

NTT 技術ジャーナル

7 JULY
2021
Vol.33 No.7

特集

Creativity and Technology — designing for an unknown future

トップインタビュー

寒川 哲臣
NTT先端技術総合研究所 所長

グループ企業探訪

NTTコム エンジニアリング

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

7 JULY
2021
Vol. 33 No. 7

CONTENTS

4 トップインタビュー

研究者の多様な個性を最大限に活かして、
豊かなコミュニケーション環境を創造する
寒川 哲臣

NTT先端技術総合研究所 所長



8 特集

Creativity and Technology —designing for an unknown future

- 10 離れていてもここは君のそばにある
——ここ豊かな社会を創るコミュニケーションの本質探求
- 14 機械が会話のパートナーになる日
——大規模深層学習で拓く雑談対話システムの新境地
- 18 まなざしに宿る運動の巧みさ
- 22 聞きたい人の声に耳を傾けるAI
——深層学習に基づく音声の選択的聴取技術 SpeakerBeam
- 26 錯覚現象を応用した物体の触り心地変調手法

- 30 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11回 暗号技術

33 **from★NTT DOCOMO**
テクニカル・ジャーナル
MECを活用したアプリケーションデザインパターン

40 **挑戦する研究者たち**

松尾 慎治
NTT先端集積デバイス研究所
NTT物性科学基礎研究所
上席特別研究員



研究者どうしの何気ない会話から
共同研究の機会が生まれ、研究活動は広がる

45 **明日のトップランナー**

丹羽 健太
NTTコミュニケーション科学基礎研究所
特別研究員



データが分散蓄積される時代にも
機械学習モデルを最適化。
「非同期分散型の深層学習技術」の研究

48 **グループ企業探訪**

NTTコム エンジニアリング株式会社
デジタルトランスフォーメーションの推進と
高品質なワンストップオペレーションで
お客さまからの信頼を得る



52 **テクニカルソリューション**

柱上作業者の安全を守るための取り組み
——電磁誘導対策

Webサイト オリジナル記事の紹介 56

8月号予定

編集後記

NTT技術ジャーナルはWebで閲覧できます。

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



本誌掲載内容についての
ご意見、ご要望、お問い合わせ先

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

本誌ご購入のお申し込み、
お問い合わせ先

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

企画編集

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

発行

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

©日本電信電話株式会社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先端技術総合研究所
所長

寒川 哲臣

PROFILE :

1991年日本電信電話株式会社 基礎研究所入社。1999年ポールドルーデ研究所（ドイツ）客員研究員，2004年内閣府 総合科学技術会議事務局 参事官補佐，2006年物性科学基礎研究所 主幹研究員，2007年先端技術総合研究所 企画部，2010年物性科学基礎研究所 量子光デバイス研究グループ リーダ，2012年物性科学基礎研究所 量子光物性研究部長，2013年物性科学基礎研究所 所長を経て，2018年6月より現職。

研究者の多様な個性を

最大限に活かして、

豊かなコミュニケーション環境を

創造する

「NTTの事業領域を拡大する先端技術の研究開発」「社会に変革をもたらす新原理・新コンセプトの創出」「地球環境・人にやさしい技術の研究開発」をミッションとして研究開発に取り組むNTT先端技術総合研究所。研究成果を社会貢献につなげるため、潮流を見定め価値創造に臨んでいます。寒川哲臣所長に研究所の社会的使命や世界をけん引する研究者に必要なマインドについて伺いました。

研究者たちよ、 刃を研げ

先端総研のビジョンや社会的使命等についてお聞かせください。

NTT先端技術総合研究所（先端総研）は未来をどのようにつくっていくのかを常に見据えて、基礎から応用までの幅広い研究開発を行っています。具体的には、世界一の性能を極める情報処理・通信技術、革新的発想で新技術を創出するサステナブル技術、そして人間の理解を深める人間科学・バイオ技術を主軸にしており、世界一・世界初、驚きの創出を実現していくことで、IOWN（Innovative Optical

and Wireless Network）構想を現実のものとして推進しつつ、NTTグループの競争力強化への貢献をめざしています。

先端総研は未来ねっと研究所、先端集積デバイス研究所、コミュニケーション科学基礎研究所、物性科学基礎研究所の4つの研究所で構成されています。未来ねっと研究所では、世界トップレベルの光・無線の通信大容量化と通信領域を拡大する萌芽的技術の研究開発を行っています。先端集積デバイス研究所では、新たな価値創造をもたらすデバイス・材料の研究開発を進めています。革新的な技術をシームレスに世の中に出すために、IOWN総合イノベーションセンタでデバイス開発を

担っているデバイスイノベーションセンタと密接に連携して研究に取り組んでいます。コミュニケーション科学基礎研究所では、ここらまで伝わるコミュニケーションの実現をめざすメディア・情報処理・人間科学の研究を、物性科学基礎研究所では、ネットワーク技術の壁を越える新原理・新コンセプトの創出をめざす物質科学・電子物性・光物性の研究を担当しています。

1980年代半ば、日本企業では基礎研究所や中央研究所が次々と新設されました。バブル崩壊後、各社は相次いで活動を停止したため、現存する基礎研究所は非常に少なくなっています。また、インフラの導入は一度決めてしまうと、その更改が非常に難しいため、



企業の研究所には将来を俯瞰して技術を創出することが求められています。こうした中、より良い技術を世の中に出していくためにも、先端総研では物事の原理・原則から研究するスタンスを重視しており、これが1つのバリューとなっているのです。

日本国内においては研究者の評価が世界に比べてあまり高くない、研究費が少なくと報道されていますね。

これらはなかなか悩ましい問題です。例えばスマートフォンの中身は昔のスーパーコンピュータ並みのコンピュータが入っています。ところが、これを実現した研究者らの努力は、製品のインパクトの陰に隠れてしまい、残念ながらあまり知られていません。研究者は難しい成果を上げたことを伝えるのが苦手なのかもしれませんが、現在では研究所や研究者に求められることは少し前と違い、研究の意義を伝えることも仕事の1つとなっています。

このことは想像以上に大変な課題であると認識しなければなりません。世界初の成果は必ずしも性能が良いわけではなく、さらに、新しいことであるがゆえに理解できる人がいないため、誰かに相談すると、ほとんどの場合ネガティブな反応が出てきます。それでも自分の研究はここが優れていると自ら納得し、説得し続けて初めて周囲の協力を得ることができず。

私が物性科学基礎研究所の所長時代には、報道発表をする際には、記者向

けに分かりやすく解説することに努めていたのですが、それでもまだ分かりにくかったので、ライブ配信サービスの「ニコニコ生放送」で一般の視聴者に研究の意義を伝え、質問を受けていました。このようなことを繰り返していくうちに、研究者自身が自分の研究の本質をよく理解するという循環ができましたので、やって良かったと思っています。

日本が他国の研究の後を追っていた時代には、研究すべきことが分かっていたともいえます。性能を上げ、連続的な改良をしていけば良かったのです。ところが今や日本はすでにトップグループの一員となり、指針を示す立場です。次世代に取り組むべき課題やテーマは何か、ルールを定めるのが役割であり、単にテーマの課題をクリアすることだけでなく、新たなブレイクスルーを起こすことが求められています。ただ、日本人の研究者はこれがいまだに得意ではないと感じています。次世代の課題を定めることは大変難しいことですが、1つのきっかけとして今取り組んでいる課題を別の視点から見直すことも重要です。そこで、研究者には「刃を研げ」と伝えています。パワーがあればいつかは切れるけれど、刃を研いでおけば簡単に切れるというイソップ童話の木こりと旅人の話のように、研究開発の現場に「刃を研ぐ」事例をうまく適用することができれば、現在直面している問題に対して新たな解決方法を獲得することができます。さらに、これを世の中の動向と

照らし合わせて一段高い立場から物事を俯瞰することにより、新たな取り組むべきテーマやソリューションを見出すことができるかもしれません。

五感をフル活用し、刺激を全身で受け取ろう

新たなブレイクスルーを起こすための秘策があるのですか。

NTT R&Dでは、次世代を意識した取り組みを長年続けています。例えば、私が物性科学基礎研究所の企画部に在籍していた2000年には、アドバイザリボードを導入しました。民間企業の研究所が外部に評価を求めることは珍しいのですが、私たちはNTT R&Dの価値を自らの評価のみで判断することに疑問を感じていました。そこで、将来の通信や情報処理への貢献に資する研究を実行するために海外の有識者のお知恵を拝借しようと、当時の所長が主体となってアドバイザリボードをスタートしました。私は以前ドイツで研究活動をしておりまして、ヨーロッパで活躍している比較的近い分野の先生にお声掛けをしました。先生方からは、量子コンピュータ実現に向けて超伝導ベースのテーマだけではなく、将来の量子通信につながる光技術にも重点を置くべきであるご指摘いただいたこともあり、研究のポートフォリオを見直すきっかけとなりました。2年に一度のこの取り組みは20年余り継続しており、ノーベル賞を受賞した研究者や元ノーベル賞の選考委員長などにボードメンバーとして入っていただいています。フェローや上席特別研究員の制度を設けたのもアドバイスによるもので、研究員が長く働くきっかけにもつながっています。

また、物性科学基礎研究所では、BRL (Basic Research Laboratories) スクールも継続しています。これは海外の大学院生・博士研究員と国内外の講師を研究所にお招きし、講義とディスカッションをとおして、将来の研究者を育成することを目的としています。ヨーロッパにはさまざまなサマースクールがあり、そこで学んだ学生が大学の教員となり、その後講師をするという循環があるのですが、このような取り組みがNTTの研究所にも不可欠

であると考えて始めました。実際、初回に参加した博士研究員が現在、ヨーロッパの大学で教授に就任し、インターン生を私たちのところへ送り出してくれています。海外のコミュニティとの密な連携は地理的に難しいこともありますが、信頼性が高まればそれも問題ではなくなります。NTTの中だけでできることは限られていますから、強みを持ち寄れる人間関係を築いていきたいものです。だからこそ新型コロナウイルスの影響で、リアルな国際会議を開けないのがとても残念です。現在はオンラインの国際会議が主流なのですが、海外で発表し、研究室を訪問するのでは刺激が違います。現地に行って、会って話すことで、今まで意識していなかったことに気付くことが多いものです。

**全身で受け取る刺激はとても大切なので
すね。**

私がドイツで半導体中の電子を輸送するために使っていた超音波について議論していたときに、ドイツの研究者たちが、過去にNTTが光通信に超音波を利用していたことを教えてくれました。彼らは古い技術を見直して、半導体表面での電子輸送に応用する、という新しい機能を生み出していたのです。このことがきっかけとなり、当時私が研究していた「電子スピン」を半導体中で輸送することに応用できないかという着想に至り、帰国後も彼らと定期的に議論しながら研究に勤しみました。このテーマは、半導体中での電子スピンの状態制御や長寿命化に向けた取り組みへと発展し、物性科学基礎

研究所で継続して研究が行われています。

ところで、基礎研究や先端研究はなかなか成果を上げにくいものです。1年に一度うまくいけば良いほうで、研究のほとんどは失敗の連続です。こうした現実に臨むためには、まずOptimistic（楽観的）なマインドを持つことが必要です。また、Optimisticにも2種類あり、Definite、つまり確信をもって臨む人と、根拠のないIndefiniteな人がいます。ドイツの研究者はDefiniteで、理論をベースにして見通しを立てて、研究を進めていました。実際の研究では、確信をもって臨んでいてもうまくいかないことのほうが多いのですが、そのときは実験結果と理論をもう一度見直して、仮説を軌道修正していくことが大切になります。

刺激を受けた言葉もいくつかあります。ノーベル賞を受賞した江崎玲於奈先生とは、博士課程のころから何度か議論する機会があり、先生はThink unthinkableという言葉大切にされていました。「若いのだから考えられないことを考えなさい。年齢や失敗を重ねるとJudicious mind（思慮分別のある精神）がだんだん身につく一方で、Creative mind（想像力）が失われていくものです」と話されていました。加えて米国の起業家、ピーター・ティールのZero to One。ゼロから新しい何かを生み出すという意味のこの言葉も先端総研の使命を表現する一言です。私たちがイノベーションの創出に向けてこれらの言葉を大切に、これからもさまざまな挑戦を続けてい

くつもりです。

そのための環境を構築し、守っていくのがマネージャの仕事です。そのうえで、私は研究者の多様な個性を最大限に活かせるように、ルールは最小限にしてその中で研究者が伸び伸びと活動でき、そこに上司がサポートするような環境づくりを心掛けています。先端総研では、これが一番良い成果が出る方法であると信じています。特に、研究者に自分の研究成果のビジネスへの応用を考えさせすぎるとアイデアが小さくなってしまいますから、そのあたりは別のプロデューサーとしての役割を持つ人に任せて、魅力ある素材をつくることだけに注力してほしいです。

マネジメントの醍醐味は 研究者が化けたとき

ご自身も研究者でありながらマネジメントの立場となりました。第一線で研究活動を継続することを望む方も多いため、研究者をマネージャに起用する意義はどこにあるのでしょうか。

私は博士卒で入社しましたから、ずっと研究を続けていくのだろうと思っていましたが、マネジメントの立場となりました。しかし、大学に残って研究者となったとしても、いずれ大学の教員となり、仕事の半分はマネジメントとなるので、結局同じことだと考えています。

研究所におけるマネージャは、第一線で研究成果を上げている人を評価するので、評価される側が納得できる存在でなければなりません。しかも、研究の方向性について判断する場合も研究者としての勘所が重要になります。つまり、深い見識があり、他を納得させることのできる説明力と人間力を兼ね備えていることが必要になります。マネジメントは研究とは別物であるのとらえる人もいますが、逆にマネジメントをすることによって自らの研究について整理できるという作用もあるので、私は両者は密接につながっていると考えています。

私が物性科学基礎研究所の所長だったときには、第一線で研究する立場にはなかったのですが、自身の過去の実験データを基に論文を書いていました。さすがに現在は当時のように論文





社内外の研究者、技術者の皆さんに一言お願いできますでしょうか。

日本が勝ち残るには新しい技術やイノベーションの創出が不可欠です。研究者・技術者は使命を持ってやり続けていただきたいと考えています。日本の技術力は昔から高いのですが、ルールや流れをつくるのがうまくないと感じています。研究力・技術力を上げるために、方向性を定め、ビジョンを示して世界のトップに立ち続けましょう。

日本人の研究者は本当に優秀ですが、昔は奥手に見え、押しの弱さが目立つ人も多かったものです。しかし、最近の若い世代はだいぶ変わってきました。国際会議の場でも、自身の専門とは違う分野についても学ぼうとしていますし、参加したからには何かを得ようと積極的に質問をするなど、頑張っている姿をよく見かけます。彼らは、堂々としていて期待が高まります。技術の覇権争いは熾烈を極めている厳しい状況ですので、もう一度気合いを入れ直して日本を盛り上げていきましょう。

(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。

を書くことはありませんが、論文に連名で入ることはありますので、それについての議論は継続しています。研究・論文にかかわる時間が非常に少ないのは残念ではありますが、自身の代わりに研究を進めてくれている優秀な人がたくさんいますから、彼らの背中を押してあげることが現在の仕事だと思っています。しかも、そうした中で自分の考えとは異なるセンスの良いアプローチを見ると感心するものです。

研究者が化けたとき、これが研究所におけるマネジメントの醍醐味です。テーマを変え、さまざまな経験を積み重ねるうちに、研究者が次のステップに向けて急に成長することがあります。私が想定していた以上の見解や成

果を研究者が見せてくれるときが、何よりの幸せです。

NTT R&Dが提唱したIOWN構想とその構成要素であるオールフォトニクス・ネットワークは、先端総研の悲願を実現するビジョンです。30年前、私が駆け出しの研究者のころにめざしていたことが現実味を帯びてきました。これになぞらえれば、30年後を見据えて、次の構想を今から立てていくことも大事であると考えています。間違った方向に進まないように舵を取っていきながら、研究者とともに先端総研を挙げてアイデアを出し、実現するためのロードマップを示すことで、世界のリーダーシップを取りたいと考えています。

インタビューを終えて

厚木にある先端総研にお邪魔した当日は気持ちの良い風が吹き、木々の緑がまぶしいほどで、所長室の前では、所長自ら笑顔で迎えてくださいました。壁一面に書籍などが並ぶ空間にどしどしとした机。いかにも所長室という印象を受けましたが、1つ違和感のあるものが目にとまりました。それはトレーニング器具のように見えました。「実はコロナ禍で通勤時間に渋滞するようになったので、始業の2時間前に到着して、スポーツ実験棟でゴルフのデータをとって分析しながらじっくりとフィードバックし

ているのです」と寒川所長。プロゴルフファー秘伝のノウハウをYouTube等で勉強しては検証しているのだとか。「まさに研究者気質ですよ」との一言に周囲の方も至極納得していました。インタビュー会場の準備中もお気遣いをいただき、錯覚を体感できるノベルティで研究活動を紹介してくださいました。私も実際に経験することで研究内容に興味を持ち、心を動かされました。さりげなく、そして、スマートに魅力をアピールされるお姿にマネジメントの極意を学ばせていただいたひと時でした。



特集

Creativity and Technology —designing for an unknown future

リモートワークの浸透など、物理的に近接できない状況でもさまざまな社会活動が行われるようになった。

また、AI・機械学習などの技術革新は、引き続き社会変容をもたらしている。

これらの新しい社会のあり方に沿って、情報科学・人間科学でも基礎研究の新しい展開が生まれている。

本特集では、NTTコミュニケーション科学基礎研究所で実施している情報科学・人間科学の基礎研究について、最新の研究を専門家ではない一般の方々にも分かりやすく紹介する。

コミュニケーション科学

雑談対話システム

視覚運動生成

目的話者抽出

触覚の錯覚現象

Communication Science

離れていてもここは君のそばにある

—— ころ豊かな社会を創るコミュニケーションの本質探求 —— 10

NTTコミュニケーション科学基礎研究所の過去の研究を振り返りつつ、コミュニケーションの本質を究める取り組みのいくつかについて紹介する。

機械が会話のパートナーになる日

—— 大規模深層学習で拓く雑談対話システムの新境地 —— 14

最新の深層学習モデルを利用した高性能な雑談対話システムについて、NTTが構築したシステムの詳細や現状の到達点・課題を紹介する。

まなざしに宿る運動の巧みさ

—— 「なぜ運動にとって目が重要なのか」という問いに対して、従来の考え方に加えて、NTTコミュニケーション科学基礎研究所の最新の知見を紹介する。 —— 18

「なぜ運動にとって目が重要なのか」という問いに対して、従来の考え方に加えて、NTTコミュニケーション科学基礎研究所の最新の知見を紹介する。

聞きたい人の声に耳を傾けるAI

—— 深層学習に基づく音声の選択的聴取技術SpeakerBeam —— 22

選択的聴取をコンピュータ上で実現することをめざした研究として、混ざった音声の中から目的話者の音声のみを抽出する技術SpeakerBeamについて紹介する。

錯覚現象を応用した物体の触り心地変調手法

—— ベルベットハンド錯覚という現象において生じる触り心地の変化を定量的・定性的に評価し、その知見に基づいて新たに提案した触り心地変調手法を紹介する。 —— 26

ベルベットハンド錯覚という現象において生じる触り心地の変化を定量的・定性的に評価し、その知見に基づいて新たに提案した触り心地変調手法を紹介する。

離れていてもこころは君のそばにある こころ豊かな社会を創るコミュニケーションの 本質探求

NTTコミュニケーション科学基礎研究所（CS研）は創立以来30年間、コミュニケーションの本質を究め、こころまで伝わるコミュニケーションの実現をめざして、メディア処理やデータ科学など、人間の能力に迫り凌駕するための革新技術の創出と、認知神経科学や脳科学など、人間への深い理解につながる基本原理の発見に取り組んできました。本稿では、過去も振り返りつつ、コミュニケーションの本質を究めるCS研の取り組みのいくつかを紹介します。

やまだ たけし
山田 武士

NTTコミュニケーション科学基礎研究所 所長

はじめに

NTTコミュニケーション科学基礎研究所（CS研）は、1991年7月4日に創立されてから、今年で30周年を迎えることとなりました。この30年間、コミュニケーションの本質を究め、こころまで伝わるコミュニケーションの実現をめざした基礎研究に取り組んできました⁽¹⁾。そもそもコミュニケーションの本質とは、①情報を正確かつ効率良く伝達するのみならず、②情報が指し示している、その意味を共有することによりお互いの理解を深めることや、③伝達方法にも工夫をこらすことで背後の意図や感動を共有することであり、ひいては④これらを通じてこころのふれあいを醸成すること、その結果こころ豊かな社会を築くことまで、広く含むと考えられます。主にこのコミュニケーションの4つの観点に焦点を当て、過去の研究も振り返りつつ、コミュニケーションの本質を究めるCS研の取り組みのいくつかを紹介します。

情報伝達の基本技術、音声符号化

NTTでは、音声音響処理や自然言語処理など、コミュニケーションの基本技術に、電電公社時代から継続的に取り組んできました。そのルーツといえるのは音声符号化技術であり、情報の正確かつ効率的な伝達という意味でもっとも重要な技術の1つです。電電公社時代の1975年に提案したLSP (Line Spectrum Pair)は、国際標準技術として現在でも世界のほとんどの携帯電話に使われており、2014年には電気電子通信分野の技術遺産に相当するIEEE Milestoneとして認定されました⁽²⁾。この流れを継承し、CS研は、2014年に3GPP (3rd Generation Partnership Project)の標準規格として承認されたEVS (Enhanced Voice Services)に主導的立場で貢献しました。EVS規格は第4世代の音声符号化として日本でも携帯電話3社間の共通の符号化伝送方式に採用されるなど、2016年より利用され、2021年現在、世界中のスマートフォンに

搭載されています。さらに、EVSを拡張するIVAS (EVS extension for Immersive Voice and Audio Services)標準規格の制定にも貢献しています。また最近、ワイヤレスマイクなどに適した、ビット誤りに頑健な低遅延の音声音響符号化方式BRAVE[®]を考案しました。BRAVE[®]は、2021年2月にTOA株式会社から発売されたワイヤレスマイクに採用されています⁽³⁾。

意味の共有のための、 カテゴリと概念の獲得

人間は類似している事物をカテゴリとしてまとめて学習することで、コミュニケーションを含む、思考、推論、意思決定など高度な認知活動を可能にし、学習自体も効率化しています。例えば、1匹の動物を見かけたとき、その姿かたちがすでに学習済みのカテゴリの1つ、例えば「猫」と十分類似していればそのカテゴリの要素、すなわち猫として認識します。これまで見たすべての物体を個別に記憶することは

困難ですが、カテゴリとしてまとめる
とコンパクトに記憶できます。後で振
り返った際、見かけた猫の細かい特徴
は忘れても、それが猫であったことは
忘れません。さらに、学習済みのどの
カテゴリとも異なる場合は、あらたな
カテゴリを設定します。このようにし
て、大量のデータに対しても、データ
の特性に合わせ、必要に応じて柔軟に
カテゴリを増やしたり、場合によって
は減らしたりしながら、効率的に学習
しています。

CS研ではこのような人間の柔軟な
カテゴリ学習を計算機上で実現するこ
とに取り組んでいます。例えば、顧客
ごとにどの商品を購入したかを行列形
式で記録した購買データを用いて、顧
客と商品の両方をカテゴリ分けするこ
とを考えます。すると、このカテゴリ
分けは購買データ行列を長方形分割
することに相当します。そこで、ノンパ
ラメトリック・ベイズモデルに基づき、
この長方形分割のあらゆる無限の組合
せパターンの中から、最適な分割を
データに合わせて調整し効率的に学習
する手法を考案しました⁽⁴⁾。

このように、カテゴリとしての「猫」
は、ある特定の「猫」ではなく、「猫」
一般を抽象化したものです。一方概念
とは、カテゴリについての心的表象
(mental representation) が、記憶
に蓄えられたもの、すなわち、カテゴ
リが指し示す、カテゴリについて知っ
ている情報の集合です⁽⁵⁾。人間がここ
ろに抱く「猫」の概念は、その姿かた
ちだけでなく、鳴き声や、動作、さわ
り心地、あるいはそれらの言語による
表現など、猫を表すさまざまな側面を

統合して抽象化したものといえます。
すなわち、概念とは、1つの事物(の
集合)を複数の視点(異種のメディア
情報、モダリティ)からみることで得
られる、視点に依存しない抽象化され
た情報ととらえることができ、共通の
概念空間での座標として表現できま
す。CS研では、例えば猫の映像とそ
の鳴き声など、異種のメディア情報の
共起、すなわち、同じものに端を発す
る異種のメディア情報がランダムにで
はなく特定の関係性を持って現れるこ
とを利用し、陽に正解を教えられなく
ても自律的に概念を獲得する研究に取
り組んでいます⁽⁶⁾。

乳児にとっての コミュニケーションと言語獲得

では、人間の乳児は自然界の事象の
共起から自律的に学習するのでしょうか。
CS研ではコミュニケーションの本質を
理解するため、乳児のコミュニケーション
や言語獲得にも着目しています。乳児
にとって、コミュニケーションは物体を
認識し、知識や概念、語彙の獲得を
促進する重要な手段です。実際乳児は、
養育者からの会話や、テレビなどの
周囲の環境から聞こえる音声聞き、
統計学習によって共起して出現する
頻度の高いシラブル(発音の単位)の
まとまりを単語として覚えていくなど、
環境から得られる情報からさまざまな
知識を学んでいます。しかし、決して
膨大な情報を無差別に処理している
わけではありません。CS研の研究
では、乳児の学習は、乳児向け発話
など、養育者からのコミュニケーション
シグナルによって促進されることが

分かりました⁽⁷⁾。乳児は養育者からの
コミュニケーションシグナルを学習の
手掛かりとして利用し、学習すべき
対象へ注意を適切に向け、環境から何
をどのように学習すべきかを取捨選択
しているのです。

乳児とのコミュニケーションは脳の
発達を促し、その後の乳児の語彙数
にも影響を与えます。そこでCS研
では、幼児の言語獲得の研究を進め
ています。その結果に基づいて、CS
研が監修した絵本が累積発行部数
28万部を突破しています。デジタル
ではなく、やはり五感で接することが
できる、印刷物としての本が大事だ
と考えています。さらに最近では、
NTT印刷と連携して、パーソナル
知育絵本というものを提案してい
ます。これは保護者による語彙
チェック履歴に合わせて、CS研
の研究成果である幼児語彙発達
データベースを基に、これから覚
える語と対応する絵を組み込んだ
知育絵本です。当初は読み聞かせ
用の絵本からスタートしましたが、
一方、これも最近のCS研の研究
成果によって、幼児は、実際に
ひらがなを読み書きできる少し
前の3歳前後において、文字と
その文字の音の対応性の理解が
始まっていることが分かってき
ました。そこで、3歳前後の幼
児を対象に文字への興味を促す
「ひらがな・カタカナなまえ
絵本」を提案しました。パーソ
ナル知育絵本は一般発売を開始
しました⁽⁸⁾。

養育者と乳児のインタラクシ
ョンについて、養育者側に焦点
を当てた研究にも取り組んでい
ます。昨今、母親の育児スト
レスや、産後鬱、虐待や育児
放棄などは、社会全体の課題
です。そ

こで母親の乳児への接し方を調べるため、乳児の音声の種類と、それに反応する母親の接近行動に着目しました。その結果、母親は乳児の泣き声に反射的に接近し、その接近度合いは音声に緊急性を感じるほど強くなることが分かりました。すなわち、母親は乳児の泣き声によって、早く対処したい気持ち（緊急性）が喚起され、反射的無意識に乳児に接近します。

一方で人間には、この反応を抑制する仕組みも備わっています。オキシトシンというホルモンがあります。このホルモンは、母乳を分泌するためのホルモンであり、向社会性ホルモンとも呼ばれ、相手に対しポジティブな感情を持ちやすくなることなどが知られています。また、オキシトシン濃度は母親の養育モチベーションに正の相関があることも知られています。CS研の研究では、オキシトシンが、このような母親の反射的な、泣き声への接近衝動を抑制していることが分かりました。すなわち、オキシトシンが少ないと母親の「余裕」がなくなり、泣いている乳児を早く泣き止ませたくてなのですが、オキシトシンレベルが高いと副交感神経活動が大きくなり、よりリラックスして、反射的な泣き声への接近を抑制していることを示唆します。これは、育児のWell-being向上の知見につながる可能性のある結果と考えられます⁽⁹⁾。

新たなコミュニケーション形態の創出

伝え方に工夫をこらすこと、すなわち、新たなコミュニケーション形態創

出の取り組みも進めています。「メディアはメッセージである」というのは英文学者マーシャル・マクルーハンの有名な言葉です。マクルーハンはこの言葉によって、メッセージはそれがどう伝えられるかも含めてメッセージであると主張し、コミュニケーションにおけるメッセージを伝達する媒体、すなわち、メディア自体が持つ感覚イメージの重要性を唱えました。一方、米国AT&Tの1970年代のコマーシャルの有名なフレーズは、「reach out and touch someone（手を差し伸べて、誰かに触れよう）」でした⁽¹⁰⁾。AT&Tのイメージを変える、この当時としては斬新なキャッチフレーズの発案にもマクルーハンの貢献がありました。

このreach outという観点では、CS研ではかつてt-Roomという、部屋サイズの遠隔コミュニケーションシステムを研究していました。t-Roomは、地理的、時間的に離れた複数のユーザが遠隔にいながらあたかも同じ部屋にいる感覚「同室感」を共有するシステムでした⁽¹¹⁾。しかし、実際にtouchするなど、触感の共有は含まれていませんでした。そこで触覚を利用した新しい感覚提示技術や、触覚で気持ちが深く伝わる感性コミュニケーションにも取り組んでいます。2018年に提案した「超未来式体感型公衆電話（3号／4号）」は、電話のプッシュボタンを押すとさまざまな触感が相手の身体を貫通・刺激する、触覚でコミュニケーションするシステムでした。最近では、リモートハイタッチや公衆触覚伝話など、まさにふれあう感覚を、距離を越えて共有するシステムを新た

に提案しています⁽¹²⁾。

また、伝えたい内容を、望みの表現に自在に変換して送受信する、音声変換の研究にも取り組んでいます。人間の発声・聴覚機能を拡張する新たなコミュニケーション形態の創出につながることを期待しています。

こころの中まで伝えるためには、人がこころで思い描いていることをできるだけ負担をかけずに外側から読み取る手段が必要です。目は心の窓などといわれます。CS研では、人間は魅力的な顔を見ると、無意識のうちに瞳孔が収縮することを発見しました。すなわち、リアルタイムに瞳孔の大きさを観測することができれば、その人がこころの中で思っていることを、ある程度は読み取ることが出来ます。一方で、輝度コントラストを変化させるなどにより瞳孔を収縮させると、その結果、顔の魅力度の評価が高くなることも分かりました。すなわち、逆に瞳孔の大きさを制御すれば、その人の好みのある程度変えることができてしまうのです⁽¹³⁾。

多様な価値観が調和するこころ豊かな社会

最後に、こころのふれあいの観点で、少し違う角度からコミュニケーションの本質に迫る研究を紹介します。現代社会は分断が進んでいるといわれます。氾濫する情報の中で異なる意見に耳を傾けることもなく、グローバリズムかナショナリズムか、集中か分散か、アナログかデジタルかなど、一見すると二律背反し、一方を取ると他方が犠牲になる問題によって人々の対立はま

すますます深まります。だからこそ、矛盾を許容し、多様な価値観を認め合い、プライバシーは守りつつも、コミュニケーションを通じてお互いの理解を深め、共感を広げることでこころのふれあいを醸成し、こころ豊かな社会を築くことが求められます。

機械学習、特に深層学習においても、データ量の増大やプライバシー保護のため、学習データはローカルにあるサーバ群に分散して蓄積される必要が生じます。その状況で各サーバがローカルに学習すると、それぞれ異なる、互いに矛盾したモデルが学習されてしまいます。不完全に調整するとモデルは収束しません。そこで、分散配置されたサーバ群とそこに分散して蓄積されたデータに対して、サーバどうしがコミュニケーションしコンセンサスを取りながら、あたかも1カ所にデータを集約したかのようなグローバルモデルを学習できる、非同期分散型の深層学習アルゴリズムを考案しました⁽¹⁴⁾。

また、CS研ではHiddenStereoという、裸眼で2D映像がクリアに見える3D映像生成技術を考案しました。すなわち、メガネを掛けて視聴する3D映像を楽しみたい人も、3D映像が苦手な、2Dのほうを好む人も、どちらも互いを犠牲にすることなく、一緒に1つの映像を楽しむことができる技術です⁽¹⁵⁾。

おわりに

本稿では、コミュニケーションの本質を究め、こころまで伝わるコミュニケーションの実現をめざした取り組みをいくつか紹介しました。まさに、

「reach out and touch someone's heart」です。現在、新型コロナウイルス感染対策により、他者とのかわり方が変化しています。そうであれば、なおさら、離れていてもこころはそばにある、を実現するような、五感を駆使した新たなメディアの可能性を追求するとともに、そこで新たに生ずる問題点の解明と克服が必要です。一方、離れた相手に思いを伝える以前に、無意識は自分の中の他人というほど、人間は自分のことがよく分かっていません。自分自身に対する理解を深めることで、日々の活動の質を向上させることができます。また、今後とも人間の知能に迫る技術の限界に挑戦するとともに、社会科学や哲学などの視点も取り入れ、人間らしさとは何かを再認識することにも取り組んでいきます。

■参考文献

- (1) 山田：“あなたを・もっと・知りたくて——AIで人に迫り脳科学で人を究める,” NTT技術ジャーナル, Vol.32, No.9, pp. 12-17, 2020.
- (2) <https://www.ntt.co.jp/news2014/1405/140522a.html>
- (3) <https://www.toa.co.jp/products/news/2021/news2021-02-10wm.htm>
- (4) <https://www.ntt.co.jp/news2020/2012/201207a.html>
- (5) L. J. Rips, E. E. Smith, and D. L. Medin : “Concepts and Categories: Memory, Meaning, and Metaphysics,” in The Oxford Handbook of Thinking and Reasoning, 2012.
- (6) 柏野：“画像や音を見聞きするだけで賢くなるAI——クロスモーダル情報処理の展開,” NTT技術ジャーナル, Vol.31, No.9, pp. 10-13, 2019.
- (7) 奥村：“乳児期における社会的学習：誰からどのように学ぶのか,” 東京大学出版会, 2020.
- (8) <https://ehon.nttprint.com/>
- (9) D. Hiraoka, Y. Ooishi, R. Mugitani, and M. Nomura : “Relationship between oxytocin and maternal approach behaviors to infants’ vocalizations,” Comprehensive Psychoneuroendocrinology, Vol. 4, Nov. 2020.
- (10) C. S. Fischer : ““Touch Someone” : The Telephone Industry Discovers Sociability,”

Technology and Culture, Vol. 29, No. 1, pp. 32-61, 1988.

- (11) 平田：“未来の電話を考える——遠隔コミュニケーションシステムt-Room,” NTT技術ジャーナル, Vol.19, No.6, pp. 10-12, 2007.
- (12) NTT研究所発 触感コンテンツ専門誌ふるえ：“展示解説“近くにいる”を伝送できる公衆端末「公衆触覚伝話」を体験@NTTインターコミュニケーション・センター[ICC],” Vol.26, No.12, 2019.
- (13) H. I. Liao, M. Kashino, and S. Shimojo : “Attractiveness in the Eyes: A Possibility of Positive Loop between Transient Pupil Constriction and Facial Attraction,” J Cogn Neurosci, Vol. 33, No. 2, pp. 315-340, Feb. 2021.
- (14) <https://www.ntt.co.jp/news2020/2008/200824a.html>
- (15) <https://www.ntt.co.jp/news2017/1705/170529a.html>



山田 武士

次の30年に向けて、CS研は今後もコミュニケーションの本質を探究することで、こころ豊かな社会を築くことをめざした基礎研究に取り組んでいきます。今後とも、皆様のご指導とご支援を心よりお願い申し上げます

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
TEL 0774-93-5000
FAX 0774-93-5026
E-mail takeshi.yamada.bc@hco.ntt.co.jp

機械が会話のパートナーになる日 ——大規模深層学習で拓く 雑談対話システムの新境地

近年、人との自然な雑談を通して人の対話欲求を充足させることを目的とする、雑談対話システムに注目が集まっています。NTTでは以前より雑談対話システムの研究を続けており、複数の対話ロボットを有機的に連動させ対話のスムーズさ・快適さを向上させる研究など、特色豊かな研究を幅広く進めています。本稿では、最新の深層学習モデルを利用した高性能な雑談対話システムについて、NTTが構築したシステムの詳細や現状の到達点・課題を解説します。

| | | | |
|------------|------------|------------|------------|
| すぎやま 杉山 | ひろあき 弘晃 | みずかみ 水上 | まさひろ 雅博 |
| ありもと 有本 | つねひろ 庸浩 | なりまつ 成松 | ひろみ 宏美 |
| ちば 千葉 | ゆうや 祐弥 | なかじま 中嶋 | ひではる 秀治 |

NTT コミュニケーション科学基礎研究所

一問一答型の雑談対話システム

私たちは日々、周りの人々との雑談を楽しみながら生活しています。このような人の対話欲求を充足させることを目的とするシステムを雑談対話システムと呼びます。システムとの対話は場所や時間に制約されないため、独居の人々や、高齢者施設・病院等で生活している人のコミュニケーションの機会を増やすことができます。さらに、人と異なり遠慮や気兼ねもいらぬため、対人コミュニケーションを苦手とする人が安心して話せる相手として、また人に話すのははばかりられるようなプライベートな話題の相談相手としてなど、多様な用途に有望であると考えられています。

こうした雑談対話システムを実現するうえで、私たちはまず、雑談対話の特徴に着目しました。雑談対話は、それまで研究が進められてきたタスク対話（スケジュール管理・レストラン予約など）と異なる、2つの大きな特徴があります。1つは、対話に出現する話題の幅が広い（オープンドメイン）

という特徴です。雑談対話に現れる話題の幅について、私たちが収集したテキスト対話を調べたところ、3680対話中に18000もの話題が含まれていました。一番多い話題であった「旅行」でさえ、全体の0.7%しか含まれておらず、極めてロングテールな分布になっていたのです。これだけの話題をカバーするのは、容易なことではありません。もう1つの特徴は、対話の流れが多様であるということです。スケジュール管理のような対話であれば、ある程度決まった流れが存在するため、あらかじめ流れを想定してシステムを設計することができます。しかし、雑談対話はその場その場で流れが大きく異なるため、あらかじめ流れを想定しておくことが困難です。

これらの特徴のため、当初の雑談対話システムの開発では、ユーザ発話に対して一問一答で応答を生成する、というアプローチが採られました。あらかじめ入力と出力のペア（応答パターン）を大量に用意しておき、ユーザ発話と類似するパターンを検索して応答する、という方法です。もちろん対話

は発話の連なりで構成されますので、文脈を無視した一問一答で良いのか、という議論も当然ありました。しかし実際問題として、文脈を考慮しようにも、発話の組合せが膨大すぎて全く扱いきれなかったのです。

この応答パターンの代表的な作成方法として、ルールベース、抽出ベース、生成ベースの3種類の方法があります。1番目のルールベースは、人手で応答ルールを作成する方法です。ユーザが「こんにちは」と言ったら「こんにちは」と返す、「眠い」と言ったら「おやすみ」と返す、というように、想定されるユーザ発話に対するシステム応答を設計者が作成します。人手で応答文をつくるため、制御性が高く不適切な発話をする危険性が低い、時事ネタのようなユーザを楽しませる発話を用意しやすい、といった利点があります。こうした利点から、SiriやAlexa等、現在の商用システムのほとんどは、ルールベースで実現されています。一方ルールベースの欠点として、人手で発話を構築するため、幅広い話題に対応できるシステムの構築が難しいことが

挙げられます。

2番目の抽出ベースは、大規模データから文（用例）を抽出・検索して発話に利用する方法です。2種類のアプローチがあり、類似文自体を用例として利用する方法（新聞記事、ブログ、ツイート単体など）と、発話の対を用例として利用する方法（対話ログ、ツイートリプライ、QAなど）があります。構築コストが非常に低く、ほぼすべての話題に何かしら応答可能という利点がありますが、類似文を返す場合はオウム返しになりがち、発話の対を返す場合は文脈が合わず関連性の薄い発話が出力されがちという欠点があります。

3番目は、生成ベースという、用例ベースの話題の幅を活かしつつ応答発話の品質を向上させるアプローチです。あらかじめ大量のテキストから、係り受け関係を手掛かりに関連する話題をペアとして抽出しておき、ユーザ発話中の重要な部分に対応するペアを利用して発話を生成します。こうすることで、抽出ベースでの問題点であった、無関係な文やオウム返しを抑制し、高品質な発話を生成することができます。

NTTではこれらの方法を組み合わせ、利点・欠点をうまく補い合うことで、安定して高品質な応答を生成するシステムを実現しています。

一問一答型雑談対話システムの問題点とNTTのアプローチ

ところが、実際にこれらの方法で構築した対話システムと話してみると、どうにもうまく話がかみ合わず、対話が破綻してしまうことがあります。調べてみると、発話単体への応答としては妥当けれども、対話の文脈にそぐわない応答、というものが多く観察されたのです。例えば図1のように、「ラーメン食べに行きたいなあ」というユーザ発話に対する、「ラーメンはスープが命だよ」というシステム応答は、文脈を見なければ自然な応答です。一方、このユーザ発話が、ユーザが糖質制限でラーメンをなかなか食べられない、という文脈で発話されていた場合、上記のシステム発話は、ユーザの意図を無視した、意味の通らない発話となってしまいます。しかしながら、文脈を考慮して応答発話を出力したくとも、発話履歴の組合せが膨大となるため、これまで紹介した方法では考慮しきれません。

そこでNTTでは、3種類のアプローチで改善を図りました。1番目のアプローチは、話者切替による文脈のリセットです。複数のロボットを連携させて対話を進め、2体目のロボットが適宜割り込んで発話し文脈のリセットすることで、比較的小さなデータを使

う場合でも、文脈との齟齬に対するユーザの違和感を軽減する方法を考案しました⁽¹⁾。また、ロボットどうしの自然な対話をあらかじめつくり込んでおくことで、対話が破綻しかけたときでもロボット間対話を挟み込んで対話を自然に継続させたり、ユーザ発話を起点として展開される話の流れをつくり出せたりすることも分かりました。この機能を応用し、京都市動物園で「物知りAIロボット」の実証実験を行い、来場者と動物について知識を深める対話を実現しています⁽²⁾。

2番目のアプローチは、特定話題に限定した、高密度応答パターン列の構築です。当初のオープンドメインな雑談というコンセプトからはいったん離れますが、話題を限定すれば文脈を考慮しきれのではないかと、という真正面からのアプローチです。とはいえ、通常の雑談対話では、どう話題が展開されるか分かりません。そのため、話題を限定しやすいタスク対話と雑談対話の中間点として、議論対話を対象とすることにしました。ある特定の命題（例：永住するなら田舎か都会か）について、論点（例：老後の快適さ）を20個用意し、それぞれの論点について支持する意見・反対する意見を木構造としてどンドンつなげていく、という方法で、議論構造という高密度な応答パターン列を構築しました（図2）。このシステムを米国のオースティンで開催されたSxSW（サウス・バイ・サウス・ウェスト）という展示会で大阪大学・ATRの石黒研究室と共同で披露し、文脈を踏まえた議論対話を実現しています。

3番目のアプローチは、ユーザ発話の誘導による特定の文脈への引き込みです。1番目の物知りAIロボットの

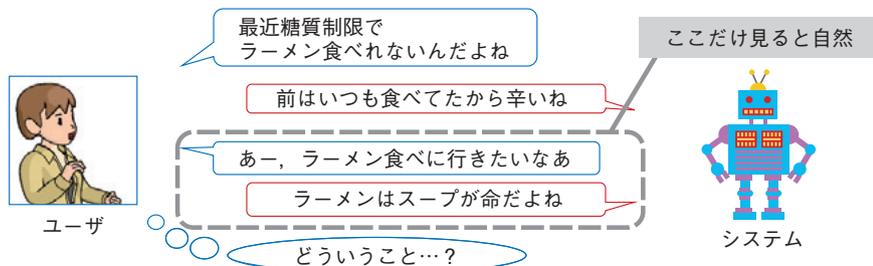


図1 一問一答型雑談対話システムの問題点

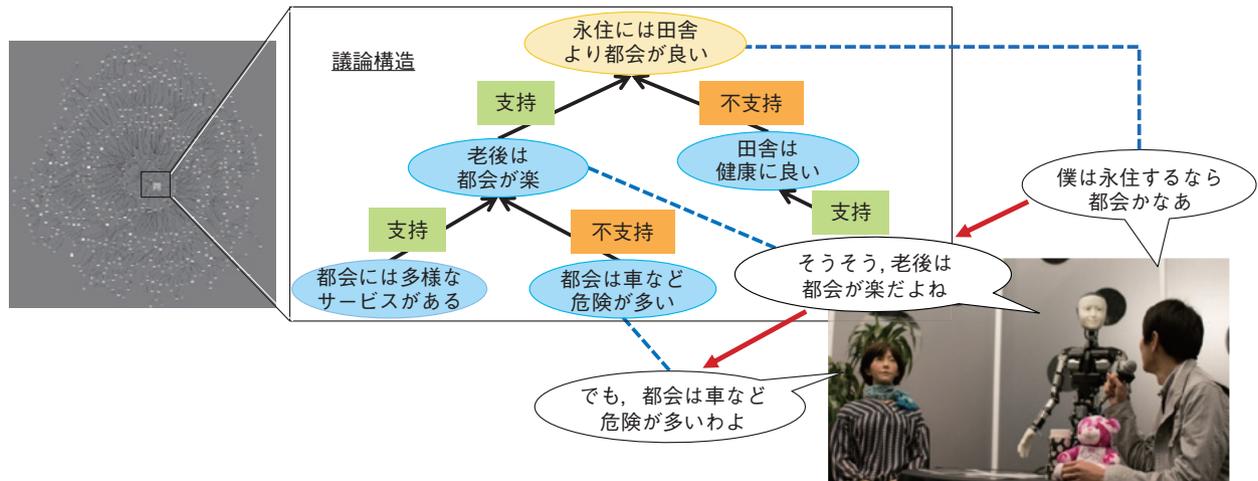


図2 議論構造に基づく議論対話システム

実験や2番目の議論対話システムの実験を通して、タスク対話のように自明な流れが存在しない雑談対話であっても、うまくユーザ発言を誘導できれば、特定の対話の流れに引き込み続けられることに気がきました。これを利用して、タスク対話システムと同様の設計方法で旅行についての雑談を行うシステムを構築したところ、ほとんどのユーザを想定した流れに引き込むことができました。クラウドソーシングを利用した実験でも、非常に小規模なルール量で自然な雑談を実現できることを確認しています。

大規模深層学習による急速な性能向上

さて、ここまで紹介したシステムは、いずれも人がつくった発言や用例を選択するか、単語を組み合わせで人手で構築したテンプレートに当てはめるといった方法で発言していました。一方で近年、深層学習と呼ばれる技術が急速に進展しており、自然言語処理研究全体に非常に大きな影響をもたらしています。特に、大量のテキストデータで文の自然さや基本的な構造をあらか

じめ学習する事前学習と呼ばれる方法が肝になっており、これを用いて学習された汎用言語モデルは、翻訳や質問応答など特定の目的に沿った少量のデータで転移学習 (Fine-tune) することで、非常に高い性能を得られることが知られています。

雑談対話システムも例外ではなく、2020年に相次いで、深層学習を利用した高性能な雑談対話システムが英語圏で提案されました⁽³⁾。NTTでも、Twitterから収集した21億の発言ペア (数発言の文脈を入力、それに後続する1発言を出力とするペア) を用いて事前学習し、これまでの研究で蓄積してきた高品質な対話データ20万ペアを利用してFine-tuneすることで、非常に自然な雑談を行うシステムを実現しています⁽³⁾。このシステムは、雑談対話システムの性能を競う「対話システムライブコンペティション3 (ライブコンペ3)」で圧倒的な性能で最優秀賞を獲得しました。ライブコンペ3では、システムが対応できる話題の幅広さを評価するため、ユーザは2つの固有名詞を話題として選択し、それらに触れるよう対話する、というレギュ

レーションがありました。図3にライブコンペ3でのユーザとの対話 (左がシステム) を示します。このユーザは、「水曜どうでしょう」というバラエティ番組と、「渡辺麻友」というタレントを話題として選んでいました。従来のシステムではここまで細かい話題に適切に応答することは困難だったのですが、私たちの構築したシステムは、渡辺麻友についてはよく知らない、としつつも、見事に応答し続けることに成功しています。

今後の展望

深層学習によって、非常に自然な発言文を生成できるようになった現在でも、課題は山積しています。例えば現在のシステムは、発言の一貫性や事実性について考慮せず、文の自然さ (生成確率) のみを用いて学習されているため、過去の発言と矛盾したことや、事実と異なる「嘘」をよく発言します。さらに、対話の内容や相手のことを記憶していないため、数カ月わたって繰り返し対話し続けることは困難です。人の対話欲求を継続的に満たす雑談対話システム実現に向けて、これら

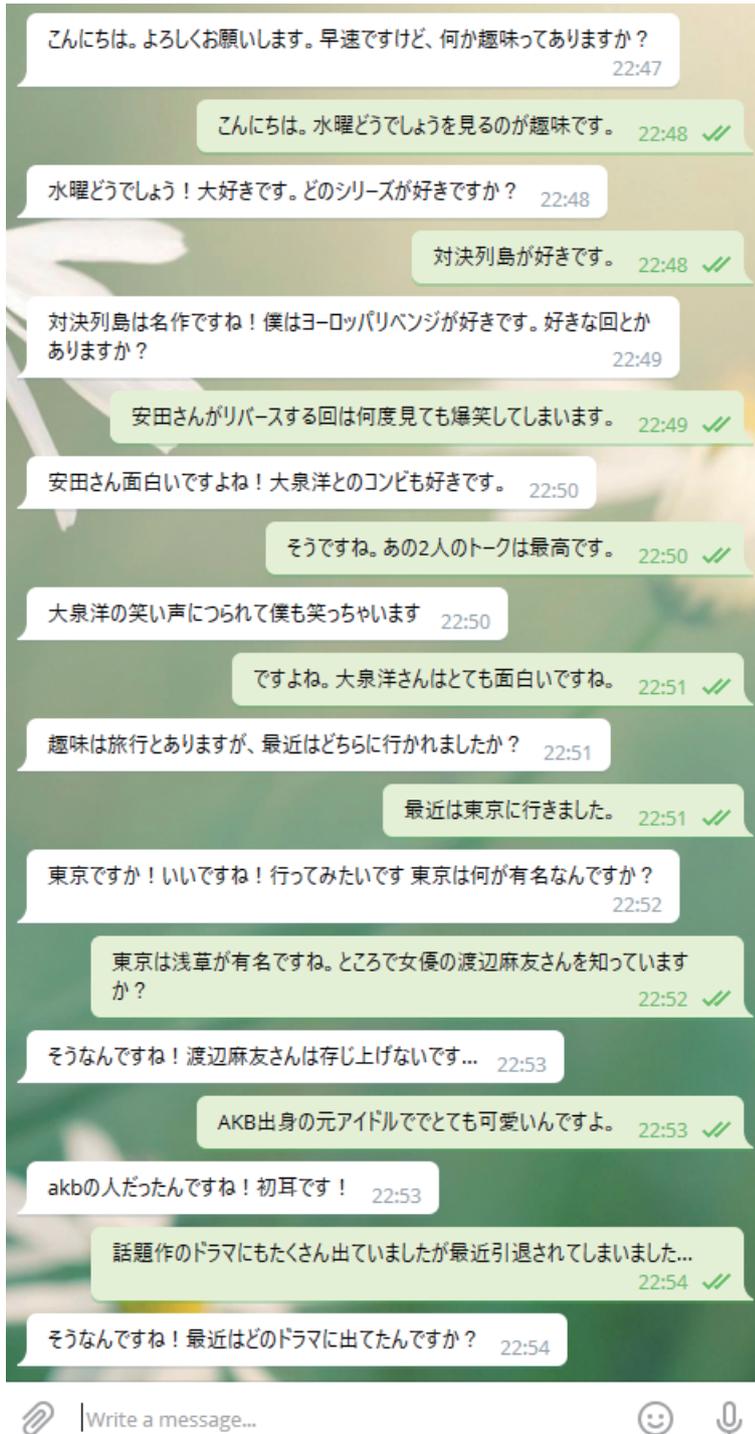


図3 ライブコンペ3での対話例

の課題に取り組んでいく予定です。

■参考文献

(1) H. Sugiyama, T. Meguro, Y. Yoshikawa, and J. Yamato: "Improving Dialogue Continuity

using Inter-Robot Interaction," Proc. of IRO-MAN 2018, pp. 105-112, Nanjing, China, August 2018.

(2) 杉山・水上・成松: "複数ロボット協調による一問一答型雑談対話からの脱却," 第32回人工知能学会全国大会, 2018.

(3) S. Roller, E. Dinan, N. Goyal, D. Ju, M. Williamson, Y. Liu, J. Xu, M. Ott, K. Shuster, E. M. Smith, Y. L. Boureau, and J. Weston: "Recipes for building an open-domain chatbot," Proc. of EACL 2021: Main Volume, pp. 300-325, April 2021.

(4) 杉山・成松・水上・有本・千葉・目黒・中嶋: "Transformer encoder-decoder モデルによる趣味雑談システムの構築," 言語・音声理解と対話処理研究会 (SIG-SLUD), Vol. B5, No. 02, pp. 104-109, 2020.



(上段左から) 杉山 弘晃/ 成松 宏美
(中段左から) 千葉 祐弥/ 有本 庸浩
(下段左から) 水上 雅博/ 中嶋 秀治

大規模深層学習に基づく対話モデルによって、雑談対話システムの品質が基礎研究から実サービスに急接近しています。システムと当たり前会話する未来がすぐそこまで来ていると感じていますので、機を逃さず研究開発に取り組んでいきたいと思ひます。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
協創情報研究部
インタラクション対話研究グループ
TEL 0774-93-5020
FAX 0774-93-5026
E-mail cs-liaison-ml@hco.ntt.co.jp

まなざしに宿る運動の巧みさ

人に寄り添うICTの実現において鍵を握るのが、人の「ふるまい」や「行為」を紐解くこと、つまり「運動」の本質的理解です。人はいとも簡単に運動を実現しているようにみえますが、その背後には、目を動かして目標物をとらえ、視覚情報から運動を生成する複雑な脳内メカニズムが存在します。本稿では、「なぜ運動にとって目が重要なのか」という問いに対して、従来の考え方に加えて、NTTコミュニケーション科学基礎研究所の最新の知見を紹介します。

あべかわ なおとし
安部川 直稔

NTT コミュニケーション科学基礎研究所

人の運動を支える 「目と腕の協調関係」

歩行や車の運転といった日常生活から、テニスや野球などのスポーツに至るまで、私たちの巧みな身体動作の実現には、腕や足の動きに加えて、目の動かし方が重要な要素になります。例えばテニスのレッスン時、「ボールを良く見て」と言われた経験はないでしょうか。また、一流のアスリートが、自身の目にかかわる話をしていることを耳にしたことはないでしょうか。これらの例に代表されるように、脳は目と腕を協調させて動かす仕組みを持っています。本稿では、これらの仕組みについて従来知見を概説した後に、私たちの最近の取り組みによって明らかになってきた「目・腕協調関係の重要性」に関する新たな考え方について解説します。

目と腕が協調して動く仕組み

運動の一例として、「コップに手を伸ばす」ことを考えてみます。まず、位置を確認するためにコップに目を向

けますが、同時に、コップの大きさ、水の量、掴みやすさなど、必要な情報を視覚的に取得します。人を含めた霊長類の視解像度は、目の中心でもっとも高く、周辺に向かうほど低くなるということが知られています。脳は、これから行う腕運動にとって必要な情報をより正確に得るために目を先行的に動かし、適切な腕運動出力へとつなげていきます。

このような目と腕の協調機構を探る研究が、人やサルへの行動実験、脳活動計測などさまざまな手法を通じて数多く行われてきました。例えば、腕に先行して目が動くことは前述のとおりですが、その時間関係は常に一定の範囲内で保たれることが知られています。また、腕と目（視線）の最終到達地点も、相互に関連します。このような関係から、脳内の目と腕の運動生成システムは相互に情報をやり取りし、時間的に協調した運動出力を行うメカニズムが存在すると考えられています。協調機構を実現する脳メカニズムの全容はまだ明らかになっていませんが、大脳、小脳、脳幹を含むさまざまなネッ

トワークの関与が示唆されています。ただし、これら従来研究の根底には、「視解像度のもっとも高い視野中心で目標をとらえて腕運動を行う“中心視運動”の重要性」を常に強調する考え方がありました。

従来の考え方（中心視運動を重要視）に対する疑問

先行研究では主に「静止目標への腕運動」が実験課題として用いられてきましたが、実環境では、目標物は複雑かつ予測できない動きをする可能性があります。テニスや野球を例にとれば、数百ミリ秒以内の厳しい時間制約の中で、即座に判断し、複雑な運動（運動スキル）を生成する必要があります。これらの環境においても、「目標物を常に目の中心でとらえ、その目の動きに協調して腕運動が生成される」という従来研究の考え方は成り立つのでしょうか。さらには、新規の運動スキルを獲得・発揮する過程では、目と腕の協調関係はどのような重要性があるのでしょうか。これらの疑問点が、私たちが研究を始めた出発点となってい

ます。

NTTコミュニケーション科学基礎研究所では、突然動く目標物を追いかける腕運動課題⁽¹⁾や、プロ野球選手のバッティング計測⁽²⁾など一連の研究を推し進め、その結果、複雑な運動スキルが求められる課題下でも、目・腕の間に一定の協調関係が成り立つことが分かってきました。一方、その時間関係や、目の向かう先など詳細な解析結果は、「目標を目の中心でとらえる」という従来の考え方とは必ずしも一致しません。例えば、プロ野球選手のバッティング実験の結果では、バットがボールに当たる瞬間のわずか100ミリ秒前に、ボールに向かう高速な眼球運動（サッカード）が頻繁に観察されます。バットを振る行為は100ミリ秒以上かかりますので、目が動くタイミングにおいて、腕はすでに動き出しています。また、視覚から運動出力に至る脳内の処理時間を考慮すると、ボールを打つ瞬間にボールを目の中心でとらえたとしても、その視覚情報をバッティングに利用することはできません。それでもなぜ、一流選手は、バッティングの直前に目を動かすのでしょうか。

腕運動学習と密接に関連する「目と腕の位置関係」

私たちは、これまでの研究結果や実世界の伝承を整理した結果、中心視であっても、周辺視であっても、目と腕

の位置関係自体が、腕運動スキルの獲得・発揮にとって、重要な要素になっていると考えました⁽³⁾。この仮説を検証するためには、目と腕の関係性を、運動学習の過程から観察・議論する必要があります。

そこでまず、運動学習を実験的に計測する方法を説明します。実験参加者はペンタブレット上でペンを操作し、モニタに提示される「手の位置を示すカーソル」を視覚目標へと動かします（図1左）。この際、「実際の腕」と「視覚カーソル」の動きの間に、30°程度の回転変換を加えます（図1右）。すると、参加者の腕は正しく目標に向かっていても、視覚カーソルはずれた方向に向かうため、運動エラーが生じます。この状況を数百回と繰り返すうちに、運動エラーが減少するように、腕運動自体が次第に変化していきます。この変化を運動学習として評価します。

さて、このような学習パラダイムを用いて、中心視運動と周辺視運動が運

動学習とどのように関連しているか、実験1で調べました（図2左上）。条件1では、参加者は中心視運動で回転変換に対する運動学習を行います。その後、その学習効果をどの程度発揮できるかについて、学習時と同じ中心視運動と、学習時とは異なる周辺視運動で比較しました（図2右上、条件1）。その結果、学習効果の発揮率は、中心視運動に対して周辺視運動では低くなることが明らかになりました（図2左下、条件1）。次の条件2では、参加者は周辺視運動で学習を行います（図2右上、条件2）。その後の発揮率の結果は、条件1とは異なり、周辺視運動に比較して、中心視運動の方が低くなりました（図2左下、条件2）。この結果は、「中心視運動が周辺視運動に対して常に優れている」という従来の考え方では説明できません。中心視運動であっても、周辺視運動であっても、学習効果を効率良く発揮するためには、学習時に用いた目と腕の位置関係を保つ必要があることが明らかにな

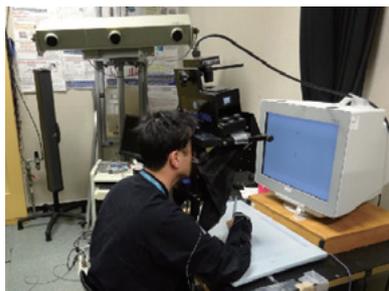


図1 腕運動学習実験を行う装置とパラダイム

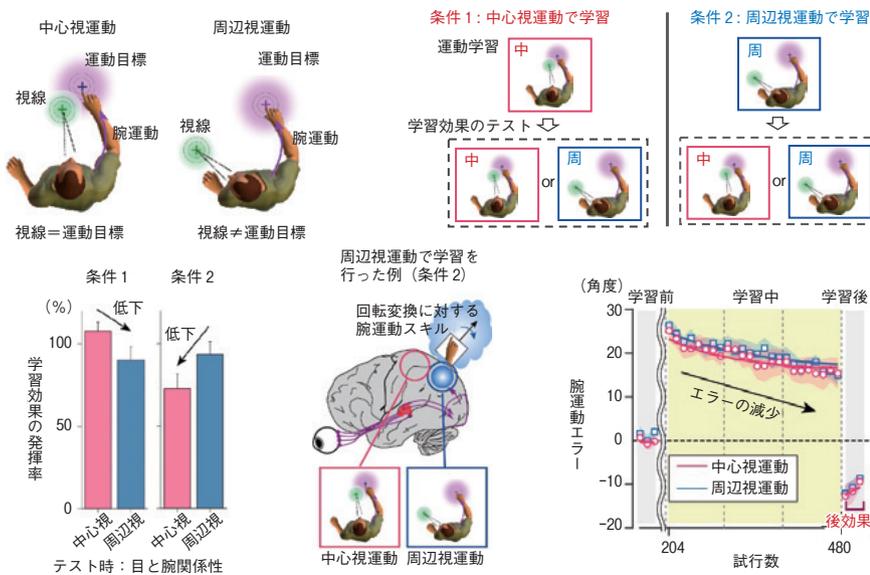


図2 実験課題と実験結果

りました。

この結果は、中心視運動と周辺視運動が、脳内で異なる領域（あるいは表現）で処理されることを仮定するとうまく説明することができます（図2中下）。運動学習の結果、つまり運動メモリも、学習時に用いた目と腕の関係性に関連する表現に紐付けられています。このため、学習時とは異なる目と腕の関係性を用いると、この運動メモリを100%利用できないこととなります。この考え方が正しければ、分離表現をうまく利用することで、異なる運動スキルを同時に獲得することができるかもしれません。この可能性を検証するために、実験2を行いました。

異なる運動スキルの同時獲得とは、例えばテニスのフォアハンドとバック

ハンドを同時に練習することに相当します。初中級者の方が、これらのショットを練習する際、ある試行はフォアハンド、次の試行はバックハンドと順不同に学ぶことは非効率であり、学習が難しくなることは想像しやすいかと思います。実際、異なる運動スキルの同時獲得は難しいことが実験的にも確かめられており、これは異なる運動メモリが試行ごとに上書きし合う、つまり干渉することに起因すると考えられています。

実験2では、異なるスキルとして、回転変換の右回りと左回りを導入し、これらを順不同に提示します。目と腕の関係性についても、中心視運動と周辺視運動のどちらを行うか、試行ごとに指示します。ただし、中心視運動の

試行では、必ず右回り変換が、周辺視運動の試行では左回り変換が提示されるようデザインしておきます。中心視運動と周辺視運動に関連する脳内の分離表現に、異なる運動スキルが干渉することなく、うまく獲得されるという仮定です。実験結果は、私たちの考えを支持するもので、右回りと左回りの双方の試行（つまり中心視運動と周辺視運動の試行）に対してエラーが減少し、異なる運動スキルの同時獲得が可能になることが明らかになりました（図2右下）。また、エラーの減少のみならず、学習後の後効果*も顕著に観察されます。このことは、学習後にある試行を中心視運動で行うのか、周辺視運動で行うのかに応じて、適切に運動メモリを切り替えていることを示唆します。

今後の展望

私たちの研究成果により、視線と運動目標が「一致している・離れている」という位置関係自体が、腕運動・腕運動学習で利用される重要な要素になっていることが明らかになってきました。このことは、運動スキルの獲得と生成には、「運動目標を常に見ること」以上に、「目と腕の位置関係を一定に保つ」ことが重要であることを示して

* 後効果：回転変換に対する学習後に、回転変換を取り除いた状態で腕運動を評価します。大きい負値ほど、学習した運動パターンを適切に発揮します。

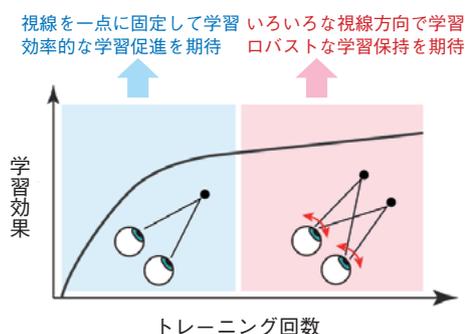


図3 視線に着目した腕運動トレーニングへの応用例

います。

このような知見は、目の重要性に着目した新たなトレーニング法やリハビリテーションプログラムに応用できる可能性を示しています。例えば、何かしらのトレーニングを行う場合、学習の初期はとにかく効率を高め、早く学習を進めることが有用かと思われます(図3青塗部分)。この場合、視線方向を1カ所に止め、脳内の1つの表現を用いて学習することで、学習を速めることができます。一方、学習後期は、速さ以上に、忘れにくさなど学習のロバストさが必要とされます(図3赤塗部分)。この場合、積極的に視線を動かして、脳内の複数の表現を用いて学習することで、ロバストな学習が可能になるかもしれません。

また、目と腕の関係性は、脳が常に計算・処理・制御していることから、腕運動学習のみならず、人のさまざまな動き・ふるまいと関連していると考えられます。私たちは今後も、目と腕の関係性を足掛かりとして、人の運動

メカニズムを本質的に理解し、人の自然なふるまいを引き出すインタフェースの設計や、人とロボットの効果的なコミュニケーション設計など、ICTに新しい価値を幅広く提案していきます。

本研究の一部は、平成28年～令和2年度文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「人工知能と脳科学の対照と融合 潜在的運動における学習適応メカニズムの解明と計算モデル構築(JP16H06566)」の助成を受けて行われました。

参考文献

- (1) N. Abekawa, T. Inui, and H. Gomi: "Eye-hand coordination in on-line visuomotor adjustments," *Neuroreport*, Vol. 25, No. 7, pp. 441-445, May 2014.
- (2) Y. Kishita, H. Ueda, and M. Kashino: "Eye and head movements of elite baseball players in real batting," *Front. Sports Act. Living*, Vol. 2, p. 3, Jan. 2020.
- (3) N. Abekawa, S. Ito, and H. Gomi: "Different learning and generalization for reaching movements in foveal and peripheral vision," *Proc. of Adv. Mot. Learn. Mot. Control*, 2019.



安部川 直稔

人の本質を理解することは、想像以上に奥が深く、自分も含めてこれまで常識だと思ってきたことが、違う観点から整理されることがよくあります。多くの方との意見交換、共同研究をぜひ進めたいと考えています。

◆問い合わせ先

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

聞きたい人の声に耳を傾ける AI —— 深層学習に基づく音声の選択的聴取技術 SpeakerBeam

人は、騒がしい環境の中でも、聞きたい人（目的話者）の声の特徴などの手掛かりに注目してその人の声を聞き取ることができる、「選択的聴取」と呼ばれる能力を持っています。本稿では、この選択的聴取をコンピュータ上で実現することをめざした研究として、目的話者の音声の特徴を示す手掛かりに基づき、混ざった音声の中から目的話者の音声のみを抽出する技術 SpeakerBeam について紹介します。

| | | | |
|---------------|------|------|------|
| | | おちあい | つばさ |
| Marc Delcroix | | 落合 | 翼 |
| さとう | ひろし | おおいし | やすのり |
| 佐藤 | 宏 | 大石 | 康智 |
| きのした | けいすけ | なかに | ともひろ |
| 木下 | 慶介 | 中谷 | 智広 |
| あらき | しょうこ | | |
| 荒木 | 章子 | | |

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

はじめに

人は、パーティ会場などの騒がしい環境の中でも、聞きたい人（目的話者）の手掛かり（声の特徴、話している内容など）に注目して、その人の声を聞き取ることができる「選択的聴取」の能力を持っています。私たちは、この選択的聴取をコンピュータ上で実現するため、長年にわたって研究を進めてきました。例えば、複数人が同時に話す状況では、互いに似た特徴を持つ音声どうしが混ざるため、その中から聞きたい話者の声を取り出すことは難しい課題です。これに対する従来技術として、混ざった音声を各話者の音声へ分離する音源分離技術 (Blind Source Separation: BSS) があり、近年、高品質な分離が実現できるようになってきました。しかし、BSSは①混合音声に含まれる話者数に関する事前知識もしくはその推定が必要、②各分離音声と各話者との対応関係が不定なため、どの分離音声为目的話者の音声であるかが不明、といった制約が

あり、さまざまな応用先で利用する際の課題となっていました。

BSSに代わる新たな枠組みとして、混合音声から聞きたい話者の音声のみを抽出する、目的話者抽出技術が最近注目されています。目的話者抽出は、聞きたい話者の手掛かりを補助情報として活用し、混合音声の中からその話者の音声のみを抽出します^{(1)~(3)}。話者の手掛かりとしては、例えば、目的話者の発話から推定された声の特徴（音響手掛かり）や唇の映像データ（映像手掛かり）などが考えられます。目的話者抽出は混合音声中の話者数によらずに目的話者の音声のみを抽出することができ、また抽出音声と話者の対応関係も明らかであるため、BSSが持つ課題を回避することが可能です。

本稿では、以前紹介した目的話者の声の特徴に基づく目的話者抽出 SpeakerBeam^{(1), (2)}をレビューし、混合音声の中の話者の声が似ている際に抽出が難しくなる SpeakerBeam の問題点について実験結果を示しながら説明します。次に、この問題を回避

する方法の1つとして、マルチモーダル (Multimodal:MM) SpeakerBeam を紹介します。最後に、目的話者抽出技術の他の音声処理タスクへの拡張と、さらに人間の選択的聴取の能力に近づけるための今後の取り組みについて述べます。

ニューラルネットワークによる 目的話者抽出 SpeakerBeam

私たちは、目的話者抽出技術として、ニューラルネットワーク (Neural Network:NN) を用いた新技術 SpeakerBeam を提案しました (図1)。SpeakerBeam の特徴は、NN の挙動を制御するために、目的話者に関する何らかの手掛かりを与える仕組みを導入したことにあります。SpeakerBeam は、図1にあるように、事前録音された10秒程度の目的話者の音声（音響手掛かり）からその声の特徴量を抽出する NN (①話者特徴抽出 NN) と、抽出した特徴量を補助入力として混合音声から目的話者の音声抽出する NN (②目的話者抽出

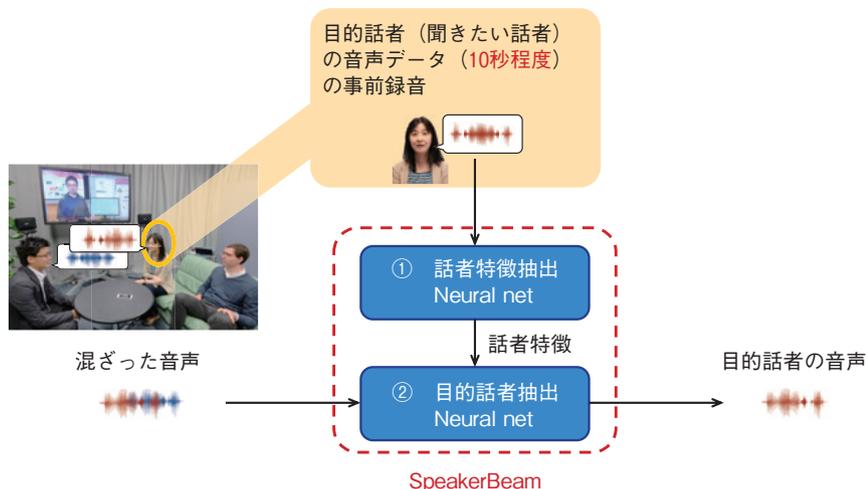


図1 目的話者抽出技術 SpeakerBeam の仕組み

- ☺ 平均的に高い抽出性能
- ☹ 声が似ていると性能が悪化
- ☺ 全体的に性能改善
- ☺ 特に同性の場合は改善が大きい

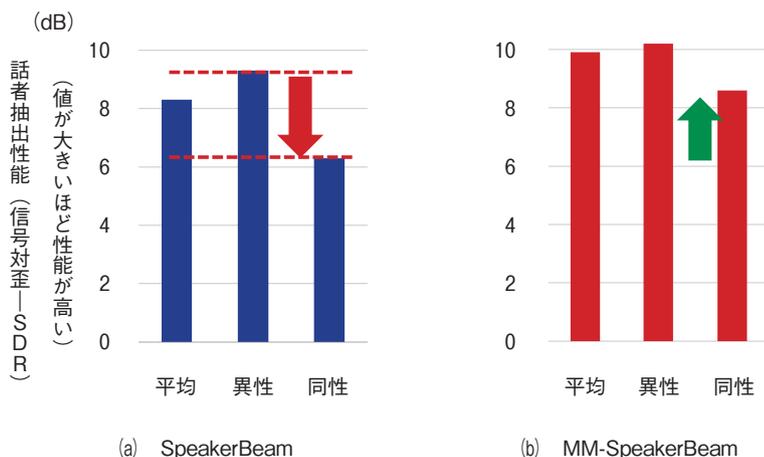


図2 SpeakerBeam の性能 (2人の話者の英語音声を混ぜた実験)

NN), の2つのNNによって構成されています。SpeakerBeamは、目的話者の手掛かり(声の特徴)に基づく目的話者抽出、すなわち選択的聴取を、世界で初めて実現した手法です。

SpeakerBeamの性能を評価するために、英語発話の話者2人の混合音声を用いた、目的話者抽出実験を行いました。その実験結果を図2(a)に示します。目的話者抽出性能を測るため

の評価指標としては、信号対歪み比(Signal-to-Distortion Ratio : SDR)を採用しました。SDRは、その数値が高いほど、抽出性能が高いことを示します。図から、SpeakerBeamは平均して8 dB以上の高い抽出性能を達成していることが確認できます。一方、この結果を同性どうしと異性どうしの混合に分析してみると、同性どうしの性能は大きく劣化することが分かりま

す。これは、同性の混合音声では、話者の声の特徴が互いに似通っていて、目的話者の特定や抽出を行うことが困難になる場合があるためです。この問題に対処するための、方向性の1つとしては、声の特徴に依存しない、音響手掛かりとは別の手掛かりを用いることが考えられます。

MM-SpeakerBeam

これまでも、音響手掛かり(声の特徴)以外の、映像情報を手掛かりとした話者抽出はいくつか検討されています。例えば、参考文献(3)では、ビデオカメラを利用して、話している目的話者の顔や唇の動きを録画し、映像特徴抽出NN(例えばFaceNetという学習済みの顔認識ネットワーク)を使って、その顔画像の時系列から唇の動きを表す時系列特徴量を抽出します。目的話者抽出NNは、これを映像の手掛かりとして利用し、唇の動きに合致した音声を抽出します⁽³⁾。映像情報を手掛かりに用いた目的話者抽出は、似た声の人どうしであっても抽出が可能であると期待されます。例えば、極端な例では、同じ人が別の発話を話している混合音声でも、唇の動きが違っていれば、目的音声の抽出が可能であるとの報告もあります⁽³⁾。このように、映像情報を使う目的話者抽出は、声が似ている場合にSpeakerBeamの抽出性能が劣化する問題に対処する1つの方法です。一方で、実際の映像収録状況では、顔や唇が隠れていることはよくあり、このような状況では映像情報の手掛かりは役に立たないという問題があります。

そこで私たちは、音響手掛かりと映

像手掛かりに基づく方法のそれぞれの利点を活用するため、SpeakerBeamを複数の手掛かりを選択的に利用可能なかたちに拡張したMM-SpeakerBeamを提案しています^{(4), (5)}。MM-SpeakerBeamの仕組みを図3に示します。MM-SpeakerBeamはこの図のように、音響の手掛かりに加え、映像の手掛かりも利用する方法になります。映像の手掛かりは、参考文献⁽³⁾と同様に、ビデオカメラを用いて録画した目的話者の顔（唇の動き）の時系列になります。MM-SpeakerBeamは、複数の手掛かりから、信頼度に応じて手掛かりの選択ができる仕組みを導入しています。これを実現するために、ニューラル機械翻訳をはじめとしたさまざまな分野で、近年よく使われているAttention機構を利用しました。また、図にある目的話者抽出NNは従来のSpeakerBeamと同様のNNです。

MM-SpeakerBeamの最大の特長は、片方の手掛かりが役に立たない場合でも、他の手掛かりを使うことによって、高精度な目的話者抽出が可能

になることです。例えば、声の性質が似た話者のときには、映像の手掛かりを主に利用し、逆に、唇が画面に映らない場合には、音響の手掛かりを主に利用するようになります。このように、その時々で利用できる情報源を活用することで、多様な状況でもより安定に、より高性能に動作します。

MM-SpeakerBeamの抽出結果を図2(b)に示します。マルチモーダル手掛かりを使うことによって、性能が大幅に改善していること、特に同性の場合に大きな改善が得られることを確認できます。このように、MM-SpeakerBeamは、複数モダリティ（例えば音声と映像による）の手掛かりを活用することで、互いに似た声の話者の混合音声からの目的話者抽出性能が大きく向上し、安定した抽出を可能とします。デモサイト⁽⁶⁾にて実際の処理音声の例を聞くことができます。

他の音声処理タスクへの拡張

SpeakerBeamの枠組みは、目的話者抽出の問題以外にも、さまざまな場面でその応用が研究されています。

実際、SpeakerBeamの登場を受けて、①目的話者の手掛かりに基づいてその人の発話区間を推定する（目的話者発話区間推定）問題⁽⁷⁾や、②信号の抽出を経ずに目的話者の手掛かりに基づいてその人の発話内容を直接的に推定する（目的話者音声認識）問題⁽⁸⁾などの新たな試みがなされています。

今後の展開

SpeakerBeamの応用先として、例えば、目的話者の声を聞き取りやすくする補聴器やボイスレコーダ、特定の人のみに反応するスマートデバイス、会議音声の議事録システムなど、さまざまなものが考えられます。さらに最近の進展として、音声だけでなく任意の音を抽出できる、ユニバーサル音抽出の研究にも取り組んでいます⁽⁹⁾（図4）。これは、音声や映像に基づく話者情報ではなく、聞きたい音の種類に関する手掛かりを用いることで、該当する種類の音のみを抽出する枠組みです。この技術により、例えば、消防車の音と女性の声に注意し、犬の声や他の音を無視できるような未来の音声デバイスを実現できるようになると期待されます。この技術のデモ音は、デモサイト⁽¹⁰⁾にて聞くことができます。

また、人間は音や映像といった手掛かりのほかにも、自身の聞きたい「話題」に注目し、その人の声を聞き取る能力を持っています。すなわち人間は、話している内容や概念といった、より抽象度の高い手掛かりに基づく選択的聴取もできるのです。SpeakerBeam技術を、より抽象度の高い手掛かりをも扱えるように拡張することができれば、私たちの長年の研究目標である人

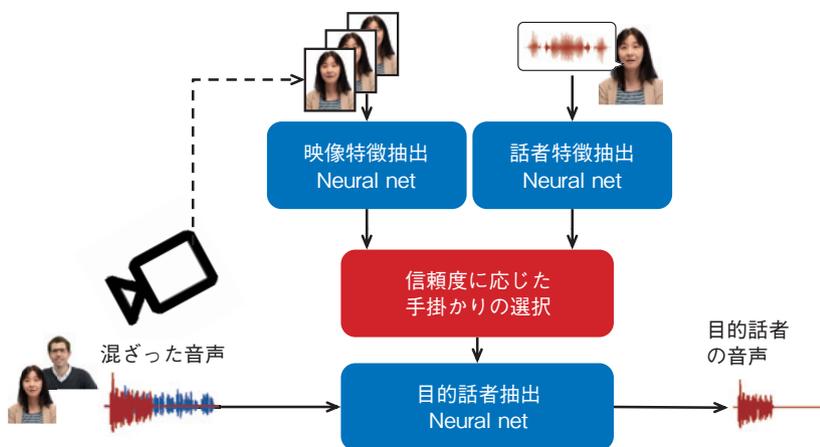


図3 MM-SpeakerBeamの仕組み



図4 音声以外の音も扱えるユニバーサルサウンド抽出

間の選択的聴取の実現により近づいていけるものと考えています。

これを実現するためには、①どうやって概念を表現・獲得するか、②概念を表現できたとしても、どうやってそれを使って、聞きたい会話を抽出するか、の2つの研究課題があります。

①については、すでに音声と映像から内容・概念を獲得する研究を行っています⁽¹⁾。②については、今度の研究課題の1つとして取り組んでいきたいと考えています。

■参考文献

(1) Delcroix・Zmolikova・木下・荒木・小川・中谷：“SpeakerBeam: 聞きたい人の声に耳を傾けるコンピュータ——深層学習に基づく音声の選択的聴取,” NTT技術ジャーナル, Vol. 30, No. 9, pp. 12-15, 2018.
 (2) K. Zmolikova, M. Delcroix, K. Kinoshita, T. Ochiai, T. Nakatani, L. Burget, and J. Cernocky: “SpeakerBeam: Speaker Aware Neural Network for Target Speaker

Extraction in Speech Mixtures,” IEEE JSTSP, Vol. 13, No. 4, pp. 800-814, 2019.
 (3) A. Ephrat, I. Mosseri, O. Lang, T. Dekel, K. Wilson, A. Hassidim, W. T. Freeman, and M. Rubinstein: “Looking to listen at the cocktail party: a speaker-independent audio-visual model for speech separation,” ACM Trans. Graph., Vol. 37, No. 4, Article 112, pp.1-11, August 2018.
 (4) T. Ochiai, M. Delcroix, K. Kinoshita, A. Ogawa, and T. Nakatani: “Multimodal SpeakerBeam: Single channel target speech extraction with audio-visual speaker clues,” Proc. of INTERSPEECH 2019, Graz, Austria, Sept. 2019.
 (5) H. Sato, T. Ochiai, K. Kinoshita, M. Delcroix, T. Nakatani, and S. Araki: “Multimodal Attention Fusion for Target Speaker Extraction,” Proc. of SLT 2021, pp. 778-784, 2021.
 (6) http://www.kecl.ntt.co.jp/icl/signal/member/demo/audio_visual_speakerbeam.html
 (7) I. Medennikov, M. Korenevsky, T. Prisyach, Y. Khokhlov, M. Korenevskaya, I. Sorokin, T. Timofeeva, A. Mitrofanov, A. Andrusenko, I. Podluzhny, A. Laptev, and A. Romanenko: “Target-Speaker Voice Activity Detection: A Novel Approach for Multi-Speaker Diarization in a Dinner Party Scenario,” Proc. of INTERSPEECH 2020, Shanghai, China, Oct. 2020.



(上段左から) Marc Delcroix/ 落合 翼/
佐藤 宏/ 大石 康智

(下段左から) 木下 慶介/ 中谷 智広/
荒木 章子

私たちは、ロボットやコンピュータなどが、人間と同様に私たちの会話を理解できるように、日々研究を進めています。目的話者抽出は、それを達成するための重要な要素技術と考えています。SpeakerBeamをもっと発展させ、人間の選択的聴取の能力により近づけていきたいと考えています。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
 メディア情報処理研究部
 信号処理研究グループ
 TEL 0774-93-5030
 FAX 0774-93-5026
 E-mail cs-liaison-ml@hco.ntt.co.jp

錯覚現象を応用した物体の触り心地変調手法

手で、例えば石をこすっても、持っても、叩いても、その触り心地を毛皮やスポンジだと勘違いすることはないように、人間の触り心地判断はとても安定しているようにみえます。しかし、ベルベットハンド錯覚という現象は、触れた物体に対する触り心地の判断が簡単に歪められてしまうことを示しています。本稿では、この現象の最中の触り心地を具体的に調べた研究や、この現象を応用した触り心地変調手法について説明します。

よこさか

横坂

たくみ

拓巳

くろき

黒木

しのぶ

忍

にしだ

西田

しんや

眞也

NTT コミュニケーション科学基礎研究所

日常に潜む触り心地の錯覚

その昔、高校の体育の授業でテニスをプレーする機会がありましたが、学生の数に比べてテニスコートの数が圧倒的に少ないので、授業時間のほとんどは手持ち無沙汰にテニスラケットを手の中で転がしていたものでした。あるとき、気まぐれにラケットのガット部分（網目の部分）を両手で挟んで、そこを中心としてラケットを振り回すという暴挙に出ました。若く、あまりにも暇だったためです。今思えばそれがベルベットハンド錯覚との邂逅でした。

錯覚に学ぶ

視覚ディスプレイ（モニター）や聴覚ディスプレイ（スピーカ）に比べると、触覚ディスプレイはまだ実用レベルに至っていないと思われるかもしれませんが、その表現力は着実に向上しつつあります。例えば、ゲーム機のコントローラでは内部に仕込んだ振動子を制御することで、さまざまな対象の触り心地を表現できるようになってき

ました。一方で、コントローラ越しではなく、まるで自身の皮膚で直接触れているかのように、さまざまな物体の触り心地を提示可能な手法は、まだ確立されていません。これは、皮膚で直接物体に触れる場合は皮膚上に生じる振動だけでなく、物体の形状や細かな凹凸パターン、弾性、熱伝導率、水分含有率などのさまざまな物理特性や状態も触り心地の判断に用いられるためであり、このことが複雑な特性や状態を柔軟に再現提示する装置の実現を困難にしています。そこでヒントとなるのが、触り心地の錯覚現象です。

錯覚というと動かないはずの絵が動いて見えるような目の錯覚（錯視）が有名ですが、手などの皮膚で生じる錯覚（錯触）も存在します。錯触と一言でいっても、実際とは異なる形状や重量、動き、触り心地などいろいろな属性を実際と異なるように知覚してしまう現象が知られています^{(1), (2)}。錯触は、我々人間が物体に触れたときに、その物体の性質をどのように推定しているのかというメカニズムを考えるためのヒントを与えてくれるという点で

重要です。本稿では、触り心地の錯覚の1つとして知られているベルベットハンド錯覚に着目しました。ベルベットハンド錯覚では、図1のように両手で並んだワイヤ（例えばラケットのガット）の部分をつまんで、両手もしくはワイヤのいずれかを前後に動かすと、両手の間に明らかにワイヤとは異なる奇妙な触り心地が生じます⁽³⁾。その名前にベルベットを冠しているのは、この奇妙な触り心地がベルベットに似ていると思った人がいたからだと思われませんが、これは重要な示唆です。ベルベットハンド錯覚は、前述したようなワイヤの形状や細かな凹凸パターン、弾性などの複雑なパラメータを制御してい

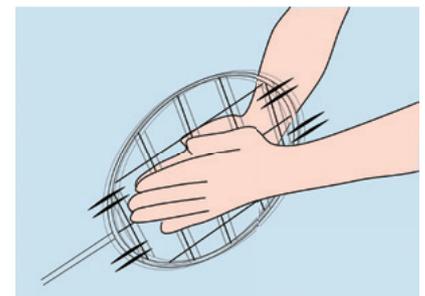


図1 両手でワイヤを挟んでこするとベルベットハンド錯覚が生じる

ないにもかかわらず、ワイヤの動かし方を変えるだけで、直接手の皮膚にベルベットのような全く異なる触り心地を生じさせる現象であるといえます。私たちは、この現象を詳細に調べること、手の皮膚に対して直接さまざまな触り心地をつくり出せる方法のヒントが見つかるのではないかと考えました。

ベルベットハンド錯覚とは何の錯覚なのか

ベルベットハンド錯覚を実際に体験していただくと分かりますが、ワイヤを動かしたときに生じる奇妙な触り心地が具体的にどんな感覚なのかを言葉で表現することは、なかなか簡単ではありません。このことが、これまでのベルベットハンド錯覚の研究における問題の定義、すなわちベルベットハンド錯覚はそもそも何を、どのように錯覚する現象なのかを定量的・定性的に理解することを難しくしていました。

そこで私たちは、ベルベットハンド錯覚とはどのような現象なのかを理解することを試みる実験を行いました⁽⁴⁾。この実験において、参加者は、ワイヤが両手の間で動いたときの触り心地〔つまり、ベルベットハンド錯覚の最中の触り心地（図2(a)）を、身の回りのさまざまな素材の触り心地（図2(b)）と比較しました。特に、ベルベットハンド錯覚の強さと関係した触り心地の変化を特定するために、ワイヤ間の間隔が狭い条件や広い条件、ワイヤを前後に動かす条件や上下に動かす条件、両手ではなく片手で触れる条件などさまざまなワイヤ条件（図2(c)）を提示することで、ベルベットハンド錯覚の強さをコントロールしました。また、これらのワイヤ条件それぞれについて、ベルベットハンド錯覚の強さも評価してもらいました。

ベルベットハンド錯覚の最中の触り心地やさまざまな素材の触り心地がどれくらい似ているのかを二次元空間上

に可視化した結果を図3に示します。ワイヤ条件の触り心地や素材の触り心地を粗さや硬さの観点で評価してもらった結果から、この二次元空間の横軸は柔らかさと温かさを、縦軸は滑らかさと関係することが分かっています。面白いことに、ワイヤ条件における錯覚の強さの評価値をこの解析に使っていないにもかかわらず、二次元空間上で錯覚が弱い条件から強い条件までその触り心地が直線状に順に並んでいました（横軸、縦軸それぞれとベルベットハンド錯覚の強さの相関は、それぞれ0.75と-0.93でした）。一番錯覚が弱かったのは片手でワイヤに触れる条件（図3右下）で、その触り心地は金網の触り心地にもっとも近いことが分かりました。ワイヤも金網も硬く線状の素材であることから、妥当な結果であるといえます。一方で、錯覚が強くなるほどその触り心地は図3左上にシフトしていくことから、その触り心地がより柔らかく滑らかに変化していくことが分かります。一番錯覚が強い条件は、両手の間で75 mm隔てたワイヤを前後に動かす条件で、その触り心地は布や革などの触り心地に似ていました。このことから、ベルベットハンド錯覚とは、本来硬く粗いワイヤの触り心地が、両手の間で動くことによってまるで布や革のように柔らかくなめらかに変化して知覚される現象である、ということが分かりました。

ワイヤの錯覚を任意の物体の錯覚へと拡張する

ベルベットハンド錯覚は手で直接触れたワイヤの触り心地を変える現象であるということが明らかになりましたが、この錯覚をワイヤだけではなくさまざまな物体に対して適用できるのでしょうか。これは、さまざまな触り心地を提示する手法としての可能性を検

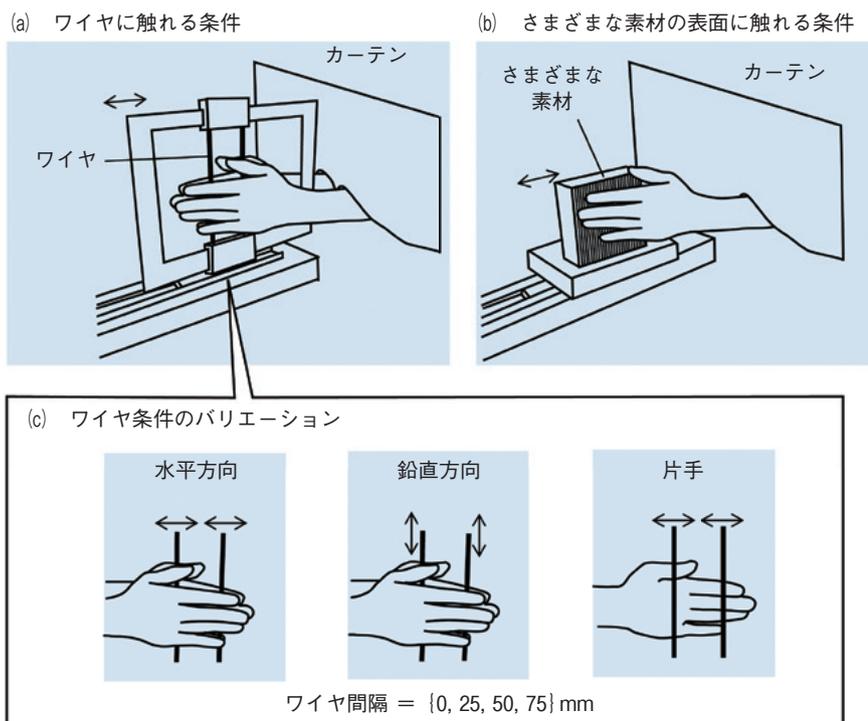
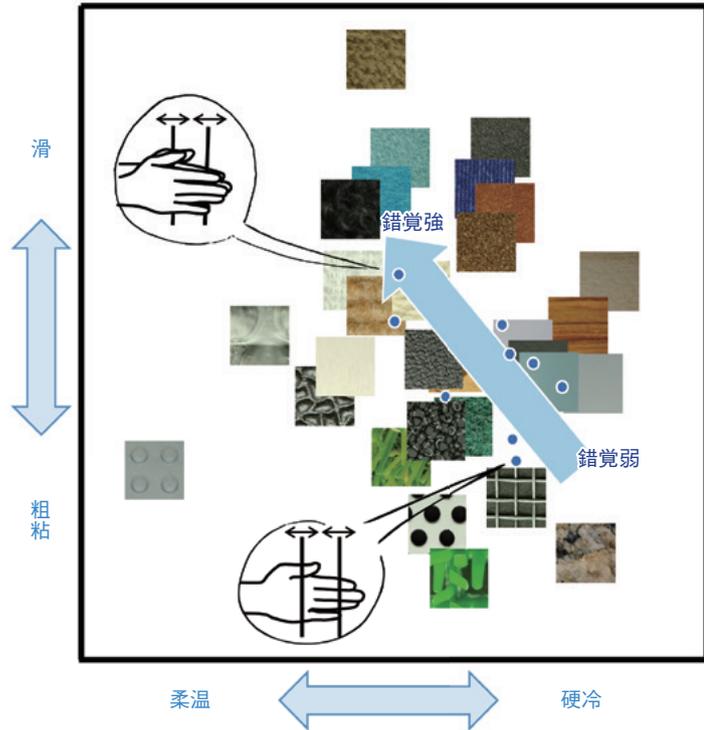


図2 ベルベットハンド錯覚の触り心地評価実験のセットアップ

討するために重要な問いです。すぐに思いつく方法は、両手の間ではなく、手と任意の物体の間にワイヤを挟んで動かす方法です。しかし、このやり方にはいくつか問題があることが分かりました。例えば、ワイヤが手と物体の間を行ったり来たりして横断することによって、手と物体の間の接触が阻害されることです。これでは結局、肝心の物体の触り心地ではなく、ワイヤの触り心地が目立ってしまいます。また、ワイヤは凸凹した物体の上では引っかかってしまい、安定して動かさないという問題もあります。ここで、ワイヤの代わりに穴の開いた薄い板を2本の指腹の間に挟んで前後に動かしても、ベルベットハンド錯覚が生じるという知見に着目しました⁽⁶⁾。これは両手の間にも適用でき(図4(a))、さらにこの穴を前後ではなく回転させることによってベルベットハンド錯覚を起こせることも分かりました(図4(b))。これらのことは、錯覚を生じさせるために手のひら全体を横断してこする必要はないことを示唆します。つまり、手のひらの周囲を穴のエッジによってこすることで、エッジに囲まれた中央部分に錯覚が起こると予想され

ます。この回転する厚紙を両手の間ではなく、手と任意の物体の間にはさんで回転させることによって、最終的に触れた物体の触り心地を変調できる手法を見出しました(図4(c))。これをフレーム回転法と名付けました。この

方法によって、手のひらと任意の物体の間に何も横断させる必要がなくなり、また、回転方向にエッジが少ないため、物体表面に引っかかりにくく、安定して動かすことが可能になりました。



図中の青い点が、ワイヤに触れる条件(両手・片手で触れる条件、ワイヤが水平・鉛直に動く条件など)を表しています。

図3 ベルベットハンド錯覚の触り心地評価実験の結果

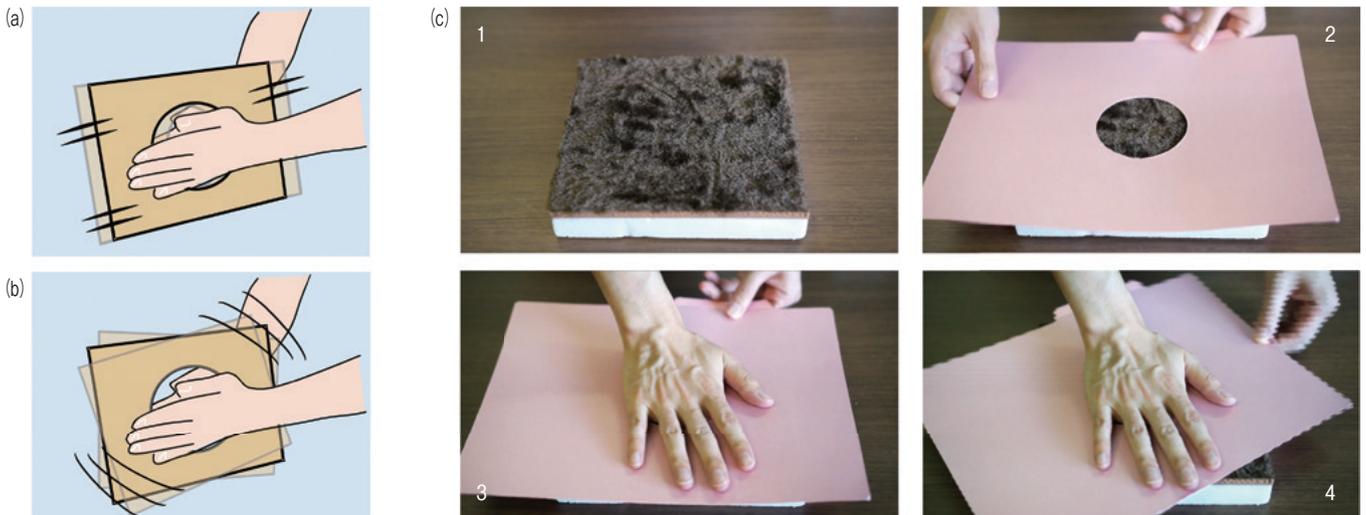
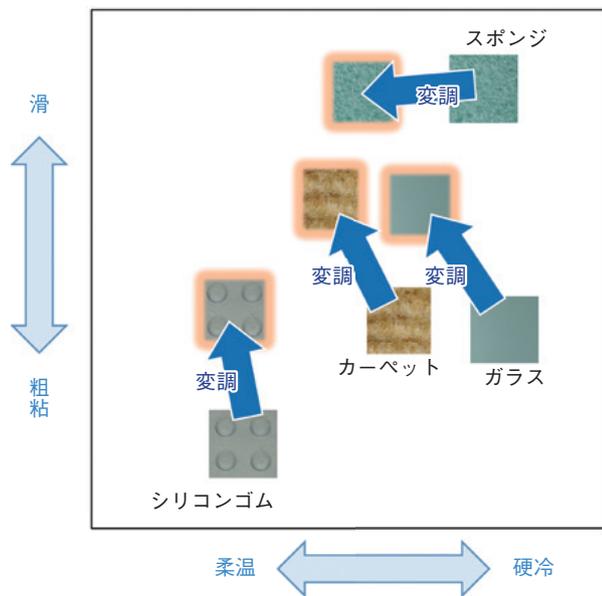


図4 ベルベットハンド錯覚の発展形((a)(b))とフレーム回転法(c)

フレーム回転法によって物体の触り心地がより柔らかく滑らかに

この手法によって、さまざまな物体の触り心地を本当に柔らかく滑らかに変化させることができるのかを調べる実験を行いました⁽⁶⁾。この実験では、実験参加者にいろいろな素材の触り心地やその素材にフレーム回転法を適用したときの触り心地がどれくらい似ているかを評価してもらいました。その結果を図3と同様に二次元空間上に可視化したものが図5になります。別の実験で、それぞれの素材の触り心地を粗さや硬さの観点で評価してもらった結果から、この二次元空間の横軸は柔らかさと温かさを、縦軸は滑らかさと関係することが分かっています。例えば、粗くて硬めのカーペットはフレーム回転法を適用することによって、その触り心地がより柔らかくなめらかに変化することが明らかになりました。このように、この手法によっていろいろな物体の触り心地が実際より柔らかく滑らかに変化していることが分かります。

このようにベルベットハンド錯覚のような触り心地がより柔らかく滑らかに変化する現象を、さまざまな物体に適用できる手法を考案し、評価しました。今後この錯覚が生じる脳のメカニズムを調べていくことで、まだ知られていない触覚処理機構の解明につながる事が期待されるほか、触り心地をより硬く粗く変化させるための方法や、柔らかさと滑らかさを独立に変化させるための方法の発見につながるかもしれません。また、この手法の特徴は特別な装置を用いる必要がなく、誰でも簡単に家にあるもので実現できることです。これによって、振動提示装置や力を発生させる装置などを操作するためのノウハウを持たない人でも、



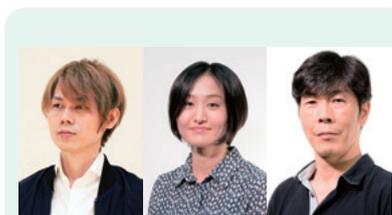
二次元空間上における矢印はフレーム回転法によってその触り心地がどのように変化したかを表しています。

図5 フレーム回転法による触り心地変調評価実験の結果

触り心地をより身近に操作することが可能になります。例えば、デザイナーがパッケージの触り心地のイメージを他者に伝えたり、店頭で柔軟剤などの製品の使用感を伝えたりするような場面で簡単に利用できると考えられます。

参考文献

- (1) 渡邊：“触れる感覚の質感・実感に着目したコミュニケーション,” NTT技術ジャーナル, Vol. 23, No. 9, pp. 26-30, 2011.
- (2) 黒木：“知覚心理学で探る触覚の仕組み,” NTT技術ジャーナル, Vol. 32, No. 9, pp. 18-22, 2020.
- (3) H. Mochiyama, A. Sano, N. Takesue, R. Kikuuwe, K. Fujita, S. Fukuda, K. Marui, and H. Fujimoto: “Haptic illusions induced by moving line stimuli,” Proc. of WHC 2005, pp. 645-648, Pisa, Italy, March 2005.
- (4) T. Yokosaka, S. Kuroki, and S. Nishida: “Describing the sensation of the ‘velvet hand illusion’ in terms of common materials,” IEEE Trans Haptics, Dec. 2020. DOI: 10.1109/TOH.2020.3046376.
- (5) M. Ohno, T. Miyaoka, and M. Nakatani: “Two hands feel smoother than one: a study on the smoothness magnitude produced by the Velvet Slit Tactile Illusion,” EuroHaptics 2018, Pisa, Italy, June 2018.
- (6) T. Yokosaka, Y. Suzuishi, and S. Kuroki: “Feel illusory texture through a hole: Rotating stimulus modulates tactile sensation for touched object’s surface,” EuroHaptics2020, Leiden, Netherlands, Sept. 2020.



(左から) 横坂 拓巳/ 黒木 忍/
西田 真也

暇を持て余した高校生がたまたま出会ったように、実は私たちの身の回りにはたくさんの触り心地の錯覚が潜んでいます。こんな何気ない錯覚が、10年後、20年後の触覚提示技術の土台となるのかもしれない。

◆問い合わせ先

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

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11回 暗号技術

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11回目は「暗号技術」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）。

■暗号とCISラボラトリー

NTT研究所のひとつCryptography and Information Security Laboratories（CISラボ）があるのはアメリカ、カリフォルニア州のサニーベールだ。シリコンバレーの一角にあり、パーム、AMDなどITベンチャーの本社がいくつもある町だ。

2019年に設立されたCISラボが研究しているのは暗号で、そのうち、暗号理論と仮想通貨等で利用されているブロックチェーンが対象である。社員数は49名で、うちCISラボの研究者は14名。設立されたばかりといってもいいのだけれど、暗号研究の分野ではすでに業績を上げている。

例として、次のふたつの賞が挙げられる。国際暗号研究学会（IACR）からは2020年4月にTest of Time Award、8月にはCrypto2020 Best Paper Awardを受賞した。さらに特許は10件を出願し、最難関の国際会議（Crypto, Eurocrypt）に採択されている論文数は世界一である。そして、現在活発に研究を行っているトップクラスの研究者の数も、例えばマサチューセッツ工科大学（MIT）などの一流大学や企業での暗号チームがそれぞれ4、5名程度であることに比べるとCISラボには7、8名以上が在籍している。

このように暗号の研究では世界トップレベルにある。

さて、所長の岡本龍明は「暗号とは何か」からレクチャーを始めた。

「辞書には、『秘密通信を行うための方法や装置に関する科学』と書いてあります。もともと暗号は軍事における使用がほとんどでした。それがインターネットの登場

により、商用利用が進んだのです。インターネット自体は1969年に主として大学の間の通信技術として始まったわけですが、一般が使うようになったのは1990年代の中ごろ、みなさんもよくご存じのWindows 95が登場した頃からです」。

■ダダ漏れのインターネット

インターネットが一般化した頃、「データはダダ漏れが当たり前だったのです」と岡本は言った。

「データはネットワーク上を転々としながら、相手に届けられます。初期はセキュリティも考えずにデータは公開されたまま伝わっていきました。開封されたままの信書を裸のまま届けていたようなもので、誰でも簡単に見ることができましたし、改ざんされたり、すり替えられたりする危険がありました。そこでデータを暗号化してネットワーク上に載せるようになったのです」。

そうしてダダ漏れをなくすために暗号技術の商用化は始まった。

まず、暗号にはふたつの機能がある。

ひとつは秘匿する機能だ。データを簡単に見られないようにすること。

もうひとつは認証機能。送ったデータが正しいかどうか、送った相手が正しいかどうかを認証すること。

このふたつの機能を進化させることがデータのセキュリティを守り、個人のプライバシーを保護することにつながる。

■暗号理論

暗号理論のなかでもCISラボの研究者が提唱した新しい概念の暗号が属性ベース暗号というもの。

岡本はこう解説する。

「従来の暗号方式は例えば人に見られたら困るものを暗号化して送り、受け取った側が復号機能を使って、暗号を元に戻すわけです。

一方で、例えば、暗号化したメールのなかからスパムメール（迷惑メール等）だけを削除して送るといったことがある場合、途中のサーバで暗号化されたものをいったん復号しなければなりません。そうしてメールの内容を確認し、スパムメールを検出、削除してから再び暗号化して、相手に送ることになる。つまりサーバという第三者が内容を見てしまうわけです。そうすると、暗号化の意味が損なわれ、暗号の安全性を確保するうえで、瑕疵（キズ）がついてしまう。

それに対して、CISラボのブレント・ウォーターズという研究者は15年ほど前から属性ベース暗号（一般的には関数型暗号）という概念を考えだしました。先ほどの例でお話すると、サーバにおいて暗号化されたデータを復号せず、暗号化したまま必要な情報だけを抽出して、スパムメールの検出・削除を可能とする技術です（図）。

属性ベース暗号を使えばスパムメールの検出、削除だけでなく、自身の医療データや金融データのような、他人には絶対、知られたくないデータを安心して外部のサーバに保存したり送信したりすることができるようになる。

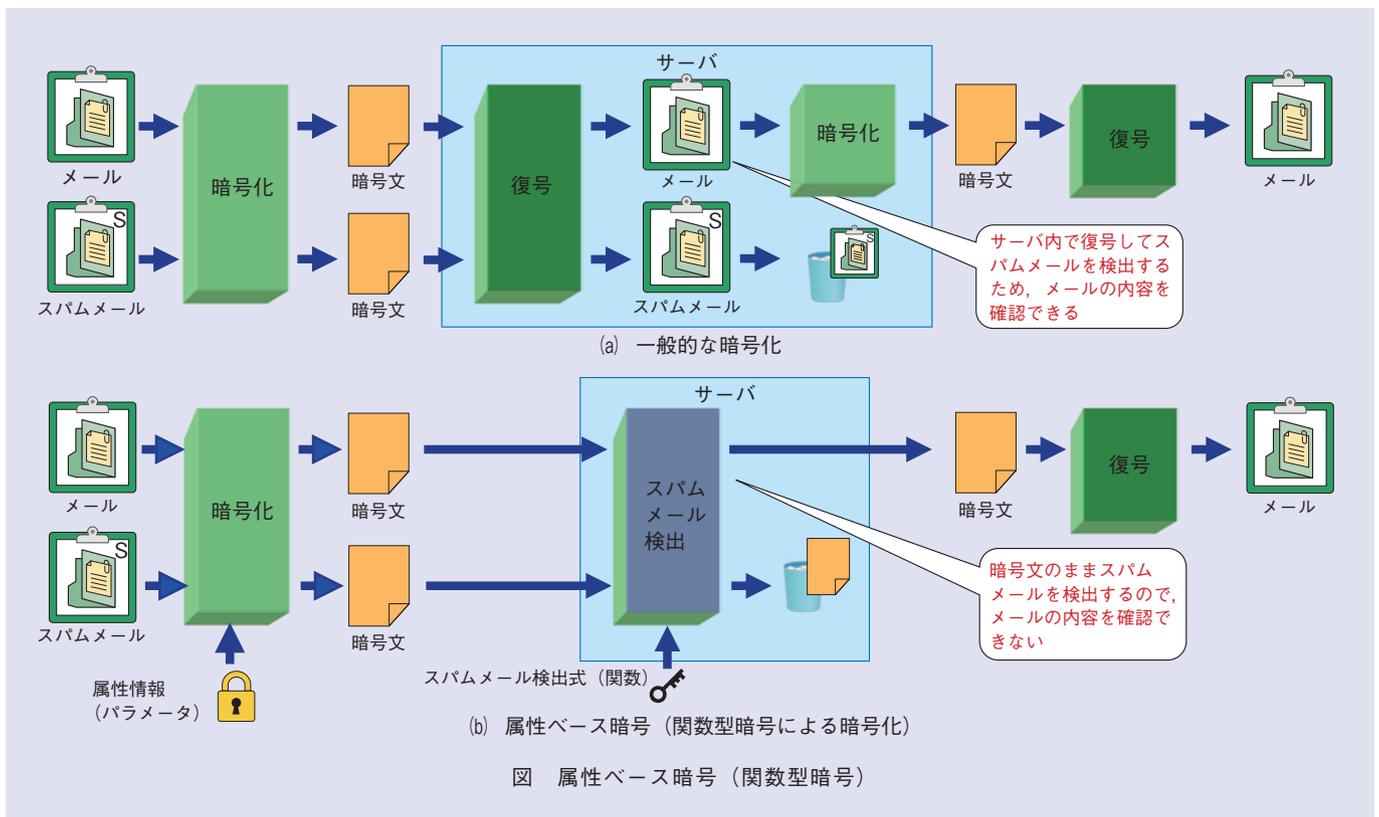
■ブロックチェーン技術

CISラボの研究テーマは暗号理論とブロックチェーンの2つであり、それぞれ7割、3割の比率で研究を進めている。ブロックチェーンに関してはジョージタウン大学でも研究を続けている松尾真一郎博士をリーダーに研究者4名が担当している。

ブロックチェーンは暗号資産（仮想通貨）で使われている技術だ。そのため、スタートアップ企業（革新的技術で創業し急激に成長した企業）、ベンチャー企業（革新的技術で創業した企業）を中心に研究者の奪い合いになっている。CISラボは基礎研究なので、岡本はブロックチェーン研究の場合、人材の確保に苦労していると苦笑した。

彼は言った。

「当研究所のブロックチェーン研究のゴールは『プロ



グラム可能で共有された帳簿を利用したアプリケーションを、誰もが自由につくることができること』。今のところはそのための基盤的な研究にフォーカスを当てています。

現在、ビットコインのような仮想通貨やブロックチェーンが大きな話題になっています。そのせいもあって、『誰でも共有可能な公開帳簿』がすぐにも普及すると考えている人が少なくないようです。しかし、誰もが簡単に使える共通の帳簿づくりにはまだまだ時間がかかります。長期にわたる基礎的、理論的な研究開発が必要なのです。

また、ブロックチェーンの理論研究はさまざまな異なる性質が絶妙に組み合わせられているため、異なる専門性を持った研究者でチームを構成する必要があります。さらに、ブロックチェーンは戦略的に研究を展開しなくてはなりません。そうすると、CISラボはもっと多くの方に協力していただかなくてはならないと思っています」。

■毎日の研究と受賞の意義について

では、暗号とブロックチェーンの「研究」とはいったい、どういった作業になるのだろうか。この場合の研究とは実験のような手を動かすことではないだろう。それは「考える」ことだ。

すると、それはつまり、沈思黙考する毎日なのか。そういうことならば何も研究所まで行かなくとも、自宅で学術論文を読んだり、窓を開けて雲の流れを見つめて、ひらめきが下りてくるのを待っていたりしてもいいのではないか…。

「いやいや、そうではありませんよ」。

岡本は言った。

「確かに研究のアイデアは机に向かわなくとも出てきます。通勤電車のなかでも、散歩している途中でも、何かしら考えているのが研究者ですから。私が思うに、研究者として必要なのはディスカッションです。先ほども申し上げましたが、当研究所のブロックチェーン研究者は数学、量子力学、ITと専門が分かれています。専門が違う人間たちが対面し、集まって話すことがとても重要だと思っています。幸い、アメリカはワクチン接種が進んで、ロックダウンもなくなりました。生身で話しながら研究が進むのを楽しむ毎日が戻ってくるのも近々のことでしょう」。

冒頭に触れたが、CISラボは設立してわずか3年足ら

ずなのに、受賞歴もあり特許も獲得している。暗号の基礎研究機関としてはすでに世界トップと言っていい。それは岡本の研究所マネジメントが優れているからなのか。

「いえいえ、そんなことはありません。ただ、この分野はとてもオープンな分野です。誰が何をやっているかがすぐにわかりますし、評価される世界でもあります。

受賞したうちのひとつ、Test of Time Awardの受賞論文はブレント・ウォーターズが15年前に発表した論文です。属性ベース暗号の概念を世の中に提示したもので、世界でもトップクラスの引用件数を誇る論文です。15年の間にさまざまな論文に引用され、また実用されて使われるようになりました。時代を経て認められた論文です。この賞は、学会でもこうした研究成果を大切に評価しようとしてきている証拠なんです。つまり、未来で高く評価されるような成果をめざして研究は進展していくのです」。

暗号研究、ブロックチェーン研究は難解と思われがちだが、関わっている研究者たちにとっては謎解きのような楽しさがあるのではないか。毎日、謎解きに挑戦している彼らの仕事は未来へ向かってボールを投げるようなものだろう。

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）、『新TOKYOオリンピック・パラリンピック物語』（KADOKAWAから7月14日発売予定）。

挑戦する 研究者たち CHALLENGERS



松尾 慎治

NTT先端集積デバイス研究所
NTT物性科学基礎研究所
上席特別研究員

研究者どうしの 何気ない会話から 共同研究の機会が生まれ、 研究活動は広がる

日本のデータセンタの消費電力は2015年時点で日本の年間消費電力の1%という試算があります。データの処理や伝送の高速・大容量化に伴い、消費電力は増加傾向にあるため、この低減は重要な課題となっています。この課題解消に向け、シリコン基板上に化合物半導体を高密度集積する革新的な技術の研究開発により、光・電子融合集積回路の実現をめざす松尾慎治上席特別研究員に研究活動の進捗と研究者としての姿勢を伺いました。



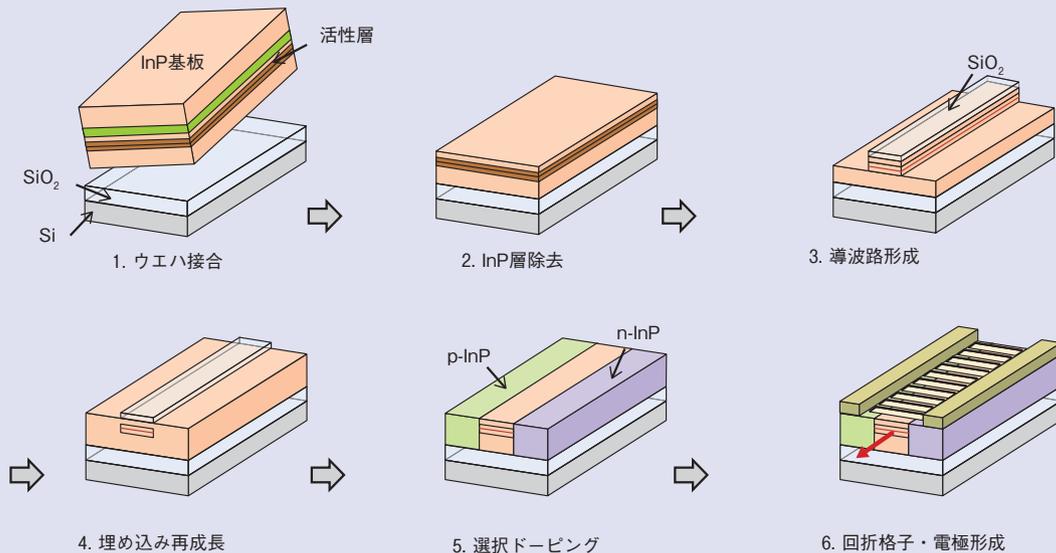
IOWN構想の1つ、超低消費電力の 実現をめざす

現在の研究内容を教えてください。

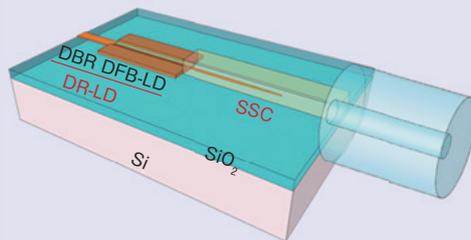
インタビューしていただいた2015年は、ちょうど半導体レーザをシリコン（Si）基板上に作製する技術の基本ができたころでした。その後、チームの努力が実り、リサーチというフェーズからディベロップメントへ移行してきたと実感しています。当時は新技術であるがゆえに懐疑的な意見も聞かれましたが、今では好意的に変化しているという手ごたえもあります。基礎的な研究から応用研究、そして実用化・開発までを一貫して取り組んでいるNTT先端集

積デバイス研究所の特徴そのものを体現しており、社会的に受け入れられ、より使われるデバイスに仕上げるための検討を進めています。

こうした流れの中、現在大きく2つのテーマに取り組んでいます。1つは高密度・低消費電力な短距離光インターコネクションに向けたデバイス技術開発です⁽¹⁾(図1)。IoT（Internet of Things）の進展やAI（人工知能）の利用拡大等により、データの処理や伝送の高速・大容量化が加速していく中、消費電力は増加傾向にあるため、この低減は重要な課題となっています。そして、この課題はIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想において超低消費電力としてテーマとなっています。



(a) Si基板上LDの作製方法



(b) Si基板上LDの構造

図1 Si基板上LDの作製方法と構造

これを実現するために、これまで電気配線が利用されてきたデータセンタ等に設置された機器のボード（回路基板）内の短距離通信に光技術を適用することで、データの処理や伝送にかかる電子機器の高速化と低消費電力化をめざす光インターコネクションの研究開発を進めています。

ボード内光インターコネクション用の光源として、Si基板上に作製した薄膜（メンブレン）直接変調レーザダイオード（LD）を開発しています。Si基板上にLD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二酸化ケイ素（SiO₂）層の上にLDを形成することで、LDの小型化と低消費電力化を実現することができるのです。また、現在、さらに消費エネルギーを小さくするLDを実現するために、フォトリソ結晶を用いたLDを開発しています。今後は、大容量化と高密度集積化に挑戦し、さらにはCPUやGPUといった演算処理回路との融合を進め、将来の情報処理基盤の発展に寄与したいと考えています。



もう1つは、世界最高速の帯域100 GHzを超える直接変調レーザの開発です（図2）。東京工業大学（東工大）と共同で、高熱伝導率を持つ炭化ケイ素（SiC）基板上にインジウムリン系化合物半導体を用いたメンブレンレーザを開発しました。直接変調レーザとして世界で初めて3 dB帯域（周波数が高いほど低下するレーザの出力が70.7%まで減衰する周波数帯域）が100 GHzを超え、毎秒256ギガビット（2560億ビット）の信号を2 km伝送できることを確認しました。この成果は2020年、英国科学雑誌『Nature Photonics』のオンライン速報版で公開されました⁽²⁾。

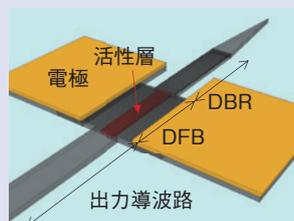
直接変調レーザは、現在、データセンタで広く使用されていますが変調速度に限界があることが課題とされてきました。この技術を用いれば予想されるトラフィックの増大に低コスト・低消費電力に対応でき、研究開発を進展させればIOWN構想を支える大容量光伝送基盤の実現に貢献できると考えています。将来的には光を中心とした革新的技術を活用し、これまでのインフラの限界を超えた高速大容量通信の実現をめざします。

課題やテーマを探るときに大切にしていっしょやることはありますが、

研究者にとって情報収集はとても重要だと思います。積極的に学会へ参加し、社内外の研究者と直接話して、NTTの技術やコンペティタの方々が注目する技術の動向を注意深く見守っています。

経験の浅いころは学会へ参加しても、発表された内容を理解しているか、目上や高名な研究者にどう声をかけようかと物怖じしたこともありましたが、経験を積んだことでそうした悩みは減りました。また高名な研究者や発表者と世代が近くなり、講演をさせていただくようになりました。かつては話すことも難しいと思っていた方からもお声がけいただけるようになったことを考えると、焦らずに積み重ねていく大切さを実感するとともに、こうした積み重ねや努力があっこそ築けるのが周囲の評価だと思います。

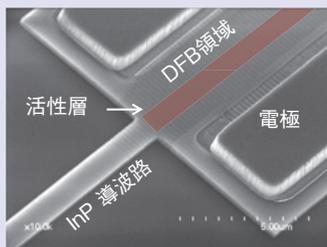
振り返ってみると、若いころは特に英語に慣れていないこともあり、学会で声をかけるよりも論文で勉強していたほうが気分的には楽でした。しかし、研究所にこもって勉



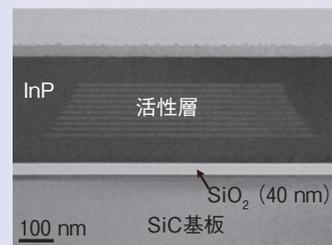
(a) 鳥瞰図



(b) 活性層付近の断面図



(c) 走査電子顕微鏡像



(d) 透過型電子顕微鏡像
活性層付近の断面図

図2 世界最高速の帯域100 GHzを超えるSiC基板上直接変調レーザ

強しているだけでは新しい刺激を得ることは難しいと気付
き、学会のような「場」に臨み、集中的に情報収集して取
捨選択することの有用さを実感しました。

また、研究の継続のために、自らの研究を理解してい
ただくことが重要になってきます。概して日本人は自分の主
張が弱い傾向にあります。外国籍の研究者との交流が盛
んになり、彼らが自分の考えを端的に、魅力的に表現す
るのを目の当たりにし、その重要性が分かるようになりま
した。研究は明るい未来を創造するためにあると考えれば、
目の前の人にいかに関心を持って自分の構想が明るい将来を描いている
かを伝えられなければ理解してもらえないのも当然です。
さらに、研究者は地道にコツコツというイメージもあるし、
自負もあると思いますが、企業の研究者であることを踏ま
えて、自社のため、社会のために何ができるかと考えて研
究を続けられるように働きかけることも大切ではないでしょ
うか。そのためにも自社が何に注目し、何が課題なのか等
の動向を踏まえておくことも必要だと思います。

NTTの研究所には、年に一度、研究企画の見直しや所
属グループでの検討等、自らの企画のアピールをし、自分
に向けられている要望を知る機会があります。対外的に
大々的にアピールすることも大事ですが、こうした機会を
利用して身近な存在に自らの価値を理解してもらおう活動に
も努めていきたいです。



研究者の役割は経験の深さによって 変化する

**研究者には研究以外にもさまざまなスキルや役割が求められて
いるのです。**

情報収集やネットワークの構築に加え、研究テーマの見
極めも重要な研究者の仕事です。

研究テーマを見極める際に、私は人員や設備、装置をか
んがみて、自分たちでその財産を担えるのかという自問自
答をしています。装置等を購入するとなったら億単位の金
額が動きますから、テーマの追究は社会にとって重要なも
のとなるかを基準にし、慎重に選択しています。

それから、研究成果には常に責任が伴います。私たちの
ような性能勝負の研究では、自分たちでつくってその正し
さを示すことが重要ですし、ディベロップメントの段階に
おいてはどれだけ簡単につくれるかということも重要にな
ります。ただし、この原則に縛られすぎてもいけません。
自分たちでつくれることは大前提ではありますが、これは
面白そうだとか、役に立ちそうだという、研究者としての
感覚も大切にしています。加えて、「つくれる」という見
通しも人それぞれであることも踏まえておきたいことです。

ところで、研究者という概念は経験の深さによって変化
するものだという実感があります。例えば、最初の10年程
度は自分で考えて自分の力で実現していけるのが研究者だ
と考えていましたが、その後は周囲の影響の大きさを知り
ました。現在は学会や国際会議における役員・委員、
NTTの研究所においては上席特別研究員としての役割を
担っています。これらを通じて、いかに後輩をはじめその
分野の研究者にとって有意義な研究環境を整えることがで
きるか等、研究分野や研究者のコミュニティまで考えるの
が研究者であり、役割であると考えようになりました。

**国際会議の招待講演を依頼されることもあるそうですが、それは
研究者として名誉なことだと思います。招待講演のエピソードに
ついてお聞かせください。**

招待講演を受けるのは研究者にとって大変名誉なことだ
です。そして、招待講演はモチベーションをアップするのだ
けではなく、自らを振り返り、研究分野の立ち位置を再認
識して、未来への展望ともつながっていると実感しています。

初めての招待講演は1993年ごろ、NTTに入社して5年
目でした。これは現在の研究にも関連することで、CMOS
(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) に
LDを作製する方法について講演させていただきました。
当時は作製方法が斬新であると評価され、ブームだったこ
ともあって3、4の学会等にご招待いただきました。せっ
かかお招きいただいたのだから恥ずかしいことはできない
と必死でした。英語による発表の経験も浅く、通常の倍の
持ち時間ですから、暗記するほど一生懸命に練習して発表



したことを覚えています。

とてもうれしかった講演は、2015年にヨーロッパで開催された会議でその分野の第一人者が担うチュートリアル講演をさせていただいたことです。たまたまそういう雰囲気だったのか、習慣なのかは分かりませんが、登壇すると同時に拍手が沸き起こりました。何ともいえない高揚感がありました。チュートリアル講演などでは、経験豊富な講師がその分野の歴史と自分の研究の位置付けやビジョンを冒頭で語ることが多いのです。このように過去・現在・未来を自分なりに語ることで自分の考えを整理でき、研究分野の歴史のどこに自分が位置し、担っているかを確認できることがモチベーションアップにつながります。また、講演内容を推敲するのに過去の論文を読み返すことも結構勉強になるのです。

それから若い方へのレクチャーもうれしいですね。2019年にIEEE Photonics SocietyのDistinguished Lectureの講師5名のうちの1人に選出され、米国やカナダを回りました。電子工学科の大学院生に向けて研究に関して講演するのさることながら、学生と触れ合う機会を持てることも楽しみです。今何をすべきかといった自分なりの考えを語る時、彼らが素直に耳を傾けてくれるのがうれしいです。インドやブラジルも訪問する予定でしたが、残念ながら新型コロナウイルスのパンデミックによって実現していません。



重要な資質は「しつこさ」

若い研究者の皆さんに一言お願いします。

最近は研究者も時間がなかなか取れない中で活動していますから、焦る気持ちも十分に分かります。しかし、私の場合は中堅になってから新しく立ち上げたテーマで今の実績を残せていますから、時間がない、自分に蓄積された知見などがないと、心配しなくても大丈夫だと伝えたいです。

私は、うまくいくことを信じて活動していますが、もしかしたらこれがこの結果につながったのかもしれない。

うまくいくことを信じられるかどうか、モチベーションには大きくかわると思います。当然、信じていてもうまくいかない研究も山ほどありますし、偶然や運による部分も大きいと思います。どんなに優秀な方もうまくいかないこともあれば、たまたまうまくいってしまうこともあります。何がどう作用しているかは分かりませんが、ネガティブに考えても仕方がないので、うまくいくことを信じて研究しています。偶然うまくいったとはいえ、そこには目の前のチャンスを逃さない感覚も大切になってきます。そのためにも情報収集は欠かせません。学会への参加はもちろん、積極的に学会の委員・役員になることで、情報収集の場が大きく広がります。

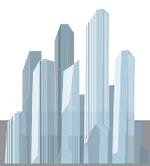
そして、研究者にとって重要な資質は「しつこさ」です。当然、研究はうまくいくときばかりではありません。周囲からの重圧を感じる時もありますが、コアな技術や考え方をしっかりと持ちつつ、時代や環境に合わせられる柔軟性を持って、しつこく続けることでこうした重圧をはねのけることができます。

さらに、研究者とはいえ、私たちは社会の一員であることを忘れないようにしましょう。すぐ上の先輩や周囲の方々に自分のしたいこと、研究の意義をアピールし、納得していただきましょう。理解を得られないと研究は続けられません。そのうえで周囲の意見に耳を傾け、取り入れながら研究を進めていきましょう。私たちの研究にとっては周囲との協力関係の構築はとても重要です。主張と受容のバランス感覚が大切なのです。

最後にもう一言、国際的な活動を通じて得た教訓から、英語力は若いうちから磨いたほうが良いです。外国籍の研究者と気軽に話せるオープンなマインドも養っておけば将来の研究活動もより楽しくなると思います。学会の準備や発表後の何気ない研究者どうしの会話から共同研究の機会が生まれ、研究活動が広がると思います。学会の友人は大事にしましょう。

■参考文献

- (1) <https://journal.ntt.co.jp/article/6173>
- (2) <https://journal.ntt.co.jp/wp-content/uploads/2021/02/JN20210283.pdf>



丹羽健太 特別研究員

データが分散蓄積される時代にも機械学習モデルを最適化。「非同期分散型の深層学習技術」の研究

現在の深層学習ではデータを1カ所に集約したうえでモデルを学習する場合が一般的ですが、近い将来には取り扱うデータ量の増加やプライバシー保護の観点から、データが分散蓄積されることが予想されます。今回はそうした時代にあってもあたかも1カ所にデータを集約して学習したかのような機械学習モデルを最適化できる、「非同期分散型の深層学習技術」の研究に取り組む丹羽健太特別研究員にお話を伺いました。

◆PROFILE：2008年日本電信電話株式会社入社、NTTメディアインテリジェンス研究所にて收音処理に関する研究開発に従事。遠くの音をクリアに收音するズームアップマイク、マイク技術の商用化貢献などの成果を挙げる。その後、2017年～2018年のVictoria University of Wellington留学を機に、NTTコミュニケーション科学基礎研究所にて分散最適化など機械学習の研究を開始。非同期分散型の深層学習技術の研究に尽力。現在、NTTメディアインテリジェンス研究所兼務。



NTTの基礎研究— 非同期分散型の深層学習技術とは

◆研究されている内容を教えてください。

機械学習による画像認識、音声認識などのモデルを構築する際にはよく「深層学習」(ディープラーニング)が利用されます。

現在の深層学習では、1つの巨大なデータセンタを設置してすべてのデータをそこに集約し、そのデータを使用してモデルを学習させる言わば「一極集中型」が一般的です。しかし、今後、自動運転、ファクトリーオートメーション、分散電源、個人ごとにオートチューン化されたモデルなどが普及することを考えた場合には、取り扱うデータの量が増加するため、1カ所にすべてのデータを集めて処理し展開することは困難となっていくことでしょう。また、GDPR(EU一般データ保護規則)などの影響もあり、プライバシー保護の観点からもデータの集約は難しくなります。これらの要因から、近い将来にはデータの蓄積や推論処理は分散化されるのではないかと考えています。

そこで、各サーバで分散蓄積されたデータを使って高度な知を創造するための研究をしており、例えば、あたかもデータを1カ所に集めて学習を行ったかのような機械学習モデルを得ることができる技術を最近成果として挙げました。

◆具体的にはどのような方法がとられているのでしょうか。

現在の分散深層学習では、各サーバ間でモデルを交換し、平均化するという手段(平均化合意形成)がよく用いられています。

平均化合意形成は非常に簡単な演算で、かつ効果のあるものです。ただし、各サーバが統計的に同じようなデータを持っている場合にはこの方式でもうまくいきますが、各サーバのデータの統計的な偏りが大きい場合には学習がうまく進まないことが多いです。また、ネットワークを構成するサーバの数が多くなると同期して通信を行うことも困難となります。

そこで、ネットワークに接続された各サーバが非同期的に通信を行い、協調してモデルを学習する深層学習のアルゴリズムを構築しました。詳しい数式やアルゴリズムは割愛しますが、簡単に言うと、この「協調する」という概念を数学的に表現する研究、と思っていただければと思います。

例えば、仲の良い人たちが集まって相談し、ある結論を導くことは簡単でしょう。しかし、仲の悪い、個性の強い人たちが集まっても皆がバラバラな方向に向かってしまいます。こうした場合に「平均化」はあまり大きな意味を持ちません。今回のアルゴリズムは、各自を協調させるような1つに纏まる力がうまく表現されていると考えてください。

図1は、CIFAR-10と呼ばれる画像分類器のテストで標準的に用いられるデータセットを用いて、8カ所にデータを統計的な偏りを持たせて分配したときの、提案方式と従来方式との比較を示しています。縦軸は分類誤差率を表していて、値が小さくなるほど性能が良いと言えます。青い点線はデータを1カ所に集めて学習した「グローバルモデル」の性能を示し、緑色の実線は従来方式(Gossip法)、赤色の実線は今回提案した新方式の性能を示しています。

従来方式では途中で性能向上が止まってしまっている一方、新方式では学習が進むにつれてグローバルモデルの性能に近づいて

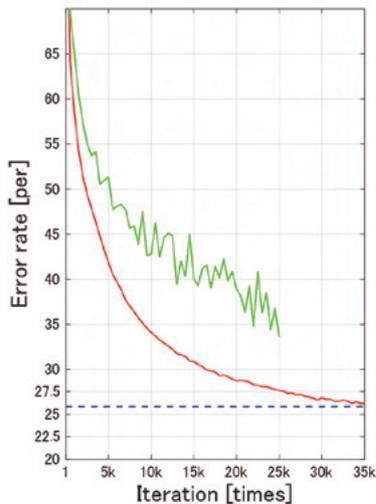


図1 従来方式およびグローバルモデルとの比較

ており、非同期通信下であっても、よりデータ全体に適合するモデルが得られていることが読み取れると思います。

◆この研究により、どのようなことが可能となるのでしょうか。

図2は複数拠点の医療画像データを用いて画像解析モデルの学習を行うデモンストレーションです。

医療データはプライバシー保護の観点において第一に挙がるもので、基本的に病院外に持ち出すことはできません。ましてや国外に持ち出すことはほぼ不可能です。そこで、N1~N8の8つの病院をネットワークでつなぎ、各病院から医療画像データを出さずにモデルを学習させることを考えます。具体的には胸部レントゲン写真から疾病の有無および約14種類の疾病を判断する医療画像診断補助のモデルです。現実社会において病院により取り扱う疾病に違いがあったり、地域性などにより状況が異なったりすることを加味し、N1~N8の持つデータの件数および収録疾病について人工的に偏った状態をつくり出しています。

N1~N8それぞれの青色のグラフは新方式、橙色のグラフは従来方式の学習の進捗を示しています。8カ所に分散した医療画像データがうまく協調し、「スーパードクター」のような高度な知の創造がなされていることが分かります。

非同期分散型の深層学習技術により、プライバシーを犠牲にすることなく、機械学習の恩恵を受けることができるわけです。こ

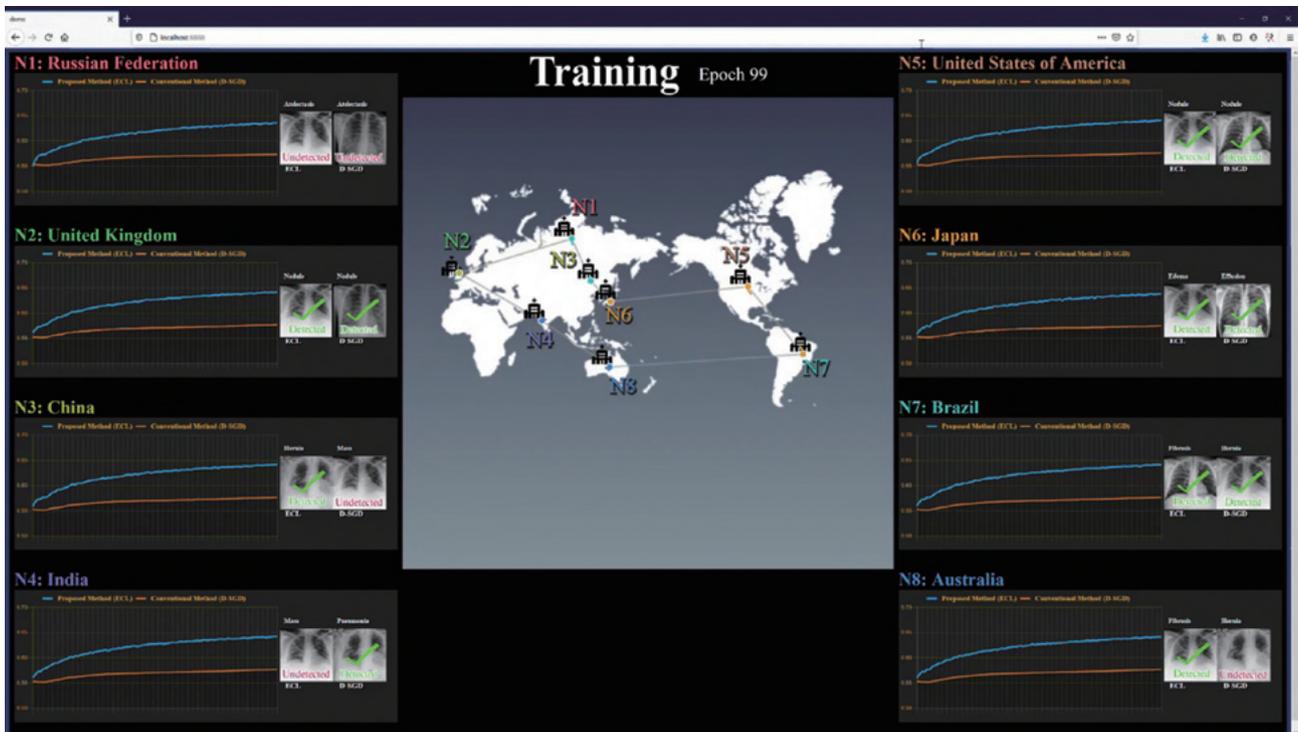


図2 複数拠点の医療画像解析モデル学習の融合



(今回はリモートにてインタビューを実施しました)

の技術は、特にアプリケーションに依存した技術ではありませんので、他にも、スマートフォンのデータを使ったテキスト変換、自動運転モデルの作成、コールセンタの音声認識、工場機器の故障検知など、非常に応用範囲の広いアルゴリズムだと思います。

NTTの地の利を活かしたサービスの提供を

◆NTTの強みはどのような点にあるとお考えでしょうか。

NTTは全国各地に局舎を所有しており、それぞれの局舎はネットワーク構造により接続されています。そうした地の利を活かし、各局舎にサーバを設置し、データの蓄積・処理してみるのはいかがでしょうか。当然、各局舎には全く違うデータが蓄積され、全体としてはとても巨大なシステムとなるでしょう。

そうしたデータを活用して、よりユーザの近くでデータ処理などのサービスを提供することは今後のNTTのビジネスとして有力な選択肢ではないかと思えます。いわゆる「エッジコンピューティング」の考え方ですね。

また、そうしたことを考えたとき、非同期分散型の機械学習のサービスを提供していくことは有用なのでは、と考えています。

◆今後の方向性についてはどのようにお考えでしょうか。

もともと私は音響、特にマイクロホンやスピーカーを使ったコミュニケーションに関連した研究をしていました。その後、入社から10年ほど経ち、ニュージーランドの大学に留学したことをきっかけとして「分散」というものをテーマに機械学習、特に最適化と呼ばれる分野の研究を始めました。

現在のシステムの多くは一極集中型です。データが1カ所でさばききれぬ量であること、求められているものも万人共通ととらえられ、同じサービスが分配されていることなどに起因しているのでしょう。しかし、今後はサービスの個人化が進むのではないかと考えています。個人に合わせたモデルの学習・推論の提供なども登場するのではないのでしょうか。そうした世の中になったとき、「このまで一極集中型でいいのか」という疑問があります。分散化すると考えたほうが自然なのではないのでしょうか。

考えてみれば、私たちの脳も「分散型」です。何かを話した

がらも、全然別のことを考えていたりする。私の脳が焼き切れていないところを見ると、現在の深層学習・推論のような重い計算をしているとは思えません(笑)。頭の中では何か分散した計算処理群が非同期的につながっていて、非常に軽い演算の膨大な組み合わせで高度なことを成し遂げているという気がしています。そう考えると、次世代のコミュニケーション、社会全体を支えるシステムというものも、高度な処理ができ、低消費電力で、柔軟性があり、少しくらい傷がついても簡単には壊れないものになるのではないかと考えています。

例えばIOWN(Innovative Optical and Wireless Network)構想では社会全体を最適化しようという文脈で、街における自動運転車の整列なども議論されています。それぞれの車は当然行先も違いますし、運転の仕方も違うべきだと思います。しかし、自分の利益だけを考えて動いてもうまくはいきませんし、また平均化も好ましくない気がします。

それぞれの車を協調させて取りまとめ、制御するようなシステムはまだないと思いますが、「分散」をテーマにしながら、そうしたものに寄与するシステム、ソフトウェアの根幹みたいなものをつくっていきたいと思っています。

◆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。

機械学習という分野は競争過多で、数カ月で状況が変わります。毎日とは言いませんがそれに近い頻度でいろいろな論文が投稿されています。では分散型のシステムに関しては競争過多かという点、分散学習に関しては競争過多ですが、私の考えている「柔軟に高度な知を与えられるような非同期型の分散システムを考える」ということ自体はそうではないように思います。「一極集中型」「End-to-End」という流れが主流な中で、あまり開拓されていない領域であり、そこに可能性を見出したいと思っています。

新しい分野を創造するにはエネルギーが必要です。それなりに知名度のある人が「こうだ」と言えば簡単ですが、そうでない人が99.9%を占める場合には、共通の課題を見つけ、議論したり参照し合って比較したりしながら競争することが非常に重要となります。

一方で、自分のポリシーのある独自の部分をつくり上げていくことも重要です。本当に自分が表現したいもの、つくりたいものを少しずつ表現していくことが大事なのではないかと思えます。

現在、データを集めることができれば、誰にでも(高校生でも)任意のアプリケーションのモデルをつくれるような時代です。そうした状況で、基礎研究と実用開発のどちらに軸足を置くべきか、私の周りの研究者たちも悩んでいる人は多いです。私は、たまたま留学させていただく機会があり、そこで分散に関する高度な知識を習得したので、基礎研究に軸足を置くという道を選びました。もちろん、その逆を選択するという道もあったでしょう。どちらのポジションにつけば良いかというのは、人によって向き不向きもあるので結論はありませんが、どちらか極端なほうに賭けたほうが良い時代なのかな、という気がしています。



NTTコミュニケーションズグループ

NTTコム エンジニアリング株式会社

デジタルトランスフォーメーションの推進と 高品質なワンストップオペレーションで お客さまからの信頼を得る

NTTコム エンジニアリングはNTTコミュニケーションズのネットワーク設計・構築・保守・運用，サービスデリバリーといったバリューチェーンを担い，高品質なワンストップオペレーションをお客さまからの信頼の源泉としている会社だ。自らのデジタルトランスフォーメーションとしてオペレーションの自動化とリモート化を推進し，コストセンタ的な発想からプロフィットセンターへの飛躍をめざす，梶村啓吾社長に話を伺った。

自らのデジタルトランスフォーメーションで オペレーションの自動化とリモート化を推進

◆設立の背景と目的，事業概要について教えてください。

NTTコム エンジニアリングは，FA (Factory Automation) 向けシステムエンジニアリング事業を行う会社として，1987年4月に設立されました。その後，業容拡大に伴い，ネットワークサービスをベースとしたパッケージサービスやISDN通信機器の開発販売などを行い，2007年4月にNTTコミュニケーションズ (NTT Com) のエンジニアリングとソリューションのバリューチェーンの一角を担う100%の子会社となりました。2014年には，エンジニアリング業務を事業の中心とした会社として体制を一新，社名も「NTTコム エンジニアリング」としました。

その後も，NTT-MEから仙台センタ移管（故障対応業務），NTT Comからクラウドサービスのエンジニアリング業務移管など，NTT Comグループの戦略に応じてさらに業容拡大し，創業期には13名だった社員が2021年4月1日現在で2083名となり，質・量ともにグループの中核企業に成長しました。

当社はNTT Comが提供しているクラウド・アプリケーションサービス，ボイスコミュニケーションサービス，ネットワークサービス，通信ビルや基盤ネットワーク等のインフラサービスの設計・構築・保守・運用を主な事業としています。また，グローバル系サービスについても，NTT Ltd.等のサービスのバリューチェーンを担っているほか，国際海底ケーブルについては全国5カ所のLanding



NTTコム エンジニアリング 梶村啓吾社長

Station（海底ケーブル陸揚げ局）の現地エンジニアリング業務，国際海底ケーブルの一元的な監視運用業務も担っています。このほか，放送事業者向けのTV映像の中継サービスも運用しています。そして，法人のお客さまの回線の移転・増設といった申込み受付から開通に至る一連のデリバリー，複数サービスにまたがるワンストップオペレーション，ご利用サービスの運用・監視を行うサービスマネジメント，さらにはお客さまの拠点からSaaSやパブリッククラウドまでの区間におけるネットワーク/トラフィックの品質を可視化し，ネットワーク運用の最適化をご提案する「お客さま体感品質モニタリングサービス」も当社の経験豊富なエンジニアが技術面でサポートしております。

◆事業を取り巻く環境はどうか。

NTT Comのサービスが多様化し，サービスリリースまでの期間が短縮化してきており，それに対する対応が必要になってきます。また，オペレーション全体にわたってさらなる生産性向上が求められるようになってきました。

そこで，サービスの企画・開発段階から参加していくことで，効率の良いオペレーションのプロセスを定義できるようになるとともに，体制の準備も迅速に行うことができ，生産性向上にも寄与しています。さらなる生産性向上については，自らのデジタルトランスフォーメーション (DX) 推進で対応していきます。

DXについて，オペレーションの自動化に積極的に取り組んでいます。当社は，非常に多くのサービスを扱っており，全社的な統一プラットフォーム上で各サービスのオペレーション自動化には至っておりませんが，例えば，SO

(Service Order) については、個々のプロセス分析結果を RPA (Robotic Process Automation) と BPM (Business Process Management) により自動化を行い、自動化率が54%まで達成することができました。また、企業向けクラウドサービスの監視・故障対応においては、自動化率75%に達しており、故障発生から復旧までの時間を60分から5分に短縮させることができました。

オペレーションの自動化においては、いわゆる DevOps といわれる、オペレーションの担当者が自らツールを開発して、使用しながら良いものにしていく中で、標準化していくような方法で内製開発しています。特に企業向けクラウドの場合は、非常に効果があったところもあり、電子情報通信学会 情報通信マネジメント研究会において「研究賞」をいただき事例紹介として発表しています。

DX のもう1つの側面として、業務のリモート化にも取り組んでいます。通常のオフィス業務については、リモートワークを積極導入しリモート率8割を達成しているのですが、当社には、TOC (Tokyo Operation Center) と SO デリバリティセンタといったセンタ業務があり、この業務のリモート化の促進に取り組んでいます。センタにおいては、顧客情報や設備情報等非常にセンシティブな情報を扱っているため、セキュリティにはもっとも気を遣うところです。前述のオペレーション自動化により担当者が介在する業務を減らすことで情報にアクセスする機会を減らしたうえで、セキュアなアクセスを実現するセキュアファットPC上で、オペレーション端末のリモートデスクトップを実現して操作を行い、クラウド型のコンタクトセンタ向けのプラットフォームを利用してお客さま対応を行うことでリモートワークを行っています。また、NTT Com の NeWork というサービスを利用して、コミュニケーション環境も提供しています。1年近くこうした取り組みを行っており、オフィス業務を含めて全体の7割がリモートワークになっています。

コストセンタから プロフィットセンタへ

◆ DevOps による内製開発のためには人材育成も必要になりますね。

内製開発のノウハウというのは非常に大切に、そのための人材育成は課題の1つです。いわゆる業務の中身だけ分かって仕事をしているだけではなく、それをいかにDXの施策に直して、自ら実行する中で自動化、標準化して生産性を上げていく。その能力が必要になってきます。AI、BI (Business Intelligence)、Splunk (ログデータの「検索」「分析」「可視化」ツール)、ServiceNow (統合型IT

運用マネジメントツール) 等、DXのためのさまざまなツールやプラットフォームがあるので、最初はこのような分野の勉強を進める中で、最適な仕組みを検討し、各チームで自律的にDXを進めていくのが望ましいと考えています。

特にAIに関する勉強は難易度が高いので、知識習得を目的に深層学習に関するG検定等の検定にチャレンジすることを奨励しており、すでに200名超がG検定を取得しています。その先には、実践力が必要となるので、NVIDIAのチップ(GPU)をラジコンカーに搭載して、ラジコンカーのカメラの映像を基に、レース場を自走させタイムを競うためのAIのアルゴリズムを全部自分で勉強してつくるといふ、知識から実践力までをカバーした特徴的な取り組みをしています。

こうしたスキル向上に加えて、現場発のシステム開発という発想の転換を図り、現場の担当自らがDXの推進役として自動化を進めていくような流れができてきました。

一方、ベテラン社員の皆さんはこれまで培われた特殊・高度スキルと経験をお持ちで、その技術伝承も大きな課題となっています。そこで「炎のマイスター」というベテラン社員有志によるワーキング活動にて、若手への技術伝承の機会を設ける等、コミュニケーションの活性化も含めて人が生きる活動を進めています。

◆ 今後の展望についてお聞かせください。

バリューチェーンが主業務であるため、意識が生産性向上によるコスト削減に向き、いわゆるコストセンタ的な状態・発想になりがちです。一方、当社には、オペレーションをとおして培ってきたスキル、ノウハウがあり、DX推進によりさらにスキル・ノウハウが広がりを持ってきました。これらを活用してお客さまに付加価値を与えるようなサービスを提供することで収益を得る、プロフィットセンタ的な役割を増やしていきます。お客さまへのサービスの提供としては、例えばこれまで個社対応的要素が多かったマネージドサービスをプラットフォーム化して、NTT Comのサービスとして提供しています。前述の「お客さま体感品質モニタリングサービス」では、当該サービスを通じて当社のエンジニアが直接顧客に対し価値提供するパターンもあります。DXの推進により、リソースに余裕が生まれてくるので、それによりプロフィットセンタ化をさらに加速していきたいと考えています。

また、世界最高水準となる400 Gbit/s 伝送基盤の構築・運用、NTT Comの新たな事業の柱の1つである「データと価値をつなぐSDPF (Smart Data Platform)」に対応したエンジニアリングと複合デリバリ・オペレーション実施、ローカル5Gの設計・構築等、当社の特徴を活かした新たな領域への業容拡大も図っていきます。

「お客さま体感品質モニタリングサービス」をワンストップで提供

スマートオペレーションサービス部 塩原 努さん, 高村 将裕さん, 山口 将輝さん, サービスネットワーク部 木村 倫也さん

◆担当されている業務について教えてください。

東京オペレーションセンター（TOC）においてハイレベルな技術対応を行っているレスキューチームと、大口のお客さま向けにきめ細かな保守サポートを提供しているサービスマネージャー（SM）チームが合同で体感品質チームを構成し、「お客さま体感品質モニタリングサービス」を提供しています。



「お客さま体感品質モニタリングサービス」は、NTT Comのサービスの範囲だけではなく、他社の通信サービス、他のベンダが提供しているようなシステムまで、つまり、お客さまのICT環境全体を把握・俯瞰して問題解決につなげるコンサルティングサービスです。お客さまのシステムは複数のベンダ等で構成されている場合が多く、トラブルが発生するとベンダ間でたらい回しになりお客さまが困ってしまうという事象がありました。レスキューやSMにはこれまで蓄積してきたトラブルシューティングのスキルやノウハウがあり、これを活用することでお客さまの課題解決に貢献しています。

◆今後の展望について教えてください。

お客さまのICTシステムはクラウド化や複数のSaaSの組み合わせ利用などによって非常に複雑化してきています。しかし、お客さまからすれば、とにかく快適に使いたい、正常に使えるようにしてほしいというのが要望で、だれの責任かというのは二の次の話です。その意味で、「お客さま体感品質モニタリングサービス」であればワンストップで問題解決のお手伝いをすることができ、お客さまにNTTグループの付加価値を認めていただいています。実際に本サービスをご利用いただいたお客さまではアプリケーションの遅さの原因が特定できたり、ネットワーク設計の見直し前後におけるトラフィックフローの変化や効果測定ができたりと、お客さまの問題解決や品質改善につながるアドバイスによって感謝のお言葉も多数いただいております。

今後はNTT Comをはじめとするグループの連携により、このサービスをさらに広く、深く展開し、プロフィットセンター化の大きな柱として発展させていきたいと思っております。

内製開発によるオペレーションの自動化

サービスネットワーク部 佐々木 俊介さん, 三木原 杏弥さん, 中嶋 大河さん, 秦 慶和さん, 木下 加那子さん

◆担当されている業務について教えてください。

TOCのフロント業務を担当しており、24時間365日故障等に



関するお客さまからの電話等による問合せへの対応を行っています。ネットワークを構成する装置類は高機能・高性能化と複雑化、大容量化が進んできており、それに収容される回線数、サービス数等も多くなり、災害時のようにいったんトラブルが発生するとサービスのり障範囲、影響を受けるお客さまの範囲が大きくなっています。こういった場合、災害が原因であることは理解されつつも、お客さまからの厳しい入電が多くなります。そこで、ログデータの検索、分析、可視化を行うBIツールであるSplunkにより、迅速かつ確かな対応に向けたオペレーションの改善を行いました。大規模障害発生時のお客さま対応において必要となる警報・収容・工事状況等のデータは、そのデータを生成するシステムの関係から複数のデータベースに分散されており、それぞれにアクセスすることで障害の全体像と時々刻々と変化する状態を把握して、お客さま対応をしていました。これらのデータを一元集約し、お客さまへ通知を行うまでのプロセスのフロールー化を図ることで、これまで故障発生から通知まで1～2時間要していたものが、10～20分で通知できるようになりました。

◆今後の展望について教えてください。

今回のDX推進による自動化のポイントは、内製開発により行ったことです。しかも、専門の開発チームではなく、現場のオペレータが開発を行ったという逆転の発想です。ネットワークは今後も新装置の導入、構成の変更、新サービスの導入等により、常に変化しています。こうした変化に対して現場で直接かつ迅速に対応を行うことが可能となり、さらには装置取り換え等の移行期における品質のデグレード防止につながります。このような特徴を活かして、今後はポータル経由でのさらなる素早い情報共有の実現やAI連携に向けて展開を進めていきたいと思っております。

Zero Touch Operationによる完全自動化をめざす

クラウドアプリケーション&ボイス部

小山 和邦さん, 宮崎 友貴さん

◆担当されている業務について教えてください。

Zero Touch Operationという、人を介さない故障の自動復旧に取り組んでいます。システムや装置が故障すると、感知システム等でアラーム検知し、オペレータの解析、切り分け等による故障箇所・故障原因の特定と復旧方法の検討を行い修理し、事後処理とともにお客さまに通知するというプロセスを、どのサービスでも共通して行っています。この人が介在している部分を統合型IT運



用マネジメントツールであるServiceNowとAnsibleを活用して自動化しました。

2018年に検討をはじめ、2018年10月に故障系をメインに導入し、メンテナンス工事や機器交換等の作業ベースも既存データの活用により対処し、さらに対象サービスも拡大してきました。また、Slackへの自動投稿により顧客フロント等のオペレータとのつながりを持たせることで、人を中心のシステムにしています。その結果、2021年5月現在で、8割の警報が自動処理され、対象プロセスの100%が自動化され（全稼働削減）、故障復旧時間も15～60分要していたものが数分に短縮されました。

◆今後の展望について教えてください。

保守者が自らツールを開発するDevOpsで開発しているのですが、保守者は業務における苦勞が分かっているため、それを改善していくことに対するモチベーションがあり、もし、リカバリ・自動化のシステムが失敗しても、どうすれば直せるのか分かっているため、最後は自身が直接対応できるという強みがあります。特にモチベーションについては、自分たちの業務を自動化したという思いと、単なる自動化ではなく、プロセスの最初から最後までを自動化したという思いが大きいのが特徴です。一般に自動化においてはコスト効果の部分が注目されますが、Zero Touch Operationでは、コスト効果としての稼働削減ばかりではなく、故障復旧時間の短縮や人為故障がなくなるといった品質面の効果も出ており、今後はAIを組み合わせたZero Touch Operationのさらなる活性化により、NTTコムエンジニアリングのプロフィットセンター化に向けたリソー

スや付加価値の材料を提供していきたいと思えます。

世界最高水準となる400 Gbit/s伝送基盤の構築

インフラネットワーク部 石牟礼 涼太さん、坂田 伸幸さん、藤田 由佳さん、伊藤 有人さん

◆担当されている業務について教えてください。

インフラネットワーク部では、NTT Comの基盤業務の設備計画から設計、構築、設備管理に関する業務を行っています。



2019年から、世界最高水準となる400 Gbit/s伝送基盤の構築の取り組みを進めています。モバイル、インターネット、クラウドをはじめとするさまざまなトラフィックには特徴があります。専用線等を中心とした法人のお客さまのトラフィックと全国に分散した個人のお客さまのモバイルのトラフィックの特性を吸収してどのようにして効率の良い伝送基盤ネットワークを構築するか、といった点が課題で、光スイッチ等の新技術の導入や上位のレイヤまで含めるかたちで検討し、対応しています。

◆今後の展望について教えてください。

400 Gbit/s伝送基盤を順調に進めていく中で、今後はこれまで培ったノウハウを活用し、5G（第5世代移动通信システム）も意識したデジタル化の進展を支える伝送基盤の高性能・高信頼化の実現を手掛けていきたいと思えます。

NTTコム エンジニアリング ア・ラ・カルト

NTTコム エンジニアリングでは、CSR活動より包括的な概念であるSDGs推進活動を通し、社会課題を事業で解決することを目的に、SDGs（Sustainable Development Goals）推進室を2021年4月1日設立しました。

■ Step1 : SDGs バッジ

社内外で少しずつSDGsという言葉が聞かれるようになってきた2019年11月、まずは形からということで社内ポータルにSDGsクイズを掲載し、全問正解者にSDGsバッジを配ることを始めたそうです。バッジを胸に着けている人を見て、「それ何」と興味を持ってもらうことを目的としたところ大成功で、2021年5月現在で約1200のバッジが配布されているそうです。

■ Step2 : SDGs 検定

ベテラン社員の「炎のマイスター」の1名が「SDGs検定」という冊子をつくり、それにより50問程度の検定を行ったそうです。第1回目、第2回目までの検定合格者は約100名、今後さらに第3回、第4回と継続的に実施していこうと計画中のことです（写真1）。

■ Step3 : 活動計画からSDGs推進室設立へ

社内に閉じることなく、外部の専門家から意見をいただき、社員参加型のSDGsワークショップやアンケート、意見交換会を開催する中で、会社として具体的な活動計画の検討を始めました（写真2）。これから、コムエンジニア独自のSDGsアクティビティが実行され、SDGs推進室の活動が会社や社会をどのように変革していくか、期待したいと思えます。



写真1



写真2

柱上作業者の安全を守るための取り組み ——電磁誘導対策

通信ケーブルの近くに送電線が存在すると、電磁誘導作用により通信線に誘導電圧が発生することがあります。そのとき、柱上作業者が通信線に触れることで、感電等により人体が影響を受ける場合があります。柱上作業者の安全を確保するには、事前に送電線近くの通信ケーブルに発生する誘導電圧を計算し、対策を講じる必要があります。ここでは、電磁誘導対策の必要性ならびにその制限値について述べるとともに、NTT東日本 技術協力センターで開発した、誘導電圧の計算を効率的に行える「誘導予測計算支援システム」について紹介します。

誘導対策とは

落雷や台風などによる送電線の断線のほか、絶縁碍子や電力ケーブルの絶縁破壊などにより、電力設備に地絡故障が起きることがあります。このとき発生する地絡電流は、通信ケーブル近傍に磁界を生じさせ、磁界により通信線に誘導電圧が誘起されます。作業者が通信線の接続等の作業をしているときに、この誘導電圧が発生すると、作業者の体を介して電流が大地に流れ込み感電することがあります（図）。例えば作業者が心線作業をしながら、身体の一部がつり線や支持金物、近接する街灯や看板などの金属体に触れてしまうことによって生じます。感電による影響は、電流値や継続時間などによってさま

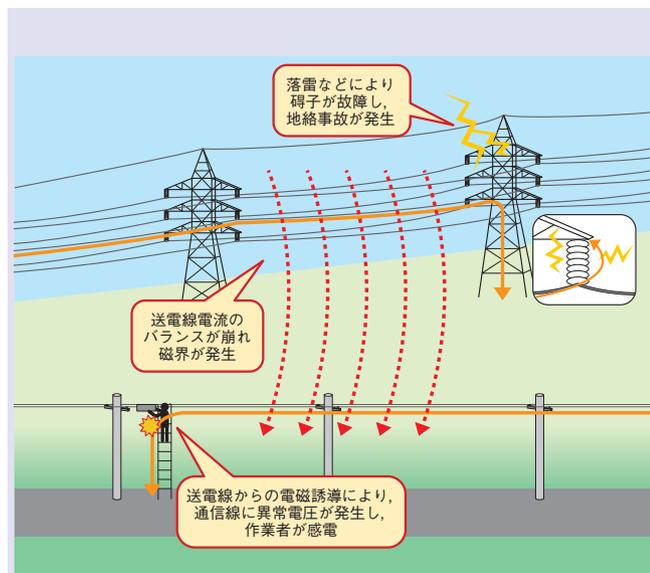


図 電磁誘導による感電事故発生のイメージ

ざまであり、例えば、電流の経路が作業者の心臓を通る場合には心室細動が発生する可能性があることや、その他の経路でもやけど等の直接的な影響のほか、感電による痛みやショックで作業者が高所から転倒・落下するなどの二次災害も想定されます。そこで、送電事業者とNTTの間では、地絡事故による誘導電圧が通信線に発生しても作業者に危険が及ばないように、誘導電圧の計算方法や対策方法に関する協定（誘導協定）を結び、誘導電圧を事前に算出して、あらかじめ決めた制限値を超える場合は対策を実施することとしています。

近年、電力需要の増大に伴い送電効率の良い超超高压送電線（500 kV）の増加や既存送電線の昇圧・回線増など送電線の変更に伴う周辺の通信線への誘導の影響と対策を検討する事例が増えています。また、既存の送電線の近傍に宅地開発などにより通信線を新設・増設する場合の誘導対策や、支障移転工事に伴い既存の誘導対策を施した通信線路を移設する場合など、送電線起因の誘導検討だけでなく、通信線の設計においても誘導対策に関する知識を必要とする機会が増えています。

誘導対策における制限値とは

柱上作業者が通信線を取り扱う作業を行っている最中に誘導電圧が発生し、通信線とその他の周辺設備との接触によって人体を経由した電流が流れた場合、その電流の大きさや流れる時間が問題になります。また、電流が人体の中をどのような経路で流れたかにより、影響が変わってきます。そのため、地絡事故発生時に送電を遮断できる時間、通信線の作業者が作業する体勢などを考慮し、作業者が心室細動を起こさないように、通信線に誘導される電圧値に制限が定められています。

日本国内では誘導障害防止研究委員会により昭和8年に通信線に発生する誘導電圧の上限は300 Vと定められました。また、昭和36年に高安定送電線と呼ばれる、地絡事故時に送電を0.1秒以下で遮断可能な送電線では、上限が430 Vと定められました。

その後、

- ① 送電線の地絡電流遮断性能が向上し、地絡事故時の遮断時間が、0.06秒の送電システムが導入されていること。
- ② 昭和59年に人体安全に関する国際規格が最新化され、人体への電流の影響が明らかになり、心室細動の発生限界が改定されたこと。

などの点から、昭和62年より電力・鉄道・通信各社の誘導に関連する業界や大学教授からなる委員会（誘導調査特別委員会）で検討が開始されました⁽¹⁾。検討内容は多岐にわたり、主な項目として、送電線の地絡電流遮断性能、通信線側の作業者が電柱に昇柱して作業している場合や、高所作業車を利用して作業している場合などの作業形態、もし衣服が濡れている状態ではどうなるか等についても検証を行うなど、作業者の安全を守ることを最優先に委員会で数年にわたり検討が行われました。その結果、地絡事故時の遮断時間が0.06秒の高安定送電線については、つり線や金物に胸や腰などが触れないように対象物に絶縁対策を行った場合に限り、誘導電圧を650 Vまで許容できると見直され、平成5年に報告書にまとめられました⁽¹⁾（表1）。この報告書の内容を基に電

力、鉄道、通信の各社とも協定を結び、現在も運用されています。また、検討結果は国際電気通信連合の電気通信標準化部門（ITU-T）へ提案され、平成8年にITU-T勧告K33等の国際標準に採用されています。

誘導予測計算支援システム

送電線の地絡事故などにより通信線に誘導電圧が発生した場合、最悪の場合は心室細動の発生等、人命にかかわる可能性があることを前述しました。そのため新たな電力設備がつけられた場合など、誘導電圧の予測計算を行い、制限値を超える場合には確実に対策を行う必要があります。

しかし、予測計算は複雑であり、誘導に関する高いスキルが必要となります。また、計算を行うには送電線と通信線の離隔を算出する必要がありますが、手作業では膨大な稼働が必要となります。NTT東日本 技術協力センターでは、これまで数多くの電磁誘導問題に関する技術支援を行う⁽²⁾とともに、予測計算の効率化を図るための「誘導予測計算支援システム」を開発⁽³⁾し、手作業による計算から多くの作業を自動化することで（表2）予測計算をサポートしています。誘導予測計算支援システムの主な機能は以下のとおりです。

- ① 離隔図作成の自動化
- ② 誘導予測電圧計算の自動化
- ③ 計算対象範囲の表示
- ④ 全通信線ルートに対する一括誘導予測計算

表1 誘導電圧制限値

| 誘導電圧制限値 | 電流遮断時間 | 対策方法 | 適用開始時期 |
|---------|---------|-------------|--------|
| 300 V | 規程なし | 遮蔽ケーブル | 昭和8年 |
| 430 V | 0.1秒以下 | 遮蔽ケーブル | 昭和36年 |
| 650 V | 0.06秒以下 | 遮蔽ケーブル+絶縁対策 | 平成5年 |

誘導予測計算システムを活用することで、誘導計算にかかわる大幅な稼働削減を見込むことができます。

また、2016年度、2018年度、2019年度と誘導予測計算支援システムを改良開発し、竹内算式⁽⁴⁾だけでなく、カーソン・ポラチェック算式や、高さ方向まで考慮したカーソン・ポラチェック算式の厳密計算⁽⁵⁾への対応、国土地理院送電線取り込み機能やメタルケーブル・光ケーブル表示切替などの機能を追加しました。

今後の展開

日本における誘導に対する検討は大正8年に電気学会雑誌に掲載された、澁澤元治先生の論文⁽⁶⁾から始まりました。その後、この検討は関係する業界全体で協議し、さまざまな計算方法⁽⁷⁾の検討や実験等を経て、作業者の安全を第一に制限値などの規程類が定められてきました。そのため、万が一の事故の際に人命を守るためにも誘導予測計算を行い、確実な対策を講じることが必要です。

NTT東日本 技術協力センタでは、引き続き支店等の課題解決に向けた技術協力活動を推進し、通信設備の品質向上・信頼性向上に貢献していきます。

参考文献

- 電気学会・電子情報通信学会：“誘導調査特別委員会報告書 電力および通信技術の進歩と電磁誘導対策への展開,” 誘導調査特別委員会, pp. 5-22, 1993.
- NTT東日本技術協力センタ編：“誘導対策について,” 通信設備のトラブルQ&A第3版, 電気通信協会, pp. 442-447, 2016.
- テクニカルソリューション：“誘導予測計算支援ツールの開発,” NTT技術ジャーナル, Vol. 22, No. 7, pp. 42-44, 2010.
- 竹内：“電磁誘導電圧の簡易計算方法,” 電気学会雑誌, Vol. 77, No. 831, pp. 1629-1633, 1957.
- A. Ametani, T. Yoneda, Y. Baba, and N. Nagaoka：“An investigation of Earth-Return Impedance between overhead and underground conductors and its approximation,” IEEE Trans. EMC, Vol. 51, No. 3, 2009.
- 澁澤：“電力線の弱電流線に及ぼす誘導作用ならびにその防止方法,” 電気学会雑誌, Vol. 33, No. 303, pp. 1021-1255, 1913.
- 深尾：“電力線の通信線に及ぼす電磁誘導作用に就て,” 電気学会雑誌, Vol. 47, No. 468, pp. 673-691, 1927.

表2 誘導予測計算の作業フローと従来方法との比較

| | 従来方法 | 誘導予測計算支援システム |
|-----------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 1.送電線・通信線情報、起誘導電流曲線等の収集および、ルート図作成 | 手作業 (紙ベース) | 通信線情報(OPTOS情報)のインポート 送電線地図(紙地図)の電子化・手入力による数値化 起誘導電流曲線(紙表)の電子化・手入力による数値化 |
| 2.離隔図作成 (送電線-通信線) | 手作業 | 自動化 |
| 3.相互インダクタンス算出 (送電線-通信線) | 手作業 (一部自動化) | 自動化 |
| 4.起誘導電流算出 (起誘導電流曲線) | 手作業 | 自動化 |
| 5.誘導電圧算出 | 1 通信線ルートごとに誘導計算 | 全通信線ルート一括計算可能 |

◆問い合わせ先

NTT東日本

ネットワーク事業推進本部 サービス運営部

技術協力センタ EMC技術担当

TEL 03-5480-3711

FAX 03-5713-9125

E-mail gikyo-ml@east.ntt.co.jp