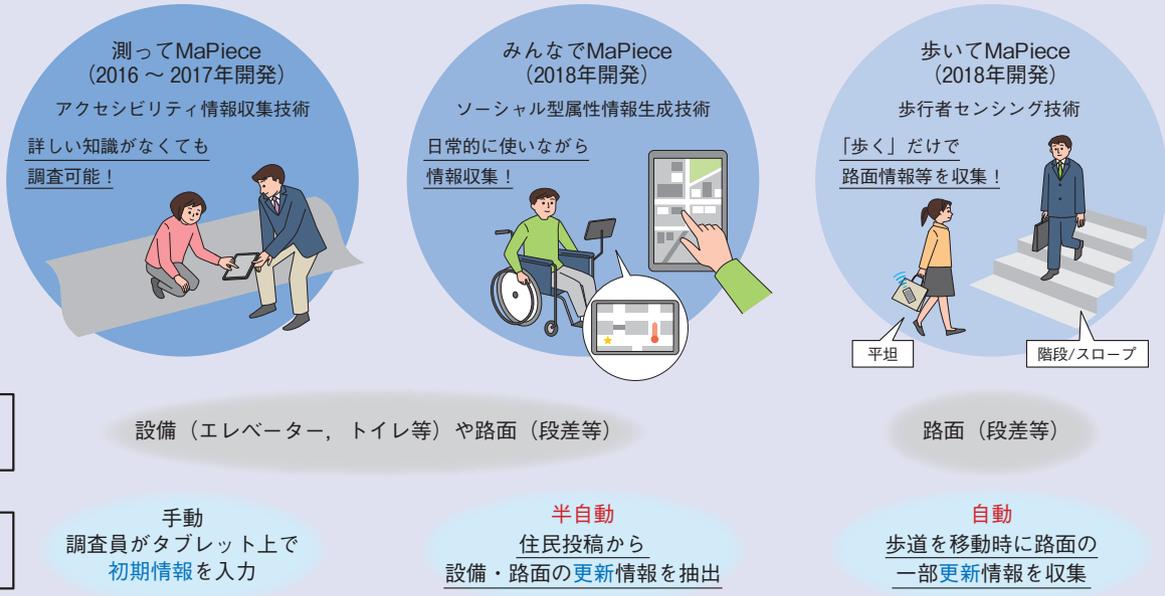


図 「MaPiece®」 シリーズ

車いすに乗る人にとっては段差が2センチより上なのか、下なのかは分かれ目ですから。そういった簡易的に集められる仕様を作り、国交省の基準に協力しました。それが2015年でした。そして簡易化した仕様に合わせたICTツールを作ったのですが、それが『測ってMaPiece』です。

情報収集ツールのコンセプトはできた。しかし、実際にそれを使ってみる段になってみると、道路、スロープ、段差というのは思った以上のバリアだとわかったのである。

一緒に開発をしていた小西が「私たちは何も知らなかったんです」とちょっと恥ずかしそうにつぶやいた。

「実際に車いすの人と一緒に街を歩くと、健常者が何気なく歩いているようなところでも、えっと思うようなバリアがあるんです。

歩道はどんな道でも、雨が降ったら水を側溝に流すために微妙に傾斜をつけてあります。自分で車いすを押してみるとわかるんですけど、歩いているうちにだんだん

道路の端っこに寄っていくんですよ。傾斜度にすれば1パーセントなり2パーセントぐらいの角度であっても、自然に端に寄って行ってしまふ。車いすを押しながらけっこう怖い思いをしました。駅のホームだって同じです。道路よりもさらに怖いんです。線路の方に寄って行ってしまふのですから。

押すだけではなく、車いすにも自分で乗ってみました。慣れないと怖いんです。視線が思ったより低いから、人を見上げるといふ風になってしまい、首が疲れます。

そして、夏場は暑いんです。道路の輻射熱を直接、感じます。

つらかったのは段差よりもむしろ路面状態でした。どことは言えませんが、道路がきれいなタイル張りになっていたりするところがあります。見た目はきれいなんですが、路面がガタガタだから、体が振動する。そして、タイヤがタイルの隙間にはまり込んで、抜けない。

ヨーロッパの石畳なんて車いすには無理です。

ただ、ヨーロッパやアメリカは車社会なので、車いすを車に積んで移動して降りるという形になっています。日本と海外とは同じ車いすの移動でも状況は違うわけです。

車いすに乗っている方々に聞くと、健常者が集める情報はバリアがある場所ばかりだけだと言うんです。

彼らが知りたいのは『バリアがどこにあるか』ではなく、『どの道が通れるかなんだ』と。いや、恥ずかしい思いをしました。考え方が逆だったんです。バリアは見つけても、それをマップに載せなくていいんです。通れるルートをわかりやすく見せた方が使う人にとっては便利だし迷うことがないんです。

■ 3種類を上手に使う

西武多摩川線 多磨駅近辺で行われたデータ収集では参加者は3種類のMaPiece[®]を使っていた。

「測ってMaPiece」はタブレットに地図が表示してあり、調査する道路が載っている。歩きながら、道路の幅員、段差を記録していく。

測った数値そのものを入力するのではなく、段差が2センチ以上か、以下かを選べばいいようになっている。紙の地図に手で書き込むのではなく、入力さえすれば自動的にデータとして整理される仕組みだ。

「みんなでMaPiece」はスマホ向けのツールだ。データ収集イベントに参加しなくとも、仕事や私用で移動する時にタブレットを使ってバリア情報を投稿すればいい。道路工事をやっていたり、段差が解消されたのを見たら、すかさず投稿すればマップの情報が更新される。

ただ、誤った情報を入力する場合もあるので、MaPiece[®]にはユーザやコンテンツの信頼度に基づいて正しい投稿を抽出する機能が備わっている。

「みんなでMaPiece」は参加する人が増えれば増えるほど情報が多くなり、また、正確度も上がる。この存在を宣伝して参加者を増やすことも深田たちの仕事だろう。

小西は「その通りです」という。

『みんなでMaPiece』は日常的に使う、普通のスマホアプリにしたのは集めた情報を参照できるようにしたかったからです。そのためには障がい者の人たちだけでは人数が少ないので、一般の人にも使ってもらわなくてはなりません。

その時ですけれど、ボランティア精神に訴えるだけで

はなく、いつかあなたも必要になるツールなんですよと伝えることにしています。

実際、高齢化社会ですから、私たちもいつかは杖を持って歩くことになる。将来的には自分自身に返ってくるデータだということ、みなさん、うなづいて積極的に参加してください」。

「歩いてMaPiece」はアプリを起動したスマホを持って歩けばいい。スマホのセンサが移動中に情報を読みとって、どこに段差があるとか、傾斜がどこにどれくらいあるかを自動的に収集してくれる。

ただ、段差、傾斜はわかるが道路の幅員は「歩いてMaPiece」では収集できない。それを補うために、NTT 未来ねっと研究所が航空写真と地図から道路の幅員や横断歩道などの歩道の形状情報を自動生成する技術を追加し、データを補正している。

それにしても、深田や小西がトライしたように、バリアフリー技術は自らが車いすに乗ってみたり、多機能トイレへ車いすで入ってみたりという実践がなければ情報の価値を判断できない。

「いつかは自分も段差やきつい傾斜の道を歩くのがつらくなる」と自覚して、参加するといい。バリアフリー情報は決して他人事ではない。

■ 大勢が参加してくれている。しかし、まだ足りない

3つのMaPiece[®]を使ったデータの収集だがオリンピックパラリンピック等経済界協議会と連携し、延べ参加人数で約1900人以上、調査距離は700キロメートル以上の歩道をカバーしたことになる。

なお、主にデータ収集したエリアは東京2020オリンピックパラリンピックが開かれる予定の競技場とラグビーワールドカップが開かれた競技場の周辺地区に過ぎない。日本のなかのほんのわずかな地域の情報を集めただけだ。

日本全国にある道路の総延長は 1,279,651.9 キロメートル (2018年現在)。また、江戸時代に地図を作成した伊能忠敬が歩いた距離は約4万キロ。4万キロとはだいたい地球を一周した距離である。

私は3つのMaPiece[®]を完成させるのは伊能忠敬がやった偉業に比すべきプロジェクトだと思う。ただし、まだ歩いた距離は少ない。

100万キロのデータを収集しようと思えば10年、20年

でも足りない。4万キロを完成させるには大勢の力を結集しなくてはならない。そのためにはボランティアに加わってもらうことだ。

そして、ボランティアを増やすには「令和の伊能忠敬を求む」くらいの大げさなコピーで宣伝しなくてはならない。

深田たちもそれはよくわかっている。

彼は言う。

「伊能忠敬は自分で集めたんだから、それはすごいことです。ただ、我々は、みんなの力を結集しなくてはいけない。まだ700キロです。しかし、それでも世界では稀です。これほど正確で、しかもICTで集めているバリア情報はどこにもありません。

また、この情報は一度、収集したらそれでおしまいではありません。つねに最新の情報にしないと使えません。持続的にどうやって整備していくかも大きな課題です」。

日本のあらゆる道とまではいかないけれど、主要な道についてデータを収集することが第一の目標だろう。さらに、それを継続的に更新していかななくてはならない。加えて、彼らがかかっているうちに、あらたにわかったことがある。

それは季節の情報だ。

北海道や東北に住む障がい者が望む通行情報とは階段、段差だけではなく、冬に道路が凍結してしまい、滑りやすくなっているところだ。

集めるとなると、担当者は冬の間、北海道、東北各地へある程度の期間、暮らしてみなければならぬ。そして季節だけではなく、災害が起こると通れなくなる道が出てくる。そういう場合は緊急にデータを集めて、知らせる機能を付加しなければならない。

道案内アプリの開発はいったん、取りかかったらやめられない仕事だ。この仕事には終わりが無い。

■これがあれば外に出たくなかった人たちが安心して出られるようになる

チームの一員である寺中は「私も実際にデータを収集していて気が付いたことがあります」と言った。

「障がい者の方は出かける前にみなさん、すごく詳しく調べるんです。私たちだって乗換案内のアプリを使っていて、駅へ行ってみたら、書いてあるよりもホームとホームの間の距離が長くて乗り換えができなかったなん

てことがあります。

障がい者のみなさんはもっと丁寧に調べます。乗り換えルートにはエレベーターはあるのか、駅のトイレは車いす対応になっているのか、駅から出てイベント会場までは平坦なルートなのか…。地図やスマホの現場写真を駆使して、すべてチェックしてから初めて出かけていく。もっと言えば、予行演習して出かける人もいます。現場の写真を見れば坂の傾斜もある程度、わかりますからね。

ただ、そこまでやるのってものすごく手間がかかる。そこまでやって、行けないとわかったら、自信をなくして外に出ること自体をあきらめてしまったり…。

個人個人の障がいの程度が違ってきますから、『ここはバリアフリールートです』と書いてあっても、自分にとっては通れなかったみたいなのもあるんです。ひとつのルートだけが提示されていても実際には使えません。それで外出に対してトラウマみたいになっている方もいらっしゃいます。

私はなるべく多くの行けるルートを載せたマップにしたいです。見ているだけで外出するのが楽しくなるようなマップにしたいんです。あれもダメだ、これもダメだではなく、安心して出かけてもらう、積極的に外に出てもらうためのアプリにしたい」。

寺中の話を聞いていると、やはりこの仕事はビジネスの効率を求めているのではなく、限りなく社会貢献に近いと感じる。

野地秩嘉（のじつねよし）

1957年東京都生まれ。早稲田大学商学部卒業後、出版社勤務を経てノンフィクション作家に。日本文藝家協会会員、人物ルポルタージュをはじめ、食や美術、海外文化などの分野で活躍中。著書は



『高倉健インタビューズ』『キャンティ物語』『サービスの達人たち』『ニューヨーク美術案内』など多数。『トヨタ物語』『トヨタに学ぶカイゼンのヒント』がベストセラーに。『TOKYOオリンピック物語』でミズノスポーツライター賞優秀賞受賞。近著は『日本人とインド人』（翻訳 プレジデント社）。

挑戦する 研究者たち CHALLENGERS



阿部正幸

NTTセキュアプラットフォーム研究所
上席特別研究員

研究には「塞翁が馬」 の視点と姿勢で臨む。 影響を与え合える関 係性の構築も研究活 動である

電子決済などの電子商取引や、ネット税務申告などの電子政府機能が普及しつつある現在、ネットワークやサービスの安全性についてはその重要性がますます高まっています。こうした中、現代暗号は安全性を保証する技術として活発に研究され発展しています。先導的研究を行い、革新的な技術を多数創出し実用化したことが評価され、2018年に情報通信および放送の進歩発展に著しい功績のあった方々に贈呈される前島密賞を受賞した阿部正幸NTTセキュアプラットフォーム研究所 上席特別研究員に、研究の進捗や研究者としてのあり方を伺いました。



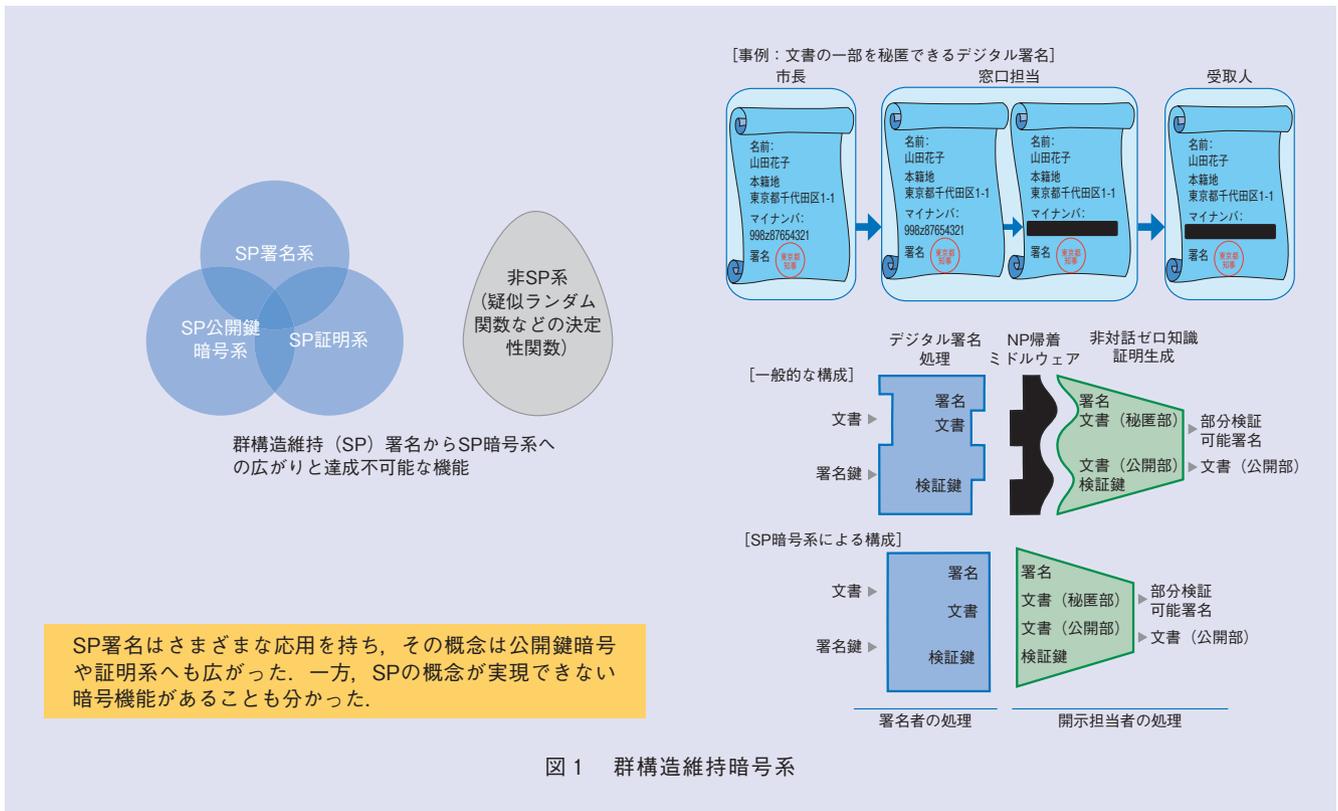
「できない」ことを明らかにする

前回のインタビュー以来、手掛けている研究についてお聞かせください。

私が追究している大きなテーマは安全な暗号プロトコルの構成です。元の情報を暗号化したりデジタル署名を付けたりとすることで必要な情報だけを必要な相手に安全に届ける、この手順のことを暗号プロトコルと言いますが、特に安全で効率的な暗号プロトコルへのアプローチが究極の目標です。一言で暗号プロトコルといっても、さまざまな要素が組み合わさって、幾重にも重なって構成されており、

研究対象も基礎研究から応用研究まで、広い範囲に及びます。中でも特に基礎となる部分は技術の進歩に沿ってチューンされていくことで変化していきます。まさに職人技的です。一方、基礎の上に積み重なっている技術は技術の進歩による変化を基礎の部分で吸収するので、これまでの技術や新しい技術を組み合わせることで対応できます。このような体系において、私は全体のバランスをかんがみて包括的な解と特化した問題に対する解の双方を求めるといった取り組みを展開したいと考えています。

前回、2013年のインタビュー以降、大きく3つの研究を手掛けています。1番目は、群構造維持（SP）暗号系で

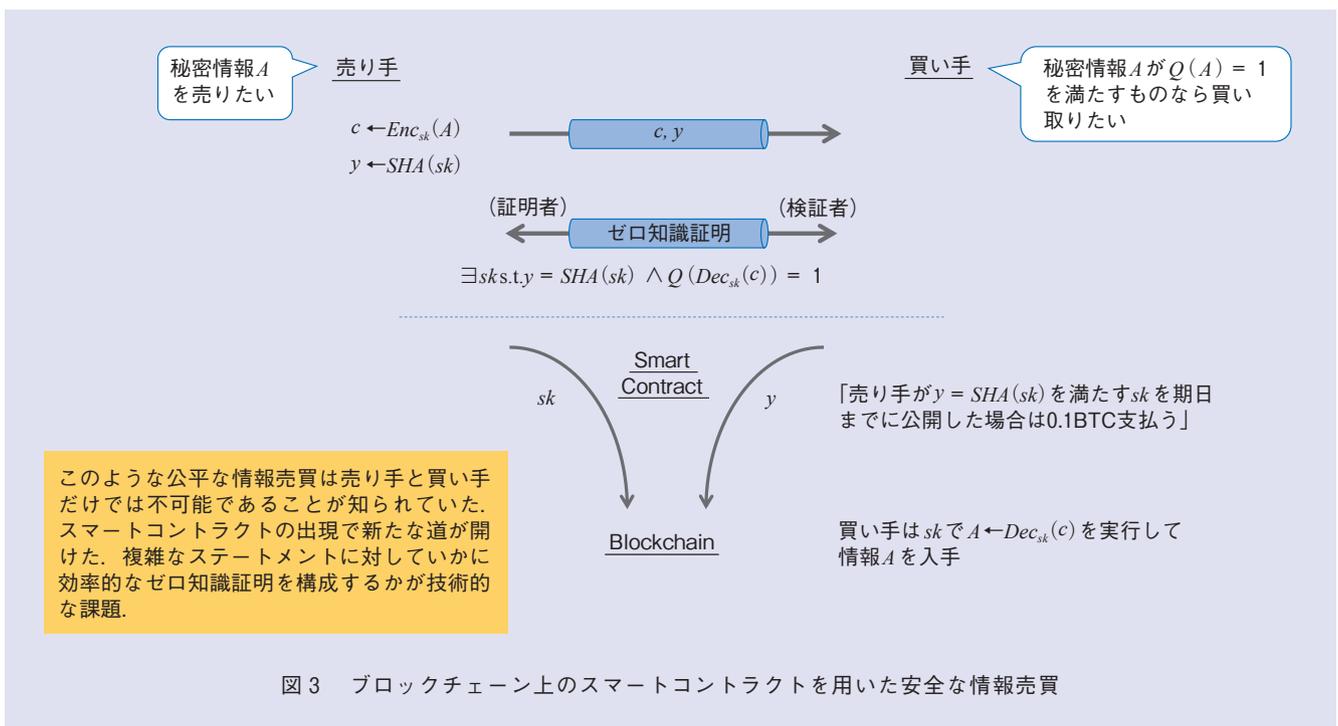
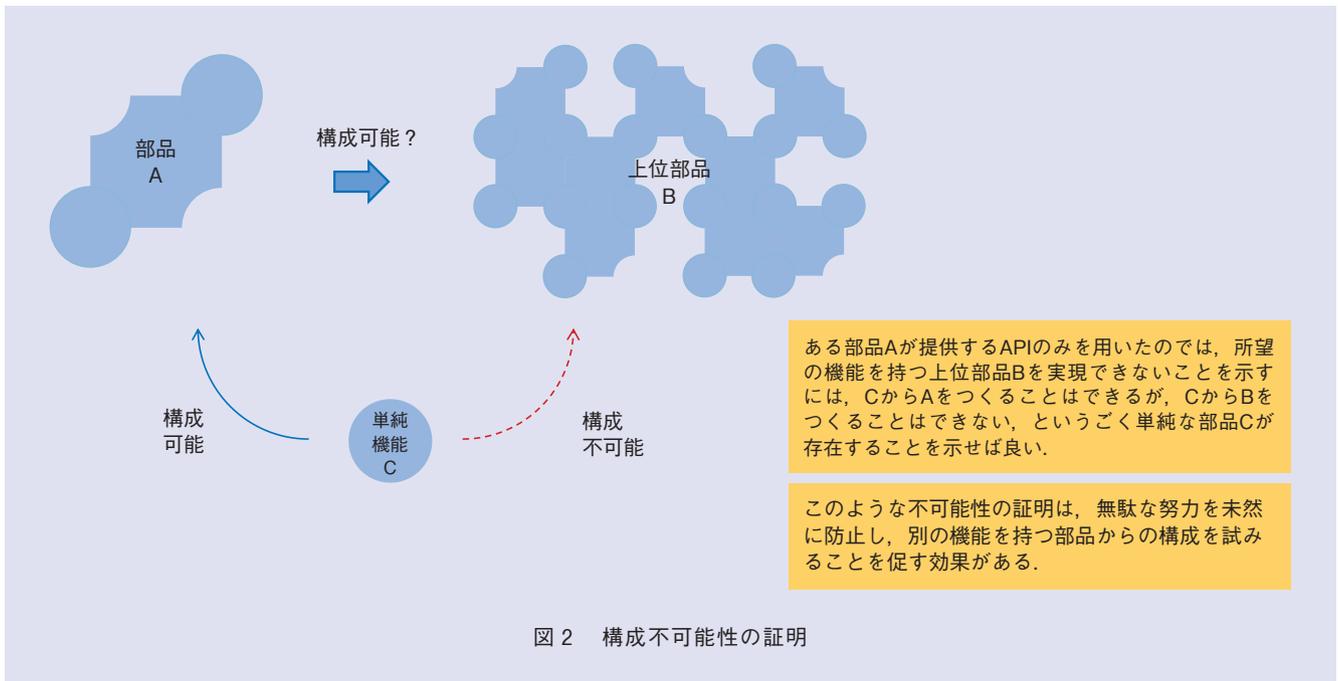


実現不可能な関数があることの証明です (図1)。SP暗号系は、統一されたインターフェースを持つ複数の暗号技術を組み合わせて生成される安全性の高い暗号系で、広く応用されていますが、この概念が実現できない暗号機能があることが判明し、それを解明・証明することです。2番目は、構成不可能性を証明することです (図2)。SP暗号系で、複数の機能を組み合わせて高度な機能を構成する場合に、ある機能のインターフェースのみを用いたのでは、所望する機能の構成ができないことを証明するものです。そして、3番目はスマートコントラクトを用いた安全な情報売買の方式で、基礎から応用までを手掛けています (図3)。

SP暗号系は、2009年の終わりにその着想を得て、2013年はSPデジタル署名を開発し、実現に近づいてきたという時期でした。ドイツのカールスルーエ工科大学との共同

研究により、高い安全性と相互接続性を両立するSPデジタル署名方式を世界で初めて開発しました。この成果は2017年8月に米国で開催された国際暗号学会主催のトップ会議 CRYPTO 2017 で発表しました⁽¹⁾。その後、デジタル署名以外の暗号機能についてもインターフェースを整えることを追究し続け、QA-NIZKと呼ばれる非対話証明系の開発にも取り組みました。

このプロセスを経て単にインターフェースを組み合わせるだけでなく、機能等を模索し、安全性が担保できない限界点、つまり「できない」ことを明らかにすることができました。この成果によって私たちは暗号分野で認知され、1つの研究分野を築くことができました。



限界点や不可能性を証明することは重要なアプローチなのですね。

不可能性の証明は、一見すると生産的ではないように映るかもしれませんが、不可能性を知ることはとても意味のあることです。暗号系の研究はコンピュータの技術が変わると攻撃者の水準も変わります。これは安全性の概念が変わることを意味します。ごく簡単にいえば、基盤となるコンピュータの部分の安全性がその上に積み重なった技術に影響を与えないようにするためには、影響を与える限界点を把握する必要があります。不可能性の証明は、「ここから先は通行止め」と知らせる行為であり、さらに不可能の本質を知ることにつながり、組み立ての新しい方法を誘導する非常に有意義な研究なのです。

これを活かして追究し始めたのが非対話証明の言語拡張です。非対話証明は一方向的に情報を送るだけで証明を完結させる技術です。デジタル署名とは違う暗号技術ですが、この分野でも限界点を追究しました。非対話証明の技術について、例えば、個人の年齢確認を行う場合には、生年月日を含む個人情報が記録された媒体（運転免許証やパスポート等）の提示を求められる場合がありますが、生年月日や個人情報は照会されたくないとき、年齢のみを提示できればこの問題は解消できます。これを可能にする技術がゼロ知識証明で、証明系といわれる暗号分野です。非対話証明暗号はSPと相性が良く、組み合わせて使われていました。そして、これらを組み合わせてもっと大きな事実を証明できないかと考えたのです。例えば、20歳以上で、自動車運転免許証を保持していて、社員2000人以上の企業に勤務している等、複合的な事実を証明するような証明系に拡張することを追究し始めました。ところがこれは難しいことが分かり、現在はそれが単に難しいだけなのか、不可能であるのかを明らかにすることに挑んでいます。

暗号系の研究はそれぞれの要求に合わせた安全性を考えていくことです。どこまでが暗号理論で守れるか、サーフェイスをしっかりと示すのが仕事の1つで、新しい技術が生ま

れるたびに安全性の意味や使い方を検討します。スマートコントラクトはブロックチェーンを支える非対話証明の技術の応用で、自動化された契約行為を手助けします。当時の技術は非効率で、安全性が明確に示されていなかったのです。これらを追究しようとヨーロッパのポスドク（博士学位を取得した後、任期制の研究職に就いている人）とともに応用系、ブロックチェーンの分野に初めて挑み、デジタル情報の安全な売買の新しい方法を提案することができました。まだ検討すべきことがありますので継続して取り組んでいきたいと考えています。



人との連鎖が研究成果につながる

研究活動を充実させるために心掛けていらっしゃることはありますか。

暗号プロトコルの研究分野は、かつては比較的小さなコミュニティで、研究対象も限られていました。しかし、セキュリティが一般的な概念となって研究のすそ野もかなり広がったため、学会でも隣のセッションで隣接する分野について議論されていることが十分に理解できないこともあります。

こうしたときに助けになるのは、アンテナを高くすることや過去の論文の共同執筆者や友人、知人の存在です。情報収集や研究を自分だけで成し遂げるのは大変ですが、友人や知人等との交流から新しい情報に触れることができます。

前述のスマートコントラクトの研究はまさにその事例です。その分野で良い成果を上げたかつての研究仲間であるポスドクとの会話が発端となり、私はスマートコントラクトを追究し、価値ある報告をすることができました。彼との出会いはスペインで開かれた学会でした。当時、まだ学生だった彼が学会で、私が過去に手掛けていた研究テーマについて発表していたのです。とても興味深い発表でしたから私は彼に「良い発表ですね！」と声をかけひとしきり



話をしました。そのときはそれで終わったのですが、数年後に突然「大学院を卒業するのであなたの下で研究をしたい」とのコンタクトがあり、彼との研究活動が始まりました。おそらく直接話したことが一度もなければ実現していなかったでしょう。「人となり」を知っていたからこそだと思えます。

こうした経験からも人のネットワークは研究者にとって死活的な問題だと考え、友人や知人との関係はとても大切にしています。学会等、機会があれば積極的に出かけてさまざまな人と知り合っ、研究につなげています。長い間続けてきたので、友人や知人も現在では権威あるポストについている方が多くなり、彼らが指導している学生などとのつながりも生まれ、新しい研究活動が生まれるという良い循環ができています。人との連鎖が研究につながっていくことが本当にうれしいです。

充実したつながりが研究に良い影響を与えるのですね。どんな研究者の周りに人は集まるのでしょうか。

自分の知らないことを知っていて、それを多く持っている研究者の周りには自然と人が集まってきます。自らがそのような人材であることはもちろん大切ですが、これに加えて研究活動はある意味で寝食を共にする間柄でもありますから、特にフィーリングの合う方とのつながりがあればもっと良いと思っています。

若い方々はもう少し計画的に研究者どうしがつながっていくのかもしれませんが、私は研究者の「人」の部分とのつながりを大切にしたいのです。なぜなら、研究は私にとっては生活の一部ですし、人生の大半を費やしてきたのが研究活動です。それを自分が大切にしていることから切り離すことはしたくないですね。

また、研究は基本的にアウトプットを求められますから、それを創出するためにもインプットが重要となります。人とのつながりや余暇等、何からインプットするかは人それぞれですが、私は世界中の人とのつながりから得ています。

これを研究活動と連動させることができるこの環境をとっても幸せだと思っています。

ところが、2020年は新型コロナウイルスの感染拡大によって、人とのつながり構築を実行できませんでした。過去では、東日本大震災のときにも同様に人との連鎖が中断しました。当時は私のグループに入る予定だったポストが震災によって来日を躊躇したのです。この状況も、日本の安全性を来日予定のポストたちに伝えることで徐々に解消されましたが、今回の新型コロナウイルスの感染拡大はそのときと状況が違います。私たちが海外に赴くことができないし、海外の研究者の来日も難しいのです。日本に住んでいる外国籍の研究者はいても、これを機に来日しようという研究者は限りなく少ないのです。既知の仲をリモートでつなぎ、彼らの紹介で新しい出会いもありますが、予期せぬ出会いが自然発生的には起こり得ないのが残念です。



若い研究者を励ます言葉は自分への励ましでもある

暗号分野の先駆者として、この分野の発展をどのように眺めていますか。

暗号分野の研究は1970年からの積み重ねによって成熟してきました。若い研究者の参入によって多岐にわたる研究に取り組みされてきた結果、すそ野がとて広くになりました。技術が成熟する過程は核となる部分のみが高く積み上がるのではなく、シーツをつまみ上げるようにすそ野が形成されて進んでいくのではないかと思います。多くの研究者がさまざまな可能性を模索することが横への広がり、最先端を追究していくことが縦の伸びです。その形状は崩れることがないというのが研究の成熟を表現しているのでしょうか。

暗号分野もかつては結構なスピード感で新しいアイデアが発表されていましたが、すそ野が広がった今では周辺領域も十分に踏まえたいうで論ずる必要があります。さらに、

当初はページ数にして10ページ前後の論文でも受け入れられてきましたが、最近では、30ページ、40ページは当たり前になってきたので書き上げるのも大変です。一方で、すそ野が広がり、隣の研究者のしていることが分からないほどに発展してきたというのは、研究者それぞれの頑張りや意味しているし、この分野でオンリーワンになれる可能性が高いことを意味していて喜ばしいと思います。

ただ、どのような研究分野においても、基礎となる部分の技術改革が起きるとそれまでの研究がリセットされる可能性をはらんでいます。例えば、通信ネットワークのクロスバ交換機がデジタル交換機に置き換わり、それがルータに置き換わるといった具合に、過去の技術が全く別の概念の技術に置き換わっています。暗号分野でも基礎に近い分野は同様のことが起きています。暗号と密接なかわりのあるコンピュータも、真空管から発展して量子コンピュータの時代が視野に入ってきました。従来の数学的な暗号を破れる量子コンピュータに対応する暗号を構築しなければならない時代が来ています。これに伴い、研究者は全く新しい技術を習得しなければならないのです。一方で、私が追究している暗号プロトコルは応用分野も視野に入りますからこれまでの知見を活かせると考えています。

研究者としてのあり方と、後輩の研究者の皆さんへアドバイスをお願いいたします。

研究者とは野生生物のように、それぞれが全く違う個性を持ってそれぞれに意味や役割があり、研究コミュニティというエコシステムを確立させる存在だと思います。研究者の特性が画一化されていたらインスパイヤされないでしょうし、新しいものも生まれませんのではないのでしょうか。別の言い方をすれば、研究者どうしの刺激（専門性や成果）によって各研究者が準備していた何か（研究）に火が付く、影響を与え合う存在だとも思います。

若い研究者の皆さんには知識をギブアンドテイクしたときはすぐに借りを返そうとせず、短いスパン、狭い視野で

考えず、物事を判断する際には拙速にならず、時間をかけることも忘れないようにしていただきたいです。私の好きな故事である「塞翁が馬」の解釈は、さまざまあると思いますが、私は「ロングスパンで物事を考えよ」という意味だと思っています。時間的に長い目で物事を見て、横のつながりを広く持って物事を判断していけたらいいと思います。

技術革新によって自分が積み上げてきたことがリセットされる、世代交代が起きることは正直なところ、不安を感じることもあると思います。NTTの上席特別研究員は次世代を育成し、機会を与えることも仕事の1つなのですが、後進がどんどんと成果を上げて、つながりを築いていくことはとても喜ばしく思います。一方で、上席特別研究員には1人の研究者としての活躍も求められていますから、活躍する若い研究者が発表する成果もキャッチアップしていかなければいけません。若い研究者の活躍を目の当たりにして、「私はこの先、本当についていけるのだろうか」と不安になることもありますが、若い研究者と直接対決ではなくても、私の手掛ける研究分野とニーズと興味がうまく合致してくれたら、不安を乗り越えて活動していけるだろうと思います。私自身が若い研究者を励ます言葉は自分への励ましだと思っています。これからも、今の立場に胡坐をかかなく常に挑み続けていきたいです。

■参考文献

(1) <https://www.ntt.co.jp/news2017/1707/170727a.html>



クラウドで新しい働き方を お客さまと一緒にデジタルイノ ベーションの実現をめざす

ネクストモードは「クラウドで新しい働き方を」をキャッチフレーズとして、基本的に全社員がテレワークでパブリッククラウド関連のサービス、インテグレーションを提供している。今後さらなる普及が見込まれるクラウド市場において、時代の先端を行く業務スタイルによる事業の取り組みと、セルフブランディングによる社員個々が活躍する企業カルチャーへの思いを里見宗律社長に伺った。



ネクストモード 里見宗律社長

自社で利用しているサービスを 提供するバーチャルショールーム

◆設立の背景と目的、事業概要について教えてください。

ネクストモードは、NTT東日本とクラウド（Amazon Web Services：AWS）に関するコンサルティング・設計・構築・運用を中心にビジネス展開を行う国内屈指のAWS技術集団であるクラスメソッド株式会社の出資により、2020年7月に設立されました。ガートナーによるバイモーダルITと呼ばれているMODEの概念で、安定性や不変性を重視するMODE1と、スピードや柔軟性を求めるMODE2がありますが、比較的MODE1に近いNTT東日本と、MODE2に近いクラスメソッドが連携して、次なるMODE（MODE1とMODE2のハイブリッドで事業をドライブする概念）をめざそう、ということで社名を「ネクストモード」としました。

パブリッククラウド導入による業務改善やDX推進等のニーズが顕在化してきている中、クラウドに関する認知が十分ではないことにより、クラウドの導入に躊躇しているお客さまも多数いらっしゃいます。そこで、クラウドをはじめとする新しい技術を多くのお客さまにとって、もっと身近なものにすることをめざしています。

事業はAWSに限らず、パブリッククラウドにおけるPaaS（Platform as a Service）やSaaS（Software as a Service）をベースとし、①IaaS（Infrastructure as a Service）を中心とした「SI構築（コンサルティング含む）」、②クラウドの監視・運用代行をサポートす

る、運用アシスタントサービスを提供する「保守運用」、③コロナ禍で急速に普及が進むDocuSignやAsana、Google Workspace、さらにはゼロトラストネットワーク商材であるNetskopeやOktaといった「SaaS導入支援」、の3つのドメインで構成されています。クラウド上のアプリケーション構築等については、専門家を擁する最適なパートナーと連携してお客さまに提供しています。

お客さまと一緒にデジタルイノベーションを実現することをめざしていくうえで、自分たちがまずは実際にサービスを利用して自らがショールームとなることで、まさに「お客さまと一緒に」を体現しています。

◆事業を取り巻く環境はどうか。

情報システムという観点からみると、AWS社の話では世界の9割近くが自社内にコンピュータを保有するオンプレミスで、クラウドはまだ1割程度とのことです。お客さまの状況としては、クラウドの利用はマーケティングでいうところの“Early Adopter”から“Late Majority”に差し掛かってきたくらいのレベルの普及で、まさにこれから一気に伸びていこうとしている市場です。国内にもいくつかクラウドをベースとした事業展開をしている会社がありますが、現在の市場環境を考えるとそれぞれが競合会社というよりも、一緒になってクラウドを盛り上げていこうというフェーズです。

このような環境の中、当社としては先頭グループにいるお客さまではなく、クラウドの導入に対して様子を窺っている第2集団のお客さまをターゲットとしてビジネス

展開をしています。コロナ禍による影響なのか、想定を上回る引き合いが来ていて、この状況・原因分析もできないほど忙しくなり、案件に対応できずにお断りしているような部分も出てきています。おかげさまで会社設立後半年も経たないうちに事業計画を達成し、このままいくと1桁上のレベルをかなり上回る利益を出せるのではないかと思います。

◆テレワーク・リモートワークを支える企業カルチャー

◆全社員がテレワーク・リモートワークとのことですが、お客さまとの対応もリモートなのでしょうか。

ネクストモードでは、基本的に、テレワーク・リモートワークで働いている環境や、自社で利用しているサービスを、そのままお客さまにも販売しています。つまり、自らがショールームとなっているのです。会社として最低限の登記場所ではありますが、全社員が好きな場所で働いています。

もちろん、お客さま対応につきましても自らがショールームとして、リモートで行っています。全社員を挙げて技術イベントやセミナーへの登壇、コミュニティ活動、さらにデジタルメディアへの登場等を行い、そこで会社紹介をすると、世の中の関心が少しずつクラウドに向いてくる中で非常に特徴的な事業形態であり、しかもショールームがお客さまの目の前にあることで問い合わせや引き合いが来る、というインバウンドの営業をしており、これが非常に効果を上げています。

テレワークが主体の業務形態なので、社員個々人のパフォーマンスが重要になってきます。そこで、

- ① オープンであること
- ② 楽しく働くこと ひらめき、意欲、情熱を大切に
- ③ フラットな人間関係（パートナーシップ）を保つこと
- ④ 全員がリーダーシップを持つこと
- ⑤ 謙虚であること 感謝の気持ちを持つこと
- ⑥ いいところを凝視し、人・組織をけなさないこと

⑦ フィードフォワード 早く失敗して、次に活かしていくこと

⑧ テクノロジー好きであること

を求める人物像として掲げ、全社員で共有しています。そして、これを実践していく中で、お互いに役職名ではなく「さん」付けで呼び合う、アイデア・ノウハウはWikiで社内に積極的に広める、社員の会話はオープンな場で行う（ダイレクトメールによるコソコソ話の禁止）等のカルチャーづくりと大幅な権限移譲を行っています。また、情報セキュリティへの留意は必要ですが、社外に対しても積極的に発信していくことも推奨しており、それがセルフブランディングとなることで各社員のブランド力が高まることにもつながっています。これは、社内に関じた話ではないので、世の中の技術者・研究者1人ひとりがセルフブランディングを行い、技術力を世界にアピールしていくことで、それが技術の発展や仕事にもつながるはずだと思います。

◆今後の展望についてお聞かせください。

会社設立から間もないこともあり、スモールスタートをしてきたところですが、ありがたいことに、お客さまからの引き合いに対応できず、ご迷惑をおかけせざるを得ない状況になっています。この解消のために、人材の採用と育成が最優先の課題です。

これにより、お客さまのご要望にこたえていくことができるばかりでなく、新たに仲間となる社員全員がネクストモードの求める人物像に成長し、セルフブランディングにより世の中に発信していくことで、さらにお客さまの関心と呼んで引き合いにつなげていくという、良い循環をつくっていききたいと思っています。そして、それを大きな原動力として、クラウドの普及とその先の働き方の改革につなげていきたいと思っています。

クラウドで提供されているサービスを組み合わせて 新サービスを実現

取締役インテグレーション事業部長
西澤 徹訓さん

人材育成が大きな課題

◆担当されている業務について教えてください。

クラウドのシステムインテグレーションを担当するチームの責任者をしています。ネクストモードは技術者が社員の約8割を占めており、そのほとんどがインテグレーション事業部に所属しています。その中で、特に、



西澤徹訓さん

クラスメソッド社のパブリッククラウド活用ノウハウをネクストモードに展開し、それを実現していくことをメインに行っています。

当社で行っているクラウドのシステムインテグレーションは、クラウド・プラス・インフラレイヤがメインで、パブリッククラウドで準備されている各サービスを組み合わせアーキテクチャをつくり、それをベースとした各機能の部品を用意します。それらを利用した最終的なアプリケーションは、お客さまもしくはパートナー会社で担当していただきますが、クラウドの最適な使い方のアドバイスと、そのための環境づくりは当社で行っています。

クラウド市場が急速に立ち上がってきている中でインテグレーションを行っていくにあたり、人材育成というのは大きな課題で、継続的に取り組まなければいけないものだと思っています。技術的なスキルアップという部分に関して、なるべくモチベーション駆動、つまり本人がやりたい分野・部分に取り組んでもらうことが、一番パフォーマンスが出るという考えの下、研修やトレーニング、OJTを行い、そこから先は本人が自発的に取り組んでもらうよう働きかけをし続けることによって対応しています。

◆ご苦労されている点を伺えますか。

コロナ禍の最中に生まれた会社ということで、基本的

に会社をつくるというところがすごく大変でした。私たちとしてはクラウドを使った新しい働き方を提案しているというキャッチフレーズの下、パブリッククラウドあるいはSaaS等により、お客さまの働き方を変えていけるようなものを次々と採用・提案していくことを行ってきましたが、単にツールだけで解決しない問題もあります。しかし、私たちが、既存のサービスを組み合わせお客さまに提供して、ご支援にも活かそうとやってきた取り組みが、ここにきてやっと上手く回ってくるようになったと思います。

組織づくりという意味では、会社設立初日こそ全員で集まったのですが、それ以降、全員で集まったことは一度もありません。基本的にオンラインでしかコミュニケーションをとれないので、一般的にいわれているコミュニケーション不足は常に課題としてはあります。それならばと、私たち自身が工夫して週例会や月報会等のかたちで施策展開して、その中でお互いのプライベートを含むコミュニケーション、情報交換、ディスカッション、チームづくりを行ってきて、それが奏功して非常に良いムードのチームができあがっています。

クラウドで日本における働き方改善に チャレンジ

◆今後の展望について教えてください。

ありがたいことに、多数お引き合をいただいております。まさに大きなビジネスチャンスに向き合っています。そして、クラウド市場は今後非常に大きく広がっていくビジネス領域だと感じていますので、2021年度、そして数年先まではアクセルを踏んで、とにかく大きなビジネスを動かせるようにしていきたいと思っています。そのためにも体制強化を図り、パブリッククラウドのご相談であれば、ネクストモードに任せれば安心だとお客さまに言っていただけるようにしていきたいと思っています。そして、お客さまのご要望におこたえしていく中で、お客さまの働き方を変え、さらには効率が悪くといわれている日本の働き方を少しでも改善することに、一石を投じられるようチャレンジしていきたいと考えています。

これを実現していくためにも、私たちの力のみでできることは限られてくるので、NTTグループの会社をはじめとするパートナーとの連携も広げていきたいと思っています。

ネクストモード ア・ラ・カルト

■リモート雑談

社内のコミュニケーションツールとして“Slack”というチャットツールを利用していますが、その中で「雑談チャンネル」が一番盛り上がっているそうです(写真1)。社員は基本的にリモートワークなのですが、なぜか数人の出社しているメンバが、「今日お昼何食べようかな」という話をしていれば、ほとんど会社に出社することのない社員から会社付近の店を知っているかのようなアドバイスが飛び交うなど、まさに雑談コミュニケーションが活発に行われているようです。

■ワーケーション

テレワークが基本の会社なので、もちろんリゾート地等でくつろぎながら仕事をする、「ワーケーション (work と vacation を合わせた造語)」も可能です。里見社長自ら北海道や沖縄等で積極的にワーケーションされており、そこに社員も合流したり、仲の良い社員どうして旅行がてら週末をはさんでワーケーションしたりと、結構盛んに行われているようです(写真2)。中には実家への帰省ついでのワーケーションもあるようです。新型コロナウイルスには万全の対策で臨んでいるのですが、旅行の費用やリゾート地でリラックスしている中での仕事、逆に家族を帯同しない場合の家族からの視線等、会社の外的環境による制約もあるようです。

■オンライン懇親会

テレワーク基本の会社とはいえ、全員集合の懇親会を企画したこともあるそうです(写真3)。ところがコロナウイルスの関係等もあり、集合型は断念し、結局オンラインで行ったとのこと。フードのデリバリー等リモート懇親会用のサービスを使い、オンラインビデオ通話サービスで自分のアバターがある部屋に行くとその部屋にいるメンバと雑談ができ、しかも近くに行くとその声がよく聞こえるようなオンライン通話スペースをつくり、そこを懇親会会場にしました。その中には、オンラインのアンケートツールを使って投票したり、オンラインのクイズサービスを使って一番成績が良かった人を表彰したり、そしてオープンな会社ならではの締め挨拶はルーレットで決める等、オンラインのツールをフル活用して、大いに盛り上がったそうです。



写真1

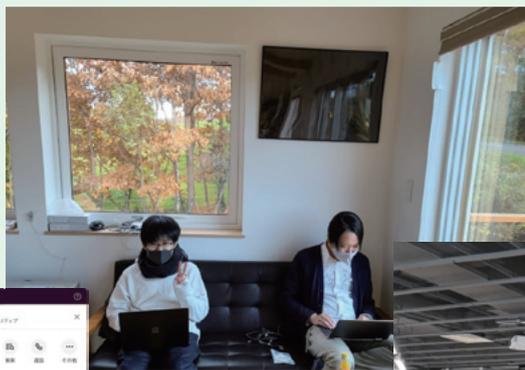


写真2



写真3

補強部材の設置が容易で通路も設けられる 耐震補強技術の開発

近年の大地震の頻発、南海トラフ地震・首都直下地震等の発生確率の高まりから、建築物の耐震補強の推進が急務となっています。NTTファシリティーズでは、建築物の長期継続使用や地震後の事業継続性確保といった市場ニーズにもこたえとともに、耐震補強に伴う建築物の運用への影響を少しでも軽減することを考えました。ここでは、NTTファシリティーズが開発した「補強部材の設置が容易で通路も設けられる耐震補強技術（ユニット型制振補強システム）」について紹介します。

新たな耐震補強技術開発の背景

■耐震補強の重要性

1995年1月17日に発生した阪神・淡路大震災では、住宅・建築物の倒壊による大きな被害がみられました。建築基準法に基づく現行の耐震基準は1981年6月に導入されましたが、阪神・淡路大震災では特に1981年以前に建築されたものに大きな被害が発生しました。そのことを契機に「建築物の耐震改修の促進に関する法律（耐震改修促進法）」が制定され、2013年11月の改正では病院、店舗、旅館等の不特定多数の者が利用する建築物および学校、老人ホーム等の避難弱者が利用する建築物のうち大規模なものなどについて、耐震診断の実施が義務付けられるようになりました。

この改正の背景には、近年の新潟県中越地震（2004年）、福岡県西方沖地震（2005年）、岩手・宮城県内陸地震（2008年）、東北地方太平洋沖地震（2011年）といった大地震の頻発があり、改正後も熊本地震（2016年）、大阪府北部地震（2018年）、北海道胆振東部地震（2018年）と続いています。このように大地震はいつでもどこで発生してもおかしくない状況にあります。特に南海トラフ地震、日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震および首都直下地震については、発生確率の高まりが指摘され、ひとたび地震が発生すると被害は甚大なものになると想定されていることから、あらゆる対策の大前提として建築物の耐震補強を推進することが求められています。

■市場ニーズにこたえるために

建築物の耐震補強に関しては、耐震改修促進法の改正、南海トラフ地震・首都直下地震等への対応といった背景に加えて、建築物の長期継続使用や地震後の事業継続性確保等の市場ニーズも高まってきています。言い換えれば、建築物が大地震に耐える（倒壊しない）だけでなく、大地震後も大がかりな補修工事をすることなく継続使用が可能で、さらには事業継続性も確保することが求められているとい

えます。

このような市場ニーズに対して、建築物の新築では制振構造が採用されることも多くなってきています。制振構造の建築物では構造骨組に取り付けた制振ダンパーが地震エネルギーを吸収し、大地震時はもとより、その後の余震に対しても構造骨組の損傷進展（補修費用の増大）を抑制することができることから、建築物の長期継続使用や地震後の事業継続性確保に有効なためです。

一方、建築物の耐震補強では「構造骨組に耐震補強部材（耐震壁、鉄骨ブレース等）を追加する補強（＝在来補強）」が大部分であり、大地震に対して建築物を倒壊させない（構造骨組の損傷進展は許容する）設計が一般的となっています。構造骨組の損傷抑制が求められる場合には、耐震補強部材の設置個所数の大幅な割増しにより対応することも考えられますが、建築物の長期継続使用や事業活動に必要な使用性・フレキシビリティ等を維持することが困難になり、市場ニーズに十分にこたえられない場合も多いと思われるます。

建築物の耐震補強でも「耐震壁や鉄骨ブレースの代わりに、構造骨組に制振ダンパーを取り付けて制振構造にする補強（＝制振補強）」の事例もあるものの、構造骨組の損傷抑制に有効な制振補強が広く採用されないのは、在来補強に比べて設計の難易度が高く手間がかかることに加えて、在来補強とも共通するいくつかの課題があるためと考えられます。

そこでNTTファシリティーズでは、既存建築物の長期継続使用や地震後の事業継続性確保に有効な制振補強をより採用しやすいものにするため、従来の制振補強の課題を解決するとともに、設計の難易度や手間を軽減する設計ガイドラインや標準設計図を備えた「ユニット型制振補強システム」を開発することにしました。

ユニット型制振補強システムの概要

■従来の制振補強の課題

制振補強部材の取付け方法は、図1のようにその形状によっていくつかの型に分類されます。従来の制振補強ではシアリンク型や壁型の取付け方法が採用されることが多いのですが、いずれの取付け方法も既存建築物の耐震補強で採用するにあたっていくつかの課題があります。

シアリンク型では、図1(a)のように制振補強部材の全周にわたってアンカーを施工するため、既存柱・梁との一体性を高めることができますが、耐震補強工事に伴って騒音・振動・粉塵が発生します。また、建築物の用途によっては、制振補強部材と既存柱・梁とを一体化するためのコンクリート打設による下階への水漏れリスクが問題になる場合があります。さらに、建築物の使用状況によっては制振補強部材が通路や窓に干渉し、建築物の使用性維持が課題となります。

一方、壁型では、図1(b)のように建築物の使用状況に応じて通路や窓を確保しやすいですが、既存梁の中央部に制振補強部材が取り付くことから、地震時には既存梁の中央部に集中的に大きな応力が作用します。そのため、制振補強部材の取付けに際して、既存梁を補強したうえで上下階までボルトを貫通させて固定するという大がかりな工事が必要になる可能性が高く、上下階での工事発生による建築物の運用や工事費・工期への影響が大きいことが課題となります。

以上のように、従来の制振補強では①施工性向上、②建

築物の使用性維持、③既存柱・梁の応力負担軽減といった課題があり、これらの課題が解決できれば制振補強をより広く採用できるようになると考えられます。

■ユニット型制振補強システムの特徴

従来の制振補強の課題を解決するため、図2のように①施工性向上、②建築物の使用性維持、③既存柱・梁の応力負担軽減に有利な「ユニット型制振補強システム」を考案しました。

1番目の特徴は「施工性向上」です。本システムでは「ユニット型」という名称のとおり、設計・製作・施工がしやすいように制振補強部材を数種類のユニットで構成し、建築物の補強位置によって階高・スパンが異なる場合でも、一部のユニットの部材長の調整のみで対応できるようにしています。また、力の流れをシンプルにし、アンカー本数を削減することで、工事に伴う騒音・振動・粉塵の発生を抑制しています。さらに、制振補強部材の取付けにコンクリートを使用せず、工事は鉄骨部材の取付けのみとすることで、コンクリート打設による下階への水漏れリスクをなくしています。

2番目の特徴は「建築物の使用性維持」です。本システムでは制振補強部材の上部に新設梁を設けて、新設梁にV字ブレースを取り付けることで、壁型の制振補強部材取付け方法のように既存梁に大きな応力を作用させることなく、通路や窓に使用できる大開口を確保できるようにしています。

3番目の特徴は「既存柱・梁の応力負担軽減」です。本システムでは既存柱・梁との接合部をすべて「ピン接合」

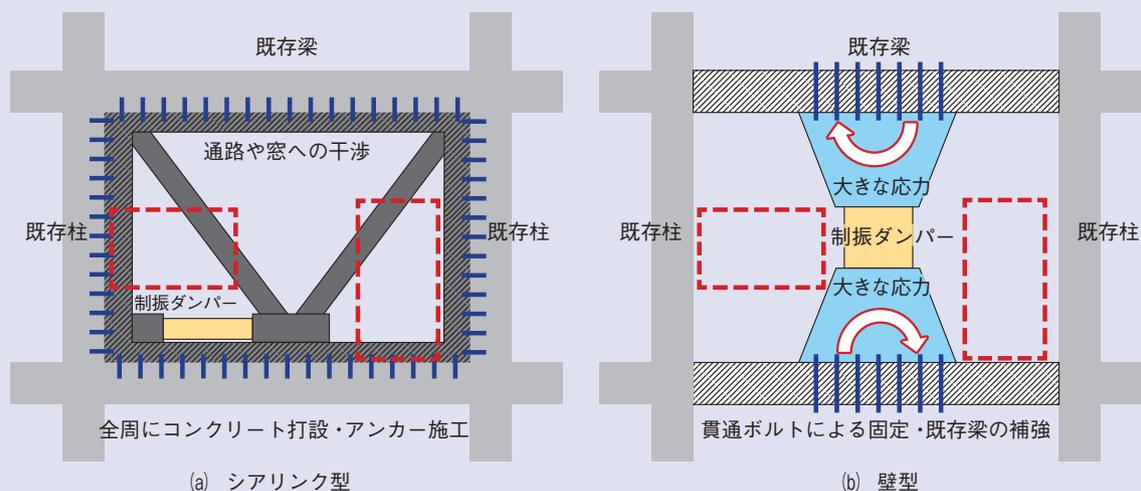


図1 従来の制振補強の課題

- ①施工性向上
(ユニットで構成, アンカー本数削減, コンクリート打設不要)
- ③既存柱・梁の応力負担軽減
(既存柱・梁の補強不要, 当該階の工事のみ)

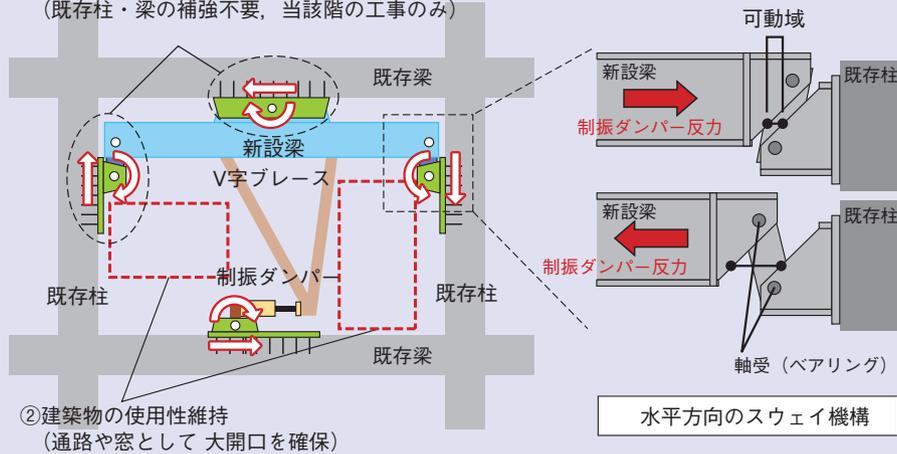


図2 ユニット型制振補強システムの特徴

とすることで、地震時においても既存柱・梁に集中的に大きな応力が作用することがないようにしています。これにより、制振補強部材の取付けに際して既存柱・梁を補強する必要がなく、上下階での工事発生による建築物の運用や工事費・工期への影響を軽減することができます。

特に既存柱との接合部には、2個の軸受(ベアリング)を用いた独自の「スウェイ機構」を採用することで、既存柱のさらなる応力負担軽減を図っています。また、スウェイ機構の可動域の範囲で施工誤差を吸収することもできるため、施工性向上にも寄与します。

なお、ここでは建物の構造種別が鉄筋コンクリート造の場合を想定して説明していますが、本システムは鉄骨造等の他の構造種別にも適用可能です。

■ユニット型制振補強システムの適用シーン

ユニット型制振補強システムは施工性に優れていること、耐震補強工事が制振補強部材を設置する階のみで完結し工期短縮も見込めることから、建築物を運用しながら耐震補強工事を進める場合に適しています。また、コンクリート打設による下階への水漏れリスクがないため、精密機器を収容する部屋の上階での工事も可能です。

制振補強部材の形状の工夫により、通路や窓に使用できる大開口を確保できるため、事務室内や窓際でも建築物の使用性を維持しつつ補強部材を設置することが可能です。また、建築物の用途変更に伴い、既存の耐震壁を全面的に撤去し、本システムを設置することで耐震性能向上と建築物の使用性向上を両立させ、建築物の資産価値を向上させ

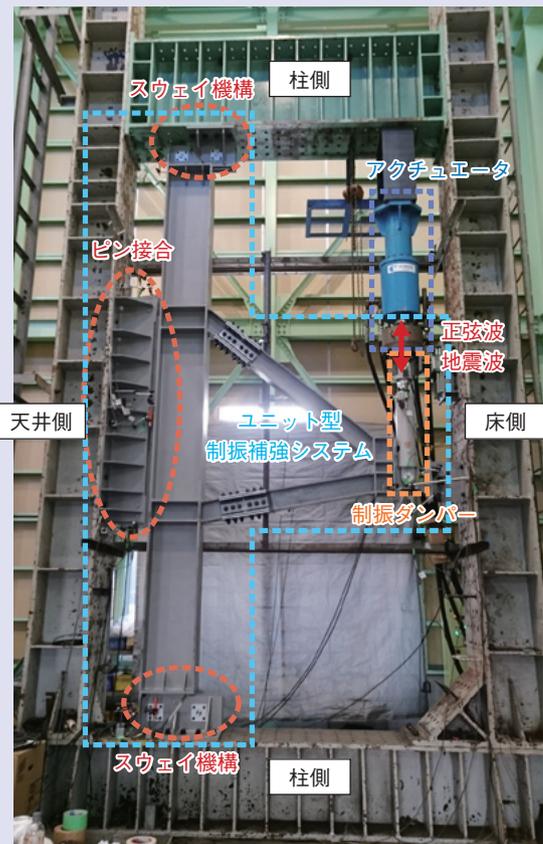


図3 構造性能確認試験の状況

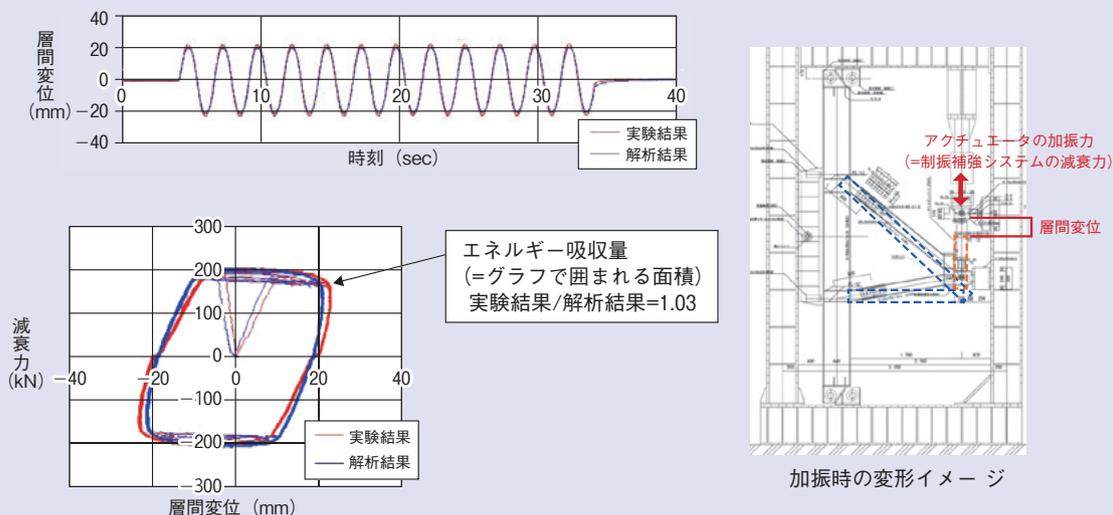


図4 エネルギー吸収性能の検証結果

ることも考えられます。

独自の構造により、既存柱・梁の応力負担を軽減できるため、既存柱・梁の強度に余裕がない建築物でも適用しやすいというメリットもあります。

ユニット型制振補強システムの構造性能確認試験

ユニット型制振補強システムが開発意図どおりの構造性能（エネルギー吸収性能、応力伝達機構）を有することを検証するため、本システムの試験体を製作し、大地震を想定した動的加振による構造性能確認試験を実施しました。

図3のように、試験体は試験設備の形状に合わせて90度回転させて設置し、重力加速度の影響を与えないように変位制御による加振を行いました。

1番目の検証項目であるエネルギー吸収性能（地震時に制振ダンパーがエネルギー吸収する能力）は、本システムを加振したときの減衰力-変位関係により表されます。本試験では図4のように減衰力-変位関係が解析結果と非常によく対応し、開発意図どおりのエネルギー吸収性能を有することを確認することができました。

2番目の検証項目である応力伝達機構（既存柱・梁の応力負担を軽減するために設けたピン接合やスウェイ機構の働き）は、本システムを加振したときの応力や変位の状態により確認することができます。本試験では試験体各部の変位を詳細に計測して解析結果と比較することで、独自の応力伝達機構が有効に機能することを確認することができ

ました。

なお、加振波は正弦波および地震波とし、最大変位や周期の異なる多数の加振波で検証することで、建築物や地震動の特性によらず安定した構造性能を発揮できることを確認しました。また、長周期地震動に伴う長時間繰り返し加振や建築物の供用期間中の地震の繰り返しを想定した300秒間の連続加振においても、本システムが必要なエネルギー吸収性能を維持し損傷しないことを確認しました。

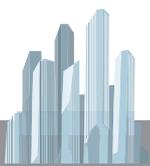
今後の展開

NTTファシリティーズでは、既存建築物の長期継続使用や地震後の事業継続性確保に有効な制振補強をより採用しやすいものにするため、従来の制振補強の課題を解決する「ユニット型制振補強システム」を考案し、開発意図どおりの構造性能を有することを検証しました。今後は実建物への導入検討を通して、ユニット化の徹底による施工性のさらなる向上や工事費削減に向けた改良に取り組み、耐震補強工事における適用シーンを増やしていきたいと考えています。

◆問い合わせ先

NTTファシリティーズ
 研究開発部 ファシリティ部門 建物ソリューション担当
 TEL 03-5669-0823
 FAX 03-5669-1652
 E-mail nakaga55@ntt-f.co.jp

明日のトッパー



NTTコミュニケーション科学基礎研究所

安部川直稔 特別研究員

運動学習には「眼と腕の位置関係を一定に保つ」ことが重要。 運動に関する脳内の働きを解き明かす「感覚運動生成」の研究

「ボールを良く見る」など、スポーツの世界ではよくヒトの「眼」について言及されます。今回は、特に無意識下の運動について、眼と腕の関係性を解き明かす「感覚運動生成」の研究に従事し、スポーツやユーザーインタフェースなど実社会への新たな価値提案をめざす安部川直稔特別研究員にお話を伺いました。

◆日本電信電話株式会社NTTコミュニケーション科学基礎研究所（2005年4月）、同研究主任（2013年7月）、同主任研究員（2016年7月）、同特別研究員（2020年4月）、2012年10月～2014年3月 京都大学情報学研究科知識情報学専攻社会人博士課程。2015年3月～2016年3月 University College London, Institute of Cognitive Neuroscience客員研究員。



NTTの基礎研究—感覚運動生成とは

◆研究されている内容を教えてください。

私はもともと「人間が賢いとはどういうことなんだろう」という点に興味があり、大学の卒業研究では画像のパターン認識、つまり現在トレンドとなっている人工知能につながる分野の研究をしていました。その後、「人間そのものを理解したい」という気持ちが高まり、現在の「感覚運動生成」の研究を始めました。感覚運動生成とは、感覚器官から取得した情報を処理し、身体の動きを生成するまでの脳内メカニズムを考えることであり、修士課程も含めると、実に15年以上この分野の研究を続けていることになりました。

私は特に「眼と腕」の関係性に注目し、現在は「潜在的な視覚運動生成」「眼と腕の協調運動機構」「身体情報表現の構築」の3つの研究プロジェクトに取り組んでいます。

◆「潜在的な視覚運動生成」について教えてください。

例えば机の上になにかモノがあるとき、私たちはまず目で見てそれが何であるかを認識し、自分から見た位置を把握し、そこに向かって手を伸ばすという意味決定をし、最後に腕を動かします。こうしたひとつひとつのステップを経て運動する処理を「逐次処理」と言います。

こうした従来の運動生成理論の考え方は随意的、意識的な運動には非常にマッチしますが、一方、スポーツなど非常に厳しい

時間的制約のあるケースでは、このような複雑な計算を経た運動が果たして間に合うのか、という疑問が生まれます。そこで私は潜在的、無意識的な運動に着目しました。

例えば、腕運動中に背景の映像をある方向に動かすと、それを無意識に腕が追いかけるという潜在的な運動応答が老若男女を問わず発生します。この運動応答は非常に精密な計測を行わないと観測できませんが、我々のグループの一連の研究により、こうした潜在的視覚運動生成処理が存在していることが実証されてきました。

◆「眼と腕の協調運動機構」について教えてください。

例えば朝食を作るとき、飛んでくるボールを打つといったとき、眼はこれから腕の動いていく先を捉えるよう適切に動きます。つまり眼の運動と腕の運動とは協調関係にあるわけです。この協調関係が潜在的な運動についても成り立っているのか、そしてもし成り立っている場合、それは随意運動と同一のものなのか、それともまったく別個のものなのかを調べるのがこのプロジェクトです。

例えば自転車に乗る練習を考えてみると、最初はいろいろなこと





を意識しながら一生懸命に乗ろうとしますが、いったんできるようになるとその後はあまり意識しません。我々の分野ではこうした運動スキルの向上を「運動学習」と呼びますが、無意識的な運動学習と獲得した運動の実行において、眼が重要な役割を果たしていること、

具体的には、眼と腕の位置関係を一定に保つことが学習効果を高めていると、研究により明らかになりました。

この新しい考え方は生体の運動制御・運動学習系で最難関と言われる国際会議（Advances in Motor Learning & Motor Control, 2019）での発表もアクセプトされました。現在、私が最も注力しているプロジェクトです。

◆「身体情報表現の構築」について教えてください。

このプロジェクトと前述の2つプロジェクトとは多少毛色が異なります。

テニスを例にすると、飛んできたボールをフォアハンドで打ち返すか、バックハンドで打ち返すかを判断するには、ボールが自分の右側にあるか左側にあるかを判断しなければいけません。そしてその際には「自分の身体の中心」を基準とする必要があります。

しかし、視覚や聴覚とは異なり、自分の身体の中心を知覚する器官はありません。おそらくいろいろな感覚器や自分の知識、経験などをもとに自分の身体の中心、すなわち身体中心という表現が形成されるものと思われませんが、こうした身体情報表現の構築過程を探ろうというプロジェクトです。

具体的にはGVSという電気刺激を脳の前庭器官に流す実験により、身体中心表現が動くことが確認でき、前庭からの情報が身体中心に深く関与していることが明らかになりました。

本プロジェクトは2015年のロンドン留学中に取り組んだもの

で、すでに論文化など一定の成果を上げています。

将来的には運動統一理論を打ち立て、ヒトの本質的理解につなげたい

◆将来どのような分野での応用が期待されているのでしょうか。

野球やテニスなどプロスポーツの世界では「ボールを良く見なさい」や「私は本当に調子が良いときはあまりボールを見ません」など眼に言及する選手・コーチなどが結構いらっしゃいます。しかし、それが「なぜなのか」を突き詰めて考えてみると、なかなか説明に困ります。

私はこうしたメッセージが「ある決まった一点を見る」のではなく、むしろ「眼と腕の位置関係を一定に保ったうえで、その状態で学んだものをしっかりと再現する」ことに重要な意味があるのではと考えました。

現場レベルで語られていることを研究レベルに落とし込み、解明された眼と腕の協調機構を活かすことにより、スポーツトレーニング、リハビリなどの分野でのさらなる精度向上、効率向上が見込まれるのではないかと思います。

また、ユーザインタフェースやヴァーチャルリアリティなどへの応用も考えられます。例えばヒトにとって使いやすくアトラクティブなインタフェースの設計をめざした場合、ヒトがどのように感じ、どのように身体を動かすかについて、本質的に理解する必要があります。ヒトの運動には随機的な運動と潜在的な運動の両方が含まれていますが、ヒトが感じる「心地よさ」には随機的な運動だけでなく、潜在的な運動も密接にリンクしている可能性があります。

さらに中長期的には、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) がめざすデジタルツインコンピューティングにも寄与することでしょう。見た目だけでなく、内面を含めたヒトのすべてをデジタル再現するうえでも、我々のめざす「ヒト感覚運動生成」の本質的理解は確実に必要となるはずで

◆NTTの強みはどのような点にあるとお考えのでしょうか。

やはり多様な専門家が近くにいることです。

私の所属するNTTコミュニケーション科学基礎研究所は人間



と情報とを2つの柱と捉えている基礎研究所ですが、情報の分野でも機械学習、AIなど感覚運動生成の分野にも融合できる手法を持った研究者が多数在籍しています。また、私の所属する人間情報研究部にも、運動に加えて、視覚、聴覚、触覚などを対象とする、さまざま

な専門家がいます。

さらに研究所内にはプロスポーツ群を中心に、非凡な方々の卓越した能力を脳科学的に解明する柏野多様脳特別研究室があり、我々の実験室環境での記録と実環境での記録との密接なリンクを生み出しています。

初めからコラボレーションありき、で始めるとうまくいかないことも多いですが、新しいテーマや研究は、さまざまな価値観や考え方、手法がミックスされたときに拓けることが多いのではないかと考えており、こうした点はNTTの大きな強みではないかと思います。

◆これから基礎研究に取り組みたいと思っている方へメッセージがあればお願いします。

これから研究者を志す学生や若い研究者には、まずは迷ったらやってみる、ということをお伝えしたいと思います。まずはやってみて考える。考える際には深さももちろん大事ですが、「いろいろな方向からデータを見る」ということも大事です。そして考えがまとまってきたらもう一段上の視座からそれを眺めてみる。研究は常に苦勞の連続ですが、この繰り返しを地道にやり続けることにより自分なりのオリジナリティ、価値観が生まれるのではないかと思います。

また、「素人のように考え、玄人として実行する*」という言

葉がありますが、私は最近になってこの言葉が非常に的を射ていることを実感しています。以前、私は「玄人のように考え、玄人として実行する」、つまり研究の深さや専門性、言ってみればマニアックさが勝負どころだと思っていました。ところが、そうして進めた研究にはあまり大きなインパクトがない。実はよりインパクトの高い研究成果は、日常生活でよく見られること、ふとした機会に不思議だなと思うことなど、社会の皆さまから近い位置にある疑問や現象を、科学的エビデンスを基に理解することだということに認識するようになりました。

研究を進めるうち、眼には腕に対して従来言われている「見ることでより詳細な視覚情報を得る」以上の働きがあるのではないかと考えるに至りました。一般的にも「眼は心の窓」と言われるように、眼は人の意識やマインド、注意力とも密接に関係している可能性があります。こうした点を突き詰め、将来的には随意的な運動と潜在的な運動とを合わせた運動統一理論を打ち立て、ヒトの本質的理解につなげたいと考えています。

しかし、「ヒトを本質的に理解する」という研究は複合テーマであり、日本の大学にはなかなかマッチする学科はありません。そのため、近しい専門性を持つ学生は少ないという状況にありますが、逆に言えば、多様な専門・バックグラウンドを持つ方が参画できる分野であるとも言えます。

NTTでは、修士卒や博士卒などの新規採用はもちろん、中途採用やポスドクなどさまざまなパスを用意していますので、興味のある方はぜひアクセスして欲しいですね。

*：日本のロボット工学者、金出武雄博士の言葉。

ソリューション サービスの今

ニューノーマル時代における マイバトラー誕生秘話

NTT東日本デジタルデザイン部では、新型コロナウイルス禍におけるニューノーマルな働き方をめざしたオフィスDX施策において、これまで注目されづらかった共通業務に着目し、個人個人の執事のように支援をしてくれる「マイバトラー」の開発を行っています。また、内製化開発推進のため、「DXラボ」というバーチャル組織を立ち上げ、そのアプリや機能をPoC（Proof of Concept）開発やオフショア開発を行うことで、「短期間で」「安価に」「ユーザ目線に立った」開発を進めています。

しもじょう ひろゆき

下條 裕之

NTT東日本

リモートワークにおける 業務課題に着目

2020年4月新型コロナウイルス感染拡大防止を目的に、緊急事態宣言が発出され、これまで在宅勤務等のリモートワークを実施していなかった企業もリモートワークを行うようになる等、働き方改革が早急に進められてきました。

一方、さまざまな調査結果をみても、コミュニケーションツールの導入は進んだものの、リモートワークで必要となるその他のツール導入は進んでいないのが現状です。

NTT東日本デジタルデザイン部では、新型コロナウイルス禍より以前からデジタルトランスフォーメーション（DX）を行う際に、共通業務のDXが進んでいないことに着目をしていました。コロナ禍において共通業務のDXが進んでいないことがリモートワークにおける業務課題になると見極め、SaaS（Software as a Service）などと連携した「マイバトラー」シリーズの開発を加速することとしました。

共通業務のDX

共通業務のDXを語る前に重要な

が、「デジタルトランスフォーメーション」という言葉の定義です。さまざまな定義がありますが、単なる「デジタル化」とはすみ分けていく必要があると考えています。私たちは、単一作業のシステム化やツール化は単なる「デジタル化」であるのに対し、そのデジタル化した作業を業務フロー全体、もしくは抜本的に見直し効率化できている状態のことを「デジタルトランスフォーメーション」と定義付けています。

今回、私たちは共通業務のDXを推進するため、オフィスDX施策の検討を開始することとしました。

あなたの執事 「マイバトラー」誕生

共通業務のDXを進めるにあたり、それを助けるのはどのような存在かを考えたときに、それはまるで「執事」のような存在なのではないかと考えました。それをヒントに「マイバトラー」という共通業務を助けてくれるツールのシリーズが誕生しました（図1）。

まずは自分たちが在宅勤務で困ったことをかたちにすることを目的に、在宅勤務中も鳴り響く会社の代表電話に着目しました。

在宅勤務中で会社貸与携帯を持っていない担当者は代表電話の用件が把握できない。そんな課題感から生まれたものが「テルバト」です（図2）。

テルバトは電話のAI（人工知能）



図1 マイバトラーロゴ



図2 テルバトロゴ

自動応答機能botです。

リモートワーク中、オフィスの代表電話に電話がきてもIVR (Interactive Voice Response) で自動応答。会話内容はAIで文字に起こしてメールに転送してくれます。

テルバトがいれば、もうテレワーク中に出勤する必要はありません(図3)。

内製開発推進のためのバーチャル組織「DXラボ」設立

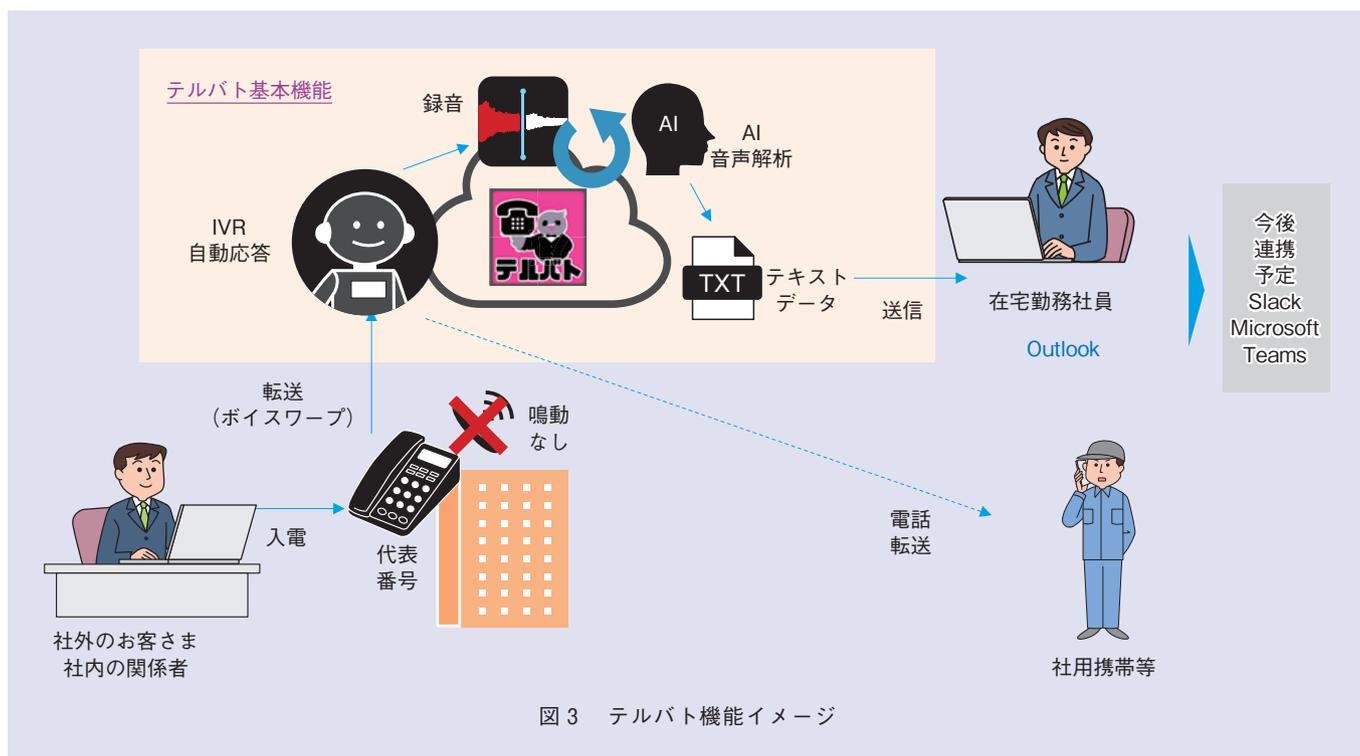
「DXラボ」は内製部隊とグループ会社の海外開発拠点と協業し、ワンチームとして開発を推進するバーチャル組織です(図4)。

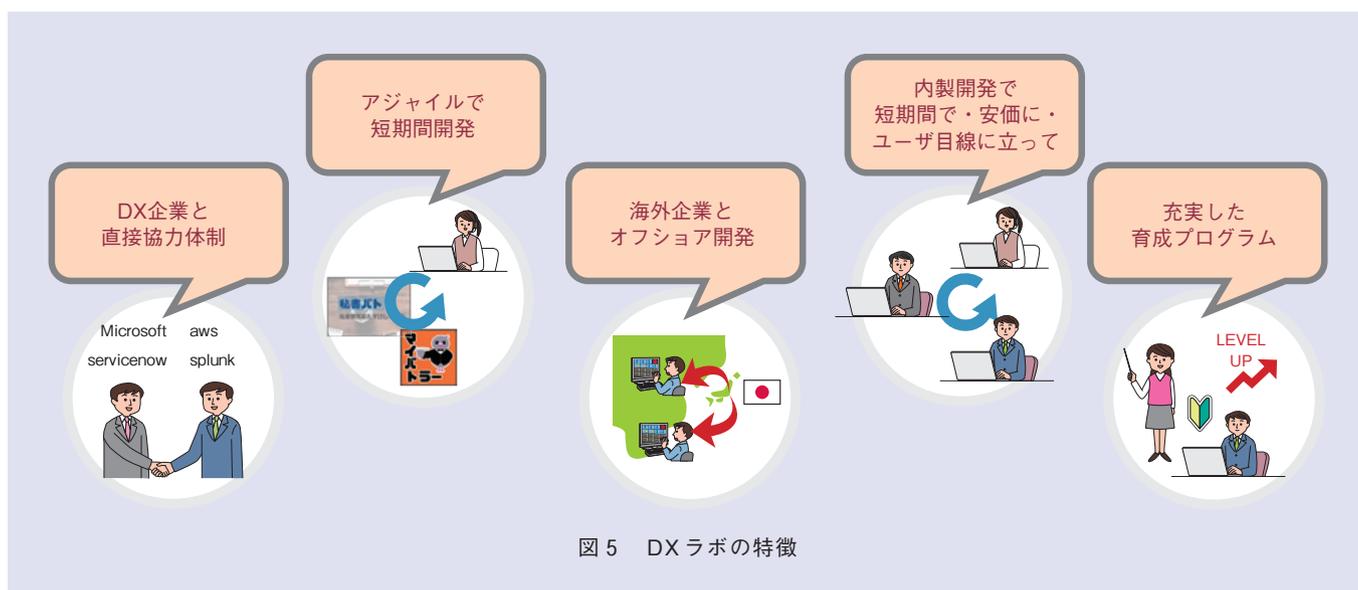
デジタル技術のPoC (Proof of Concept) 開発と人材の育成を目的

としています。これまでのNTT東日本は、プロジェクトマネジメントの役割を多く担ってきましたが、今後は自分たちでソフトウェア開発を推進できるような人材を育てていく必要があります。そこで、今回立ち上げたDXラボは、SaaSのプロダクト開発を行う

組織であると同時に、ソフトウェア開発人材を育成することもめざしています(写真)。

現在、DXラボでは前述のマイバトラーシリーズ開発を中心に行っており、第1弾として秘書担当の業務のDXを行うため、秘書担当とともに「秘





書バト」を約2週間で開発し、β版運用を開始しています。やりたいことをまず自分たちでつくって使ってみるという開発体制の中でみえてきたことは、単純なアジャイル開発ではなく、ユーザと対等に話し合いながら開発を進めることで、ユーザ自身も気付かなかった課題を見つけながら進めていけることが内製開発の良いところだと考えています（図5）。

今後のマイバトラー展開とDXラボ活動

マイバトラーは現在、個々の作業を「デジタル化」するツールとなっていますが、DXを行うために、各機能のユーザインタフェースを統合していきたいと考えています。まずは社内で使ってみてNTT東日本社員約4万人の業務効率化を進め、その実績を基に社外のお客さまにも販売できるよう検

討を進めていきます。

また、DXラボのもう1つの設立目的である人材育成のため、自組織の社員だけでなく、他組織の社員を受け入れ、社内で副業をするような働き方で内製開発のノウハウを身につけ、自組織に戻ってからもDXラボと同じような開発サイクルを回すことのできる人材を拡大できるよう育成面にも力を入れていきます。

ニューノーマルな時代だからこそ、新しい手法やツールを積極的に取り入れ、今までにはなかったようなプロダクトを創出していきたいと考えています。



下條 裕之

ニューノーマルな働き方が求められる中、多くの方がまだ完全に移行する準備が整っているわけではないと思います。DXラボのような内製化開発はこの時代だからこそ大事になってくると考えています。新しい時代をつくるためにDXラボは引き続き進んでいきます。

◆問い合わせ先

NTT東日本
デジタル革新本部 デジタルデザイン部
TEL 03-5359-3939
E-mail dd_dx-strategy@east.ntt.co.jp
URL <https://www.d3.ntt-east.co.jp/>