

NTT 技術ジャーナル

ISSN 0915-2318 平成2年3月5日第三種郵便物認可
令和6年9月1日発行 毎月1回1日発行 第36巻第9号(通巻426号)

9

SEPTEMBER
2024
Vol.36 No.9

特集

人間と情報の本質探求と人に寄り添う技術の協創 サプライチェーンにおける セキュリティ透明性の向上と活用に向けた取り組み

トップインタビュー

池田 敬 NTT常務執行役員 技術企画部門長

For the Future

自動車業界のゲームチェンジ:EV業界を紐解く―後編―

グループ企業探訪

NTTデータ オートモビリティ研究所

from NTTフィールドテクノ

NTT西日本におけるネットワーク見える化ツールの活用状況(能登半島地震における活用実績)

from NTTコミュニケーションズ

すべての人が自らの力で制御機器・危機を管理できる世界へ! OT/ICSセキュリティリスク可視化サービス OsecT



4 トップインタビュー

現場最前線とマーケットの「周辺情報のシャワー」を浴び「カンの働く組織」へ

池田 敬

NTT常務執行役員 技術企画部門長



8 特集1

人間と情報の本質探求と人に寄り添う技術の協創

10 生成AI時代におけるコミュニケーション科学研究の新展開

——人間と情報の本質探求と人に寄り添う技術の協創に向けて

14 圧縮計算でめざす高信頼インフラ

——決定グラフを用いたネットワーク解析問題の高速な解法

18 人の知覚に寄り添った自然で快適な映像表示

——人間の視覚情報処理モデルに基づく表示映像の最適化

23 たくさんのデータの中から素早く知識を発見

——計算の枝刈りによる高速化手法を活用した厳密性を担保した大規模データ解析

27 ヒトの動きが“ばらつく”ことの本質

31 主役登場 錦見 亮 NTTコミュニケーション科学基礎研究所



32 特集2

サプライチェーンにおけるセキュリティ 透明性の向上と活用に向けた取り組み

34 透明性によるサプライチェーンセキュリティリスクへの挑戦

38 可視化データ活用シーン拡大に向けたセキュリティ・

トランスペアレンシー・コンソーシアムの活動

42 可視化データ活用によるソフトウェア脆弱性管理

46 セキュリティ・トランスペアレンシー確保技術

49 主役登場 鐘本 楊 NTT社会情報研究所



50 For the Future

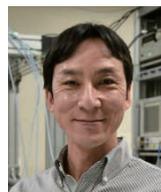
自動車業界のゲームチェンジ:EV業界を紐解く —後編—

56 挑戦する研究者たち

齊藤 志郎

NTT物性科学基礎研究所 上席特別研究員

レッドオーシャンの研究領域の先を見据えたボソニック
量子ビットによるエラー訂正に迫る



特集

60 明日のトップランナー

山下 直美

NTTコミュニケーション科学基礎研究所 特別研究員

情報技術で心豊かな社会へと導く
「人と人のつながりを深化させるコミュニケーション支援」



For the Future

特別企画

64 グループ企業探訪

株式会社NTTデータ オートモビリティ研究センター

AIを活用した自動運転の研究, およびその開発環境
ツール群の開発を行う会社



挑戦する研究者たち

68 from NTTフィールドテクノ

NTT西日本におけるネットワーク見える化ツールの活用状況(能登半島地震
における活用実績)

挑戦する研究開発者たち

72 from NTTコミュニケーションズ

すべての人が自らの力で制御機器・危機を管理できる世界へ!
OT/ICSセキュリティリスク可視化サービス OsecT

明日のトップランナー

76 Webサイト オリジナル記事の紹介
10月号予定
編集後記

グループ企業探訪

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/>

NTT技術ジャーナルは
Webで閲覧できます。
<https://journal.ntt.co.jp/>



from



NTT 常務執行役員
技術企画部門長

池田 敬 Kei Ikeda

PROFILE

1992年日本電信電話株式会社入社。2012年NTT 東日本神奈川支店設備部長、2017年千葉事業部長、2020年ネットワーク事業推進本部副本部長を経て、2022年6月より現職。



現場最前線とマーケットの「周辺情報のシャワー」を浴び「カンの働く組織」へ

公共的な側面も担う通信事業のリーディングカンパニーとして、社会課題解決に臨んでいるNTTグループ。世界最先端で持続可能な新たな社会システムとインフラを構築し、Well-beingな社会の実現をめざしています。Co-CAIO (Co-Chief Artificial Intelligence Officer) / CIO (Chief Information Officer) としてNTTグループの技術部門を牽引する、池田敬NTT常務執行役員 技術企画部門長にNTTグループの技術戦略、トップとしての信条を伺いました。

自社で新技術の実装を推進し、蓄積した成果やノウハウを、自信を持って提案する

さまざまな個性を備えた社員が共鳴し合い、「カン」を磨き合う布陣で技術戦略を遂行している。技術企画部門は、技術戦略において主にどのような役割を担っているのでしょうか。

社会課題の解決は私たちNTTグループの使命であり、NTT技術企画部門は技術戦略を策定し、それを事業会社の事業に反映して実現していくことがミッションです。NTTの技術というと研究所を思い浮かべる方がいらっしゃると思いますが、研究所およびそれを取りまとめる研究企画部門では、将来を見据えた技術について基礎研究から実用化までを研究テーマとして活動しています。一方、技術企画部門ではNTT全体のネットワークやITなどに関して、研究所技術はもちろん、市中の新しい技術の開発・導入戦略を策定

しNTTグループの各社に実装し、事業会社の社員が持つ「周辺情報」を使ってそれらをしっかりと磨き上げて世に出すことを担います。現場最前線の社員が日々「周辺情報のシャワー」を浴び、経験やノウハウを蓄積しているからこそ、お客さまに自信を持って提案することができるまで技術が磨き上げられ、その結果お客さまの課題解決のお役に立つことができると考えています。

真にマーケットに受け入れられる IOWNを創る

「周辺情報のシャワー」という言葉が出ましたが、それはどのようなもののでしょうか。

私は「周辺情報のシャワー」という言葉を頻繁に使うのですが、『カンの構造』¹⁾という書籍を読んだことに端を発しています。『カンの構造』は電電公社研究所出身の中山正和さんの著書で、センスや「カン」について当時の脳生理学の知見か

ら解説しています。ごく簡単に要約すると、知りたいと思っている情報の周辺に何万倍というさまざまな情報があって、人はそれを知らないうちに吸収しているのだそうです。一方で、無意識に吸収し蓄積した情報がみだりに外に溢れないように抑制する仕組みもあるのですが、それを乗り越えて出てきたのがいわゆる「カン」なのだそうです。つまり、1人の人間が好奇心を持って幅広いことに取り組んでいるとき、そのときは何の意味もなさないかもしれないけれど、問題意識高く一人称で考えているとそれらが組み合わさって意味のある「カン」として表出する。これは人間の持つ大きな力であると私は信じているのです。しかも、これが組織となったら、個々の社員が持つさまざまな周辺情報が束となり、同じ問題意識を持ってベクトルを合わせれば「カン」の働く組織になるでしょう。「周辺情報のシャワー」はまさにこの「カン」の源泉なのです。NTT技術企画部門は技術戦略の要

を担う組織となりますが、まさに理想とする「カン」の働く組織をめざして、日々の業務にあたっています。

このような組織像や使命感により、私たちが展開しているNTTグループのIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 普及に向けた取り組み、通信障害や災害対策としてのネットワークの強靱化における「周辺情報のシャワー」について紹介したいと思います。

IOWNもAPN IOWN1.0のサービスがリリースしましたが、この先へ続くIOWNの展開における「周辺情報のシャワー」、そして特に循環型社会の実現についてもお聞かせいただけますか。

IOWNのねらいを端的に申し上げれば、これまで通信の世界で培った光の技術をコンピュータ (信号処理) の世界に適用し、超低消費電力のサーバを世に出していくことです。現在のコンピュータで使われているCPUやGPU、メモリといったデバイスは電気信号で動作し、デバイス間の通信も電気信号で行われています。これらを光信号に置き換えることで消費電力の大幅な削減をめざしています。このときの核となる技術が「光電融合デバイス」ですが、このハードウェアを動作させるには、ネットワークオペレーションシステム (NOS) と呼ばれるソフトウェアが必要です。こうした背景から、2023年の12月に、NOSとしてグローバル市場で高く評価されているOcNOSを開発しているIP Infusion社を傘下に持つACCESS社に出資をしました。

出資をして良かったと思うのは、グローバルマーケットの最前線で活躍しているマーケットとともに開発ロードマップを描けるようになったことです。NTTの研究者たちがマーケットの最前線の情報に直接触れることができる、つまり、「周辺情報のシャワー」を浴びられるようになったことに大きな価値を実感しています。「そのような機能を市場は求めていない」などの厳しいコメントも飛び交っていますが、こうした環境をとおして、グローバルなマーケットが「これなら売れる」と言ってくれるソリューションのかたちが見えてきました。第一弾のリリースに向けて準備



を進めていますのでご期待ください。

IOWNも構想段階から実装へとフェーズが移行する中、こうした「周辺情報のシャワー」を浴びながら、真にマーケットに受け入れられるIOWNを創ることに努めたいと考えています。

2021年に発表したNTTグループ環境エネルギービジョンにおいて、CO₂排出量の約半分をIOWNで減らし、残りの半分は再生可能エネルギーを確保することで、2040年にカーボンニュートラルを達成することを宣言しています。

その一環として、2023年に風力発電の開発会社である株式会社グリーンパワーインベストメント (GPI) を買収しました。GPI は開発中の案件も含めるとトータルで200万 kW (原子力発電2基分) もの再生可能エネルギーを発電する能力を有しています。これにより NTT グループで必要な再生可能エネルギーの供給にほぼ目処がついたことになり、今後は NTT グループ外のお客さまに供給することも進めていきます。

ただ、再生可能エネルギーは非常に不安定で、電力の需要と供給のバランスを維持する「調整力」が必要です。この問題に対しNTTアノードエナジーでは、NTTグループの最新のICTを活用したエ

ネルギーマネジメントシステム (EMS) と蓄電池をうまく組み合わせて電力系統を安定させることに取り組んでいます。また、先ほどお話ししたIOWNの取り組みにより、再生可能エネルギーの地産地消に貢献できると考えています。コンピュータのデバイス間を光で結ぶ技術が確立できれば、例えば、北海道や九州のデータセンタ内のCPUやGPUなどのコンピューティングリソースと、首都圏のデータセンタ内のストレージ等が連携して1つの大きなコンピュータとして動作させることが可能となります。九州エリアが快晴であれば、九州のコンピューティングリソースをフルに活用し、逆に北海道エリアが晴れていれば北海道のリソースを活用するなどにより、再生可能エネルギーの変動にエネルギー需要を合わせていくことが可能となるのです。

さらに、グリーントランスフォーメーション (GX) 分野の取り組み強化に向けて、グループ共通ブランド「NTT G×Inno (エヌティティ ジーノ)」を立ち上げました。G×Innoは「GX×Innovation」を意味し、GX分野でイノベーションを起こし、日本が掲げる2050年カーボンニュートラル実現に貢献する思いを込めました。まずは自社および自社に関連するバリュー

チェーンの脱炭素化を進め、これらの取り組みから得られたノウハウや実績を活かしたGXソリューションを企業や自治体などの皆様にご提案することにより、社会全体のカーボンニュートラルの実現に貢献していき、2030年度には1兆円超の事業規模を目標として取り組みます。

IOWN とGXはかけがえのない地球環境を維持するうえで、非常に重要な役割を担うでしょう。さまざまな課題が山積していますが、地球環境を守り抜くことをモチベーションにして IOWNやGXの取り組みを進めていきたいと考えています。

グループカの源泉は結集した社員の力である

通信は私たちの生活において重要なライフラインです。通信障害や災害対策、ネットワークの強靱化についてはどのような取り組みをされているのでしょうか。

私が技術企画部門に赴任してまだ1週

間余りのとき、他社で大規模な通信障害が発生しました。「これは他人事ではない」と考え、NTTグループ内でも対策を検討しようと動き出したタイミングで、NTT西日本で大規模通信障害を発生させてしまいました。このことをきっかけに、事業会社のCTO/CDO (Chief Technology Officer/Chief Digital Officer) 級メンバーで「システム故障再発防止委員会」を立ち上げ、このような事象が発生しない、または発生しても早期に回復可能な、より強靱性の高いネットワークに関する検討を始めました。ところがその後も各社で大規模な通信障害が立て続けに発生したのです。

この事態を受けて、顕在化したリスクのグループ内総点検という従来からの対策に加え、どんなに再発防止策を実施したとしても「想定外の事象は必ず起こる」ことを前提にしたさらなる信頼性の向上施策に着手しました。

例えば「突然3分の2の装置がダウンする」「3倍のトラフィックが流入する」など、通常ではあり得ないような極端な異常事態を想定して、各事業会社にどのようなサービス影響が発生するか棚卸をしてもらいました。この取り組みをとおしても心強く思ったことがあります。それはグループの中にこの難題への「答え」があったということです。ある課題に対しては事業会社Aの取り組みを展開し、別の課題に対しては事業会社Bの取り組みを展開するといったかたちでグループトータルで強靱なネットワークをつくり上げていったのです。各事業会社は異なる「周辺情報のシャワー」を浴びており、それらに基づいた解を模索しています。持株会社はそれらをミックスし水平展開することで、新たな「カン」を生み出せるような組織づくりを担っているのだと実感した出来事でした。

トップとして大切にしていることをお聞かせください。また、研究者、技術者、お客さまへメッセージをお願いします。

私は、「周辺情報のシャワー」を活用するために、どちらかというとトップダウンではなくボトムアップ型のマネジメントスタイルを実践しています。個々が持つ情報をいかに結集するかがグループカの源泉であると考えています。多少の遠心力が働くガバナンス下であっても、知見を拾い上げ、それをしっかりと共有していけばNTTグループはもっと力が出せる会社になると信じています。

私は1992年に1人のエンジニアとしてスペシャリストをめざして入社しました。ところが、実際のところは何となくゼネラリスト的な道を歩み、NTT東日本では人事部に在籍していたこともあります。育成業務を通じて若手社員たちと面談する機会等を重ねていくうちに、会社全体が見えるようになりました。そして、設備系の現場の魅力を感じた私は、当時の上司に相談して支店の設備部に異動しました。その職場では高い意識を持った諸先輩方の姿を目の当たりにしました。現場で「周辺情報のシャワー」を浴びて育ち、支店のオーバースタッフに配属された選ばれし者としてのプライドを持ち、「設備の現場を支えているのは自分たちだ」という高い意識をもって働いている諸先輩の姿に感銘を受けました。

労をいとわず働く方々が会社を支えているのだと実感し、このような心を持つ人がそろえば会社は強くなると確信したのです。私自身も支店の設備部長や支店長を務めた際には週に一度は現場に足を運び「周辺情報のシャワー」をいただいて今日に至ります。このような経験から、現場の皆さんから気兼ねなく「周辺情報」を届けていただけるように、壁をつくることなく心理的安全性をいかに高めるかということをお心掛けるようになりました。

最後になりましたが、技術者・研究者の皆さん、現場やお客さま、マーケットが私たちの技術や成果をどう見ているかを念頭に置き、そうした方々と交わりながら「周辺情報のシャワー」を浴び、「カン」を磨いていきましょう。

そして、お客さまやビジネスパートナー





の皆様、私たち研究者・技術者の活動に対して忌憚のないご意見をお寄せください。皆様からの「周辺情報のシャワー」を浴びることで、私たちのカンと感性は鍛え

られます。そうして磨き上げた技術をとおして、皆様に貢献できるよう尽力してまいります。

■参考文献

(1) 中山：“カンの構造,” 中央公論新社, 1968.

(インタビュー: 外川智恵 / 撮影: 大野真也)

インタビューを終えて

トップインタビューではトップの新人時代の思い出やトップとしての信条の礎となった出来事を伺うことがあります。いずれも示唆に富むお話なのですが、誌面の関係で収めきれないことも。池田常務も同様で、NTT東日本の千葉事業部長時代に、エネルギー事業を中心とした地域振興を目的としたドイツの「シュタットベルケ」の日本版をやりたいという部下からの提案に対し「社員の幅広い見識に感銘を受けた」というお話は池田常務のトップマネジメントのあり方を体現する取り組みでした。当時は時期尚早でご理解いただける首長さんも少ない中、NTTと東京電力との電力系合弁会社であるTNクロスとともに「電力バックアップ事業」というかたちで自治体との協業をスタート。

その自治体が、のちに「日本版シュタットベルケ」ともいえる「環境省脱炭素先行地域100選」に採択されたのです。肝となるのはこれが「現場」の「部下の提案」に端を発し、NTTグループ会社が連携したことです。まさに池田常務のボトムアップスタイルで、社員の持つ「周辺情報のシャワー」を活かし、TNクロスに引き継がれて成果を上げたのです。そんな池田常務のご趣味の1つは犬の散歩。「以前飼っていた犬は犬嫌いだったんです。犬のいないところを探していたら、いつの間にか、キャンプ場1泊で散歩をするようになりました」と池田常務。ペットの心理的安全性も考慮してわがままを言いやすい環境をつくられていたようです。長年、モータースポーツを愛している池田常務の愛車のアルファロメオジュリエッタ。「ゆっくり、安全運転で楽しんでいます」と、

さりげなく添える池田常務のスタンスに、どんな立場の人も不安にさせない行き届いた配慮を感じたひと時でした。



人間と情報の本質探求と 人に寄り添う技術の協創

本特集では、NTTコミュニケーション科学基礎研究所が取り組む

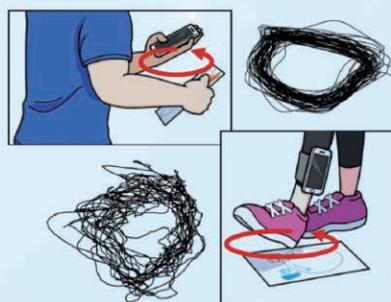
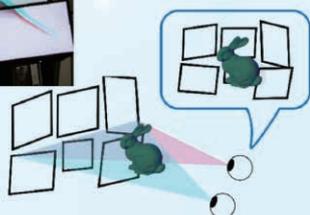
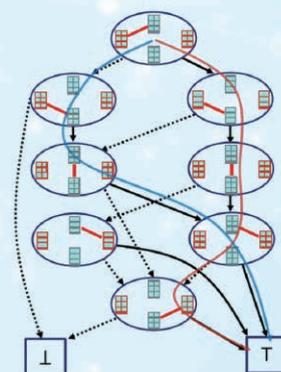
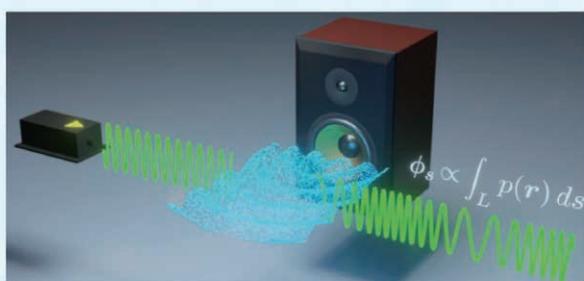
「人を深く理解し極める」人間科学の研究および、

「人の能力に迫り凌駕する」情報科学の研究などについて、

最近の取り組みの一部を紹介する。

生成AI時代におけるコミュニケーション科学研究の新展開 ——人間と情報の本質探求と人に寄り添う技術の協創に向けて—— 10

昨今急激に進歩しつつある生成AI（人工知能）の動向を踏まえ、人とAIの共存に向けたNTT コミュニケーション科学基礎研究所における最新の研究の取り組みについて紹介する。



コミュニケーション科学

圧縮計算

視覚情報処理モデル

大規模データ解析

運動制御

特集

圧縮計算でめざす高信頼インフラ

——決定グラフを用いたネットワーク解析問題の高速な解法—— 14

膨大な数の組合せを圧縮して表現する決定グラフを用いたアルゴリズムによる、困難な解析問題の高速な解法について解説する。

人の知覚に寄り添った自然で快適な映像表示

——人間の視覚情報処理モデルに基づく表示映像の最適化—— 18

人間の視覚情報処理のモデル化を通じて、透過型ディスプレイなどの情報提示を、利用シーンによらず自然で快適に実現するアプローチを紹介する。

たくさんのデータの中から素早く知識を発見——計算の枝刈りによる高速化手法を活用した厳密性を担保した大規模データ解析—— 23

計算の枝刈りを行うことにより高速性と厳密性を両立させたデータ解析手法の代表的な例を紹介する。

ヒトの動きが“ばらつく”ことの本質 27

「脳が筋を動かすタイミングの乱れ」が運動をばらつかせる要因であり、手足の器用さに関係することを示した研究について紹介する。

主役登場 錦見 亮 NTTコミュニケーション科学基礎研究所 31

機械学習技術で病気と無縁の社会をめざす



生成AI時代におけるコミュニケーション科学研究の新展開 ——人間と情報の本質探求と人に寄り添う技術の協創に向けて

NTT コミュニケーション科学基礎研究所 (CS研) では、人と人および、人とコンピュータシステムとの間の「ここまで伝わるコミュニケーション」の実現に向けて、情報と人間の本質に迫る基礎理論の構築と、社会に変革をもたらす革新技术の創出に取り組んでいます。本稿では、昨今急激に進歩しつつある生成AI (人工知能) の動向を踏まえ、人とAIの共存に向けたCS研における最新の研究の取り組みについてその一部を紹介します。

キーワード：#コミュニケーション科学、#人工知能、#脳科学

なや ふとし
納谷 太

NTTコミュニケーション科学基礎研究所 所長

はじめに

2022年11月にOpenAI社が対話型生成AI (人工知能) であるChatGPTをリリースして以降、わずか2カ月で1億人ユーザーに達するというニュースは世界中に大きなインパクトを与えました。「対話型」という文字どおり、人と自然に対話する機能を有し、自然な文章の作成や要約および翻訳に加え、図表を読解して質問に回答することや、人が指定したインストラクションに従って所望の画像や動画、音楽、さらにはプログラムさえ自動生成できる機能を有するものまで各社から発表され、高い注目を集めています。その背景には、深層学習の発展を支えたGPUの計算能力の大幅な向上に加えて、膨大かつ多様な言語資源を学習可能にしたTransformerと呼ばれる自然言語処理での大きなブレイクスルーとなる技術が生まれたことが挙げられます。膨大なデータを学習した結果である大規模言語モデル (LLM: Large Language Model) の1つであるGPT (Generative Pre-trained Transformer) と対話的にインタラクションするインタフェースを備えることで、研究者やエンジニアだけでなく、広く一般のユーザーがスマートフォンなどで簡単に利用できる環境が整ったことが相乗効果を生み出しました。

こうした生成AIは、その精度や信頼性の改善に伴い、今後私たちの生活に確実に

浸透していくでしょう。最近発表されたGPT-4oでは、リアルタイムでの音声対話や、カメラで撮影した映像を見せながら質問するなど、マルチモーダルな入出力応答も扱えるようになり、さらなる注目を浴びています。しかしながら、現状の生成AIは、ユーザーがどのような回答を求めたいかに応じて、プロンプトという指示により事細かに状況を言語的に与える必要があります。マルチモーダル化されたLLMとはいえ、LLM自体はあくまで言語情報をベースとして構築されており、映像や音声などのマルチモーダルな入力情報はLLMの入力形式に適合するようにトークン化されて処理しています。一方、人間は言葉を用いる以前からあらゆる感覚情報を脳内で処理して物事や概念を理解・記憶しており、これに対して言語という抽象化した記号体系を紐付けています。すなわち、現状のマルチモーダルLLMは、言語ではとらえきれないような五感情報を取り扱えないという限界が存在します。これは1990年に認知科学者のStevan Harnadが提唱した「シンボルグラウンディング問題⁽¹⁾」または「記号接地問題」と呼ばれ、AIに人間と同じように言語で表現される記号が指し示す物事に対して、実世界の概念や意味を結び付けて理解させることができるのかを問う根本的な問題です。加えて、現在のLLMは、人間と同じように、表情や態度や会話などから、相手の好みや感情、意図、知識、信念などを

察し、相手に対して気の利いた回答を返したり、あるいはAI自身がパーソナリティを持ち、信念に基づく回答を返すという段階には至っていません。そこには「心の理論⁽²⁾」という、人間のように他者の心の状態を推測し理解する能力をAIで実現できるのかを問う哲学的ともいえる大きな課題が残されています。

CS研は、1991年の設立当初から、「人と人との理解のメカニズムを学際的に解明」することを目的とし、情報と人間を結びコミュニケーション科学の分野を開拓すべく基礎研究に取り組んできました⁽³⁾。まさに、上記の「シンボルグラウンディング問題」および「心の理論」という本質的な問いを追究する研究テーマといえます。CS研設立以来33年を経た現在において、さまざまな情報の本質や人間の本質に関する深く理解に基づく新発見や革新技术を創出し続けていますが、人と人がお互いを理解するメカニズムの全貌の解明は容易には解決し得ない究極的な研究課題であり、研究が進展するほど、情報科学、工学、神経科学、心理学、社会科学、人文科学、哲学に限らず、医学、生物学、さらには数学など、さまざまな学際分野にまたがる幅広い視野に立ったアプローチの必要性が年々高まっていると実感します。

本特集では、学際的な研究分野を広げつつあるCS研の最近の取り組みにおいて、「情報の本質を極める」「人間の本質を極める」

「人と社会に寄り添う」「基礎理論の追究」という4つの切り口から、それぞれ代表的な研究事例の一部を紹介します。

情報の本質を極める

CS研では、コミュニケーションにおける情報を伝達するあらゆるメディアを対象にした情報処理技術に関する研究を進めています。近年、センシング技術の発展に伴い、これまで観測できなかった現象を見える化し情報化することができつつあります。中でも、「音」は私たちの日々の生活において非常に身近な存在ですが、通常はマイクロフォンを用いて計測することが一般的です。音は空気中を波として伝わりますが、マイクロフォンはそれが置かれた場所での音を計測することはできるものの、音がどのように発生しどのように空間を伝搬するかを詳しく知ることは困難です。CS研の最近の研究では、レーザー光を用いた光学技術と高速カメラを用い、音の波を動画像としてとらえ、「音を可視化」する光学的音響計測という技術を実現しました⁽⁴⁾。この技術では、レーザー光が音場を通過する際、音の粗密によって光の位相が変調される様子を、元の音による変調のないレーザー光と干渉させ、この干渉光を高速カメラで撮影することで音場をイメージングします。ただし、計測する際のノイズが非常に大きいいため、さまざまな音源数やノイズの条件を変化させシミュレーションで生成した音場データセットと深層学習技術を組み合わせることにより、雑音が多い状況下でもこれを除去し、クリアな音場の可視化を可能にしました。さまざまな音の可視化にとどまらず、心地良い音を再現する音響デバイスの設計や、騒音源の分析など、幅広い応用が期待できる技術です。これまで個体差が大きかったマイクロフォンで音の振動を

計測するのではなく、光周波数といった物理量を基準とした次世代標準をめざした超精密音圧計測技術への発展を見込んでいます。

上述の音や光に加えて、最近では生体信号の1つである心電図から、その元になっている心筋細胞の挙動に関する情報をAIで推定する技術についても研究を進めています⁽⁵⁾。医学的には心電図波形と病気との大まかな対応は解明されているものの、その根本となる心筋細胞レベルで何が起きているかを推定することは困難でした。この研究では、スーパーコンピュータ富岳を用いた心臓物理モデルによるシミュレーションにより、心筋細胞内におけるNa（ナトリウム）、Ca（カルシウム）イオンや伝導率、心臓形状などのパラメータを入力情報として、人工的に生成した心電図波形から、これを生成したパラメータを高精度に推定する逆問題を解く機械学習技術を考案しています。心電図を含む多様な生体データの計測とともに、その要因や関係性を解析する技術を構築することにより、個々人の遺伝的特性や生活習慣を反映させた健康状態の予測や、どのような薬や治療法が有効かを検証するテーラーメイド医療のシミュレーションを可能にするバイオデジタルツインの実現をめざした研究です。

このような生体内の心筋細胞や生化学反応などのミクロな挙動から、臓器としての心臓および、血液や他の臓器間との関係、さらには個としての人体全身におけるマクロな振る舞いまでをトータルで扱いモデル化することは極めて困難な課題です。これを解決するためには、体内で起きているさまざまな事象をとらえることに加え、どのような事象と事象とが相互に依存し、因果関係を有しているのかについて、膨大な組合せの中から正確な情報を高速に見出す技術が必要です。本特集記事『たくさん

タの中から素早く知識を発見——計算の枝刈りによる高速化手法を活用した厳密性を担保した大規模データ解析』⁽⁶⁾では、このような問題を解く足掛かりになる技術として、高速性と厳密性を備えた大規模データ解析について紹介しています。

人間の本質を極める

CS研は、人の情報処理メカニズムを科学的に解明することを目的として、視覚、聴覚、触覚などの感覚や、運動機能、情動に関する研究を推進しています。人間がなぜ今のような感覚や運動、情動のような機能を持つに至ったのかという普遍性を調べる研究や、個々人が持つ先天的な特性や、後天的に得た経験や学習により多様性が生まれる本質的な問いへの答えを追究する研究を含めて幅広く進めています。

例えば、私たちは歩く際に眼から入ってくる情報に基づき、無意識のうちに自分の歩行速度を推定し、最適な速度で歩くよう運動を調節していることが知られています。一方で、自分が動いておらず、TVなどで自転車に乗っている他者の一人称視点のカメラ映像を見るとき、その際に感じる速度感、自身が実際に自転車に乗っているときに感じる速度感と同じなのかを調べる研究を行いました。実験参加者がヘッドマウントディスプレイを装着して仮想的な廊下を歩く際に、縞模様のある左右の壁を前後に動かし、その際の歩行速度の変化を調べた結果、縞模様が粗いほど自身は早く歩いていると感じ、細かいほどゆっくり歩いていると感じます。しかし、歩行せずに単に縞模様が流れるさまを見る状況では、逆に縞模様が細かいほど早く動いていると感じ、粗いほど遅く動いていると感じる結果が得られました⁽⁷⁾。このことは、人間の脳内で運動と知覚における速度推定の過程が異なる

る（脳内に複数の速度計が存在する）という可能性を示唆しています。今後、メタバースなどのバーチャル空間において、高い臨場感を与えることや、VR酔いが生じにくい視覚映像を提示するインターフェースのデザインに貢献し得る成果です。

上記は、人の感覚や運動の普遍的能力に関する研究の例ですが、人の能力の多様性を表す身近な例として、利き手や利き足が挙げられます。多くの人は、成長するにつれて手や足の器用さに左右差が生じ、右利きの人は左手で文字を書くことは非常に困難ですし、逆に左利きを右利きに矯正した人は、運動の種類にもよりますがどちらの手もある程度器用に動かすことができます。CS研の最近の研究では、スマートフォンをぐるぐる回すだけで手足の器用さを簡便に計測し定量的に評価する新たな手法を考案し、利き手は非利き手に比べて繰り返し運動のばらつきが少ないことや、年齢によってそのばらつきがどのように変化するのか、さらには、このばらつきが生じる本質的なメカニズムを解明しました。本特集記事『ヒトの動きが“ばらつく”ことの本質』⁽⁸⁾で詳しく解説しています。

人間は感情的な生き物であり、そのときの自身の体調や心理状態によって、物事や他者に対する印象についての主観的な評価は曖昧性を伴います。主観的印象を問うアンケート調査などでは、その人個人の感情表現や感情認識に対する癖や、同じ問いに対する回答の揺らぎなどの曖昧性を伴います。このような不確実性は人間ならではの性質ですが、回答のパターンから本心を知ることが可能でしょうか。最近の研究⁽⁹⁾では、回答の癖や曖昧さを統計的に抽出・除去することにより、回答の信頼度を推定する手法について提案しています。

人と社会に寄り添う

これまで、情報および人間の本質を極める研究について述べてきましたが、ここではコミュニケーションの本質である情報と人をつなぐ、あるいは情報を介して人どうしや人と社会をつなぎ寄り添う研究について紹介します。

今や、情報通信ネットワークは日々の生活に深く浸透し、あらゆる社会活動を支えています。自然災害のみならず、人為的なミス等によるネットワークインフラの故障は甚大な影響を及ぼします。より堅牢で高信頼なネットワークを設計するには、構成する部品の故障や災害に対する耐久性を解析する信頼性解析および、どの部品を補強すべきかを発見する脆弱性解析などの課題があります。しかし、ネットワークを構成する部品がたった50個だけでもその組合せは1000兆パターンにもおぼり、従来技術では近似的な解析手法しか適用できませんでした。現実的な規模のネットワーク設計において非常に高い信頼性を評価するためには、近似ではなく厳密な解法が必要です。本特集記事『圧縮計算でめざす高信頼インフラ決定グラフを用いたネットワーク解析問題の高速解法』⁽¹⁰⁾では決定グラフというデータ構造を用いたネットワーク解析の厳密解法について詳しく紹介しています。

一方、人間科学の分野では、深層学習の技術を援用し、人の視覚情報処理メカニズムを数理的にモデル化しシミュレーションすることにより、人が映像に対して感じる不自然さや快適さなどの指標を定量的に評価できるようになってきました。本特集記事『人の知覚に寄り添った自然で快適な映像表示——人間の視覚情報処理モデルに基づく表示映像の最適化』⁽¹¹⁾では、人の視覚情報処理モデルに基づき、人にとって自然で快適と感じる映像を工学的に自動生成す

る技術について紹介しています。また、最近報道発表した記事⁽¹²⁾では、eスポーツ選手の格闘ゲーム対戦直前の脳波から、その後の勝敗に強くかかわるパターンが現れることを世界で初めて発見しました。人は機械とは異なり、身体的なスキルだけでなく、極度なプレッシャーや緊張などの「メンタル」的な要素が試合におけるパフォーマンスを左右します。この研究では、相手の出方に対してどのように試合運びをするかの戦略判断にかかわる脳波パターンと、逆境においても動じないよう感情制御することにかかわる脳波パターンが明らかになり、試合直前の脳波状態からその後の勝敗を機械学習モデルにより約80%の確率で予測することができることを示しました。これは、勝負事に臨む際の理想的な脳状態が存在することを示唆し、スポーツにとどまらず、手術に臨む医師や、的確な判断と操縦を要求されるパイロットなど、高度なスキルと熟練を要し、プレッシャーに対処する必要がある人々に対して、理想的な脳状態に近づけるような新たなメンタルトレーニングが可能になると考えられます。NTTが推進するIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想では、人のデジタルツインコンピューティングの実現を目標としていますが、熟練者の脳状態をデジタル化し、訓練者の脳状態から熟練者のそれに近づくプロセスをシミュレーションすることで能力拡張を実現することにつながります。

一方、育児・教育の場においては、幼児のことばの発達に加え、他者との社会性の発達を調べるのが大きな課題です。幼児が他者に抱く親密さは友人関係の基盤であり、発達心理学分野での重要テーマですが、従来の大人による行動観察による手法では、非常に手間がかかるうえに、幼児に目的を悟られやすいという課題がありました。最

近のCS研での研究では、3～6歳の幼児に自分と他者の絵を描いてもらい、描かれた人物間の一番近い点どうしの水平距離が近いほど、その幼児が他者に抱く親密さが高く、それらが有意に相関することを明らかにしました⁽¹³⁾。大人の目が行き届かない場面も多い現代社会において、孤立やいじめなどの対人関係の問題をいち早く検知し、これを防ぐように気付きを与える支援技術へと発展させていく予定です。

基礎理論の追究

CS研では、長期的視野に立った研究開発を加速し、「知の泉」の源を一層強化するため、現代数学の基礎理論を研究する組織「基礎数学研究センタ」を2021年10月に設立しました⁽¹⁴⁾。2024年7月現在、8名の数学者が在籍し、数論、代数、幾何、表現論、解析、力学系などそれぞれ異なる専門領域を研究する研究者がそれらを横断・接続し、未知の数学的真理を探究と重要な未解決問題の解決や、物理学、生物学、医学など、他の学際分野での重要課題に対する現代数学によるアプローチの提案と新たな数学的対象の発見をミッションとして日々研究に勤しんでいます。NTT技術ジャーナル2024年7月号特集『未知に挑む数学研究と夢』⁽¹⁵⁾では、NTT基礎数学研究センタの所属メンバによる最近の主要な研究成果および展望について紹介されていますので、ご興味ある方は是非ご一読ください。

おわりに

CS研における最新の研究成果の代表例を紹介しました。生成AIをはじめとする技術が高度化するにつれ、私たち人間1人ひとりの多様性の本質の理解と、個々人の特性に応じて有益な情報をどのように処理

し伝えるのかといった、人に寄り添う技術の重要性はますます高まっていくと考えます。今後、人と人および、人とコンピュータが真に理解し合い、人とAIが協力してよりよい社会を創造できる未来に向けて、さらなる研究分野を切り拓いていきます。

参考文献

- (1) 土屋・中島・中川・橋田・松原・大澤・高間：“AI辞典 第2版,” 共立出版, 2003.
- (2) 子安：“心の理論：心を読む心の科学,” 岩波書店, 2000.
- (3) 研究所探訪：“情報通信を人間の思考の段階まで高めるコミュニケーション科学研究所,” NTT技術ジャーナル, Vol.4, No.9, pp.58-59, 1992.
- (4) 石川：“光を用いた音の可視化と精密計測,” 電信情報通信学会誌, Vol. 106, No. 9, pp. 849-854, 2023.
- (5) R. Nishikimi, M. Nakano, K. Kashino, and S. Tsukada: “Variational autoencoder-based neural electrocardiogram synthesis trained by FEM-based heart simulator,” Cardiovascular Digital Health Journal, Vol. 5, No. 1, pp. 19-28, 2024.
- (6) 藤原：“たくさんのデータの中から素早く知識を発見——計算の枝刈りによる高速化手法を活用した厳密性を担保した大規模データ解析,” NTT技術ジャーナル, Vol.36, No.9, pp.23-26, 2024.
- (7) S. Takamuku and H. Gomi: “Vision-based speedometer regulates human walking,” iScience, Vol. 24, No. 12, 2021.
- (8) 高木：“ヒトの動きが“ばらつく”ことの本質,” NTT技術ジャーナル, Vol.36, No.9, pp.27-30, 2024.
- (9) S. Kumano and K. Nomura: “Multitask item response models for responses bias removal from affective ratings,” Proc. of ACII 2019, Sept. 2019.
- (10) 中村：“圧縮計算でめざす高信頼インフラ——決定グラフを用いたネットワーク解析問題の高速解法,” NTT技術ジャーナル, Vol.36, No.9, pp.14-17, 2024.
- (11) 吹上：“人の知覚に寄り添った自然で快適な映像表示——人間の視覚情報処理モデルに基づく表示映像の最適化,” NTT技術ジャーナル, Vol.36, No.9, pp.18-22, 2024.
- (12) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2024/07/18/240718a.html>
- (13) A. Shinohara, M. Narazaki, and T. Kobayashi: “Children’s affiliation

toward peers reflected in their picture drawings,” Behavior Research Methods, Vol. 55, pp. 2733-2742, 2023.

(14) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2021/10/01/211001a.html>

(15) <https://journal.ntt.co.jp/article/27040>



納谷 太

CS研は、人間とAIが共存し、「ここまで伝わる」コミュニケーションと豊かな社会の実現に向けて、広く学際的な基礎研究に取り組むとともに、パートナーの皆様とのコラボレーションにより新たな価値創造に貢献していきます。

◆問い合わせ先

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



圧縮計算でめざす高信頼インフラ——決定グラフを用いたネットワーク解析問題の高速な解法

現代社会は通信網や道路網などの多くのネットワークインフラによって支えられています。その性能解析は、高性能・高信頼なネットワークの設計などのために重要ですが、多くの場合ネットワークを構成する道路や光ファイバなどの「組合せ」を考える必要があります。すると、計算時間が膨大となり、現実的な時間内での精緻な解析が難しくなります。本稿では、膨大な数の組合せを圧縮して表現する決定グラフを用いたアルゴリズムによる、困難な解析問題の高速な解法について解説します。

キーワード：#ネットワークインフラ、#圧縮計算、#決定グラフ

なかむら けんご

中村 健吾

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

ネットワーク解析問題と組合せ

現代社会は道路、通信、電力などのインフラによって支えられています。このようなインフラはどのような構造になっているのでしょうか。例えば、高速道路は日本全国を網羅的にカバーしています。また、通信の基幹網でもケーブルを張り巡らせて全国をカバーしています。このように、現代のインフラは道路やケーブルなどの部品が集まってネットワーク構造をなしています。

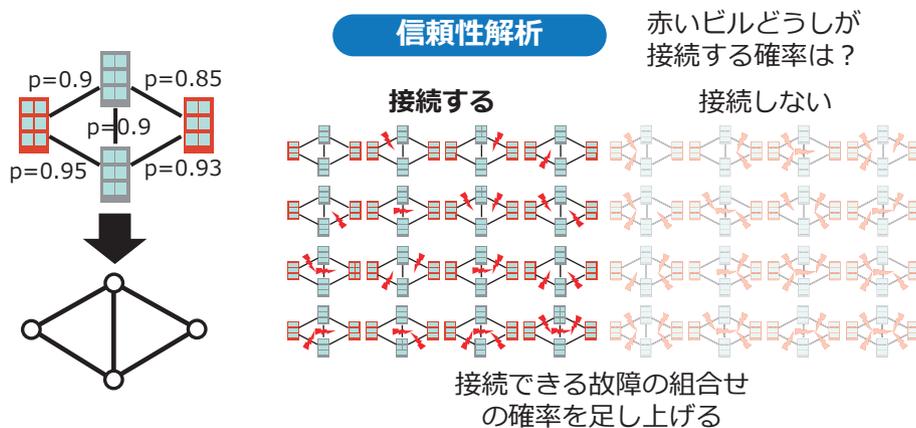
このようなインフラが現代社会の基盤となるためには、さまざまな要件があります。例えば道路網においてはなるべく渋滞しないこと、通信網においては通信がなるべく遅延しないことや、通信障害がなるべく起こらないことが求められます。それに対応して、インフラの良さに関する定量化・数

値化された指標が考えられます。例えば道路網や通信網では混雑、すなわち渋滞や遅延が少ないほど良いとか、通信網では部品故障に対する耐性が高いほど良いといった指標が考えられます。現代社会の基盤となる「良い」、すなわち高性能・高信頼なインフラを実現するためには、先に挙げたような指標の解析を行う手法を開発することが重要です。そのような解析として、例えばネットワークのどの部分が混雑するか解析する混雑解析、ネットワークがどのくらい故障や災害に強いかを解析する信頼性解析、またどの部品を補強すべきかを解析する脆弱性解析などが挙げられます。

では、ネットワークインフラの解析はどのように行えばよいのでしょうか。解析を行う際に、道路やケーブルなどの各部品を物理的な装置として扱うと計算機にとって扱

いづらいため、ネットワークのつながりに着目して抽象化することを考えます（図1左）。ここで各部品はノードどうしを結ぶ線（辺）に対応します。これは数学的にはグラフ理論におけるグラフを考えることにあたります。この抽象化したグラフを扱える解析法をつくることにより、ネットワークの本質的な構造に着目した解析を行います。

しかし、たとえ抽象化したとしても、ネットワーク解析は計算機で解くのが難しい問題になっています。それは、ネットワークインフラは複数の部品から構成されていて、その部品の組合せの数が部品の個数に対して指数的に多いためです。N個の部品があればそのネットワークの状態の組合せの数は2のN乗、すなわち2をN回かけた数になります。例えばたった50個の部品から構成されるネットワークでも部品の組合せは



ネットワークをつなぐに着目しグラフとして抽象化（左）。信頼性解析ではすべての故障の組合せを調べて、接続する組合せの確率を足す必要がある（右）。

図1 信頼性解析

2の50乗で約1000兆通りに及びます。

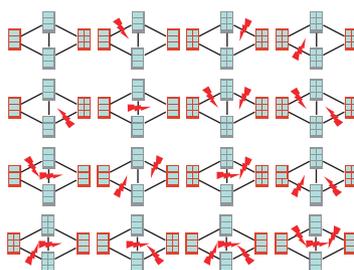
そして、実際にそのような膨大な数の組合せを調べたり数え上げたりしなければならぬネットワーク解析が数多くあります。例えば、信頼性解析では、特定のノード（図1においてはビル）どうしがケーブルを介して接続できる確率を解析することになります。このとき、一部の部品が故障していてもビルどうしは相変わらず接続できることもあります。したがって、各部品について故障している・していないの2通りの可能性を考え、それらの組合せをすべて調べて、接続できる故障の組合せの確率を足し上げる必要があります（図1右）。同様に、混雑解析ではどの道路やケーブルなどが混雑するかを解析しますが、この際あり得る経路をすべて調べ上げる必要があります。1つひとつの経路も部品の組合せであり、やはり膨大な数存在するため、計算機でも計算が困難な問題になります。

決定グラフと圧縮計算

では、膨大な数の組合せに対処するにはどうすればよいのでしょうか？ 従来は、膨大な数の組合せのうち一部のみを調べたり数えたりすることでこの問題に対処してきました。これにより、調べたり数えたりする組合せを大幅に削減し、計算時間が増大してしまう問題を解決しています。しかし、このアプローチでは一部の組合せしか調べていないため、解析が不正確になってしまうという欠点がありました。インフラは多くの人が用いるものであり、社会的に大事なので、多少時間がかかっても精緻な解析が要求される場面があります。

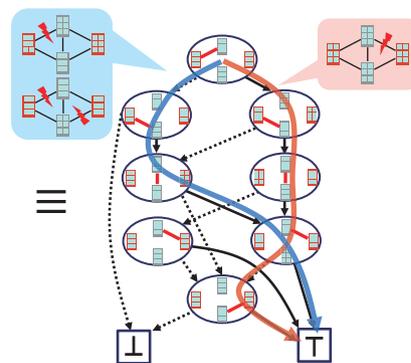
そこで、本稿では圧縮計算というコンセプトを考えます。これは、調べたい組合せを圧縮して保持し、圧縮したまま解析、すなわち計算に用いるという考え方です。もしこれが実現できれば、すべての組合せを調べられるので精緻な解析ができ、また計算時間が圧縮後の大きさに比例するため計算の高速化を望めます。

これを実現する手法の1つが、決定グラフ*と呼ばれる表現方法です。決定グラフは図2右のように節点を矢印で結んだ図で組合せを表現し、上から下までたどるとすべての組合せが得られます。このとき、実



決定グラフの赤・青の経路がそれぞれ赤・青の吹き出しの中のもの組合せを表現している。

図2 赤いビルどうしが接続する故障の組合せ（左）を表現する決定グラフ（右）



線矢印をたどると部品が動作していること、点線矢印をたどると部品が故障していることを表します（図2）。より一般には表現する組合せについてのその部品の有無を表します。決定グラフでは、組合せのうち共通部分をもとめることで小さな表現を達成しています。例えば、信頼性解析において100ノード規模のネットワークになると、ビルどうしが接続する故障の組合せが10の41乗個に及びこともありますが、決定グラフではわずか3000節点程度で表現できます。この計算は圧縮後の節点数に比例する時間でいきます。つまり、決定グラフは圧縮計算を実現する道具として使えます。これらの性質から、決定グラフはこれまで信頼性解析などのさまざまなネットワーク解析問題を解くために用いられてきました。

さらに、決定グラフでは圧縮したままで組合せに関する最適化や数え上げなどの計算ができます。例えば、特定の条件（ある部品が故障しているなど）を満たす、赤いビルどうしが通信できる故障の組合せの個数は、図2の決定グラフがあれば組合せをすべて調べることなく計算できます。この計算は圧縮後の節点数に比例する時間でいきます。つまり、決定グラフは圧縮計算を実現する道具として使えます。これらの性質から、決定グラフはこれまで信頼性解析などのさまざまなネットワーク解析問題を解くために用いられてきました。

NTTコミュニケーション科学基礎研究所では、決定グラフを用いた圧縮計算における圧縮計算できる計算の種類や、圧縮の方法を拡張することによって、より高度な解析を精緻に行えるアルゴリズムを開発してきました。以後、本稿では計算の拡張および圧縮の拡張によってそれぞれできるようになったネットワークインフラ解析アルゴリズムについて紹介します。

圧縮計算によるインフラ解析

混雑を抑えるインフラ設計技術

道路インフラや通信インフラにおいて、その多くの利用者の経路（道路においては道順、通信においてはデータが伝送される経路）が重なってしまうと、その部分で混雑が発生して移動時間が長くなってしまいます。そこで、インフラの運営者は道路の道幅や通信ケーブルの帯域などを補強することで混雑を解消し、全利用者の平均移動時間を短くしたいと考えます。しかし、インフラのユーザは一般には利己的に振る舞うことを仮定して補強を考えなければなりません。例えば、すべての車が幹線道路に集中すると渋滞が起きてしまいますが、それでも迂回路よりも早く移動できるならばそれぞれの車は迂回路ではなく幹線道路を利用すると考えられます。

このような状況でどのようにインフラを補強すればよいのでしょうか？ 実は、むやみに道幅を増やすなどの補強を行うと、そこにさらに多くの交通が集中し、かえって平均移動時間が長くなってしまいます。これを交通工学の分野でブライスのパラドックスと呼びます。これには均衡状態と呼ばれる状態が関係してきます。ユーザが利己的にインフラを利用していると、もし今通っている経路より移動時間が短い経路があればユーザはそちらに切り替

* 決定グラフ：二分決定グラフ（BDD: Binary Decision Diagram）や、その亜種であるゼロサプレス型二分決定グラフ（ZDD: Zero-suppressed BDD）などを指します。いずれも組合せをグラフ理論的なグラフとして表現するデータ構造。

えることとなります。各ユーザがそのような動きを繰り返すと、最終的に全ユーザが同じ移動時間で、かつその時点で移動時間がもっとも短い経路を各々選ぶ状態になります。これを均衡状態と呼びます。平均移動時間を短くするためには均衡状態における混雑を緩和することが重要ですが、安易にインフラの補強を行うと均衡状態が変化してしまうのがブライスのパラドックスの原因です。

したがって、ユーザの移動時間を短くする補強の方法を求めするためにはまず均衡状態を求められなければなりません。ここで、均衡状態では全ユーザが同じ移動時間となってはいますが、全ユーザが同じ経路を使っているとは限りません。このため、均衡状態は膨大な数の経路の組合せ、すなわち組合せの組合せとなります。したがって、たとえ圧縮を用いても均衡状態を求めること自体が困難な問題でした。また、そこから均衡状態の移動時間が短くなるインフラの補強の仕方を探すのもまた困難な問題でした。

そこで私たちは、ユーザが選べるすべての経路を決定グラフへと圧縮し、圧縮計算を用いることで、均衡状態の移動時間が短くなるような補強の仕方を発見するアルゴリズムを開発しました(図3)。

本稿では技術について簡単に紹介します。まず、均衡状態の計算は組合せの組合せを求める問題になるので困難な問題でしたが、私たちはこれが組合せ的な制約のもとでの非線形最適化問題を解くことで求められることに着目しました。この最適化問題を解

くためには従来選べる経路を1つひとつ調べる必要がありましたが、決定グラフを用いた圧縮計算により非線形最適化を解く方法を考案したことで、均衡状態を現実的な時間で求められるようになりました⁽¹⁾(図3左)。次に、道幅を少し変化させたときの微分、すなわち均衡状態やそのときの移動時間がどう変化するかも圧縮計算によって求められる方法を考案しました。これによって、インフラのどの部品を補強すれば平均移動時間が短くなるかが分かるようになりました⁽²⁾(図3右)。これらの圧縮計算により、現実的な時間内に計算できるアルゴリズムを開発できました。

提案手法により、経路の個数に比例していた計算時間が決定グラフの大きさに比例して終わるようになりました。例えば、多点間通信の設定では、10の28乗個の経路をわずか1万節点程度の決定グラフで表現することで、10の25乗倍という劇的な高速化を実現しています。この技術を用いたネットワークインフラ設計を通じて、道路における渋滞や通信における遅延などさまざまな混雑問題にアプローチできると考えています。

■障害規模別の障害発生率計算技術

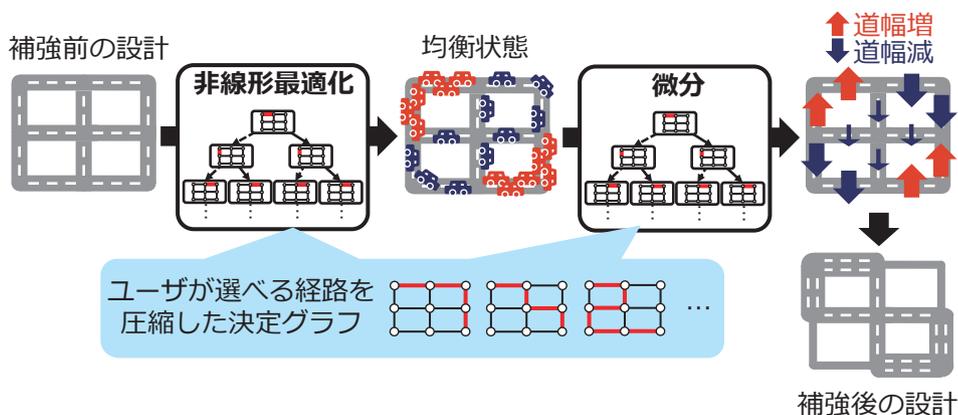
インフラは物理的な設備を使っている以上、どうしてもケーブルなどの各部品が故障してしまうことがあります。したがってインフラでは、平常時の性能が高いことに加えて、故障耐性も高いことが求められます。故障耐性を測るために、従来は図1にあるような信頼性解析、すなわちノードどうしが接続する確率の計算が行われており、

決定グラフを用いた圧縮計算により200ノード程度の現実的なネットワークで精緻な誤差なしの解析が行えました。

しかし、障害が起こった際にはその障害の規模も大切な指標となります。多数のユーザに影響が及ぶ大規模障害は、小規模障害と比べると特に起こってほしくないものですが、従来の信頼性解析では障害規模の考慮ができていませんでした。そこで、小規模障害と大規模障害で別々にその発生確率を解析する、すなわち、障害規模別にその発生確率を解析するのがここでやりたいことです。

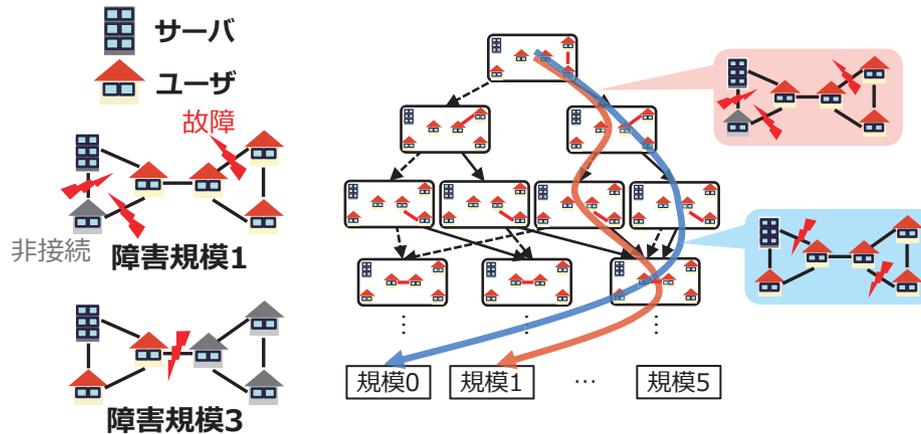
この問題においては、ネットワークのノードがサーバとユーザの2種類あり、サーバに接続できないユーザの数を故障規模とします(図4左)。このとき、起きた故障の数と障害規模は必ずしも連動していないことが特徴で、上の例では故障は3カ所で行っているのに対し非接続になったユーザは1軒だけですが、下の例では故障1カ所に対し3軒の非接続ユーザが発生しています。この状況下での障害規模別の障害発生率の誤差なしの計算を行うことを考えます。これにより、インフラ運用者は障害規模別に発生確率に関する設計基準を決めて、設計したネットワークが基準を満たすか確認することができるようになります。

しかし、規模別に障害発生率を計算することはとても困難な問題です。それは各製品の故障の組合せが膨大な数あることに加えて、どのユーザが障害を受けているかに関する組合せも考える必要があったためです。従来の信頼性の圧縮計算では、どの



決定グラフを用いた非線形最適化により均衡状態を求め、さらに決定グラフを用いた微分によりどうすれば均衡状態の移動時間が短くなるか計算し、設計に反映する。

図3 混雑を抑えるインフラ設計技術の概略



障害規模の説明（左）．部品故障の組合せを障害規模別に振り分ける新たな決定グラフ（右）．

図4 障害規模別の障害発生率計算技術の概略

ユーザが障害を受けているかを決め打ちすれば、そのような障害が起こる確率を計算することができました。この計算を障害を受けるユーザに関するすべての組合せで行えば規模別の発生率が計算できますが、たった50ユーザでも1000兆回の圧縮計算を繰り返すことになり現実的な方法ではありませんでした。

そこで私たちは、従来の障害が起こっているか起こっていないか振り分ける決定グラフに代わって、部品の故障の組合せを障害規模別に振り分ける新しい決定グラフを開発しました⁽³⁾ (図4右)。これにより、一度の圧縮計算によってすべての障害規模の確率を計算できるようになり、従来の圧縮計算を用いた方法と比べても大幅な高速化を実現しました。例えば、各都道府県に1つずつノードがあるような50ノード程度のネットワークでは、1秒以内に規模別の障害発生率を計算できるようになり、従来と比べて10万倍以上高速になりました。さらに、この2倍の100ノード規模では、問題としては2の50乗で1000兆倍問題が難しくなりますが、それでも数10分から1時間強という現実的な時間で計算を可能にしています。

提案手法によって、現実的な規模のネットワークでも障害規模別の設計基準を満たしているかを厳密に確認できるようになったため、現代や将来のネットワークの高信頼設計に貢献したいと考えています。今後は本技術をさらに発展させて、大規模障害が起こりづらいネットワークを自動的に設計できる技術を開発したいと考えています。

まとめと今後の展望

ここまで、決定グラフを用いた圧縮計算を用いたネットワーク解析アルゴリズムの実例について述べてきました。決定グラフでできる圧縮計算の種類を増やすことにより混雑を抑えるインフラ設計技術ができ、また新たな圧縮の方法、すなわち新たな決定グラフの考案によって障害規模別の障害発生率計算技術ができました。私たちはこれ以外にも、ネットワーク信頼性の分散値の計算⁽⁴⁾や、部品に故障が起こる状況下でサーバに接続できるユーザの数の期待値の計算⁽⁵⁾などを高速に行うアルゴリズムを、決定グラフを用いた圧縮計算を拡張することにより提案しています。今後も、決定グラフを用いた圧縮計算によって、ネットワーク解析に限らず組合せを扱う必要がある問題の高速なアルゴリズムを開発します。

私たちの技術は基礎研究の段階であり、インターネット上で公開されている現実的なネットワーク形状を用いた実験はできているものの、実際に現在運用・設計されているネットワークの解析は未着手です。そこで、運用・設計されているネットワークのリアルなデータを用いて提案したアルゴリズムによる解析を行い、知見を得ることが次の段階と考えています。

参考文献

- (1) K. Nakamura, S. Sakaue, and N. Yasuda: "Practical Frank-Wolfe method with decision diagrams for computing Wardrop equilibrium of combinatorial congestion games," Proc. of AAAI 2020, pp. 2200-2209, 2020.

- (2) S. Sakaue and K. Nakamura: "Differentiable equilibrium computation with decision diagrams for Stackelberg models of combinatorial congestion games," Proc. of NeurIPS 2021, pp. 9416-9428, 2021.
- (3) K. Nakamura, T. Inoue, M. Nishino, N. Yasuda, and S. Minato: "Exact and efficient network reliability evaluation per outage scale," Proc. of ICC 2023, pp. 4564-4570, 2023.
- (4) K. Nakamura, T. Inoue, M. Nishino, and N. Yasuda: "Impact of link availability uncertainty on network reliability: analyses with variances," Proc. of ICC 2022, pp. 2713-2719, 2022.
- (5) K. Nakamura, T. Inoue, M. Nishino, N. Yasuda, and S. Minato: "A fast and exact evaluation algorithm for the expected number of connected nodes: an enhanced network reliability measure," Proc. of INFOCOM 2023, pp. 1-10, 2023.



中村 健吾

アルゴリズムの改善はときに計算資源の進化の速度をはるかに上回る、数億倍・数兆倍の高速化をもたらします。今後もアルゴリズムの力でネットワーク解析に限らない問題の計算時間の改善に貢献できればと考えています。

問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
協創情報研究部 言語知能研究グループ
TEL 0774-93-5020
FAX 0774-93-5026
E-mail cs-jousen-ml@ntt.com



人の知覚に寄り添った自然で快適な映像表示 ——人間の視覚情報処理モデルに基づく表示映像の最適化

情報表示技術や表示デバイスの発展に伴い、近い将来、現実空間のあらゆる場所が情報表示に使われるようになるかもしれません。しかし、プロジェクタや透過型ディスプレイを用いた新しい表示技術では、周囲の明るさや背景の模様によって表示画像の見え方が大きく変化するため、映画館のように常に理想的な表示はできません。本稿では、人間の視覚情報処理をモデル化することで、こうした将来の情報表示において、使用場面によらず自然で快適な映像表示を実現するアプローチを紹介します。

キーワード：#メディア表示技術、#人間情報科学、#視覚情報処理モデル

ふきあげ たいき

川上 大樹

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

視覚の理解に基づくメディア技術

視覚情報を伝達・共有するための媒体である視覚メディアは、絵画や写真からテレビ、プロジェクタ、スマートフォン、ヘッドマウント型ディスプレイ (HMD) *1 など、多様な形態に発展してきました。現在では、これらのメディアは私たちの生活に欠かせないものとなっています。メディア技術がさらに発展することで、近い将来、あらゆる場所 (空間) に情報提示が行われ、ディスプレイとして利用されると期待されています。では、これらのメディアの上で伝えたい視覚情報を意図どおり伝えるにはどうすればよいでしょうか。現実のシーンをメディア上で再現するには、理想的には再現したい物理空間内の情報をすべて写し取り、それをメディア機器上で再生できることが望めます。しかし、そうした究極のメディア機器はいまだ存在せず、再現の程度はそれぞれの機器が表示できる光の強さや波長、解像度などの物理的な制約に縛られます。こうした物理的制約の中で情報を意図どおり伝えるには、人間が視覚情報をどのように処理し、知覚・認識しているのかを理解することが鍵となります。具体的な例としては、カラーモニタの表示方式が挙げられます。人間の網膜には異なる波長領域の光

(赤・緑・青に対応) に応答する細胞があり、これらの応答の組み合わせで色を知覚する「三色色覚」の仕組みがあります。この知覚を応用し、ディスプレイでは赤・緑・青の3色の光の組み合わせで幅広い色彩を再現しています。また、3DテレビやHMDでは、人間の立体視メカニズムの理解に基づいて3次元の奥行き情報を伝えます。両眼には視点の違いによるわずかな像の差 (両眼視差) が生じ、脳がこの差を処理して奥行きを知覚します。この原理を利用し、左右の目に異なる映像を提示することで、物理的な3D空間を用意することなく、観察者に立体感を体験させることができます。このように、人間の視覚特性を理解し、それを巧みに利用することで、物理世界を完全に再現することなく、効率的に知覚世界を再現することが可能になります。

これまでに挙げた例は、視覚特性に合わせて提示デバイスを設計するというアプローチでした。しかし、現実と仮想の情報が混在する将来の情報提示技術では、表示環境ごとに見え方が常に変化することが想定されます。こうした状況下では、事前のデバイスの設計だけでなく、提示するコンテンツ自体をその場で最適化することが求められます。これを実現するためには、任意の画像に対する知覚を定量的に予測できる「視覚情報処理モデル」を使い、その予測に基づいて提示映像を最適化するアプローチが有効です。

視覚の情報処理モデル

視覚情報処理モデルとは、脳内の視覚情報処理を数理的にモデル化したものです。本稿で扱うモデルの処理の流れを図1に示します。このモデルでは、任意の画像を入力とし、そこから私たちがものを認識する際に用いる特徴を抽出し、その特徴に対する感覚の強さ (知覚量) を予測します。最後に、これらの特徴から、見た目の自然さや見やすさといった映像提示にとって重要な指標を推定します。

では、この「特徴」とは具体的にどのようなものでしょうか。人間は世界の認識や自身の行動のために、網膜に入った情報からさまざまな特徴を抽出して利用しています。特徴抽出の処理は階層的になっており、最初は局所的な領域の色やコントラスト (明暗の差) といった単純な特徴を抽出し、その後はこれらの特徴を統合しながら、方位や形状、テクスチャ、さらには顔や物体、風景など、複雑で大域的な特徴の検出へと進んでいきます。しかし、こうした特徴抽出処理のうち、具体的に実用可能な計算モデルとして確立されている部分は限られています。以下では、今回取り上げる研究例での使用実績のある低次の視覚情報処理に焦点を当てて解説します。

低次の視覚情報処理モデルによる特徴抽出の具体的な処理を図1の破線の枠内に示しました。まず、「色・輝度分解」について説明します。私たちの網膜には赤・緑・青の3つの波長帯に対応した錐体というセ

*1 ヘッドマウント型ディスプレイ：頭部に装着して使用するディスプレイ装置。映像を直接目の前に映し出すことで、没入感の高い視覚体験が得られます。

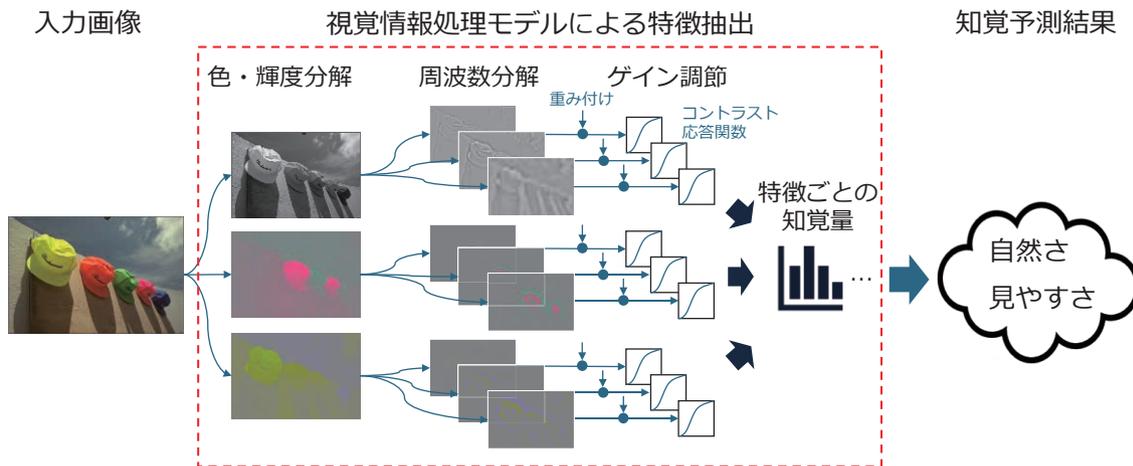


図1 視覚情報処理モデルの処理の流れ

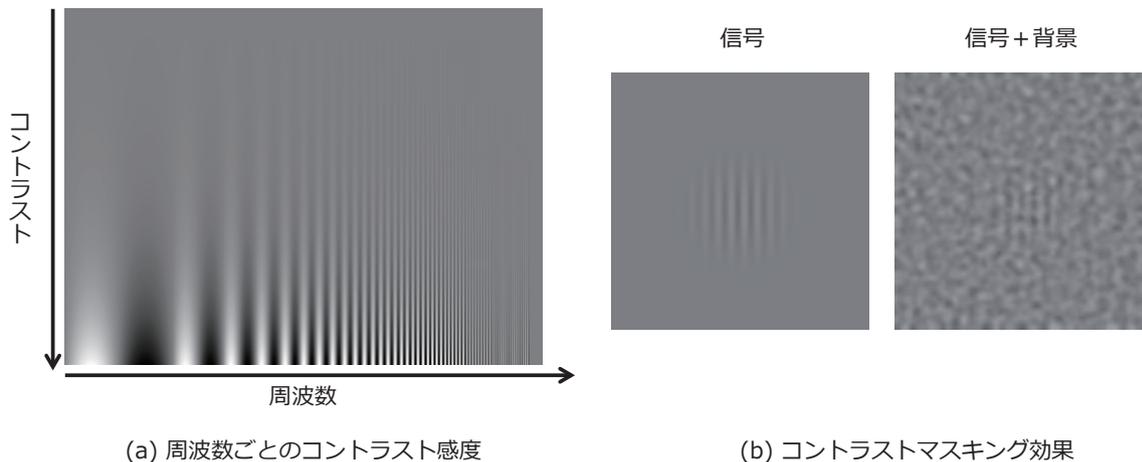


図2 コントラスト知覚のデモ

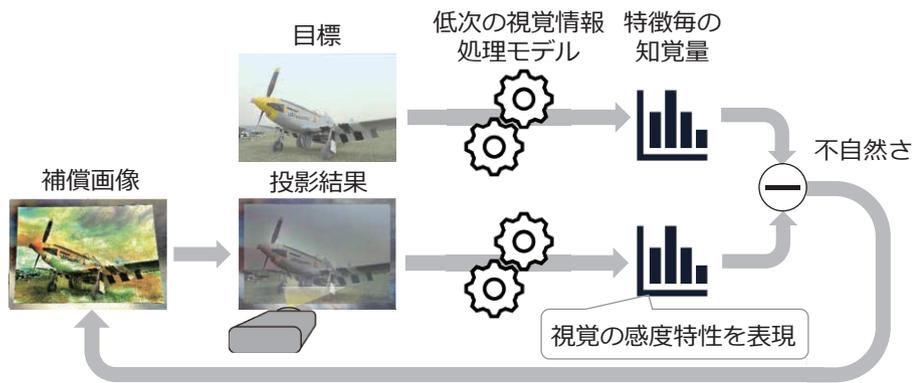
ンサがあります。これらのセンサに入力された光の情報は、色の違いを際立たせつつ、効率的に色情報を伝達するため、反対色と呼ばれる色の差分という形式に変換されて、後の処理に進みます。「色・輝度分解」処理はこの色の処理メカニズムを模倣しており、入力画像の赤・緑・青の各色チャンネルを足し引きすることで、明るさを表現する輝度の成分と、赤と緑、青と黄の色の差をそれぞれ表現する2つの反対色成分とに画像を分解します。

次に、各色成分に対応する画像はそれぞれ周波数分解処理を受けます。ここでの周波数は、パターンの空間的な細かさを表す値です。人間の視覚系には、さまざまな細かさを選択的に応答する神経細胞があり、これらの応答が網膜像の中の周波数特徴を表現しています。視覚情報処理モデルでは、

この周波数についての情報表現を再現するために「畳み込み」という画像処理が用いられます。畳み込みによって、さまざまな大きさの周波数ごとのコントラストを表す画像が得られます。さらに、最後に各周波数成分に重みをかけることで、人間の視覚系が異なる周波数に対して持つ感度の違い⁽¹⁾を反映します。図2(a)に、こうした周波数ごとの感度の違いを体感できるデモを示しました。この画像では、右側に行くほど周波数が大きく（パターンが細かく）なり、上側に行くほど物理的なコントラストが低くなっています。ここで、物理的なコントラストは周波数間で一定であるにもかかわらず、縞模様が見える部分と見えない部分の境界が上に凸のカーブを描いて見えます。このカーブは周波数ごとの視覚系の感度の違いを表しています。すなわち、視覚系は

中間の細かさに対してもっとも感度が高く、非常に粗いパターンや非常に細かいパターンには感度が低いという特性を持っているのです。

最後に、「ゲイン調節」について説明します。ゲイン調節はコントラストの知覚的な強さと密接にかかわっています。視覚系は広範囲のコントラストに対応できるように神経応答のゲインを調節しており、物理的なコントラストの増加に対して、はじめは急激に応答が増加しますが、高コントラスト域では次第に緩やかになります⁽²⁾。この様子を、横軸を物理コントラスト、縦軸を神経応答として表したのが、図1中に示したコントラスト応答関数です。コントラストマスキング効果は、このゲイン調節の分かりやすい例です。図2(b)の左右の画像には同じコントラストで縞模様が埋め込ま



(a) 視覚情報処理モデルに基づく補償画像の最適化



(b) 投影結果の比較

図3 実物体表面の自然な見た目操作

れていますが、右側の背景ノイズ上にある縞模様は視認性が大きく低下して見えます。これは、背景ノイズによってすでに神経細胞が強く応答しており、縞模様による追加の応答が相対的に小さくなることから説明できます。視覚情報処理モデルでは、こうしたゲイン調節メカニズムを数理的に表現することで、各特徴に対する視覚系の知覚量を定量的に予測します。

視覚情報処理モデルをつかった表示映像の最適化

以上のように、視覚情報処理モデルは、任意の画像を視覚系の感度特性を反映した特徴量に変換します。ここからは、この視覚情報処理モデルを使うことでどういったことが実現できるのかについて、私たちが行ってきた研究事例を基に説明します。

■実物体表面の自然な見た目操作

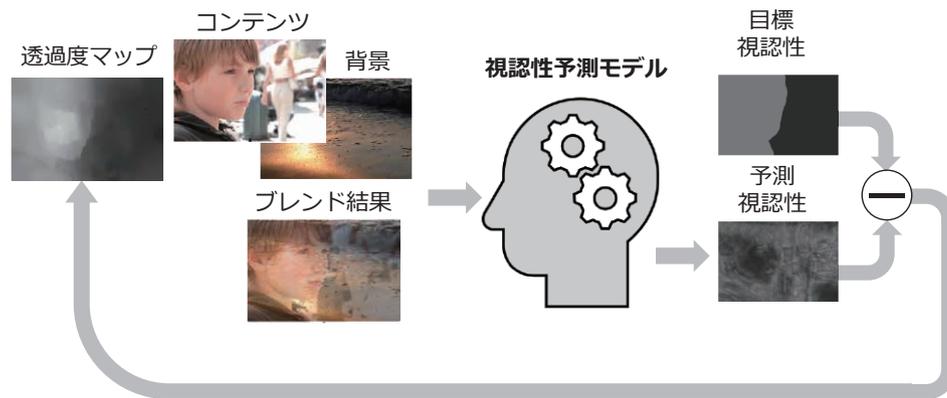
まず取り上げるのは、プロジェクタを使った空間拡張現実に関する研究です。この技術はプロジェクションマッピングとも呼ば

れ、投影対象の実物体表面の見た目を操作することができます。今はまだ大規模なショーやデモンストレーションで用いられることがほとんどですが、将来的にはより身近なところでさまざまな情報提示に用いられる可能性があります。そのような場面で特に解決が求められる技術的課題の1つが、投影対象自体が持つ模様と、投影した画像とが混ざり合ってしまうという問題です。

この解決手段として、色補償と呼ばれる技術があります。この技術では、カメラで投影面を撮影し、その情報を基に投影面の模様を打ち消すように投影画像を修正します⁽³⁾。プロジェクタから光を消滅させるマイナスの光を出力することはできないため、例えば投影面が赤い模様を持つ場合、シアンの色を投射して色味を打ち消し、そこからさらに提示したい色を足すことで投影画像をつくります。しかし、明るい環境光の下では、投影面自体の模様が持つコントラストが大きくなるため、打ち消すのに必要な光の強さも非常に大きくなります。一般

的なプロジェクタではそこまで強い光を出力できず、模様を補償しきれない場合も出てきます。

こうした問題を解決するのに、視覚の感度特性をうまく利用することが非常に有効です。人間の感度が低い特徴を多少犠牲にしながら、感度が高い特徴を優先して再現することで、物理的には正しく補償できていなくても、知覚的には自然に見えるような結果を得ることができるためです。私たちの研究では、これを実現するために、低次の視覚情報処理モデルを用いました⁽⁴⁾。具体的な手順を図3(a)に示します。まず、目標とする画像と投影結果を撮影した画像とをモデルに入力して知覚の特徴表現に変換します。この特徴量には、視覚の感度特性が表現されているため、これらの特徴間の差の大きさを投影結果の知覚的な不自然さとして定義できます。そして、この不自然さができるだけ小さくなるように補償画像を最適化します。これにより、物理的には目標と一致しないものの、知覚的には自然な投影結果を自動的に得ることができま



(a) 視覚情報処理モデルを使った視認性予測による透過度の最適化



(b) ブレンド結果の比較

図4 視認性予測に基づく「見やすい」透過表示

す。実際の最適化結果の例を図3(b)に示します。物理ベースの手法では投影面の模様がほとんど補償しきれていないのに対し、視覚情報処理モデルを使った知覚ベースの補償結果は、見た目としては目標画像にかなり近い結果が得られています。

これと同様の方法は、私たちが以前に開発したプロジェクション技術である「変幻灯」の課題解決にも用いられました。変幻灯は、物体の動きを表現する白黒の動画パターンを投影することで、静止した実物体があたかも動いているかのような錯覚を生み出す技術です⁽⁵⁾。しかし、自然に見える動きの大きさには限界があり、従来は手動で細かな調整が必要でした。この課題を解決するため、視覚情報処理モデルを活用し、投影結果の自然さを予測して動き情報を自動的に最適化する手法を開発しました⁽⁶⁾。これにより、不自然さを感じない範囲で最

大の動きを得られるようになり、ユーザの表情に合わせて絵画の表情を動かすなど、インタラクティブなアプリケーションでも変幻灯を効果的に活用できるようになりました。

■現実シーンへの「見やすい」透過表示

VR (Virtual Reality)^{*2} や AR (Augmented Reality)^{*3} といった視野全体を覆うことが想定されるメディア技術では、表示する情報が視界を遮らないように半透明で表示することがよくあります。しかし、背景となる現実シーンが常に変化する状況下では、その上に重畳したコンテンツの視認性を一定に保つのは一般に困難です。これは、前述したコントラストマスキング効果の例から分かるように、視認性が背景のコントラストに大きく影響を受けるためです。しかし、視覚情報処理モデルを使えば、こうした半透明画像の視認性の変化も定量

的に予測することが可能になります。私たちの研究では、この視覚情報処理モデルに基づく視認性予測モデルを用いることで、透過度を自動で調節する技術を提案しました⁽⁷⁾。図4(a)に示したとおり、この手法では、ユーザが物理的な透過度ではなく、目標とする視認性を指定します。そして、コンテンツと背景が与えられたときに、最適化したブレンド画像に対して視認性予測モデルが視認性を予測します。その後、目標視認性と予測視認性の差分をとって、この差分が小さくなるように透過度マップを最適化します。図4(b)に結果の例を示します。

*2 VR：仮想現実感とも呼ばれます。コンピュータを用いて作り出された仮想の映像世界にユーザを没入させる技術。

*3 AR：拡張現実感とも呼ばれます。現実の世界に仮想情報を重ね合わせて表示することで、直感的で便利な情報提供を可能にします。

ここでは、2つの背景に同じコンテンツを透過表示した結果を示しています。通常の透過ブレンドの結果では、同じ透過度を設定していても、コンテンツ画像の視認性が背景によって大きく異なることが分かります。一方、提案手法では、同じ視認性マップを目標として透過度を最適化してからブレンドします。その結果、異なる背景でも一貫した視認性でコンテンツを表示できます。このように、提案手法では、ユーザが知覚量である視認性を操作することで、より直感的に意図したような透過合成ができるようになります。こうした方法を用いることで、VRやARなどのインタラクティブメディア上で常に快適な視認性を保つ半透明表示などといった活用も期待できます。

今後の課題と展望

視覚情報処理モデルを用いたコンテンツの最適化は今後のメディア技術において、ますます重要性が増していくと考えられます。しかし、このアプローチにはまだ取り組むべき課題が多く残されています。まず、現在私たちが映像の最適化に活用できている視覚情報処理モデルは、人間の脳内で行われている複雑な視覚情報処理のうち、入口付近に相当するごく一部に過ぎません。今後の研究の発展のためには、中～高次の情報処理のモデル化を進めていく必要があります。具体的には、テクスチャ・奥行き・運動・質感などを予測できるようにすることで、これらの印象を変えずに提示映像をより柔軟に適応させることが可能になるでしょう。

ただし、高次なモデル構築には、低次の視覚モデル構築で用いられてきたような、視覚情報処理を小さなサブプロセスごとに理解して組み上げていく要素構成的なアプローチでは限界があります。そこで、今後は深層学習モデルの活用が鍵となります。深層学習モデルは、物体認識などのタスクを設定することで、入力画像からタスク回答までの複雑な情報処理を自動的に学習します。また、物体認識用に訓練して得られた深層学習モデルと人間の脳の情報処理の類似性もさまざまな観点から明らかになっている⁽⁸⁾という点も注目すべき知見です。

しかし、これらのモデルが人の知覚と定量的に一致するわけではなく、そのままでは映像最適化には使えないという課題があります。また、性能が向上するにつれて、人間の知覚との乖離が大きくなってきているという報告もあります⁽⁹⁾。今後は、人間の知覚との整合性を高めつつ、深層学習モデルを訓練する方法を解明する必要があります。

さらに、視覚情報処理のモデル化を進めるとともに、人間にとっての自然さや快適さの必要条件を明らかにしていくことも重要です。エッシャーの無限階段の例にみられるように、人間は物理的にはあり得ない状況でも、一見すると自然に感じてしまうことがあります。したがって、人間が自然に感じられる映像の分布は、物理に忠実に再現された映像分布よりも広大な裾野をもって広がっていると考えられます。こうした分布の広がりを正しく推定できるようにしていくことで、さまざまな環境・物理的制約の中で映像表現の幅をさらに拡張できると期待されます。

本稿で紹介した成果の一部は東京大学との共同研究によるものです。

参考文献

- (1) F. W. Campbell and J. G. Robson: "Application of Fourier Analysis to the Visibility of Gratings," *The Journal of Physiology*, Vol. 197, No. 3, pp. 1551-1566, 1968.
- (2) D. J. Heeger: "Normalization of Cell Responses in Cat Striate Cortex," *Visual Neuroscience*, Vol. 9, No. 2, pp. 181-197, 1992.
- (3) M. D. Grossberg, H. Peri, S. K. Nayar, and P. N. Belhumeur: "Making One Object Look like Another: Controlling Appearance Using a Projector-Camera System," *Proc. of CVPR 2004*, Jun 2004.
- (4) R. Akiyama, T. Fukiage, and S. Nishida: "Perceptually-based optimization for radiometric projector compensation," *Proc. of IEEE VR 2022*, March 2022.
- (5) T. Kawabe, T. Fukiage, M. Sawayama, and S. Nishida: "Deformation Lamps: A Projection Technique to Make Static Objects Perceptually Dynamic," *ACM Transactions on Applied Perception*, Vol. 13, No. 2, pp. 1-17, 2016.
- (6) T. Fukiage, T. Kawabe, and S. Nishida: "Perceptually based adaptive motion retargeting to animate real objects by light projection," *IEEE Transaction on*

Visualization and Computer Graphics, Vol. 25, No. 5, pp. 2061-2071, 2019.

- (7) T. Fukiage and T. Oishi: "A content-adaptive visibility predictor for perceptually optimized image blending," *ACM Transaction on Applied Perception*, Vol. 20, No. 3, pp. 1-29, 2023.
- (8) D. L. K. Yamins, H. Hong, C. F. Cadieu, E. A. Solomon, D. Seibert, and J. J. DiCarlo: "Performance-optimized hierarchical models predict neural responses in higher visual cortex," *PNAS*, Vol. 111, No. 23, pp. 8619-8624, 2014.
- (9) M. Kumar, N. Hounsby, N. Kalchbrenner, and E. D. Cubuk: "Do better ImageNet classifiers assess perceptual similarity better?," *TMLR*, Sept 2022.



吹上 大樹

NTT研究所では、今後も視覚情報処理の科学的理解に取り組みながら、人間の特性を活かした新しいメディア技術の実現に貢献していきます。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
企画部 情報戦略担当
TEL 0774-93-5020
FAX 0774-93-5026
E-mail cs-jousen-ml@ntt.com

たくさんのデータの中から素早く知識を発見——計算の枝刈りによる高速化手法を活用した厳密性を担保した大規模データ解析

現在、AI（人工知能）を活用した効果的なデータ解析に対する関心が高まっています。しかし膨大なデータの解析には多大な計算コストが必要です。一般的に計算コストを低減するために近似的な処理が行われますが、近似処理では正確な解析結果を得ることが難しいという問題があります。本稿では計算の枝刈りを行うことにより高速性と厳密性を両立させたデータ解析手法の代表的な例を紹介します。

キーワード：#大規模データ、#データ解析、#高速化

ふじわら やすひろ
 藤原 靖宏

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

集
 萃

大規模データに対するデータ解析

近年、データサイエンスに対する関心が高まっています。2012年にハーバード・ビジネス・レビューがデータサイエンティストを「21世紀でもっともセクシーな職業」として紹介したことがその1つの象徴ですが、現在では多くの企業がデータサイエンスを積極的に活用し、多くの大学がデータサイエンスを支える人材の育成に力を入れています。このトレンドは年々強まっており、データサイエンスの重要性はますます増大しています。データサイエンスへの関心が高まる理由の1つとして、企業がデータ解析を通じて効果的なマーケティング戦略を立てるなどにより、ビジネス価値を向上させることが挙げられます。エコノミスト誌が、データが持つ価値に注目し、「データは新しい石油である」という記事を発表したこともあり、データ解析の重要性が広く認識されています。

データ解析の対象であるデジタルデータの量は急激に増加しており、市場調査会社の報告によると、2014年の約12.5ゼタバイト（約125億テラバイト）であったデジタルデータの量は2024年には約147ゼタバイト（約1470億テラバイト）に達すると予測されています。このような膨大なデータの中からパターンやトレンドを発見し、人間の意思決定を支援するデータ解析は今後データという新しい資源を有効に活用していくために不可欠な技術です。しかし膨大なデータに対してデータ解析を行うには莫大な計算リソースが必要になり、その結果、

データ解析の計算コストの増大という大きな課題が生まれます。

計算コストを低減するために一般的には近似計算が行われます。しかし近似計算は高速性を得る代わりに精度を犠牲にするため、計算時間を短くすると解析結果の精度が低下し、一方で精度を向上させるためには計算時間が増加するというトレードオフが生じます。データ解析は人間の意思決定のサポートに用いられることが多いため、解析結果の厳密性を犠牲にするアプローチは好ましくありません。

そこで私たちは高速性と厳密性を両立させたデータ解析のための機械学習基盤の構築に向けて研究開発を進めています（図1）。この機械学習基盤において高速性と厳密性を確保する鍵となるのが計算の枝刈り手法です。計算の枝刈り手法は計算結果の厳密性を損なわない範囲で不要な計算を省くことで高速化を実現します。本稿ではその代表的なものとして①上限値・下限値による計算の省略、②解になり得ない計算の打ち切り、③楽観的処理による高速計算を紹介

します。

上限値・下限値による計算の省略

はじめに上限値・下限値を用いた計算省略による枝刈り手法を紹介します⁽¹⁾。この手法はスコアを厳密に計算した結果、行う必要がないことが分かる処理をスコアの上限值と下限値を用いて高速に特定することで不要な計算を省きます。この手法の例としてCUR分解の高速化の研究があります。

CUR分解は与えられた行列 X をその部分列と部分行を用いて分解する技術です（図2(a)）。例えば図2(a)の例では行列 X の大きさは 7×4 ですが、CUR分解ではこの行列 X を青色の2つの部分列とオレンジ色の3つの部分行を用いて表現します。CUR分解は与えられた行列をよく表現する特徴的な部分列と部分行を求めることで高次元データから重要な特徴量を抽出することができます。例えば工場における高機能のセンサから長期間発生する時系列データをセンサ数 \times 時間長の行列で表すと行と列の数



図1 大規模データに対するデータ解析

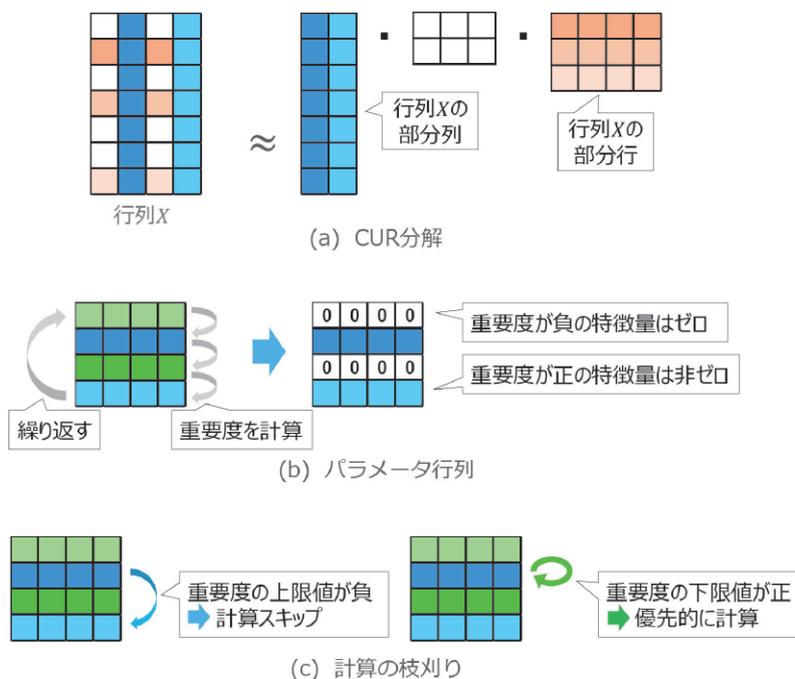


図2 上限値・下限値による計算の省略

は非常に大きくなりますが、CUR分解を適用することで行列をよく表現する部分行と部分列を取り出すことができ、非常に大きいデータの中から特徴的なセンサと時間帯を特定することができます。特徴的な箇所を特定することで工場の生産性に関する効果的な要因分析などが可能になります。

CUR分解では重要な特徴量を特定するために行列 X における各特徴量に対応するパラメータ行列を導入し特徴量ごとの重要度を計算します。そして重要度が負の特徴量を0とすることで重要な特徴量を抽出します。例えば図2(b)におけるパラメータ行列の行数は4ですが、このパラメータ行列の各行は図2(a)の行列 X の各列の特徴量に対応しています。図2(b)のパラメータ行列では1行目と3行目が0になっていますが、これは図2(a)の行列 X の1列目と3列目の特徴量が重要でない一方、2列目と4列目の特徴量が重要であることを表しています。このようにCUR分解ではパラメータ行列から重要な特徴量を抽出しますが、この抽出のために繰り返し計算を収束するまで行う必要があるため、計算コストも高くなり、大規模データに適用するのは難しいという

問題がありました。

そこで私たちは重要度の上限値と下限値を用いて重要度の繰り返し計算を軽量化することで高速にCUR分解を行う手法を提案しました⁽¹⁾。具体的には図2(c)のように重要度の上限値が負であれば厳密な重要度も負になるためその特徴量の計算をスキップします。また重要度の下限値が正であれば厳密な重要度も正になるため、その特徴量の計算を優先して行います。結果的に重要度の上限値と下限値を用いることで不要な計算を省略し、重要度が正となる特徴量を集中的に計算することが可能になり、CUR分解の高速化が実現しました。

解になり得ない計算の打ち切り

次に解になり得ない計算を打ち切ることによって高速化を行う手法について紹介します⁽²⁾。この手法は探索処理の過程で解になり得ないパターンを保持し、そのパターンが再び探索処理に現れたときに処理を打ち切ることによって高速化を実現します。部分グラフ検索の高速化技術がその一例です。

部分グラフ検索はノードにラベルの付い

た大規模なデータグラフの中から問合せグラフと同じ構造を持つ部分グラフを探索する処理です。例えば図3(a)の例における問合せグラフはラベルがA, B, Cからなる三角形とラベルがC, D, Aからなる三角形から構成されていますが、データグラフにおけるそのマッピング先の赤い部分グラフも同様にラベルがA, B, Cからなる三角形とラベルがC, D, Aからなる三角形から構成されています。部分グラフ検索のアプリケーションの一例として有機化合物の検索があります。有機化合物の分子間の結合関係はグラフで表現することができ、また共通の結合関係を持つ化合物は似た性質を持つことが知られています。そのため、部分グラフ検索を利用して同じ結合関係を持つ有機化合物を見つけることで、問合せと類似した性質を持つ有機化合物を発見することが可能となります。しかし部分グラフ検索は問合せグラフのノード1つひとつをデータグラフにマッピングする必要があるため、その最悪時間計算量はグラフのサイズに対して指数関数になります。そのため部分グラフ検索はデータグラフが大規模になると膨大な処理時間が必要になるという問題があります。

そこで私たちはノード1つひとつのマッピングが失敗したパターンを保持し、マッピングにおいて失敗したパターンが再度現れた場合に処理を早期に終了する手法を提案しました⁽²⁾。例えば図3(b)の上の場合、問合せグラフのラベルがAの u_0 をデータグラフの v_0 に、ラベルがBの u_1 を v_2 に、ラベルがCの u_2 を v_7 に、ラベルがDの u_3 を v_{10} にマッピングすると、ラベルがAであるノード u_4 は v_0 にマッピングせざるを得なく探索が失敗します。この探索の失敗について調べてみると u_0 を v_0 に u_2 を v_7 にマッピングすることが原因であることが分かります。これはラベルがCの u_2 を v_7 にマッピングすると v_7 につながったラベルがDのノードは v_{10} しかないため u_3 を v_{10} にマッピングせざるを得なく、さらに、 v_7 と v_{10} につながっているラベルがAのノードは v_0 しかないため、もし u_0 を v_0 にマッピングしてしまっていると探索が失敗する

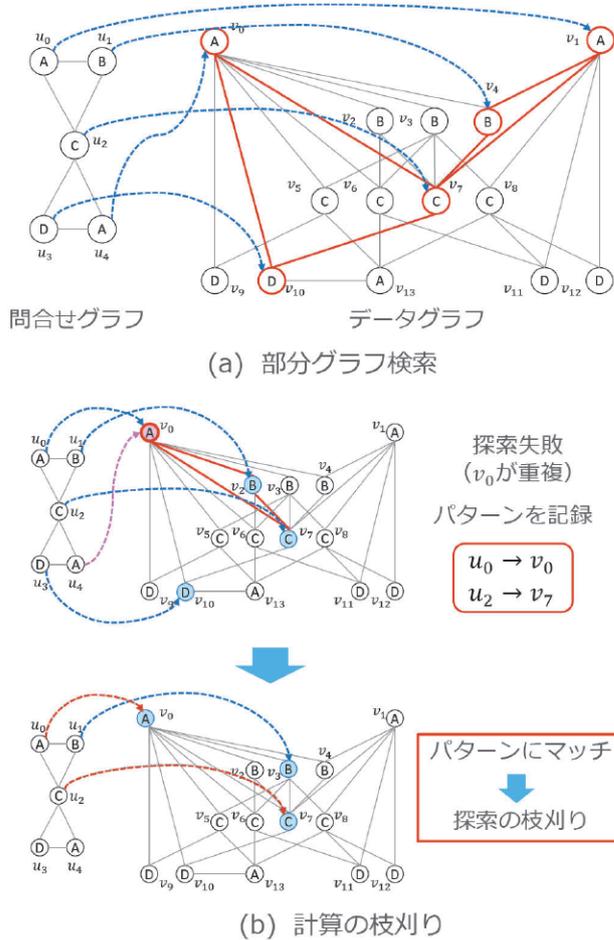


図3 解になり得ない計算の打ち切り

からです。そのため探索が失敗する原因となった u_0 を v_0 に u_2 を v_7 にマッピングするパターンを打ち切り条件として保持します。そして再度検索の過程でこのパターンが現れた時点で探索処理を打ち切ります。例えば図3(b)下では、 u_0 を v_0 に、 u_1 を v_3 に、 u_2 を v_7 にマッピングしていますが、このマッピングは保持していた打ち切り条件に一致するため、探索を進めることなく処理を中断します。このように、解になり得ない計算を打ち切ることで不要な処理を枝刈りし、部分グラフ検索を高速に行うことが可能になります。

楽観的処理による高速計算

最後に楽観的な処理を行うことで計算を枝刈りする手法を紹介します⁽³⁾。この手法

は制約条件を一時的に外して高速に解を求めた後に、得られた解が制約条件を満たすかを確認することで高速化を実現します。この手法の例としてb-Matchingグラフの高速計算があります。

b-Matchingグラフは、各データがちょうど決められた数の近傍データとつながっている近傍グラフです。近傍グラフとしてはデータごとに k 個の近傍データをつなげる k -近傍グラフがよく用いられますが、 k -近傍グラフではデータごとに k 個の近傍データにつなげた結果、エッジの数が k 個より多くなるデータが発生することがあります。例えば、図4(a)左の例は各データから2個の近傍データをつなげる場合の k -近傍グラフの例ですが、2個の近傍データをつなげた結果、 x_2 、 x_3 、 x_4 のように2個より多い数の近傍データにつながるデー

タが発生しています。一方、図4(a)右の例はデータごとに2個の近傍データとつなげるb-Matchingグラフですが、b-Matchingグラフでは各データのエッジの数がちょうど2になっています。 k -近傍グラフでは多くの近傍データとつながるデータが発生するため、すべてのデータが1つのクラスタとなっていますが、b-Matchingグラフでは図4(a)右のようにエッジの数が多くなるデータが発生していないため、データが持つ2つのクラスタを抽出することができます。このようにb-Matchingグラフはエッジの数が多くなるデータが発生しないため、データが持つクラスタ構造をとらえやすいという利点があります。またb-Matchingグラフにおけるエッジの重みはデータ間の類似度によって決まります。具体的には図4(b)のように、b-Matchingグラフではデータどうしが近い距離にある類似したデータ間のエッジの重みは大きくなり、データどうしが遠い距離にある類似していないデータ間のエッジの重みは小さくなります。結果としてb-Matchingグラフはクラスタ構造をとらえやすく、類似したデータのエッジの重みは大きくなるため、同じクラスタで距離が近いデータほどよくつながるといふ特徴があります。同じクラスタで距離が近いデータは同じラベルを持つ傾向があるため、データのラベルをその近傍データから効果的に推定することができ、駐車場の状況推定やクレジットカード詐欺の検出などに応用することができます。

b-Matchingグラフを計算するためには、(1)各データにつながっている決められた数の近傍データを求める処理と、(2)各エッジの重みを求める処理を行う必要があります。(1)の処理について本稿では詳細な説明は省略します。(2)のエッジの重みを求める処理では図4(c)に示す最適化問題を解く必要があります。図4(c)の式において x_i は i 番目のデータ、 $W[i, j]$ は i 番目と j 番目のデータ間のエッジの重みを表します。この最適化問題では図4(a)に示すとおり、①回帰誤差を最小化するようにエッジの重みを計算しますが、②エッジの重みの合計が1であり、③エッジの重みは非負であるという制

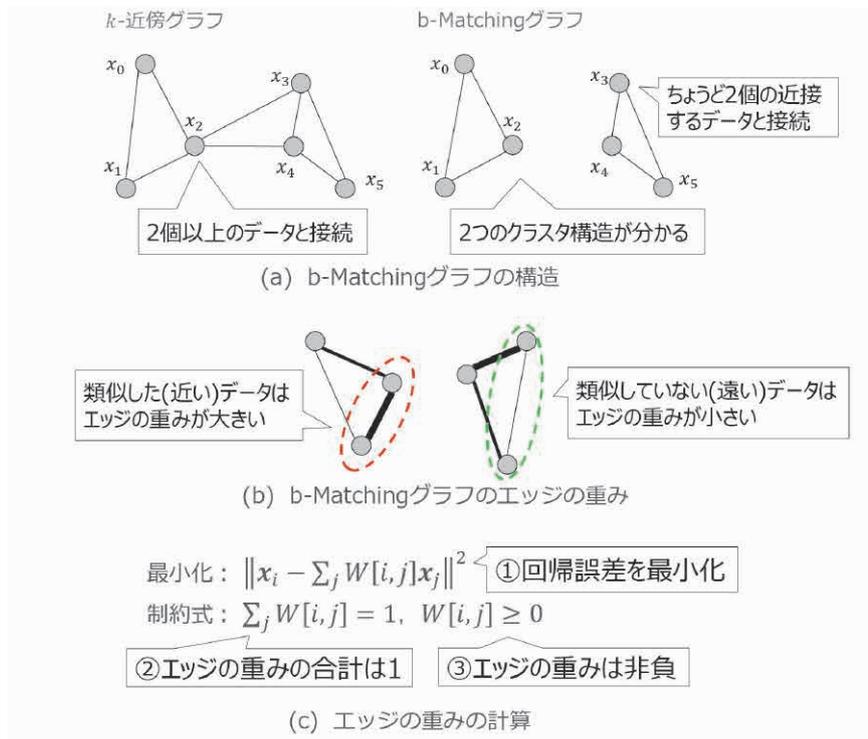


図4 楽観的処理による高速計算

約があります。これらの制約が付いた回帰分析を解くには一般的に最適化ソルバを用いる必要があります。しかし最適化ソルバは高い計算コストが必要であるため、b-Matchingグラフにおけるエッジの重みを求める処理時間が長くなるという問題があります。

そこで私たちは③エッジの重みは非負であるという制約をいったん除外することでエッジの重みを高速に計算する手法を提案しました⁽³⁾。この手法は、①回帰誤差の最小化と②エッジの重みの合計が1という制約下で解を求めるために、まずソルバではなく回帰分析を用いてエッジの重みを計算した後に、合計が1になるように正規化します。そして求めたエッジの重みが③の制約を満たしているかを確認します。提案手法はエッジの重みが③の制約を満たしていない場合のみソルバを用いてエッジの重みを計算するため、ソルバを用いる回数を減らすことができ、高速化を実現しています。このように提案手法は制約を一時的に除外しても、結果的にその制約を満たす解が得られるだろうという楽観的な処理を行うこ

とで高速化を達成しています。

今後の展望

データベース技術やインターネット技術の著しい進展に伴い、私たちはこれまでにない規模のデジタルデータを収集・解析することが可能になりました。この結果、データは新たな資源としての重要性を増し、さまざまな分野で新しい価値の発見や意思決定において活用されるようになっていきます。社会全体がデータを活用する方向へとシフトしており、この動きは今後ますます加速すると考えられます。

私たちの研究チームはこの社会的な動きに対応し、高速性と厳密性を両立した機械学習基盤の実現をめざして日夜研究を進めています。具体的には膨大なデータを迅速かつ正確に処理できるアルゴリズムの開発や効率的なデータ管理システムの構築に取り組んでいます。これにより、より多くの人々がデータを有効に活用できる環境を整えたいと考えています。

将来的には私たちが開発する機械学習基

盤が社会のインフラとして広く普及し、さまざまな領域でデータ解析を活用した革新的なアプリケーションが誕生することをめざしています。このような未来を実現するために、私たちは引き続き最先端の技術を追求め、データ解析の可能性を最大限に引き出すことに努めていきます。そしてデータを通じて社会全体の発展に貢献できるよう、努力を惜しまず研究を進めていきます。

参考文献

- (1) Y. Ida, S. Kanai, Y. Fujiwara, T. Iwata, K. Takeuchi, and H. Kashima: "Fast Deterministic CUR Matrix Decomposition with Accuracy Assurance," ICML 2020, pp. 4594-4603, July 2020.
- (2) J. Arai, Y. Fujiwara, and M. Onizuka: "GuP: Fast Subgraph Matching by Guard-based Pruning," Proc. of ACM Manag. Data, Vol.1, No.2, 167, pp.1-26, 2023.
- (3) Y. Fujiwara, A. Kumagai, S. Kanai, Y. Ida, and N. Ueda: "Efficient Algorithm for the b-Matching Graph," KDD 2020, pp. 187-197, August 2020.



藤原 靖宏

データの重要性が増しさまざまな分野で活用が進んでいます。私たちは高速かつ厳密な機械学習基盤の開発に取り組み、大規模なデータを利用したデータ解析が広く活用される社会の実現をめざして研究を進めていきます。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
 メディア情報研究部 メディア認識研究グループ
 TEL 0774-93-5020
 FAX 0774-93-5026
 E-mail cs-jousen-ml@ntt.com

ヒトの動きが“ばらつく”ことの本質

理想の投手は「投げたいと思う位置」に「何回でも」投げられますが、それを可能としているのは体を操る脳の情報処理です。本稿では、「脳が筋を動かすタイミングの乱れ」が運動をばらつかせる原因であることを示した研究について紹介します。この研究で新たに開発した手法により、利き手は非利き手に比べて繰り返し運動のばらつきが少ないことや、若年層では成長とともに運動ばらつきが減少し、高齢者では、運動ばらつきが増加することが明らかになりました。

キーワード：#運動制御、#動きのばらつき、#タイミング

たかぎ あつし
高木 敦士

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

特集

思うように動くための 脳の情報処理を理解する大切さ

人間は、学習によって複雑な感覚情報を基に器用に思ったとおりに動くことができますようになります。しかし、ロボットと異なり、どんなに上達した動きでも「ばらつき」が生じ、完全に思ったとおりに動かすことはできません。この運動のばらつきは、長年、脳運動研究分野でも注目されてきました。

手や足を自在に動かす脳の情報処理の仕組みを理解するには、成長やトレーニングによって運動のばらつきがどのように変化するかを調べ、そのメカニズムを考えることが必要です。これまでNTTでは、人に寄り添うICTを構築するため、感覚や運動生成にかかわる脳情報処理を理解する研究を行ってきました。ここでは、人の「思ったとおりに動かせる」能力と深く関係する

「動きのばらつき」の本質を調べた研究を紹介します。

従来の研究

ボールを投げたり、階段を上る等、人は日常生活中にさまざまな動作を行います。これらの動作では、個々の動きの目的に合わせて、毎回同じように動けることが必要です。目標通りの動きを達成するための運動学習の仕組みは、従来多くの研究がなされ、脳の情報処理メカニズムも明らかにされてきました。運動学習が進むと、動きのばらつきが減少することも従来の研究で知られていましたが、ばらつきが少ない動きを生み出す仕組みは未解明でした。

ヒトの運動は筋の活動により発生した力によって生成されます。従来の研究で、筋活動を起こすための筋指令は原理的にばらついてしまうことが知られており、また筋

指令のばらつき（分散）が筋活動の大きさと相関することから、動きのばらつきの起源は「筋力の揺らぎ」にある、という考えが主流でした⁽¹⁾。この考えによれば、筋活動が大きくなればなるほど筋力のばらつきも大きくなることとなります。見たものに素早く手を伸ばす動作では、動かす方向に働く筋（主働筋）と減速させるために働く筋（拮抗筋）の活動の増減により腕が動くため、主働筋と拮抗筋*が最大活動する瞬間に手先力（図1(a)、りんごに与える力）も大きくばらつくこととなります。すなわち従来のモデルに従うと、手を伸ばす動作中の手先力は加減速する2カ所でばらつきが大きくなることが予想されます（図1(b)の左）。それを確かめるため、装置のハンドルを握った手先をターゲットへ到達する肘曲げ動作を50回繰り返し、動作中の力とそのばらつきを計測する実験を行いました。すると、従来モデルの予想に反し、計測した手先力の時間パターンには、ばらつきが高まる個所が3つあることが明らかになりました（図1(c)の右）。したがって、このばらつきは従来のモデルでは説明できず、新たなモデルが必要になります。

動きのばらつきの要因は 「脳内タイミングの乱れ」にある

筋活動は大きさ以外に、活動するタイミ

* 主働筋と拮抗筋：肘を曲げる運動を例にすると、主働筋は上腕二頭筋で、拮抗筋は上腕三頭筋外側頭です。

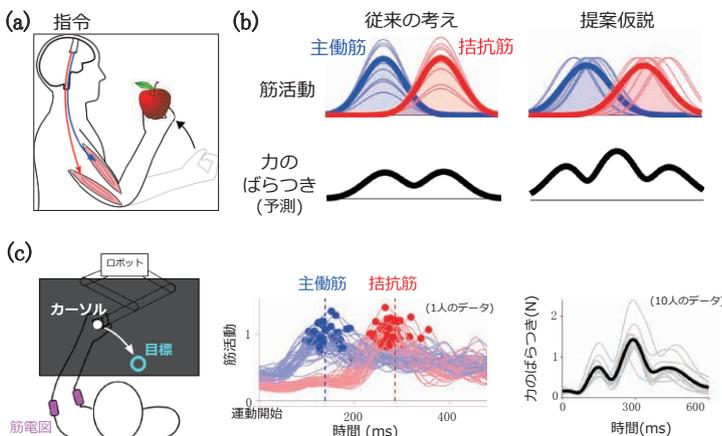


図1 動きのばらつきの要因

ングも重要であることは従来から知られていましたが、筋活動のタイミングが動きのばらつきにどのような影響を及ぼすかについては十分考察されていませんでした。本研究では、主動筋と拮抗筋の活動のタイミングが乱れたときに、四肢を動かす力がどのようにばらつくかを検討しました。従来の研究では、運動を行う寸前に脳に電気または磁気刺激を与えると、運動中の筋活動の大きさや形は変わらず、活動のタイミングだけが早く、もしくは遅くなることが示されています⁽²⁾。すなわち、脳情報処理が揺らげば、通常の運動においても、筋活動の大きさだけでなく、タイミングも乱れる可能性は十分あります。そこで、私たちは筋活動タイミングの乱れが四肢を動かす力のばらつきにどのように影響を与えるかをモデルシミュレーションにより確認しました⁽³⁾。興味深いことに、このモデルは、手を伸ばす動作中に手先力のばらつきが3カ所で高まることを予測しました(図1(b)の右)。そこでさらに、運動中の主動筋と拮抗筋の活動を計測し、肘の終点位置のばらつきと筋活動タイミングの乱れの相関を調べました。主動筋と拮抗筋の活動タイミングは試行ごとに大きく異なり、終点位置のばらつきと正の相関がありました。筋活動の大きさも動きごとに変化していましたが、位置のばらつきとの相関はありませんでした。よって、タイミングの乱れが「動きのばらつきを左右する」本質であることが本実験で明らかになりました。

左右の腕の筋には異なるタイミングの乱れがある

肘の筋のタイミングの乱れとその動きのばらつきに相関があることは明らかになりましたが、同じような関係が手首や肩、そして左右の腕でも見られるかを新たな実験で調べました。この実験では装置のハンドルの位置が動かないように制御し、ハンドルに掛ける力の方向に、画面上の矢印が表示されるようにプログラムしました(図2

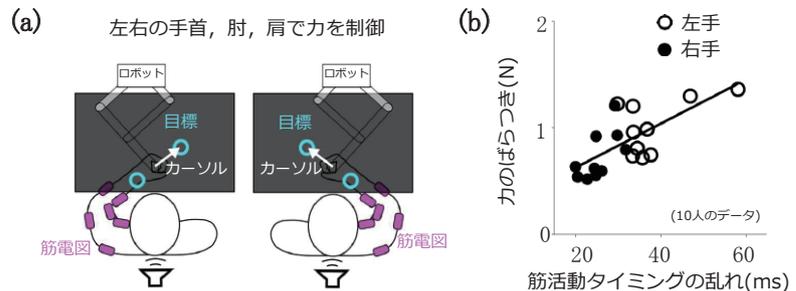


図2 筋活動タイミングの乱れと力のばらつきの相関

(a). 体験者には、一定の時間間隔で鳴る音を頼りに、指示方向にハンドルを押したり引いたりしてもらいました。手首、肘、肩の筋指令タイミングの乱れを計測するため、それぞれの関節が主動動作となるような力の指示方向を設定しました。このような実験で得られた手先力と筋活動を調べてみると、手首、肘、肩それぞれの力のばらつきと主動筋と拮抗筋のタイミングの乱れに正の相関がありました(図2(b))。さらに、右利きの人のみを対象としたこの実験では、左腕の筋に比べ、右腕の筋のタイミングの乱れが少ないことが明らかになりました⁽⁴⁾。この実験結果から推測すると、利き手である右手の精度が高い理由は、タイミングの乱れの少なさにあると考えられます。

利き手と動きのばらつきの関係

利き手と筋指令のタイミングの乱れの関係性をさらに深く調べるため、多人数のデータが必要です。しかし、筋活動の計測は時間と手間がかかるため、大規模実験には向いていません。そこで、多人数からのデータ収集を容易にするため、手足の「動きのばらつき」からタイミングの乱れを推定する簡易な手法を考案しました。思ったとおり動かせるかどうかを簡単にかつ信頼性よく計測するため、私たちは比較的速い速度で繰り返し円運動をする際の「動きのばらつき」に注目しました。複数の筋を順番に活動させることで円運動が可能になるため、精度の高い筋活動のタイミングが要求されます。また、比較的速い単純な繰り返し

運動のため、短時間のデータでもばらつきを評価することができます。そこで私たちは、測定を受ける方がスマートフォンを持って(あるいは足に装着して)15秒ぐるぐるの繰り返し運動(図3(a))をした際の、加速度軌道のばらつき量を定量化するアルゴリズムを開発しました。周期運動における連続した2周期の3次元加速度軌道の違いを距離尺度で表現し、全周期に対して平均を求めたばらつき度で動きのばらつきを評価することにより、周期運動の全体的なばらつきをうまく表現することができます。また実験では、本手法の評価のため、従来利き手や利き足を判断するエジンバラ利き手調査⁽⁵⁾とコーレン利き足調査⁽⁶⁾にもお答えいただきました。エジンバラ利き手調査には全10項目が存在し、字を書く手やボールを投げる手などの作業で操作する側の手をお答えいただけます。左手(-1)と右手(+1)を選んだ頻度により、エジンバラ指数が変わります。ここでは、エジンバラ指数がゼロ以下の場合は左利きと判断し、ゼロ以上であれば右利きと判別しました。コーレン利き足調査は4項目あり、ボールを蹴る足や階段を上がる時の一歩目になる側の手をお答えいただくことで、利き足を判別しました。

図3左下に、右利きの方の、両手両足の加速度軌道の一例を示します。左右の軌道を比較すると、手足ともに、左よりも右のほうが軌道のばらつきが少ないように見えます。開発したアルゴリズムを使うと、その「ばらつき度」を定量化することができます。利き手とばらつき度との関係を調べる

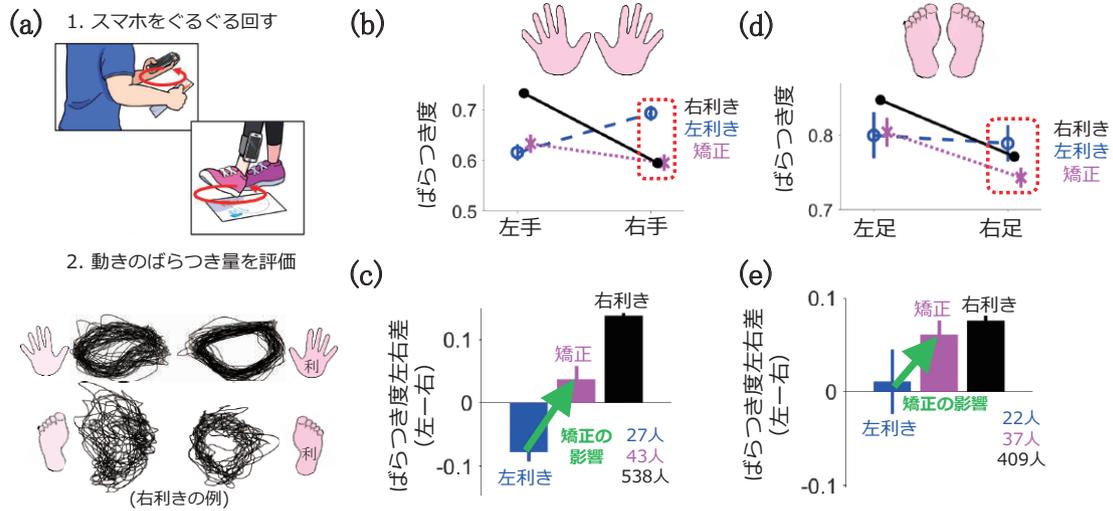


図3 右手を使うように矯正されると、手と足のばらつき度とその左右差に影響

ため、右利き、左利き、右手への矯正者（質問紙調査で右利き538人、左利き27人、右手への矯正43人）に分けてばらつき度を評価しました（図3 (b)）。右利きの人は左手のばらつき度が右手より大きく、左利きの人は右手のばらつき度のほうが大きくなっています。つまり、利き手のばらつき度が少ないことが分かります。また、右手を使うように矯正された人は、左手と右手両方ともばらつき度が少ないことが分かります。すなわち、右手を使うように矯正トレーニングを受けた場合には、平均的には、右手のばらつき度が減少する（すなわち器用さが向上する）だけでなく、左手のばらつき度は増えていない（器用さが低下しない）ということも明らかになりました。また、左手と右手のばらつき度の差でみると、右利き、左利き、右手への矯正者の両手のバランスが明確になります（図3 (c)）。矯正者のばらつき度の手の左右差は左利きと右利きの間であることが明らかになりました。すなわち、右手を使うように矯正されると、両手のばらつき度が減少し、左右差も少なくなることが分かりました。

右手を使う矯正トレーニングは足のばらつき度に影響する

右手を使うように矯正トレーニングを受けると右手のばらつき度が少なくなことは分かりましたが、足への影響についても調べました。足のばらつき度も、手の左利き、右利き、そして矯正のグループに分けて解析しました（図3 (d)）。興味深いことに、手が右利きの人は、平均的に、右足のばらつき度が少ない（すなわち足も右利き）のに対し、手が左利きの人は、左足と右足のばらつき度には差がありませんでした。さらに、右手を使うように矯正された人でも、通常は足を使う運動の矯正はされないと思いますが、平均的には、左足より右足のばらつき度が小さい（図3 (e)）という結果が得られました。矯正という利き手を変えるトレーニングは、左手と右手のばらつき度の差を変化させるばかりでなく、さらに足のばらつき度の左右差にまで影響を及ぼすことが今回の実験で明らかになりました（図3 (e)）。

動きのばらつきは成長や加齢とともに変化する

大規模調査により、利き手や右手を使う

矯正トレーニングによって手や足の動きのばらつき度が変わることが分かってきましたが、それに加え、年齢とともに手足のばらつき度が変化するのかも調べました。4歳から88歳までの総計608名の実験によって得られたデータから定量化した、手足の利き側・非利き側のばらつき度を図4に示します。このグラフから、手足ともに利き側・非利き側で、ばらつき度は成長とともに減少し、その後一定となり、加齢によって増大することが明らかになりました。筋力の増加や低下の影響も考えられますが、筋力は20代まで増加し、そこから減衰すると考えられているため、筋力の変化だけではばらつき度の変化は説明できません。すなわち、成長や加齢に伴うばらつきの変化は、筋の活動タイミングをどれだけうまく制御できるかどうかという脳の情報処理の問題であると考えられます。

今後の展開

本稿では、動きのばらつきが筋活動のタイミングの乱れに左右されることについて、新たに明らかになってきたことを解説しました。そして、手足の動きのばらつき、繰り返し運動を使って評価する技術を開発することで、利き手と筋指令のタイミングの

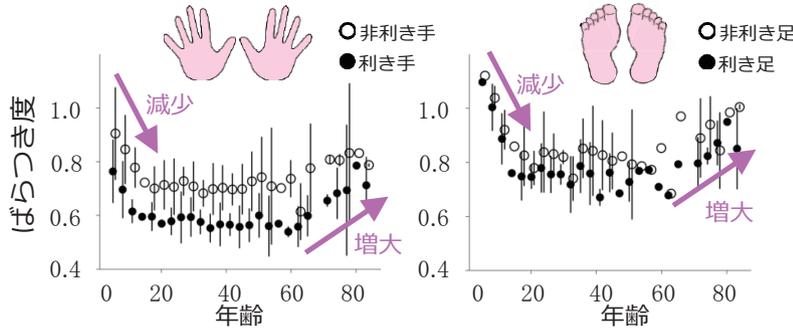


図4 手足の動きのばらつき度は成長とともに減少し、高齢で増大

乱れの関係が分かりました。従来、手を「思ったとおりに動かせる」能力は、例えば、一定時間に細い棒を穴に何個入れられるか、あるいは小さなブロックをいくつ運べるか、などの作業率が評価に使われてきました。しかし、それらの手法は特殊な器具を使用するため、手軽な評価が困難でした。そのため、一般の幅広い年齢層を対象に多人数の計測をすることは難しく、成長や加齢の影響、あるいは個人のトレーニングによるばらつき度の変化や左右のバランスの状態を簡単に調べて、多くの人と比較することは困難でした。また、足のばらつき度については、片足のバランス計測をする手法などが用いられていましたが、その手法は全身の感覚情報処理の機能も含む評価になってしまうため、足自体を動かす器用さの計測としては十分ではありませんでした。

本研究では、短時間の繰り返し運動のばらつきを定量的に評価することにより、ばらつき度を見える化する方法を検証しました。これにより、利き手のばらつき度は筋活動のタイミングの乱れの少なさにあることが分かりました。さらに、右手を使うように矯正トレーニングを受けると、右手だけでなく右足のばらつき度が左側より少なくなることを示しました。さらに、ばらつき度はトレーニングだけでなく、年齢とともに変化することが分かりました。成長とともにばらつき度が減少することから、動きのばらつきを少なくする運動学習が成長の中で進んでいると考えられます。一方で、加齢により増大する手足のばらつき度は、

転倒のリスクと関連する可能性も考えられます。

成長や加齢が腕や足の動きのばらつき度に影響することが分かりましたが、ばらつき度を左右する筋活動のタイミングの乱れがどのようなメカニズムで変化するのは未解明です。タイミングの乱れを生み出す脳部位を特定できれば、成長や加齢によりタイミングの乱れが変わる理由が明らかになります。成長だけでなく、右手を使うトレーニングによってばらつき度が減少するメカニズムやトレーニング方法が解明できれば、スポーツトレーニングやリハビリに活用できることが期待されます。このようなトレーニング法の検証には、ばらつき度を容易に評価できる技術が必要です。スマートフォンを回すだけで動きのばらつき度を容易に可視化する技術は、これからスポーツジム、部活動、リハビリ施設などのシーンに導入して、個人のトレーニングや回復度の定量化に役立つことが期待されます。今後さらに実験参加者を増やし、より信頼性が高い知見を得ていくとともに、動きのばらつき度を決定する運動機能と脳情報処理の関係を明らかにすることをめざしています。

■参考文献

- (1) C. M. Harris and D.M. Wolpert: "Signal-dependent noise determines motor planning," *Nature*, Vol. 394, No. 6695, pp. 780-784, 1998.
- (2) B. L. Day, J. C. Rothwell, P. D. Thompson, A. M. De Noordhout, K. Nakashima, K. Shannon, and C. D.

Marsden: "Delay in the execution of voluntary movement by electrical or magnetic brain stimulation in intact man: Evidence for the storage of motor programs in the brain," *Brain*, Vol. 112, No. 3, pp. 649-663, 1989.

- (3) A. Takagi, S. Ito, and H. Gomi: "Command timing variability, rather than signal-dependent noise, determines motor coordination," *Proc. of MLMC 2022*, 2022.
- (4) A. Takagi, S. Ito, and H. Gomi: "Non-dominant hand has larger timing errors in muscle activity," *Proc. of Neuroscience 2022*, 2022.
- (5) R. C. Oldfield: "The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory," *Neuropsychologia*, Vol. 9, No. 1, pp. 97-113, 1971.
- (6) S. Coren: "The lateral preference inventory for measurement of handedness, footedness, eyedness, and earedness: Norms for young adults," *Bulletin of the Psychonomic Society*, Vol. 31, No. 1, pp. 1-3, 1993.



高木 敦士

「なぜ非利き手では歯を磨くことはできないのか」。この素朴な疑問から始まった研究を追求し、脳の運動制御や情報処理の解明へとつなげたいと思います。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
企画部 情報戦略担当
TEL 0774-93-5020
FAX 0774-93-5026
E-mail cs-jousen-ml@ntt.com



主役登場

機械学習技術で
病気と無縁の社会をめざす

錦見 亮 Ryo Nishikimi

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
研究員

人工知能（AI）が目覚ましい発展を遂げており、多くのタスクにおいて人間を超える精度が報告されています。最近では、さまざまなメディア情報を対象とした生成AIが注目を集めており、例えばChatGPTのような大規模言語モデル（LLM：Large Language Model）に基づくシステムは、ユーザが入力したテキストに対して適切な回答を出力してくれます。また、Stable Diffusionのような拡散モデルに基づくシステムは、ユーザが指定したプロンプトに応じて多様な画像を生成してくれます。このように、多様なメディア情報に対する高性能なAIが次々と登場していますが、これらのAIの根幹を成すのが機械学習技術です。機械学習とは、特定のタスクの実行方法をデータから自動的にコンピュータ（機械）に学習させる技術です。この特定のタスクには、入力データから出力データへの変換や、データの背後にあるパターンや規則の発見が含まれます。このようなデータ処理に関連するタスクは多岐にわたり、私はこれらのさまざまなタスクに対して有効な機械学習手法の研究を行っています。

私が現在取り組んでいる生体情報処理技術の研究開発では、機械学習技術を活用して医療や健康に関する諸問題の解決をめざしています。近年、生体情報が取得できるウェアラブルデバイスの普及や健康意識の高まりにより、生体情報の活用がますます重要になっています。さらに、AI技術を活用した生体情報処理の研究も急速に進展しており、社会的および学術的な需要とイン

パクトが大きい研究領域です。生体情報処理といっても、体には多種多様な器官が存在し、取得可能な生体データは多岐にわたりますが、体の中でも重要な器官である心臓には私は着目しています。具体的には、心疾患の発見によく用いられる心電図と、体の内部や心臓の状態を表すパラメータ（心臓パラメータ）との高速・高精度な相互変換技術について研究開発を行ってきました。この相互変換技術は、AIの学習に必要な大規模データの自動作成、心臓パラメータに基づく体内状態の詳細な把握、心電図と体内状態の未知の関連性の発見など、さまざまな場面で応用可能です。また、現在はより詳細な心臓のメカニズムの解明をめざし、心臓細胞の遺伝子の解析にも取り組み始めています。

実は、生体情報処理に携わる以前は、機械学習技術を活用した音楽情報処理について研究していました。その中でも、もっとも基本的で長年研究されている自動採譜（音楽音響信号を楽譜に変換する技術）の問題に取り組んでいました。楽譜はポピュラー音楽を含む多くの音楽を記述するもっとも一般的な形式ですが、音楽に堪能な人でも聴いた音楽を楽譜に書き起こす作業には時間がかかります。自動採譜が実現すれば、演奏したい楽曲の楽譜が即座に入手できるだけではなく、音楽のアーカイブ保存・配布・研究用データの収集など、さまざまな場面で活用できます。また、人間の音認知メカニズムを解明するという学術的側面からも自動採譜は重要です。音楽は、複数

種類の音がさまざまな音高・音量・音色・継続長で重なり合っている複雑な音響信号です。計算機にとってはただの波形にすぎませんが、人間はその中から個別の音を聞き分けることができます。この聞き分ける処理を計算機でどのように再現するかは大変興味深い課題です。一見すると生体信号処理とは全く別の分野のようにも思われますが、どちらも情報処理に関する機械学習技術の研究であることには変わりありません。音楽情報処理を通じて身に付けた、さまざまな問題に対する普遍的な考え方や機械学習技術は、生体情報という別の種類のデータに対しても応用しています。

生体情報処理は、画像・言語・音声・音楽のようなメディアデータに比べて機械学習技術の浸透がまだ進んでおらず、研究の余地が多く残されている挑戦的な分野です。また、その社会的な意義が非常に大きい点も魅力の一つです。医学や生物学の世界は広範かつ歴史のある分野であるため、医療用語やデータの読み取りなどが分からずに悪戦苦闘することも多いですが、将来的には自身の開発した技術が社会や医療現場で活用されることをめざして、今後も一歩ずつ着実に生体情報処理技術の発展に貢献していきたいです。究極的には、機械学習技術を基盤に、あらゆる生体情報のシミュレータを構築し、心身の未来の状態を予測することで、病気や健康不安と無縁の社会の実現をめざしたいです。

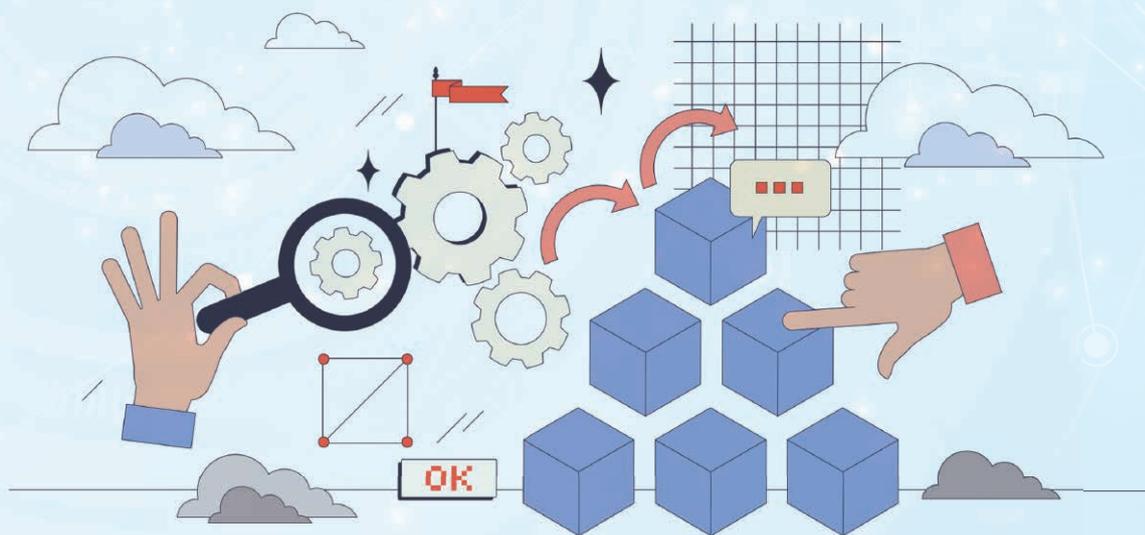
サプライチェーンにおける セキュリティ透明性の向上と 活用に向けた取り組み

サプライチェーンにおけるセキュリティリスクが顕在化している中で、ソフトウェア構成の透明性確保の重要性が高まっている。

本特集では、サプライチェーン・セキュリティにまつわる社会動向および、NTTグループ内の取り組み、昨年度設立した「セキュリティ・トランスペアレンシー・コンソーシアム」の活動について紹介する。

透明性によるサプライチェーンセキュリティリスクへの挑戦 ——— 34

サプライチェーンセキュリティリスクに関する国内外の動向や関連技術、および本コンソーシアムの概要について紹介する。





可視化データ活用シーン拡大に向けた セキュリティ・トランスペアレンシー・コンソーシアムの活動 — 38

可視化データの活用促進に資する「知見の共創」に取り組むために2023年9月に発足した「セキュリティ・トランスペアレンシー・コンソーシアム」の活動と、可視化データ活用促進に向けた課題について紹介する

可視化データ活用によるソフトウェア脆弱性管理 — 42

組織内で実施されるソフトウェア脆弱性管理の個々のアクションにおける可視化データの活用例を紹介する。

セキュリティ・トランスペアレンシー確保技術 — 46

可視化データの活用に向けたさまざまなステークホルダが寄せる期待、課題の解決に向けた最新の研究動向、およびNTT社会情報研究所が取り組んでいるセキュリティ・トランスペアレンシー確保技術について紹介する。

主役登場 鐘本 楊 NTT社会情報研究所 — 49

可視化データによる透明化時代到来、そのときあなたは



透明性によるサプライチェーンセキュリティリスクへの挑戦

NTTは、「透明性」をキーコンセプトとしてサプライチェーンセキュリティリスクの低減を図る技術の研究開発を推進するとともに、サプライチェーンを形成する多様な事業者と協調して当該リスクの低減等に取り組む場となる「セキュリティ・トランスペアレンシー・コンソーシアム」を運営しています。本稿では、サプライチェーンセキュリティリスクに関する国内外の動向や関連技術、および本コンソーシアムの概要について紹介します。

キーワード：#サプライチェーンセキュリティ、#可視化データ、#SBOM

ごとう あつひろ^{†1}
 後藤 厚宏^{†1}
 なかじま よしあき^{†2}
 中嶋 良彰^{†2}

情報セキュリティ大学院大学^{†1}
 NTT社会情報研究所 所長^{†2}

従来にない深刻なリスクの出現

経済活動や日常生活を支え、健康や生命にとっても重要な社会基盤となったインターネットにおいて、今やサイバー攻撃は人類共通の重大な脅威となりました。そして、このサイバー攻撃に関する新たなリスクとして「サプライチェーンセキュリティリスク」が世界的に注目されています。

人々が利用するサービス・システム・製品は、その設計開発段階から導入・運用段階までを含め、多様なサプライチェーンによって支えられています。このサプライチェーンを形成するいずれかの事業者が侵害されると、その影響がサプライチェーンの下流全体に伝搬します。サービス・システム・製品の高度化によってその複雑性が増すほど、サプライチェーンは深く広くなり、影響の伝搬範囲も急拡大します。また、影響が伝搬するサプライチェーンの下流側

では、サプライチェーンを把握することはおろか、その存在を認識できていないことも珍しくなく、影響を回避・低減することは容易ではありません。このような性質に起因して生じるリスクがサプライチェーンセキュリティリスクであり、その大きさに注目が集まるとともに、すでに実害も発生しています。

このような中、NTT社会情報研究所では、サプライチェーンセキュリティリスクの要因は、サプライチェーンとその対象物（サービス・システム・製品等）が「不可視」であることと考え、対象物に含まれるソフトウェアコンポーネントなどの構成を利用者側からも確認できる「透明性」をキーコンセプトとして、抜本的にリスク低減を図る研究開発に取り組んでいます。また、このリスク低減のためには、サプライチェーンを形成する多様な事業者の協調が不可欠であることから、その活動の場となる「セキュ

リティ・トランスペアレンシー・コンソーシアム」を2023年9月に発足し、本稿の筆者でもある情報セキュリティ大学院大学の後藤厚宏学長が会長に就任しました⁽¹⁾。

次に、サプライチェーンセキュリティリスクについて解説するとともに、当該リスクの低減に向けた上記のコンソーシアムを中心とした取り組みについて紹介します。

リスクの分類とインシデント事例

サイバー空間とフィジカル空間の高度な融合が進んでいる現在の社会では、サプライチェーンも多様化と拡大が進んでいます。サプライチェーン全体を正確に把握してリスクに備えることは事実上困難であることから、サプライチェーンの性質を利用したサイバー攻撃はたいへん強力です。このリスクは、例えば図1のように分類することができます。リスク①は、サプライチャー

リスク②
 サプライチェーンにおける対策が甘い「脆弱な事業者の環境」が侵害され、サプライチェーンを辿ってターゲット組織が侵害されるリスク



リスク①
 サプライチェーン上で対象物（サービス・システム・製品等）が侵害され、ターゲット組織が利用してしまうリスク

図1 サプライチェーンセキュリティリスクの分類

ンにおいて授受されるもの（サービス・システム・製品等）が侵害され、上流の事業者を信頼している下流の事業者が侵害の事実を知らぬまま利用してしまい、その結果として自身も侵害を受けるリスクです。例えば、製品に搭載されているソフトウェアにマルウェア等の不正なソフトウェアが混入しているケースが考えられます。また、製品導入時点だけでなく、運用中のソフトウェアのアップデートの際に脆弱性や不正なソフトウェアが混入するというケースも考えられます。

リスク②は、サプライチェーンを形成する事業者のIT環境がサイバー攻撃（例えば事業者設備のマルウェア感染、従業員アカウントの乗っ取り等）によって侵害され、取引先とのさまざまなやり取り（事業者間のシステム連携・メール連絡等）が、改ざん、偽造、マルウェア感染等の脅威に晒されるものです。

国内外において、このようなサプライチェーンセキュリティリスクの顕在化を

感させられるインシデントが相次いで発生しています。表は、上記の分類ごとに象徴的なインシデント事例をまとめたものです。

リスク対応に向けた各国および業界の動向

前述のインシデント発生等も契機となり、日本政府を含む各国政府はサプライチェーンセキュリティリスクの重要性や対応の困難性を踏まえ、セキュリティ向上に向けたさまざまなルール整備等の政策を推進しています。また、関連する標準化等の活動が各業界団体によって進められており、これらを土台として各事業者のセキュリティ業務およびセキュリティビジネスの改善や発展が期待されています。図2は、これらの全体像をまとめたものです。

■ 米国

米国では2021年5月に発令された大統領令（Executive Order 14028：Improving the Nation's Cybersecurity）を起点と

して、ソフトウェアサプライチェーンのセキュリティ強化、ソフトウェアの信頼性向上、サイバーインシデント報告義務の強化などが進められています。この大統領令に基づき対策を実践するためのベストプラクティスおよびガイドライン等を、米国のNIST（国立標準技術研究所）、NTIA（国家電気通信情報局）、CISA（サイバーセキュリティ・インフラストラクチャ庁）等が公表しています⁽²⁾。

上記の取り組みにおける重要な要素としてSBOM（Software Bill of Materials）と呼ばれるソフトウェア部品表が挙げられます。SBOMとはソフトウェア製品に含まれるコンポーネントとその情報（ソフトウェアバージョン情報、ソフトウェア間の依存関係等）をリスト化したものです。この情報によって、サプライチェーン全体を通じて、サービス・システム・製品等を構成するソフトウェアの存在を適切に認識できるようになり、脆弱性の特定やリスク確認、必要な対処を迅速かつ効果的に行えるようになることが期待されています。

SBOMの普及に向けた米国の取り組みは加速しており、SBOMの標準化やSBOMの運用に関するベストプラクティス公表に加えて、米国政府と取引する企業や重要インフラ事業者等に対してSBOMの作成や提供を求める取り組みも進められています。

■ EU

EUでもサプライチェーンセキュリティリスク対応のための政策が進められています。特に、2022年9月に欧州委員会が公表したサイバーレジリエンス法（CRA：Cyber

表 サプライチェーンセキュリティリスクに関するインシデント事例

発生時期	概要	分類
2020年12月	SolarWinds社が提供するシステムのアップデートプログラムが侵害を受け、サプライチェーンを通じて顧客（約1.8万件）に影響	リスク①
2021年7月	Kaseya社が提供するIT管理システムのアップデートプログラムが侵害を受け、サプライチェーンを通じて顧客（約3.6万件）に影響	リスク①
2022年10月	国内医療機関において取引先の給食事業者が侵害を受け、両者のシステム連携を通じてランサムウェアが伝搬し、院内の多数のサーバおよび端末機器（約1300台）に感染が拡大	リスク②
2022年12月	ログ出力ライブラリのデファクトスタンダードである「Apache Log4j」に発覚した深刻な脆弱性によって多くのシステムに攻撃リスクが発生（サプライチェーンにおいて該当バージョンのLog4jが搭載されているソフトウェアの特定が困難であり問題が深刻化）	リスク①

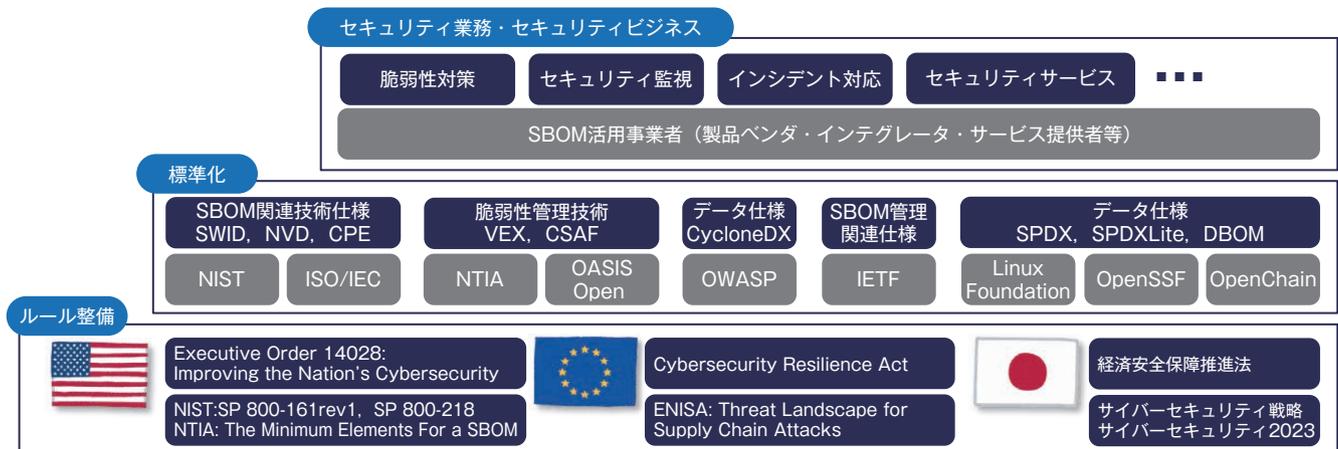


図2 サプライチェーンセキュリティリスクに関する各動向の全体像

Resilience Act)⁽³⁾では、デジタル要素を備えた製品を対象としてサプライチェーンセキュリティリスクを含むさまざまなサイバーセキュリティ関連規則が規定されており、2024年にいよいよ施行の予定です。

CRAによってサプライチェーンを形成する上流（事業者）の責任と下流（ユーザ）の権利を明確化するとともに、サプライチェーン全体でリスクに対応するための環境整備が進むことが期待されています。このCRAでは、サイバーセキュリティリスク対応に必要な情報提供が各事業者義務付けられています。そして、そのための重要な手段の1つとしてSBOMが位置付けられていることから、米国と同様にEUにおいてもSBOM作成は広く求められていく見込みです。

■ 日本

日本政府は、2021年に閣議決定したサイバーセキュリティ戦略においてサプライチェーンの信頼性確保に向けた基盤づくりを重要施策に位置付けるとともに、年次計画である「サイバーセキュリティ2023」においてSBOMを含むサプライチェーンセキュリティリスク対策強化の取り組みを進めることとしています。

上記の政策の一環として、経済産業省、総務省、厚生労働省ではSBOM導入やSBOMによる脆弱性管理に関する手引書を公表するなど、SBOM普及に向けたさまざまな取り組みを進めています。また、大規模なサプライチェーンを特徴とする自

動車業界では、SBOMの運用面（運用コスト等）を考慮して独自の工夫を行ったフォーマットを策定・採用する動きもみられます。

リスク対応のために真に求められること

製品・システム・サービス等がサプライチェーンを通じてセキュリティ侵害を受けるとなるサプライチェーンセキュリティリスクは、各構成要素の供給元などを含めた全世界に広がるサプライチェーン全体を通じて対応が求められます。各国政府が整備や検討を進めているSBOMは、保護すべき対象の中身の把握とそこに潜む脆弱性などのリスク確認を容易にする情報（可視化データ）をサプライチェーンに提供し、システム構成の透明性を高めセキュリティリスクを低減する効果をもたらすことが期待できます。サプライチェーンの上流から下流までの全体を通じて可視化データを共有し、セキュリティ対策に活用することができれば、サプライチェーン全体のリスクを効果的に低減することができます。

一方で、SBOM作成義務化に向けた動きを背景として、SBOMによる可視化データを「つくる側」の視点に組み込みがよりフォーカスしていくと、例えば可視化データの生成コストのような「つくる側」の問題への対処に関心や取り組みが偏重してしまう可能性があります。その結果、図3(a)

のように、可視化データを現実的な範囲でつくることが目的化してしまい、可視化データが本来もたらすはずであった利点を損なうおそれがあります。

そのため、私たちは「つかう側」の視点に立った検討も行い、上記のような偏重に陥らずバランス良く「つかう側」と「つくる側」の両視点から取り組むことが不可欠であると考えています。例えば、「つかう側」の視点から、可視化データを効果的につかうためのデータ条件を見出すことは、「つくる側」において無駄な可視化データの生成を回避できるメリットをもたらすでしょう。さらに、「つくる側」にとって可視化データの作成が製品の販売促進に寄与するのであれば、より多くの資源が投入され、可視化データの活用が一層進むことも期待できます。

このようにサプライチェーンセキュリティリスクを真に解決するためには、サプライチェーンにおける「つくる側」と「つかう側」にあたる多様な事業者が協調して両者の視点を取り入れた問題対処に取り組むことが不可欠なのです。

コンソーシアムがめざすリスク対応の好循環

可視化データの作成および提供は製品等のサプライヤ事業者におけるコスト負担を伴うことから、当該コストに見合うレベルの効果的な可視化データの活用が不可欠で

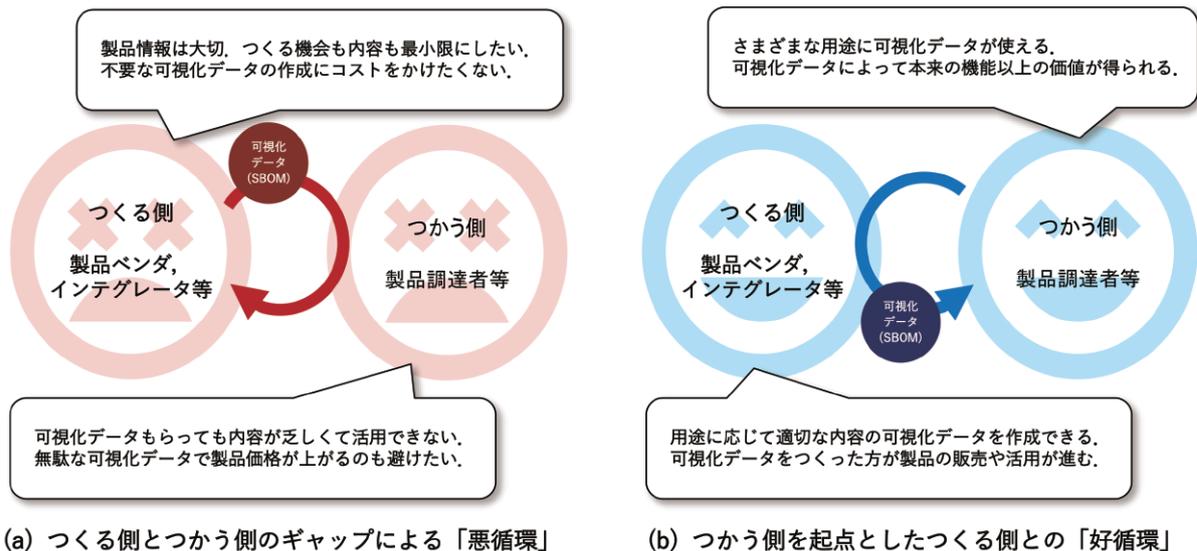


図3 可視化データに関する「悪循環」と「好循環」

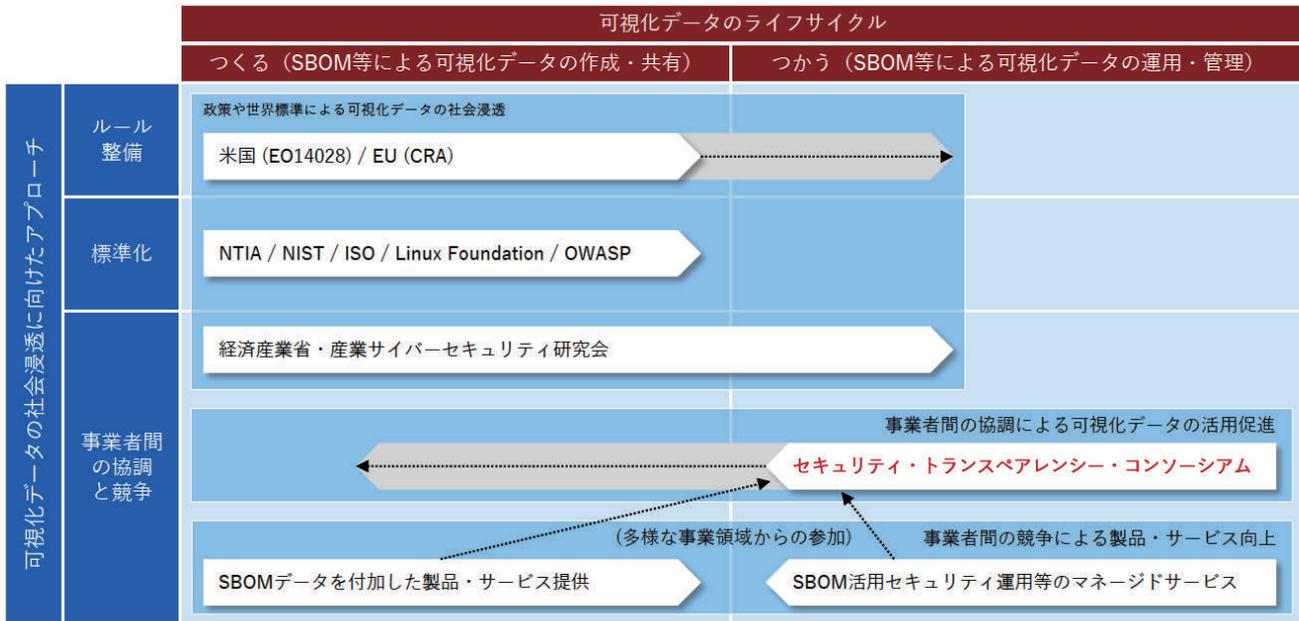


図4 コンソーシアム運営に関する基本的な立ち位置

あり、効果的な活用は可視化データの作成および提供を促し、活用シーンのさらなる拡大を生む（図3(b)）好循環につながります。

私たちは、サプライチェーンを形成する多様な事業者（製品ベンダ、システムインテグレータ、セキュリティベンダ、サービス・システム・製品を利用・運用する事業者等）と協調し、可視化データの活用促進に資する「知見の共創」に取り組むため、「セキュリティ・トランスペアレンシー・コンソーシアム」を立ち上げました。

可視化データの作成および提供を促進するとともに、各会員が持つ知見やノウハウを共有することによって、活用シーンの具現化と拡大をめざしています。このコンソーシアムにおける取り組みの柱は以下の3つです。

- ・可視化データの活用シーンおよび活用手法について広く具現化に取り組みます。具体的には、ソフトウェア構成等の可視化データによって高まる透明性の活用について、セキュリティ運用等を対象として課題分析、解決策の検討、および実証等を行います。
- ・特定の業種や分野に限定しない多様な事業者の参加によって、可視化データの「提供側」および「利用側」の両者を含む広い視点から検討を行います。
- ・検討成果の公表を通じて、サプライ

チェーンセキュリティリスク対応等の社会課題解決への貢献をめざし、それらの取り組みに資するコミュニティ活動や政府関係機関などとの連携も推進します。

上記の取り組みにあたって、サプライチェーンを形成する多様な事業者の知見を取り入れるためには「参加のしやすさ」が特に重要になります。そこで、私たちは「協調領域」と「競争領域」に関する考え方を明確にしてコンソーシアムを運営しています。

コンソーシアムでは、会員共通の問題・課題認識（活動ビジョン）を定義・公表し⁽⁴⁾、これらに対処するための知見（SBOMをはじめとする可視化データの効果的な活用を促進する知見等）を「協調領域」として議論・共創しています。また、このプロセスにおいて、各会員は独自の機密情報を持ち込まず（公開情報のみを使って）活動することとしています。そのうえで、各会員がコンソーシアム活動を通じて獲得した知見を自らの事業（ビジネスや技術開発等）にフィードバックし、「競争領域」において切磋琢磨することによって、社会全体としてリスク対応力を強化していきます。以上のようなコンソーシアム運営の基本的な立ち位置をまとめたものを図4に示します。

私たちは、このようなコンソーシアムの場や活動を通じて「セキュリティの透明性

のさらなる社会浸透に取り組み、これをキーコンセプトとしてさまざまな社会課題の解決にチャレンジしていきます。

■参考文献

- (1) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/10/11/231011a.html>
- (2) <https://www.nist.gov/itl/executive-order-14028-improving-nations-cybersecurity>
- (3) <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/cyber-resilience-act>
- (4) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2024/02/16/240216b.html>



（左から）後藤 厚宏 / 中嶋 良彰

サプライチェーンセキュリティリスクは、システムやサービスを提供する事業者だけでなく、サプライチェーンを支える事業者にもそのリスク対応を求められるという意味で「社会全体で対応すべき課題」といえます。

◆問い合わせ先

NTT 社会情報研究所
企画担当
E-mail solab@ntt.com



可視化データ活用シーン拡大に向けたセキュリティ・トランスペアレンシー・コンソーシアムの活動

可視化データを活用した「サプライチェーンセキュリティリスク」への対応の促進には、サプライチェーンを形成する多様な事業者が協力し、可視化データの有効活用を進める「協調領域」の活動が重要となります。本稿では、協調領域における活動として、サプライチェーンを形成する多様な事業者が協力し、可視化データの活用促進に資する「知見の共創」に取り組むために2023年9月に発足した「セキュリティ・トランスペアレンシー・コンソーシアム」の活動と、可視化データ活用促進に向けた課題について紹介します。

キーワード：#セキュリティ・トランスペアレンシー・コンソーシアム、#可視化データ、#SBOM

可視化データ活用拡大における協調の重要性

「サプライチェーンセキュリティリスク」への対応が重要な課題として認識されるようになり、国内外ではSBOM (Software Bill of Materials) をはじめとする可視化データの導入が本格的に進展しています。可視化データの普及のためには、可視化データを「つくる側」だけでなく「つかう側」も含めたサプライチェーンを形成する多様な事業者が、協調しながら可視化データの有効活用を進めることが求められるため、その「協調領域」における活動が重要となります。

本稿では、協調領域における活動の一環として、「セキュリティ・トランスペアレンシー・コンソーシアム」の活動趣旨や取り組みについて紹介します。

セキュリティ・トランスペアレンシー・コンソーシアムの活動

■コンソーシアムの活動方針と運営体制

セキュリティ・トランスペアレンシー・コンソーシアムは、サプライチェーンを構成する多様な事業者が協調し、可視化データの活用促進に資する「知見の共創」に取り組むことを目的として、2023年9月に発足しました。

本コンソーシアムにおいては、サプライチェーンを構成する多様な事業者が協調して知見を創出し、可視化データ活用範囲を拡大する活動を推進するにあたり、以下の活動指針を掲げています。

- ・多様な分野における活用法を深掘りするため、サプライチェーンを形成する多様な事業者（製品ベンダ、システムインテグレータ、セキュリティベンダ、製品・システム・サービスを利用・運用する事業者等）を対象とする。
- ・事業者間の相互信頼に基づく活動の場とするため、事業者の新規参加にあたっては参加事業者により選出された運営委員会と協議を行う。
- ・参加しやすい運営とするため、参加事業者には会費を求めない、あるいは最小限とする。
- ・知的財産を扱わず、参加事業者の「協調領域」を活動範囲とする。
- ・参加事業者の機密情報を活動の前提とせず、各事業者が開示可能な情報のみを用いて活動する。

本コンソーシアムでは、運営に関する議論を行う総会・運営委員会、そして「知見の共創」に向けたワーキンググループ (WG) という体制で活動を行っています。運営に関しては、原則すべての会員事業者が参加する総会で基本方針を決議し、随時発生する新規会員の参加に関する審議などの事項については、運営委員が参加する運営委員会における決議等により、意思決定の効率化を図っています。また、具体的な「知見

くまざき ゆうすけ^{†1*}
熊崎 裕亮^{†1*}
やまだ あきら^{†1}
山田 暁^{†1}
さとう りょうた^{†2}
佐藤 亮太^{†2}

NTT 研究企画部門^{†1}
NTT 社会情報研究所^{†2}

の共創」に向けた活動は、WG単位で行われます。現在、WGは「可視化データ活用WG」の1つだけですが、今後は目的に応じて増設していく予定です。可視化データ活用WGは月1～2回の頻度で、対面とオンライン併用の形態で会議が開催されており、そこでは会員間の活発な意見交換が行われています。また、これらの活動の成果についてはWebサイト⁽¹⁾を通じてオープンに発信しています。

本コンソーシアムの参加事業者については、発足時点の8事業者から、2024年7月時点では18事業者にまで拡大しています。これにより、より多くの知見が事業者間で共有され、協力体制が一層強化されています。

■可視化データの活用シーン拡大に向けた活動ビジョン

前述のとおり、可視化データの活用を広げるためには可視化データを「つくる側」だけでなく「つかう側」の取り組みも加速させることが重要となります。そこで、本コンソーシアムの活動方針、活動内容に加えて、本コンソーシアムにおいて取り扱う問題・課題として可視化データを「つかう側」が直面する問題・課題を中心に組みとめた活動ビジョン「セキュリティ透明性の向上と活用に向けて」を2024年2月に公表しました⁽²⁾。

可視化データは、ソフトウェアやハードウェアの構成、リスク（脆弱性など）および状態（機器設定などの実際の使われ方）などに関連付く広範囲な情報が含まれます。

* 現、NTT西日本。

活動ビジョンの中では、まずは可視化データ活用の議論の出発点として、製品やシステムに含まれるソフトウェアに関する構成情報の代表的な表現方法であるSBOMの利用を念頭に置きながら検討を開始しています。次にこのSBOMを中心に、可視化データを「つかう側」がサプライチェーンの透明性を確保するうえで直面する課題について紹介します。

可視化データを「つかう側」が直面する課題

可視化データの活用には現状まだ多くの課題が残されています。コンソーシアムでは、「つかう側」が直面する課題を表のようにまとめました。ここでは、各課題の内容を簡単に紹介します。

まず、社会全体で取り組むべき課題として、課題(1)の可視化データの社会浸透・認知の不足が挙げられます。サプライチェーンセキュリティを確保するためには、一部の企業だけでなく、社会全体で協力し、サプライチェーンを構成する企業全体に可視化データの活用を広げていくことが求められます。次に、技術的観点において解くべき課題として課題(2)、(3)が挙げられます。これには、データフォーマットの統一化や、膨大な可視化データを取り扱うためのツール・技術の拡充などが挙げられます。これらは、可視化データの活用を促進するためには不可欠です。さらに、課題(4)～(8)のように、「つくる側」での可視化データ活用のためのツール導入・社内教育や、「つかう側」と「つくる側」の組織

表 「つかう側」が直面する課題

(1) 社会浸透・認知の不足 可視化データの価値が具体的に理解できないため、どう利用してよいかわからない等	(5) 継続的な活用 ソフトウェア更新時に正しい可視化データを継続的に入手する必要がある等
(2) フォーマット・データの未整備 可視化データを統一的に扱うために「つかう側」の活用方針を定めなくてはいけない等	(6) サプライチェーン上の調整 多段のサプライチェーン上で「つくる側」と「つかう側」の相互共有の仕組みが必要等
(3) 技術・ツールの不足 膨大な可視化データを扱うためには自動化が必要等	(7) 「可視化データ」がもたらす影響 可視化データによってセキュリティの透明性が高まり、従来は見えず対処していなかった事象にも対処が必要となる等
(4) 活用コストの負担 可視化データの導入がもたらす業務の変化に対応するため、担当者の教育や関連ツールの習熟を効率的に行える必要がある等	(8) その他 可視化データ活用は従来の業務には含まれていないため、業務体制の見直しが必要になる等

間での取り決め、「つかう側」や「つくる側」での業務体制の見直しなど、組織内・組織間で取り組む必要のある課題も挙げられます。各課題について詳しく説明していきます。

■社会浸透・認知の不足

可視化データの作成および提供に取り組む「つくる側」の活動により、社会全体で可視化データを幅広く収集できることが期待されます。この取り組みによって、データの収集と共有が進展し、より多くの情報が可視化されることで、さまざまな分野での活用が促進されることが期待されます。しかしながら、現時点では可視化データの使用方法やその価値についての認識が十分に広まっておらず、特に可視化データを「つかう側」がその具体的な価値を理解し、適切に活用できるという認識がまだ十分に浸透していない状況です。

可視化データの活用が一部の企業に偏っている状況では、サプライチェーンセキュリティという観点において効果を発揮することが困難です。したがって、グローバルを含むサプライチェーンを構成する企業全体において、可視化データの活用が均等に広がることが求められます。

ただし、社会浸透の課題はそれ単体で解決できるものではないということには注意が必要です。後述するさまざまな課題をクリアしていくことで可視化データの利用価値を高め、「つかう側」自身が価値を体感できるようになることで、初めて社会浸透が加速するものと考えています。

■フォーマット・データの未整備

SBOMは、ソフトウェアの構成を表現するための標準仕様であり、可視化データを表現するうえで非常に有用です。しかし、SBOMのデータフォーマットにはさまざま

まな標準仕様が存在しており、その表記方法が異なることが問題となる場合があります。加えて、SBOMはデータ内容を柔軟に記述できる仕様であるため、その記載内容は作成者の裁量に依存しがちです。記載項目や記載方法が製品によって異なることがあり、統一的に取り扱うことが難しくなる可能性があります。

また、複数のSBOM生成ツールによって出力される内容にばらつき（例：大文字・小文字や半角・全角の違い、一部省略など）や表記揺れが発生することにも注意が必要です。さらに、SBOMの記載内容のばらつきは、利用者の活用方法の違いに起因して生じる可能性もあります。産業や顧客企業ごとに必要とする情報を個別に定義して作成者に求めるようになると、1つの製品に対しても異なる記載内容を持つ複数のSBOMが作成される可能性があります。

SBOMの記載内容のばらつきは、可視化データの品質にも大きくかかわります。例えば、脆弱性管理においては、脆弱性特定に用いる可視化データの品質を正しく評価できないと、本来は必要なかった対応が発生し、対応すべき脆弱性がみつけれないなどの問題が発生してしまいます。

■技術・ツールの不足

可視化データを活用するためには、多くの事業者から広く、また過不足なく情報を収集する必要があります。現在、可視化データに対応する多様な技術やツールがすでに利用可能となっています。しかしながら、これらのツールが提供する情報は、使用者が想定するユースケースにおいて十分でない可能性があり、そのため技術やツ

ールのさらなる拡充、およびそれらを効果的に利用するための知見の創出が求められています。さらに、多くの事業者が手軽に可視化データを活用するためには、安価で利用しやすい技術やツールの選択肢が存在することも重要です。

また、事業者によっては他のシステムやデータとの連携が必要になる場合もあるため、1つの選択肢として独自にカスタマイズ可能なOSS（Open Source Software）のツールの充実などが求められることも考えられます。

■活用コストの負担

「つくる側」で必要となる可視化データ生成にかかるコストは、製品やサービスを提供する際のコストに反映されるため、ツールや仕組みの導入コストは安価であることが重要です。一方で、「つかう側」では、ツールの導入コストに加え、可視化データの導入に伴う業務変化に対応するための担当者の教育やツールの習熟を効率的に行う必要があります。特に、可視化データの導入段階においては、社内での意思決定やコミュニケーションのために可視化データを正しく理解している人材の育成が急務で、これらの教育コストにも考慮する必要があります。

また、「フォーマット・データの未整備」において述べたように、1つの製品に対するSBOMでも複数の異なるSBOMが作成される可能性があり、これが「つくる側」のコスト増大につながることがあります。このコストは「つかう側」にも影響を及ぼすため、必要な情報を業界や企業の枠を超えて共通化する努力が求められます。

■継続的な活用

製品の運用・利用を開始した後も、ソフトウェアの継続的な更新が行われることが多くあります。このような場合、製品調達時点に入手した可視化データが最新の製品・システム・サービスなどの内容と一致しないと、セキュリティ管理に不整合が生じる可能性があります。そのため、「つかう側」では可視化データの継続的な内容保証が必要となります。さらに、「つかう側」において脆弱性管理がすでに行われている場合は数多くあるため、現行の脆弱性管理から可視化データを活用した脆弱性管理へのスムーズな移行手段の確保も必要となる可能性があります。

また、可視化データの対象となる製品のカスタマイズが「つかう側」で行われる場合があります。一部分の可視化データが「つかう側」のカスタマイズによって更新された場合に、製品全体として可視化データの責任範囲を明確にする方法も必要です。

■サプライチェーン上の調整

SBOMを含め製品のコンポーネントに関する情報は、製品ベンダにとって機密情報となることが多々あります。したがって、これらの情報は適切な機密保護手段を講じたうえで、特定の相手に限定して開示することが必要です。不注意でデータが漏洩すれば、サイバー攻撃に悪用される可能性があるため、厳重な管理が求められます。

まず、「つかう側」は活用を想定する可視化データの範囲を明確化することが求められます。そのうえで、必要な可視化データを入手するためには、サプライチェーンにおける合意形成が必要です。製品・シス

テム・サービスのサプライチェーンは多段階構成であることが一般的であり、サプライチェーンを通じて可視化データを「つくる側」と「つかう側」の間で、組織を超えた相互協力が必要となります。例えば、契約に基づいて、ソフトウェアを調達する場合には、契約書に可視化データに関する合意形成事項を記載していく方法も考えられます。

さらに、サプライチェーンにおいては製品の不具合に関する問合せや対応と同様に、可視化データの正確性を確認する方法や修正を依頼する方法も必要です。

■「可視化データ」がもたらす影響

可視化データの浸透によってセキュリティの透明性が高まると、従来は見えておらず対処することがなかった事象についても、対処の判断が求められるようになります。例えば、可視化データと脆弱性情報データベースの照合によって、既知の脆弱性を効率的かつ網羅的に自動確認できるようになる一方で、大量の脆弱性が検出され、脆弱性管理体制の対応能力を超えてしまう可能性を想定し、対処法を検討する必要があります。この際、照合の候補となる脆弱性情報データベースは世の中に多数存在するため、照合前に各々の脆弱性情報データベースの特性を把握し、照合の対象とする脆弱性情報データベースを選択しておく必要もあります。

同様に、可視化データの活用によって、各セキュリティ業務の実施方法を見直さなければならなくなるかもしれません。SBOMと外部の脆弱性データベースを用いて製品の脆弱性を管理する例ですと、

SBOMと外部の脆弱性データベースなどのマッチングによって得られる脆弱性の中には、製品でのコンポーネントの利用方法によっては攻撃リスクがないようなものも多く含まれることとなります。このような場合、脆弱性が製品へのどのような影響を及ぼすかを示すことができるVEX (Vulnerability Exploitability eXchange) を組み合わせることで、脆弱性対応の運用効率化を図れることもあります。

■その他

可視化データの活用は、従来の業務には含まれていないこと、各種ツールによる自動化を前提としていること、継続的なデータの更新が必要であることから、業務体制の見直しが求められます。特に、セキュリティ対策は一般的にIT部門が担当することが多いものの、多忙なIT部門に安易に一任せず、全社的な業務の見直しを必要があります。

また、「つくる側」では、業界特有の法規制やサプライチェーンモデルと可視化データの整合をとることが重要です。理論上は製品の隅々まで可視化データを作成することが可能ですが、現実的には製品の部品やその供給ベンダが多段階構成になっている場合、どの階層までデータを作成するのかが製品ごとに判断する必要があります。さらに、製品によっては構成の全体あるいは一部が非公開である場合があり、これらのデータの取り扱いについても検討が必要です。

おわりに

本稿では、「サプライチェーンセキュリ

ティリスク」に対処するための協調領域における取り組みや課題について紹介しました。現在、これらの課題に対処するための知見やユースケースを公開するために、コンソーシアムの参加事業者が自社の運用知見を持ち寄り、WGで活発に議論を行っています。議論を通じて、運用知見だけでなく現在のSBOMフォーマットの限界など、これまで見えてこなかった新たな課題も見え始めてきました。これらの知見は継続的にWebサイト上で発信していく予定です。

業界全体のサプライチェーンセキュリティリスク対策の向上のため、これからも多様な事業者による多角的な視点からの知見をコンソーシアムの活動を通じて広く公開していく予定です。

■参考文献

- (1) <https://www.st-consortium.org/>
- (2) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2024/02/16/240216b.html>



(左から) 熊崎 裕亮 / 山田 暁 / 佐藤 亮太

サプライチェーンセキュリティリスクへの対応には、技術的な取り組みだけでなく、事業者間の協調といった組織的な取り組みも不可欠です。私たちは、これら両面からアプローチし、サプライチェーンセキュリティの確保に取り組んでいきます。

◆問い合わせ先

NTT 社会情報研究所
企画担当
E-mail solab@ntt.com



可視化データ活用によるソフトウェア脆弱性管理

ソフトウェア脆弱性管理における可視化データの活用を促進するためには、活用イメージを具体化する必要があります。本稿では、組織内で実施される脆弱性管理の個々のアクションにおける可視化データの活用例を紹介します。

キーワード：#セキュリティ・トランススペアレンシー・コンソーシアム、#可視化データ、#SBOM

いのうえ あきみ
井上 陽水

NTTデータグループ

ソフトウェア脆弱性管理における実施事項

組織のソフトウェア脆弱性管理では「セキュリティ上の問題の有無に関する調査」「影響と対策の方向性の検討」「対策作業計画の策定」「対策の実施」の4つのアクションが発生します⁽¹⁾。

「セキュリティ上の問題の有無に関する調査」とは、入手した脆弱性情報について、情報システム上の脆弱性の有無や問題が発生する条件等の調査を実施することを指します。セキュリティ担当者は、公開された脆弱性情報を基に、該当する脆弱性を持つソフトウェア製品を使用する部署や情報システムの有無を確認し、対応が必要な箇所を洗い出します。この作業の一例として、セキュリティ担当者が脆弱性情報を提供する外部のサービス等を利用して収集した情報を基に、緊急対応を要するシステムがある場合は周知を行うケースがあります。この際、周知を確認したシステム担当者は、セキュリティ担当者に対して、脆弱性による影響の有無を報告し、報告を受けたセキュリティ担当者は、組織内のどこに脆弱性による影響があるかを特定し、次のアクションを実施します。

脆弱性情報は、組織内外で適切に共有しなければソフトウェアの利用者が適切な対策を実施できません。この脆弱性情報の共有については、可視化データを利用する例を後述します。

「影響と対策の方向性の検討」とは、問題個所が及ぼす影響を明確にし、修正方法や回避方法を検討することを指します。現在、ソフトウェア脆弱性は、報告件数が年々増加傾向にあり、2023年にNational

Vulnerability Database (NVD) で報告された脆弱性は28297件に上っています⁽²⁾。これは1日当たり約70件を超える脆弱性が報告されていることを指します。システム開発において、利用しているソフトウェアに発生した脆弱性はすべて消し込むことが理想ではあるものの、報告された脆弱性すべてに対して対処することは、対応負荷やコストの観点で現実的ではありません。そこで実際に脆弱性への対応を実施する際は、脆弱性がシステムや組織に与える影響度に依りて、対策の優先度付けを検討することも必要になります。これは、組織内で取り扱うソフトウェアや開発のスタイルを考慮して、組織のセキュリティポリシーの中であらかじめ優先度付けの指標を規定し、これを活用することが効果的です。

「対策作業計画の策定」では、対策作業を進める手順や期間について、計画を策定します。ここでは、費用や人員を勘案しつつ、対策実施に伴うサービス停止計画やテスト計画を検討します。

「対策作業計画の策定」で立てた計画を

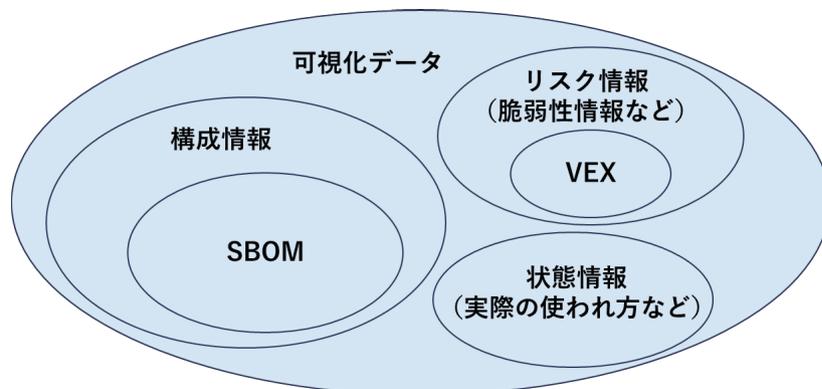
基に、「対策の実施」のアクションを行い、脆弱性対応の完了をめざします。セキュリティ担当者は、組織が「対策の実施」のアクションを実施したか確認することで、1つの脆弱性対応の完了判定を行うことができます。

可視化データを活用したソフトウェア脆弱性管理

ここでは、ソフトウェア脆弱性管理における可視化データの活用例として、可視化データの構成および可視化データを活用した脆弱性管理の一例を紹介します。

■可視化データの構成と脆弱性管理への活用

可視化データとは、ソフトウェア製品やシステムなどの構成を可視化したデータのことを指します。図1に示すように、可視化データには構成情報（ソフトウェア・ハードウェアの構成）、リスク情報（脆弱性情報など）、状態情報（実際の使われ方など）など広範囲の情報が含まれます⁽³⁾。



出典：<https://www.st-consortium.org/?download=1103&tmstv=1719377936>

図1 可視化データの構成

ここでは主に構成情報を示すフォーマットの1つであるSBOM (Software Bill of Materials) と脆弱性情報を取り扱うフォーマットの1つであるVEX (Vulnerability Exploitability eXchange) を対象に、可視化データを用いた脆弱性管理への活用事例を紹介します。

SBOMとは、ソフトウェア製品に含まれるコンポーネントとその関連情報のリストのことを指します。米国商務省のNTIA (国家電気通信情報局) では、SBOMの最小要素として、「サプライヤ名」「コンポーネント名」「コンポーネントのバージョン」「依存関係」「SBOMの作成者」「タイムスタンプ」「その他の一意な識別子」などの「データフィールド」と、SBOMを導入する組織が考慮すべきカテゴリである「自動化サポート」「プラクティスとプロセス」を定義しています^{(4),(5)}。

VEXは、ソフトウェアベンダやその他の関係者からユーザ企業へ「ソフトウェア製品が既知の脆弱性の影響を受けるか」といった情報を提供するための機械可読なセキュリティアドバイザリの1つです。米国CISA (サイバーセキュリティ・インフラストラクチャセキュリティ庁) では、VEXドキュメントにどのような情報を記載すべきか、最小要件を示しており、日本国内でもすでにVEXを用いた脆弱性管理の検討が進んでいます⁽⁶⁾。

前述のとおり、脆弱性対応管理の4つのアクションについて紹介しました。可視化データを脆弱性管理に活用するうえでは、その中でも特に「セキュリティ上の問題の有無に関する調査」「影響と対策の方向性の検討」に可視化データの要素が寄与することが期待されています。

経済産業省が公開している『ソフトウェア管理に向けたSBOMの導入に関する手引ver2.0 (案)』では、「脆弱性の特定」「脆弱性対応優先付け」「情報共有」「脆弱性対応」のプロセスが紹介されています⁽⁵⁾。ここで、「脆弱性の特定」はソフトウェアに含まれる脆弱性を特定することを、「脆弱性対応優先付け」は脆弱性を評価し対応の優先度付けを行うことを、「脆弱性の共有」

は脆弱性情報を組織内外へ共有することを、「脆弱性対応」は発生した脆弱性に何らかのかたちで対処することを指します。

■可視化データを基にした脆弱性の影響調査・分析

可視化データを脆弱性管理に活用するうえでは、「可視化データを基にした脆弱性の影響調査・分析を行う」「可視化データそのものを脆弱性情報の把握に用いる」の2つの観点が存在します。前者は、可視化データを「つかう側」が可視化データの要素の1つであるソフトウェアの構成情報を用いて「脆弱性の特定」プロセスを実施する流れを想定しています。後者は、可視化データに含まれた脆弱性情報そのものを、可視化データを「つかう側」が活用して「脆弱性対応優先付け」プロセスに必要な情報を収集することを想定しています。可視化データを活用するにあたっては、その組織においてどちらのユースケースが適しているか判断したうえで、活用方法の検討を実施することが効果的です。それぞれの関係を表に示します。

以下では、それぞれのケースにおいて、可視化データの要素をどのように活用できるか紹介します。

まずは「可視化データを基にした脆弱性の影響調査・分析を行う」ユースケースについてです。「脆弱性の特定」では、脆弱性の影響を受けるソフトウェアの名称やそのソフトウェアにおいて脆弱性の影響を受けるバージョンの情報を収集し、組織内で

当該ソフトウェアを使用していないか調査します。可視化データを活用して「脆弱性の特定」を行う場合は、可視化データの要素の1つであるSBOMなどのソフトウェア構成情報を用いて、収集した脆弱性情報との突合を行うことができます。

実際に組織内のセキュリティ担当者が実施する場合には、脆弱性情報を提供するサービスや脆弱性データベース、各種ソフトウェアベンダのサイトを参照し、脆弱性情報とSBOMに記載された情報とを機械的に突合する仕組みを構築することが効果的です。

セキュリティ担当者と、システム担当者による「可視化データを基にした脆弱性の影響調査・分析を行う」ケースにおける、ソフトウェア脆弱性管理の一連の流れの一例を図2に示します。

このうち、①～④が「脆弱性の特定」であり、⑤が「情報共有」、⑥が「脆弱性対応」のプロセスにあたります。また、③において多数の脆弱性が検出される場合に、④にて対応優先度の指標を設けて「脆弱性対応優先付け」を行い、⑤の対象を限定するようなケースも存在します。また、可視化データを活用するうえで重要なのは、⑥を実施すると、①で収集したソフトウェア構成情報も更新されている可能性がある点に留意することです。脆弱性対応の一例として、ソフトウェアコンポーネントのバージョンを変更することが挙げられます。この場合、①で収集した構成情報におけるバージョン

表 脆弱性管理のアクションと可視化データを用いたプロセスの例

ソフトウェア脆弱性管理における実施事項	可視化データを活用したソフトウェア脆弱性管理の例		
脆弱性管理のアクション	可視化データを用いたプロセスの例	各プロセスで用いる可視化データの例	可視化データの活用観点(ユースケース)の例
セキュリティ上の問題の有無に関する調査	脆弱性の特定	構成情報 (SBOM)	可視化データをもとにした脆弱性の影響調査・分析を行う
影響と対策の方向性の検討	脆弱性対応優先付け	脆弱性情報 (VEX) システム設定情報	可視化データそのものを脆弱性情報の把握に用いる
	情報共有	—	—
対策作業計画の策定	—	—	—
対策の実施	脆弱性対応	—	—

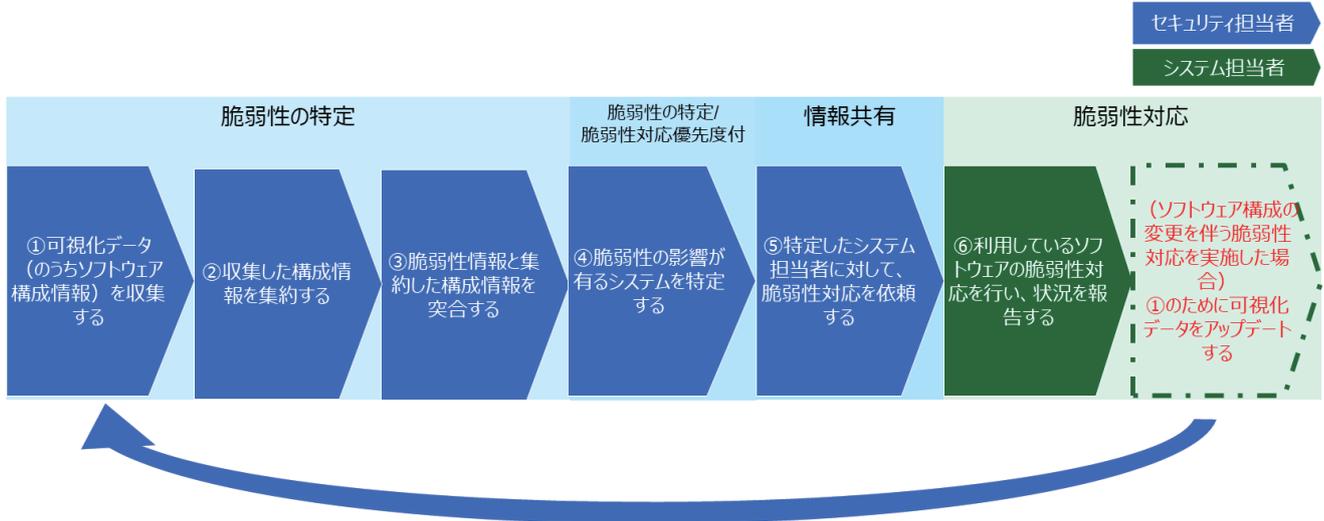


図2 「可視化データを基にした脆弱性の影響調査・分析を行う」ケースのソフトウェア脆弱性

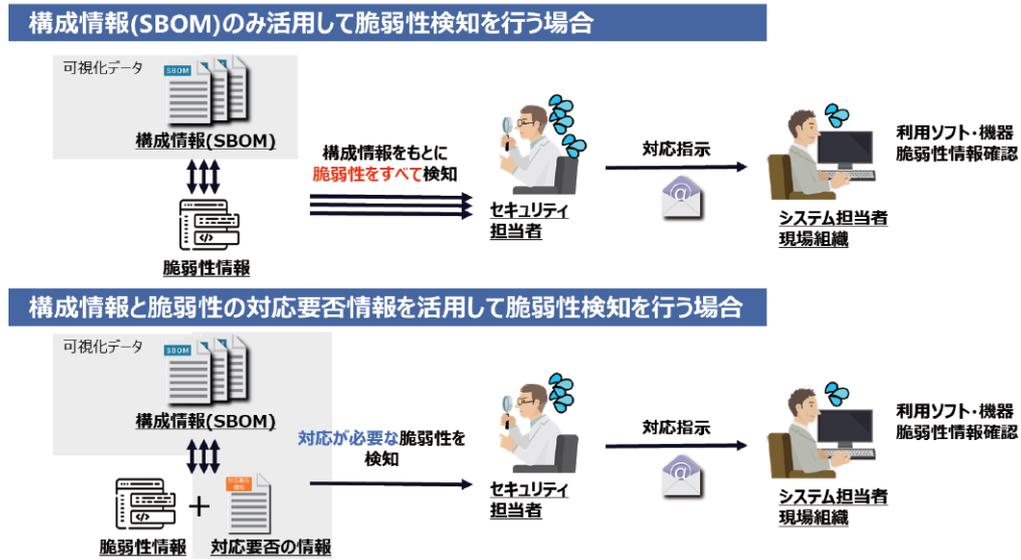


図3 脆弱性情報を可視化データとして用いるケース

情報と、⑥の後のソフトウェアバージョン情報が異なってしまう、今後の脆弱性対応が適切に行えない可能性があります。そのため、一度構成情報を収集・集約したとしても、ソフトウェア構成の変更に伴い構成情報自体もアップデートし続けることが重要です。

上記の流れを用いることで期待される効果として、セキュリティ担当者やシステム担当者による脆弱性の特定にかかる工数の削減や脆弱性残留リスクを低減する効果が挙げられます（経済産業省が実施した実証

では、SBOMを活用した脆弱性管理によって、従来の手動管理に比べて管理工数を70%程度削減した報告が挙げられています⁽⁷⁾。

■可視化データそのものをを用いた脆弱性情報の把握

次に、「可視化データそのものを脆弱性情報の把握に用いる」ユースケースについて紹介します（図3）。可視化データをこのユースケースに活用する場合は、「脆弱性対応優先付け」のプロセスへ寄与することが期待されます。

「脆弱性対応優先付け」では、システムのセキュリティ設定やアクセスコントロール機器のセキュリティ制御に加え、脆弱性情報も活用されます。ソフトウェア脆弱性は、特定の要件が満たされると脅威となるケースがほとんどです。この要件を確認する情報（設定や設計など）はシステム担当者やユーザが確認する必要があります。また、ソフトウェア製品によっては、脆弱性が見つかったとしても影響がない場合があります。その場合、ソフトウェ

ベンダが情報を公開し、利用者はそれを理解し適切に対処する必要があります。例えば、Log4Shell (CVE-2021-44228) のケースでは、Log4jの脆弱性情報が公開された後も、使用しているソフトウェア製品に影響があるかを判断する必要がありました。このような場合に、可視化データを用いてソフトウェア製品ごとの影響情報を流通させる仕組みが期待されています。

具体的には、製品ベンダがソフトウェア製品に含まれるソフトウェアコンポーネントの構成や、ソフトウェアコンポーネントに含まれる脆弱性がソフトウェア製品に与える影響を調査し、その調査結果を可視化データとして公開します。これにより、利用者は製品ベンダに確認することなく、影響の有無を把握できるようになります。一方、可視化データを活用しない場合、ソフトウェア利用者は脆弱性のあるソフトウェアコンポーネントがその製品に含まれるか、含まれる場合は影響があるかどうかを製品ベンダに確認する必要があります。

OSS (Open Source Software) の普及率が増加している現在、1つのソフトウェアに対して活用されるOSSコンポーネント数も増加しています。可視化データを用いた脆弱性管理を行う場合、使用されているソフトウェアコンポーネントが多ければ多いほど、脆弱性の検知数が増加することが懸念されます。このような状況で「可視化データを基にした脆弱性の影響調査・分析を行う」場合、利用しているソフトウェア製品で使われているソフトウェアコンポーネントの脆弱性は、本当に対処が必要なのか、1つひとつ検証すると膨大な手間がかかります。そこで、可視化データを用いて、製品ごとにソフトウェアコンポーネントの脆弱性に対する対応要否の情報を連携することで、効果的な脆弱性対応管理が実施できると考えられています。

■目的に応じた可視化データの要素ごとの企業間でのやり取り

ここまで紹介したとおり、可視化データを活用したソフトウェア脆弱性管理ではいくつもの情報を組み合わせることが想定されます。可視化データはそれらソフトウェ

ア脆弱性管理に有用な情報の組合せのサブセットであり、セキュリティ担当者は必要に応じて可視化データ以外の情報についても収集する必要があります。可視化データの収集においては、組織間で授受して脆弱性管理に活かす要素と、組織内で収集して脆弱性管理に活かす要素が存在します。

例えば、「脆弱性対応優先付け」で用いる可視化データのうち、ソフトウェアが稼働するシステム自体のセキュリティ設定やファイアウォール等のアクセスコントロール機器によるセキュリティ制御情報などは、攻撃者に情報が洩れることを避けるため、組織外への提供を避ける必要があります。したがって、ソフトウェアの受委託をする組織（企業）間での授受を想定せず、可視化データを使う側の組織内で収集・活用することが望ましいと考えられます。

一方で、「脆弱性対応優先付け」で用いる可視化データのうち、ソフトウェア製品ベンダが調査した脆弱性情報は、そのソフトウェアを利用する組織が自組織での影響調査を行うために必要な情報です。したがって、しかるべき方法で組織外に公開すべき情報となります。前述したVEXは、後者の情報にあたります。一例としてソフトウェアベンダが脆弱性データベースにVEXの情報を提供し、使う側は脆弱性データベースを介して情報を参照するというかたちが実際に検討されています⁽⁸⁾。

「脆弱性特定」で用いる可視化データのうち、SBOMのような情報は、サプライチェーンにおける脆弱性管理・責任範囲の確認の観点で、企業間で授受すべき情報です。一方で、SBOMを納品・公開した場合に発生する「ベンダ側の脆弱性確認稼働の増加」や「契約モデル」については、現在も検討が進んでおり、まだ統一的な方針はありません。そのため、仕入れ先と結んでいる契約や開発モデルに応じて、まずは自組織の中で可視化データを活用する体制を整えることが、ソフトウェア脆弱性管理の効率化に向けた第一歩であると考えます。

おわりに

現在、可視化データ、特にSBOMの活用について世界中で議論がなされています。また、実際にSBOMを作成する・管理するソリューションについても登場し始めています。一方で、ソフトウェア脆弱性管理の観点におけるサプライチェーンでのSBOMや可視化データの流通については、課題も多くあります。また、「脆弱性特定」のためにSBOMに記載されているべき情報の不足や、「脆弱性対応優先付け」のためにどのような指標を用いるべきかといった事項も検討が進んでいます。

■参考文献

- (1) <https://www.ipa.go.jp/security/guide/vuln/ug65p90000019by0-att/000058493.pdf>
- (2) <https://nvd.nist.gov/vuln/data-feeds>
- (3) <https://www.st-consortium.org/?download=1103&tmstv=1719377936>
- (4) https://www.ntia.doc.gov/files/ntia/publications/sbom_minimum_elements_report.pdf
- (5) <https://www.meti.go.jp/press/2024/04/20240426001/20240426001-2.pdf>
- (6) https://www.cisa.gov/sites/default/files/2023-01/VEX_Use_Cases_April2022.pdf
- (7) <https://www.meti.go.jp/press/2024/04/20240426001/20240426001-1.pdf>
- (8) https://www.meti.go.jp/medi_lib/report/2022FY/000372.pdf



井上 陽水

サプライチェーンセキュリティの強化に向けた可視化データ活用では、まず自組織でどのように可視化データを活用できそうか、個々の組織に合った運用を検討することが第一歩だと考えます。私たちも、引き続き検討を進めていきます。

◆問い合わせ先

NTTデータグループ
技術革新統括本部 Cloud&Infrastructure技術部
情報セキュリティ推進室
E-mail sbom@am.nttdata.co.jp



セキュリティ・トランスペアレンシー確保技術

可視化データの活用に向けたさまざまなステークホルダが寄せる期待と、活用が進んでいない実態を振り返りながら、課題の解決に向けた最新の研究動向と、NTT社会情報研究所が取り組んでいるセキュリティ・トランスペアレンシー確保技術について紹介します。

キーワード：#可視化データ、#SBOM、#LLM

和田 泰典
荒川 玲佳

NTT社会情報研究所

はじめに

国内外の政府動向に対し、サプライチェーン上の各事業者にはSBOM (Software Bill of Materials) を含む可視化データの提供や、セキュリティに関する対応が求められます。しかし、実際に対応を進めていくうえでは、実務面や技術面においてさまざまな課題があります。本稿では、事業者が各種制度に対応するうえで想定される課題や、可視化データの生成や活用における技術課題、可視化データの活用を広げいくためにNTT社会情報研究所で取り組んでいる技術について紹介します。

さまざまなステークホルダが寄せる期待

米国やEU、日本国内の制度化では、SBOMを含む可視化データの提供だけでなく、可視化データの運用管理や、可視化データを用いた脆弱性管理などを行うことにより、サプライチェーンセキュリティリスクを低減することが求められます。

しかし、サプライチェーンにおける各事業者から見た場合、整備された制度やガイドラインなどが求めている要件を、すぐにシステム運用などに反映できるわけではありません。例えば、可視化データを生成するためのさまざまなツールや技術が存在しており、適切なツール等を把握し選択する必要があります。また、それらの管理や運用の面における知見やベストプラクティスなどが必要となるでしょう。加えて、各国の制度やガイドライン⁽¹⁾などを踏まえると、次のような課題の解決が期待されていると

いえます。

まず、可視化データの提供における課題です。各事業者はさまざまな場面でSBOMの提供が求められますが、要求元によって必要とする情報の中身、データやファイルの形式などは異なるケースがあります。さらに後述するように、同じフォーマットであっても含まれる情報に差異があります。可視化データを生成する事業者は、これらの要求を満たせるツールを選定し、操作方法を習熟する必要があります。

次に、可視化データを用いた運用面に関する課題です。ガイドライン等によって一定期間はSBOMを管理することなどが規定されているほか、ソフトウェアの更新時などSBOMを更新する頻度についても決めて管理する必要があります。

可視化データを用いた脆弱性などのセキュリティリスク管理も課題となります。各国の制度では、可視化データを用いてセキュリティリスクを低減するだけでなく、セキュリティ要件へ適合することの認証、脆弱性への対処や情報開示などが求められます。そのため、事業者は可視化データを用いてセキュリティを証明する方法や開示内容、可視化データを用いて継続的にセキュリティを確保する運用方法を検討することが必要となります。

このように、これら課題を解決していくためには、可視化データをつくる側とつかう側の協力が重要となります。

さらに、SBOMによりソフトウェアの名称やバージョンが把握できるようになった一方で、2024年3月に顕在化したXZ UtilsというOSS (Open Source Software) の脆弱性は、攻撃者が時間をか

けて開発プロジェクトに侵入し、バックドアを仕込んでいたと報告されています⁽²⁾。これは可視化データを用いて不審なソフトウェアが混入していないかを確認するだけでなく、正規のソフトウェアであっても不正な動作をしていないかを確認するという新たな課題を示唆しています。

可視化データの活用が進んでいない実態

ソフトウェアサプライチェーンは複数の異なる組織を介して形成され、複雑さが増してきています。さらに開発の過程でOSSを再利用することが常態化しているため、ソフトウェアのセキュリティ脅威はより高まっています。可視化データは、ソフトウェアの透明性向上に寄与し、これらの脅威に対抗する手段として期待されているものの、現時点で十分に活用が進んでいないといえません。その原因として可視化データ自体にかかわる諸課題の存在が大きな障壁となっています。

可視化データのライフサイクルを、生成フェーズ、収集管理フェーズ、活用フェーズに大別した場合にそれぞれに課題が存在します。生成フェーズとはユーザが機器やシステムの依存関係やライセンス等の構成情報を管理するために、可視化データを生成する段階です。ここでは生成に使うSoftware Composition Analysis (SCA) ツールにかかわる課題があります。その1つが、SCAツールの仕様の違いによって可視化データに出力される文字列に表記揺れが発生する問題です。例えば、サプライヤの組織名として出力される文字列にSCA

ツールによって付与される“Person:”や“Organization:”の接頭辞の違いや、“組織名 inc”と“組織名 llc”の違いが該当します。この問題に対しては各社が検討を進めており、独自データベースによる照合方式などが実現されています⁽³⁾。また、SCAツールの解析性能に差がある問題もあります。これはツールによって解析内容に差がある問題で、具体的に私たちの調査データの一例を示すと、Docker Hubで取得したMongoDBのイメージファイルを検査した結果では、SCAツールのSyftでは依存関係パッケージが295件出力されたのに対して、Trivyは136件という違いがみられました。SCAツールの選定は、特に可視化した構成情報と目的に応じた使い分けが前提ではありますが、そもそも、米国NTIA（国家電気通信情報局）が発行するガイドラインに定められた最小要素⁽⁴⁾の要件を満たすSCAツールが存在していない可能性を示唆する調査結果もあります^{(5),(6)}。続いて収集管理フェーズは、生成された可視化データを収集および管理する段階です。ここでは、可視化データどうしの互換性に関連した統一的な扱いの難しさに課題があります。可視化データにはSPDXとCycloneDXの2つのフォーマットがあり、前者はライセンス情報の項目が多く、后者はセキュリティ情報の項目が多い仕様になっています。収集した可視化データを管理する際にどちらかのフォーマットに統一すると項目が不足するため、互換性を保つために網羅的なフォーマットモデルと統合基盤開発の検討が重要となります⁽⁷⁾。

最後の活用フェーズでは、可視化データを複数の異なる組織で共有する場合のセキュリティの課題です。すなわち、可視化データが共有の過程で不正に書き換えられていないかという完全性やアクセス制御の実現の課題です。可視化データの真正性を担保するために、ブロックチェーンにおけるVerifiable Credentialsモデルをサプライチェーンに応用した技術が検討されています⁽⁸⁾。

このように可視化データにかかわる課題

はフェーズによって異なり、可視化データ自体の表記揺れなどのようなマイクロな問題と、可視化データそのものを管理活用するマクロな問題が混在しています。これらは互いに独立した問題ではないため、一企業の努力や技術群では可視化データの浸透および活用の障壁となる課題を解決することは難しいです。また学術領域に目を向けても、可視化データの諸課題を整理して解決の方向性を論じる調査論文^{(9)~(11)}はいくつかありますが、実課題に落として技術提案をする文献はごく一部の状況です。コンソーシアムではこの諸課題に対し、各社が知見を共有して可視化データの普及に向けた技術意見交換を行っています。

可視化データを活用した セキュリティ運用の高度化

可視化データを活用することにより、大きく様変わりするセキュリティ運用業務の1つに、脆弱性管理があります。脆弱性管理業務は、脆弱性情報の収集、脆弱性の危険性の確認、自組織への影響の分析、といった流れで行われます⁽¹²⁾。

脆弱性管理では、自組織で使用しているハードウェアやソフトウェアの構成の把握がまず行われます。正確な構成把握により、該当する脆弱性を正確に把握できます。その方法の例として、管理簿による管理や、パッケージ管理システムなどがあります。しかし、システム更改等で構成は変化することや、パッケージ管理システムで管理されないソフトウェアもあることから、これらの方法には管理漏れの問題や、管理漏れを防ごうとすると管理稼働が増えてしまうといった問題があります。そこで、可視化データを導入し、正確かつ最新の構成情報を把握することで、この問題が解決できると考えられます。

しかし一方で、別の問題が発生することもあります。脆弱性管理業務において、脆弱性の影響を分析するには、複数の情報が用いられます。例えば、脆弱性の深刻度、攻撃コードの入手可否、実被害発生状

況、通信状況や起動状態などを含む環境情報があります。担当者はこれらを用いて影響を判断するため、脆弱性が正確に可視化され、従来見落としていた脆弱性も把握可能になると、従来と同じ考え方で脆弱性対応では管理しきれません。そこで、可視化データに関する研究開発と同時に、脆弱性対応に関する研究開発も必要となります。そのような技術について、2つ紹介します。

1番目は、機器で発生する通信動作を可視化することで、検出された脆弱性の中から優先的に対応すべきものを絞り込む技術です。この技術では、機器内で発生した通信について、その通信を行ったソフトウェア情報と紐付けた情報を生成できます。その結果、例えばソフトウェアXのバージョンYというソフトウェアが、グローバルIPアドレスZと通信した、といった情報が可視化されます。脆弱性の影響判定に用いる情報の1つに通信情報があることから、この情報を用いることで、リスクが高く優先的に対応する必要がある脆弱性について、通信先を基に絞り込むことができます。

2番目は、機器の起動時に実行されるプログラムを解析し可視化する技術です。この技術では、機器の起動時に実行されるプログラムや、定期実行されるプログラムを可視化することができます。脆弱性の影響判断に用いられる情報の中にはソフトウェアの起動有無があることから、この情報を基に、機器内に含まれるソフトウェアのうち、脆弱性検査時に優先的に対応すべきものを絞り込むことができます。

このように、可視化データを活用するうえでの問題点を解決する技術も開発することで、可視化データの活用を進めていきたいと考えています。

可視化データの利活用拡大に向けて取り組んでいること

現状では可視化データに記載されている機器やシステムの構成情報は、主に依存関係の把握や脆弱性管理のユースケースに活用されていますが、それは可視化データ単

体での活用例となっています。一方でサプライチェーン上の可視化データ集合に対象を広げると、例えば可視化データ間の構成情報の差分から不正な構成情報を特定したり、構成情報の依存関係と共起性の特徴などからSCAの性能が原因による構成情報の欠損を補完できたりするなどの利活用拡大が期待できます。ここでの構成情報の依存関係と共起性の特徴とは、例えば可視化データに依存関係パッケージDが記載されていて、パッケージDがパッケージのAとCを前提にした依存関係がある場合に、それらは共起関係があることを指しています。私たちは可視化データを大規模に管理する基盤をつくりながら、前述のような構成情報の特徴を解析してパターンをとらえることや、LLM（大規模言語モデル）の膨大な学習データを基に欠損したパッケージを補完推定するような技術検討も行っています。これらの取り組みは可視化データの構成情報そのものの価値を高め、今後の可視化データの普及に貢献するとともに透明性の高いソフトウェアサプライチェーンの実現につながると考えます。

そして、さらなるサプライチェーンセキュリティの強化のためには、前述のような透明性を高めてリスクを可視化するだけでなく、リスクを適切に対処して次の対策につなげるサイクルが重要になります。私たちの取り組みでは可視化データに加え、開発フェーズの段階でリスクを可視化する技術開発にも取り組んでおり、字句列解析で網羅的に検知するソースコード依存性解析技術を既に確立しています。現在は大規模言語モデルを活用したソースコード解析の技術検証を実施しており、字句列特徴では難しかった処理内容を意味的に解析することで新たなリスク検知技術の確立をめざしています⁽¹³⁾。また、検知したリスクに対処するための技術検討については、高度な知識を要する脆弱性分析やリスクの見積もりを自動化する検討を進めています。このタスクは脆弱性に関する自然言語とソースコード処理に横断した解析能力と属人的な対応経験や知見が絡み合っており、自動化には

高度な技術が必要となります。そこで、自然言語とコード解析に強い大規模言語モデルを積極的に活用し、タスクを小さな課題に分割して有効性を検証している段階です。実際に実施していた検証を取り上げると、脆弱性が発動する個所の修正であるか否かを大規模言語モデルが識別できるかを実験しました。検証の結果はゼロショットのプロンプトでも、ある程度高い識別精度は確認できたものの、脆弱性発動個所が多い脆弱性種別は精度が下がる傾向などが得られ、すべての脆弱性を同じように扱うことの難しさの課題が出てきました⁽¹⁴⁾。別の海外の研究で、脆弱性の自動修正を試みた研究でも修正個所が複数のファイルにわたって存在する場合などでは難しいことが実証されています⁽¹⁵⁾。こうした知見から、実課題を適切に分解し検証を行うことで、大規模言語モデルを活用してどこまでをドメイン特化できるかを見極めることが重要だと感じています。脆弱性に関連する領域では、特定の1つの技術がすべてを代替できるわけではなく、古典的な従来の手法の短所を補いつつ大規模言語モデルの特徴を組み合わせたいくつかの技術を、さらに互いに組み合わせさせて連鎖的に動作させたシステム設計が課題解決につながると考えます。そして、これらの検討と可視化データによる透明性の確保の技術検討は両輪で行うことにより、それぞれの技術における仕様や使い方に生まれる溝を小さくし、サプライチェーンのセキュリティを高める実用的な技術開発につながります。

今後の展望

セキュリティ・トランスパレンシー・コンソーシアムにおける「協調領域」にて議論を進めている社会課題を元に、「競争領域」としてNTT社会情報研究所で取り組んでいる研究活動について紹介しました。可視化データが、ソフトウェアを安心して利用できる技術となるよう、研究活動を進めていきます。

参考文献

- (1) <https://www.meti.go.jp/press/2024/04/20240426001/20240426001-1.pdf>
- (2) <https://gihyo.jp/article/2024/04/daily-linux-240402>
- (3) <https://yamory.io/news/patent-sbom>
- (4) <https://www.ntia.gov/report/2021/minimum-elements-software-bill-materials-sbom>
- (5) <https://ken.ieice.org/ken/paper/20240308GcCV/>
- (6) https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/index.php?active_action=repository_view_main_item_detail&page_id=13&block_id=8&item_id=228660&item_no=1
- (7) <https://www.nttdata.com/jp/ja/trends/data-insight/2023/0207/>
- (8) <https://journal.ntt.co.jp/article/23459>
- (9) <https://doi.org/10.1145/3597503.3623347>
- (10) <https://doi.org/10.1109/ICSE48619.2023.00219>
- (11) <https://doi.org/10.1145/3654442>
- (12) <https://www.ipa.go.jp/security/reports/technicalwatch/hjuojm0000006nd2-att/000071660.pdf>
- (13) <https://ken.ieice.org/ken/paper/202407231c3p/>
- (14) <https://ken.ieice.org/ken/paper/20240723PcdW/>
- (15) <https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/SP46215.2023.10179420>



(左から) 和田 泰典 / 荒川 玲佳

本稿では可視化データの利活用における課題と最新の研究動向の内容について紹介しました。サプライチェーンセキュリティの強化に向けてNTTグループの枠を超えたソリューションの創出に取り組んでいければと思います。

◆問い合わせ先

NTT社会情報研究所
企画担当
E-mail solab@ntt.com



主役登場

可視化データによる透明化時代 到来、そのときあなたは

鐘本 楊 Yo Kanemoto

NTT 社会情報研究所
主任研究員



■ソフトウェアサプライチェーンリスクの 具体例・経験談

CI/CD (Continuous Integration/Continuous Delivery) 技術、コンテナ技術の進化により、ソフトウェアの開発・利用はとても便利になりました。容易に試せるゆえに悪意あるコードに気付かずに利用してしまう可能性が高くなったと感じます。例えば、私はPython言語を活用してソフトウェア開発をしますが、パッケージ管理システムを利用してソフトウェアをインストールする際に、打ち間違いによって、間違ったパッケージをインストールしそうなことがありました。途中で気付いて中断し、セキュリティ検査を行いました。本日のウイルスと違って、コンピュータウイルスの感染は一瞬ですので、「やってしまった」とヒヤッとしました。今の事例は人のミスを誘う攻撃で、誰にでも起こり得ることと思います。よく利用されるソフトウェアに悪いコードを混入させる手口もあります。攻撃者はアカウントを乗っ取ったり、開発者の振りをしていたりして悪意あるコードを混入してきます。

私はソフトウェアの説明だけ見て、便利そうだから利用するという行為はリスクを伴うと感じています。そのため、ソフトウェアの中身が分からないという不透明さを抜本的に解決したいという思いで研究を始めました。

■可視化データ活用の現状と課題

SBOM (Software Bill of Materials) を含め、可視化データを活用したセキュリティ確保が機能するには、まず可視化データの品質の確保が一番重要と考えています。つまり、データが誤ってはいはその後

く分析はすべて信頼できないものとなります。そこで、可視化データの品質に関する課題をいくつか紹介します。

1番目は、可視化データの構成要素が足りていないことです。現状、ソフトウェアの名称や識別子に関する記載は9割程度と比較的記載するケースが多いですが、SBOMの作成者を記載するケースは3割程度と少ない状況です。将来的に可視化データの提供品質・提供者によって、信頼するに値するかを判断する場面がやってくると思いますので、作成者を含め、これらの情報が今後明確に記載されることに期待しています。

2番目は、可視化データの構成要素の表現が不適切なことや表記揺れがあることです。例えば、ソフトウェアのベンダ名を記載すべき個所にpipやmavenのようなソフトウェアのエコシステム名を記載しているというケースがありました。表記揺れも機械的な処理が難しくなりますので、脆弱性検査などの検知漏れにつながってしまいます。

3番目は網羅性です。利用するすべてのソフトウェアが可視化データに網羅されることが一番ですが、現実には可視化できていない隠れたソフトウェアも存在します。私たちはこれらの隠れた依存関係を「暗黙的依存関係」と呼んでいます。暗黙的依存関係にあるソフトウェアは脆弱性検査等で検査されないおそれがあるので、パッケージ情報だけでなく、コードベース関係性を検知・把握する技術を利用することが必要と考えます。

■SBOM活用の未来

上記の3つの課題も含めて、私は、可視

化データを通じてソフトウェアの透明性を評価し、確かな透明性を持つソフトウェアが明らかになる仕組みが必要ではないかと考えております。そのため、ソフトウェアに関する「情報の豊富さ」と「情報の正確さ」を評価する観点で研究しています⁽¹⁾。

「情報の豊富さ」とはソフトウェアの目的・動作等を十分に説明しているかという観点です。説明が十分でない場合、利用者は正しく仕組みを理解せずに利用することになり、セキュリティリスクにさらされます。

「情報の正確さ」とは提供される可視化データの情報が正確なものであるかという観点です。コンポーネント情報の意図的な消去や依存関係の深さが十分可視化されているかを利用者側で把握することが大事です。

可視化データを提供するのは人間です。良いソフトウェア・悪いソフトウェアがあるように、良い可視化データ・悪い可視化データがあると思っています。スーパーで色・つやを見てから果物を買ったり、幼児用の食品は特に食品成分表を見てから購入したりすることと同じように、将来的には、利用者が可視化データの品質を見比べ、そのうえでソフトウェアやシステムを利用するか判断する世の中になっていくと考えます。そうした透明性ある世の中でも、問題がないようにソフトウェア開発者やサービス提供者に今から働きかけていきたいと思っています。

■参考文献

(1) <http://id.nii.ac.jp/1001/00228550/>



自動車業界のゲームチェンジ：EV 業界を紐解く ー後編ー

本誌連載『自動車業界のゲームチェンジ：EV 業界を紐解くー前編ー』では、EV（電気自動車）の各国・地域のEV普及状況や、EVシフトに向けた国家政策の動向を概説しました。後編では、EV 業界の業界構造というミクロ的な動向に着目し、まず第1に、EV 製品のプレイヤーの顔ぶれや、メジャープレイヤーの戦略上の強み、EVシフトに向けた各プレイヤーの事業戦略を概説します。第2に、EVの次世代技術の動向について展望します。



EVシフトで塗り替わる自動車業界の勢力図

最初に、グローバルなEV（電気自動車）トレンドを牽引している主なプレイヤーは誰なのかをみてみましょう。

表1は、プレイヤー別に2023年のBEV（Battery Electric Vehicle：バッテリー式電気自動車）の世界販売台数と販売シェアを示したものです。販売台数・シェアともにトップの座を獲得しているのは、米・テスラで、同社の販売台数は175.3万台、販売シェアは19.3%となっています。第2位は、中国・比亞迪（BYD）、販売台数は145.2万台、販売シェアは16.0%と、米・テスラと

中国・BYDでBEV販売シェアの3割以上を占めています。

EV販売トレンドの大きな特徴は、BEV市場の拡大トレンドに乗って、BYDを筆頭とする新興の中国メーカーが存在感を高めていることです。2023年におけるBEVの世界販売台数の上位10社のうち4社が中国の自動車メーカー〔BYD、広州汽車、浙江吉利控股集团（Geely）、上海汽車（SAIC）〕となっています。また、傘下に中国・上汽通用五菱汽車を有する米General Motors（GM）グループも4位に入っています。

その一方で、ガソリン車で大きな存在感を発揮していた日本メーカーについては、仏・ルノー・日産自動車・三菱自動車の日仏3

社連合（アライアンス）が10位に食い込むのがやっとな状況であり、BEV販売における日本メーカーの存在感は非常に小さいことがみてとれます。

総じて、現在のBEV販売は、米・テスラと中国・BYDに代表される新興の中国メーカーが牽引しており、ガソリン車とはその顔ぶれがガラッと変わっている状況です。

BEVメジャープレイヤーの強み

それでは、現在のBEV販売の2大巨頭である米・テスラと中国・BYDはなぜこれほどまでにBEV業界で強い競争力を持つ

表1 主要プレイヤーのBEVの世界販売台数・販売シェア上位ランキング（2021年→2023年）

順位	2021年			2023年		
	自動車メーカー	販売台数 (万台)	販売シェア (%)	自動車メーカー	販売台数 (万台)	販売シェア (%)
1	米・Tesla（テスラ）	88.3	20.3	米・Tesla（テスラ）	175.3	19.3
2	米・GMグループ	50.2	11.5	中国・比亞迪（BYD）	145.2	16.0
3	ドイツ・VWグループ	42.8	9.8	ドイツ・VWグループ	73.1	8.0
4	中国・比亞迪（BYD）	31.8	7.3	米・GMグループ	60.4	6.6
5	韓国・現代自動車グループ	22.2	5.1	中国・広州汽車（GAC）	47.7	5.2
6	ルノー・日産自動車・三菱自動車	21.2	4.9	中国・浙江吉利控股集团（Geely）	47.5	5.2
7	欧州・ステランティス	18.2	4.2	韓国・現代自動車グループ	39.0	4.3
8	中国・上海汽車（SAIC）	13.7	3.1	ドイツ・BMW	36.5	4.0
9	中国・長城汽車（Great Wall）	13.4	3.1	中国・上海汽車（SAIC）	30.5	3.4
10	ドイツ・BMW	12.0	2.8	ルノー・日産自動車・三菱自動車	28.9	3.2

出典：各種情報を基に情報通信総合研究所作成

ているのでしょうか。ここでは、2社の競争力の源泉を展望します。

■米・テスラの事業戦略と強み

テスラ社は、世界のBEV販売のリーディングカンパニーですが、現在世界でもっとも売れているBEVは、同社の「モデル3」という車種です。「モデル3」は、2017年7月に米国本土での納車が開始されました。当初は、生産体制が整わず、販売は低迷していましたが、2018年以降に生産体制が整備されてからは、その販売数を飛躍的に増加させ、欧米のプレミアムセダン市場（アウディA4、BMW3シリーズ、メルセデス・ベンツCクラス等）を圧巻することになりました。2020年3月には、「モデル3」に続く新型BEV「モデルY」（ミッドサイズSUV）を発売し、ドイツ市場や中国市場でも圧倒的な販売数を記録しています。

同社のBEVはその革新的なデザイン性もさることながら、BEV製品としての機能が非常に優れている点が強みです。例えば、航続距離で見ると、2022年モデルの「モデル3」の航続距離は最長567 km、フラッグシップモデルである「モデルS」は最長652 kmであり、BEVの弱点であった航続距離の短さを克服しています*1。これは日産のBEVである初代リーフの航続距離が200 kmであることと比較すると明らかに高い性能といえるでしょう。

航続距離とバッテリーの容量の比率を示す電費性能（同じバッテリー容量でどれほど長い距離を走行させることができるかを示す指標）も非常に高く、同社のBEVはより小さいバッテリー容量でより長い距離を走行できるという強みがあります。充電性能については、「モデル3」では充電残量10%から80%まで充電するのに最短20分程度で充電完了させることが可能です。

加速性能については、テスラは「遅い車はつくらない」という方針で、「モデルY」ではポルシェ911に匹敵する強烈な運動性能を誇っています。

このようにテスラ社のBEVは、その革新的なデザイン性と機能性とを両立させていることに強みがありますが、それを可能としているのは、同社がバッテリーの独自製造をはじめとして、専用の急速充電ネットワークの構築など、BEVに関連するほぼすべてのテクノロジーを完全に内製化している

点にあります。同社は、BEV製品の部材調達、開発から生産、販売までのプロセスをすべて1社で統合した「垂直統合モデル」で事業を展開していることが強みとなっています*2。

さらに、テスラのBEVの強みはそのデザインや機能性だけにとどまりません。同社は、EVと自動運転との融合を念頭におきながらBEVを市場投入しています。テスラは自動運転BEVをいち早く完成させるために、自動運転に必要となるソフトウェア部分を自社開発するのみならず、自動運転システムを動作させる演算チップやスーパーコンピュータなども自社で設計・開発しています。また、世界中のテスラのBEV車から大量のデータを収集し、その大量データをディープラーニングによって解析しながら最新の自動運転システムをアップデートしながらテスラBEV車へ配布しています。

■中国・BYDの事業戦略と強み

1995年に電池メーカーとして創業したBYDは、2003年に倒産した規模の小さい国営自動車メーカーを買収して自動車事業に参入しました。同社は、バッテリーメーカーとしての強みを活かして早期からBEVの研究開発に取り組み、2022年3月には内燃機関車の生産を終了してNEV（New Energy Vehicle：BEV、PHEV、FCVを総称する中国独自の用語）に注力する方針を表明しました。同社は現在、（前編で述べた）中国政府の国家的な後押しもあり、世界最大のNEVメーカーとして君臨するほどの急成長を遂げています。

同社のBEVの最大の強みは、自社でバッテリーを内製し、大量生産することができる点にあります。具体的には、同社の最新のバッテリーセルである「Blade Battery」を乗用自動車だけではなく、バスなどの商用車を含めたあらゆる車種に搭載することによってBEV生産の量産コストを引き下げるといった戦略を採っています。つまり、BYDは、元来有していたバッテリー事業でのアセットを起点に、スケールメリットを創出しながら、垂直統合型モデルでBEV事業を展開しています。

このように現在のBEV販売の両雄である米・テスラ社、中国・BYD社は、BEVの心臓部ともいえるバッテリーなどのBEV基幹部品を自社で内製化し、低コスト化する

ことで競争力を創出しています*3。

本格化する異業種のBEV事業参入

前述したとおり、現在のBEV販売は、米・テスラ、中国・BYDに代表されるように、垂直統合型を志向するプレイヤーが競争優位になっていますが、最近では、水平分業型の事業モデルを採りながらBEV業界へ参入する異業種プレイヤーも登場しています。

異業種プレイヤーによるBEV事業への参入で注目されているのが、通信機器大手の中国・華為技術（ファーウェイ）と、スマートフォン大手の同・小米（シャオミ）です。この2社の事業戦略の特徴は、BEV車両の製造は（自社以外の外部の）自動車メーカーに委託し、その代わりに先進運転支援システム（ADAS：Advanced Driver-Assistance Systems）や、自動運転システム、スマートフォンとのOS（基本ソフト）の共通化、連携等のソフトウェア領域でのソリューションを提供している点にあります。

ファーウェイは、国内の自動車メーカーとのブランド共同運営にも力を入れており、2023年後半に、同社が手掛けるブランドからNEVを相次ぎ発売しました。中でも同年9月に発売した「問屋（AITO）」ブランド〔ファーウェイと中堅自動車メーカーの中国・賽力斯集団（SERES）が運営するブランド〕のSUV「M7」は同年11月には納車台数が1万5000台となりました。そのほかにも、2023年12月末には旗艦SUVとなる「M9」の発売も開始するなど、国内の自動車メーカーとのブランド共同運営を行いなが

*1 ガソリン車の航続距離は、ガソリン満タンの場合、軽自動車でも500~600 km走行可能、ハイブリッド車の場合は1000 km程度です。

*2 テスラ社は、もともと、2017年2月、テスラモーターズという社名を現在のテスラに変更しています。その前年の2016年には太陽光パネル事業のベンチャー企業であるソーラーシティ社を買収し、次世代型ソーラーパネルの開発・生産や蓄電池ビジネスにも参入しています。その意味で、テスラ社はBEVメーカーにとどまらず、「総合エネルギー企業」としての顔も持ち合わせているといえます。また最近では自動運転の技術開発やシステムの開発にも注力しており「テック企業」としての顔も持ち合わせています。

*3 中国・浙江吉利控股集团（Geely）も電池や電動アクスル、半導体の内製化を加速させ、垂直統合型ビジネスを展開しています。



表2 国内自動車メーカー3社のEV投入計画

トヨタ	<ul style="list-style-type: none"> 2026年までにグローバルでBEVの新モデルを10車種投入し、年間販売台数を150万台まで増産 2030年までにトヨタと「レクサス」ブランドで30車種のBEVモデルをグローバルに展開し、年間350万台を生産
ホンダ	<ul style="list-style-type: none"> 2040年までに新車販売のすべてをBEVとFCEVに 中国市場においては、2027年までに10車種のBEVを投入（2024年は3車種を投入予定）し、2035年までにBEVの販売比率を100% 日本市場においては、2026年までに新たにBEV4機種を投入
日産	<ul style="list-style-type: none"> 2030年までに、19車種のBEVを含む27車種の電動車を投入 欧州市場では、2026年における電動車の販売比率を98%（当初予定の75%から目標を前倒し）まで高め、2030年までには、投入する車種をすべてBEVにする 日本市場では、2026年度における電動車の販売比率を58%

出典：各種情報を基に情報通信総合研究所作成

らNEVを相次ぎ発売しています。ファウウェイは、これらのNEVに電動パワートレインや、ADASセンサのほか、独自OSである「HarmonyOS」を提供しています。

シャオミは、2024年3月末に同社初のBEV「SU7」の販売を開始しました。3月28日の販売初日、予約開始後27分で予定台数は完売、追加販売、追加生産も決まるなど、非常に好調な出だしとなっています。今後のBEV業界は、垂直統合を強みとする現メジャープレイヤー（米・テスラ、中国・BYDなど）に対して、異業種が水平分業型の事業モデルで挑戦する競争構造となりそうです。

また最近では、異業種プレイヤーと自動車メーカーとが提携し、EV共同開発などを行う事例もみられます。ソニーグループとホンダは、2022年9月、EVの販売とモビリティ向けサービスの提供を行う新たな共同出資会社を設立し、EVの共同開発を推進しています。直近では2024年1月、同社は生成AI（人工知能）を使った対話型システム（AIと会話することで車に指示を送れるようにするシステム）の開発で米マイクロソフトとの提携を発表し、同社が開発中のBEV「AFEELA（アフィーラ）」に搭載する方針です。同社は、ADASへのAI活用や、AR（拡張現実）を活用したエンタテインメント性の向上も推進していくことも明らかにしています。

また、独・フォルクスワーゲン（VW）もAI開発の米セレンスと提携し、生成AI「Chat GPT」のEV車への搭載を発表しました。

今後、生成AIやAR（拡張現実）などの最新テクノロジーとEVとの融合がどのように進んでいくのかは注目点の1つといえる

でしょう。

日本メーカーのEV戦略

ここまで述べたとおり、BEV業界においては、エンジン車メーカーに代わる新たな新興プレイヤーが台頭していますが、国内の自動車メーカーは世界的なEVシフトのトレンドに対してどのような戦略を描いているのでしょうか。また各社の戦略にはどのような特徴がみられるのでしょうか。

ここでは、日本の代表的な自動車メーカーであるトヨタ、ホンダ、日産のEV戦略の特徴を展望します（表2）。

■トヨタのEV戦略

自動車業界の世界最大手のトヨタのEV戦略の大きな特徴は、CO₂排出削減の観点から主力のHEV（ハイブリッド車）を筆頭に、BEVやPHEV（プラグインハイブリッド車）、FCEV（燃料電池車）、そしてガソリンの代わりに水素そのものを燃料として使用する水素エンジン車など幅広い開発を進める中で、パワートレインの電動化を推進するという全方位での「マルチパスウェイ」戦略を掲げていることです。

トヨタはBEVに対してはやや消極的で、2023年のグローバルでのBEV販売台数は10万4018台（うち国内販売台数は2929台）で、同年の米・テスラの販売数（175.3万台）の10分の1以下の水準です。

トヨタは、今後、2026年までにグローバルでBEVの新モデルを10車種投入し、年間販売台数を150万台まで増やす計画です。また、2030年までにトヨタと「レクサス」ブランドで30車種のBEVモデルをグローバルに展開し、年間350万台まで生産する

目標が掲げられています。

また、トヨタは、HEV、PHEVへの搭載を前提とした小型エンジンの開発を進めており、BEV一辺倒ではなく、HEV、PHEV車の開発も引き続き注力していく方針を示しています。

■ホンダのEV戦略

日本の自動車メーカーで唯一、「脱エンジン車」を宣言しているのがホンダです。ホンダは、2040年までに新車販売のすべてをBEVとFCEVにするという強気の目標を掲げており、日系メーカーで唯一、世界販売の100%をZEV（ゼロエミッション車）とするメーカーです。特に中国市場においてBEVに注力しており、中国市場においては、2027年までに10車種のBEVを投入（2024年は3車種を投入予定）し、2035年までにBEVの販売比率を（グローバル市場よりも5年早く）100%にすることをめざしています。

ホンダは、この目標の実現に向けて、2030年までに30車種のBEVをグローバル市場に投入し、年間200万台超を生産する計画です（2022年の同社のグローバルBEV販売台数は約2万7000台）。日本市場については、軽自動車からBEV化を進めていく方針です。

■日産のEV戦略

日産自動車は他社に先駆けてEVの量産に取り組んできたメーカーです。

同社は、2023年2月に電動化の長期ビジョン「Nissan Ambition 2030」を公表し、BEVとHEV（「e-power」）の2本柱で電動化を推進していく方針を掲げています。具体的には、2030年までに、19車種のBEVを含む27車種の電動車を投入することが目標とされています。そのうち、（EVシフト

が進む) 欧州では2026年における電動車の販売比率を98% (当初予定の75%から目標を前倒し) まで高め、2030年までには、投入する車種をすべてBEVにする予定となっています。日本市場では、2026年度における電動車の販売比率を58%としています。

EVを支える次世代技術

EV開発の最前線では、航続距離の延長、コストダウン、バッテリーの長寿命化、環境配慮など、さまざまな課題を解消して、より魅力的な車を供給すべく技術革新が進んでいます。

ここでは、次世代技術として注目を集める、バッテリー、新たな動力源である電動アクスル、複雑な車体構成部品を一体成形するギガキャストを紹介します。

■バッテリー (車載電池)

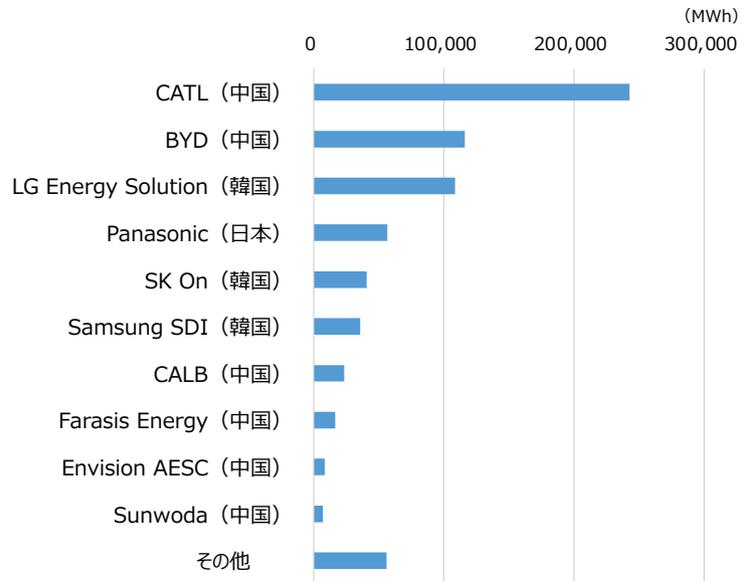
バッテリー (車載電池) はEVのコア部品であり、EVの心臓部ともいえる部材です。エンジン車と異なり、充電に時間を要するEVでは、充電容量と重量からなる航続距離の延長と充電時間短縮、そしてこれらの要素とコストとのバランスが課題となりますが、近年ではそのような課題解決に向けた技術開発が進んでいます。

バッテリー生産を巡っては、EV黎明期には日本のバッテリーメーカーが世界シェアの半分以上を占めていましたが*4、近年は原材料から完成車までのサプライチェーンを拡充しているCATL、BYD、LGエナジーソリューションといった中国および韓国メーカーが躍進しています (図1)。

バッテリーの基本構成は、正極材、負極材、その間の電解質の3つで、黒鉛系の負極材が主流となっているため、技術開発の焦点は主に正極材と電解質の分野です (表3)。

EVには、エネルギー密度が高く、比較的小型のバッテリーでも必要な航続距離を確保できる三元系リチウムイオン電池 (NCM) が多く採用されてきました。ところが、NCMは、正極にニッケルやコバルトとい

*4 2014年の車載バッテリー市場では、パナソニックが市場シェア38%で首位、NECと日産の合併会社であったAESCが同23%で2位、三菱・GSユアサも5位にランクインしていました。



出典: Statista (EV-Volumes.com; Visual Capitalist) を基に情報通信総合研究所作成

図1 車載電池の生産容量ランキング (2023年)

表3 バッテリー技術の類型と特徴

	三元系リチウムイオン電池 (NCM)	リン酸鉄リチウムイオン電池 (LFP)	全固体電池
正極材	ニッケル・コバルト・マンガン酸リチウム	リン酸鉄リチウム	ニッケル・コバルト・マンガン酸リチウムなど
負極材	黒鉛など	黒鉛など	黒鉛など
電解質	液体	液体	固体 (硫化物系、結晶物系など)
強み	高容量 (航続距離: 400~700 km) 低温時の安定出力	低コスト (NCM比3割程度安価) 長寿命	高容量 (航続距離: 1200 km) 短時間充電 (10分程度) 安全性
弱み	レアメタル使用 (高価, 地政学リスク) 安全性 (発火事故) 短寿命	低容量 (航続距離: 300~500 km) 低温時の出力低下	技術開発の途上 難加工 製造設備への新規投資が必要

出典: 各種情報を基に情報通信総合研究所作成

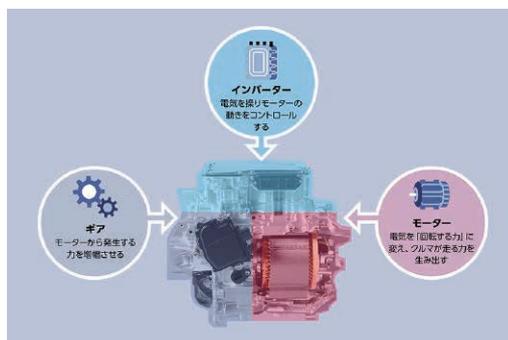
たレアメタルを使用するため、高コストであり、充放電の繰り返しの弱さという弱点があります。近年は、レアメタルの使用が少ないリン酸鉄リチウムを正極材に用いる、リン酸鉄リチウムイオン電池 (LFP) を採用するEVも増えており、中国国内で販売されたEVにおけるLFPシェアは7割に及んでいます。電極の改良や体積利用率の向上 (単位体積当りに搭載する電池セル数を増加させる技術) など、LFPであっても十分な航続距離を確保しつつ、NCMと比較して3割程度安価な価格設定が可能となっています。

LFPのシェア拡大はレアメタルを巡る地政学の視点からもインパクトが大きいです。例えば、ニッケル生産量で世界の5割を占めるインドネシアでは、2020年に未加工ニッケルの輸出を禁止しました。これに伴い、NCMの増産を志向したCATLやLGエナジーソリューション等が、2021年から2022年にかけてニッケル精錬やバッテリー製造に関する投資を表明し、インドネシア国内でEV製造のサプライチェーン充実が期待されてきました。しかしながら、LFPシフトなどを背景とする近年のEV向けニッケルの需要低迷を受け、2024年6月には、独・



電動アスル (eAxle)

- 電気自動車 (BEV) などモータを主動力とするクルマが「走る」ために必要な**主要部品を1つにまとめ、パッケージ化したもの**
- 主にギア、モータ、インバータといった部品から構成される



電動アスル (eAxle) の用途

- BEV, FCEVの前輪駆動では、eAxleをクルマのフロント (前方部分) に搭載し、クルマを走行させる
- リア (後方部分) にも、eAxleを搭載すれば4輪駆動 (4WD) にすることが可能



出典: アイシン社 HP情報 (<https://www.aisin.com/jp/aitthink/innovation/blog/005809.html>) を基に情報通信総合研究所作成

図2 電動アスル

化学大手BASFと仏・鋳業大手エラメットが精錬所の投資計画を中止すると発表しました⁽⁴⁾。ほかにも、埋蔵量豊富なナトリウムを正極材に用いるナトリウムイオン電池 (NIB) の実用化によってリチウムの使用量削減が期待されています^{*5}。バッテリー技術の進展によるレアメタル需要の縮小は、今後も各国の産業戦略と企業の資源確保を巡る思惑に影響を及ぼすでしょう。

日本のバッテリー業界の再興につながる技術として期待されるのが、硫化物などの固体系電解質を用いた「全固体電池」です。固体系電解質中ではイオンが速く動けるため、全固体電池は、従来の液体系電解質を用いた電池と比較して、充電時間の短縮、航続距離の拡大、高出力化が可能です。加えて、高温・高電圧に強いいため、安定性が高いという特徴も有します。トヨタ自動車は、耐久性の技術課題が解消できたため、航続距離：1200 km以上、急速充電時間：10分以下という高水準なバッテリーの2027～28年実用化をめざして量産化技術を開発していく方針です⁽⁵⁾⁽⁶⁾。全固体電池の登場によってEV向けバッテリー業界にどのようなゲームチェンジが起こるのか注目点です。

■電動アスル

電動アスルは、動力源のモータ、モータからの力を増幅させるギア、モータの動きをコントロールするインバータなどをモジュール化したもので、内燃機関車の「エンジン+トランスミッション」に相当するEV駆動の基幹部品です (図2)。

電動アスルは、複雑な駆動系部品を従来の2分の1以下のサイズの小型軽量なパッケージに納めることができるという利点があります。エンジンの動力を頑強なシャフト経由で車輪に伝動していた従来の駆動システムと比較して、EVでは小型の電動アスルをケーブルで接続すれば駆動力が得られるため、前輪駆動、後輪駆動、四輪駆動のレイアウトや車内空間デザインの自由度が向上します。また、軽量化により、電費の改善も図ることが可能となります。

電動アスル市場では、異業種や新興メーカーの参入が相次ぎ、市場競争が激化しています。モータ製造に強みを有するNidecは、2019年に世界で初めて電動アスルの量産を開始し、2030年の世界シェア45%を目標に事業拡大を進めています。ファーウェイなどの中国メーカーも、自社電動アスルの内製化だけでなく、海外市場への自社部品の供給を志向しています。

モータのレアアース使用削減^{*6}、インバータのSiCパワーデバイスシフト^{*7}といった各構成部品の技術革新が進む中、電動アスルにおける技術開発の大きな争点は、「Xin1」と称されるモジュール化の進展です。「モータ」「ギア」「インバータ」の主要3部品に加えて、直流電圧を変圧するDC-DCコンバータやバッテリーの状態を監視・制御する電池管理システムなどを1つのモジュールとすることで、車体内の部品接続に用いるケーブルやワイヤハーネス等

を減らす取り組みです。モジュール化によって、一体化される部品点数が増えるほど、小型化と軽量化のメリットは大きくなり、部品の共通化に伴うコストダウン効果も期待されます^{*8}。従来、自動車メーカーは系列部品メーカーと駆動系部品のセッティングをすり合わせることで、加速や乗り心地といった車種ごとの特徴を出してきました。異業種の参入も相次ぐ電動アスルのモジュール化が進捗し、既製品から駆動部品を選択できるようになると、自動車開発の体制が大きく変わるかもしれません。

■ギガキャスト

ギガキャストとは、大型のダイカストマシンを用いてアルミダイカスト製大型部品を成型する技術で、テスラが2020年に主力EVのアンダーボディに採用して注目を集めています。

中国のEVメーカーは、EVの生産工程にギガキャストを導入していますが、日系メーカーでも、トヨタが2026年、日産が2027年度から、ホンダが2028年以降にそれぞれアン

*5 CATLは2023年4月、ナトリウムイオン電池が中国の自動車メーカーChery AutomobileのEVに採用されたことを公表しました。

*6 ネオジムなどのレアアースを基にした永久磁石の使用量を減らす取り組みが進んでいます。

*7 インバータに用いるSiパワー半導体をSiCパワー半導体に変更することで、高電圧、高温への耐久性向上、エネルギー損失の減少、システム全体の小型化などにより航続距離の延長が期待されています。

*8 主要3部品を一体化したものは3in1、5つの部品を一体化した場合は5in1と呼ばれ、BYDでは8in1電動アスルの採用例もあります。

ダーボディへ採用する計画となっています。

ギガキャストを採用することによって、従来100点前後の鋼板プレス部品を溶接して製造していたアンダーボディをアルミニウム合金で一体成型できるため、軽量化による航続距離の延長や、高い強度・剛性による走行性能の向上が期待されています。加えて、製造工程や部品点数の削減によるコストダウンも見込まれています。トヨタの発表では、一体成型した大型部品を自走可能な車体とし、次工程へ移動させる自走生産を組み合わせることで、工程と工場投資の半減をめざとしています⁽⁵⁾。

他方、ギガキャストには、事故破損時に修理が難しい、金型の大型化により多様な車種を展開するのが難しい、完成車メーカーが大型部品を自社内で成型するためサプライチェーンへの影響が大きいという課題もあります。このうち、修理への対応については、衝突時に破損しやすい部分に緩衝部品を導入することで改善が試みられています。また、多品種少量生産への応用については、プラットフォームの共通化に加えて、型内の金属流体の最適化による金型の小型化や金型交換作業の短時間化に関する技術開発が進んでいます。サプライチェーンの変化については、自動車用ボルトなどを製造するメイデーがドイツの大手ネジメーカーと提携し、アルミボディの接合に対応したネジを共同開発することが新たなビジネスチャンスをとらえた事例として報道されました⁽⁷⁾。ギガキャストがアンダーボディ製造の標準技術になると、鋼材メーカーやプレス加工を担う部品メーカーへのネガティブな影響は避けられないため、自動車部品メーカーも次世代技術に対応した技術・商品開発を加速させることが求められています。

今後のEV進化の見通し

本連載では、グローバルレベルで進展するEV業界のマクロトレンドや主要国・地域のEVシフト政策、EVプレイヤーの事業戦略、EVを支える次世代技術の開発動向等について概説してきました。

本連載の最後に、EVがさらにどのような進化を遂げていくのか、その将来像について筆者なりの2つの注目ポイントを提示

します。

第1の注目点は、EVと自動運転との融合による自動運転EVへの進化です。自動運転EVとは、自動運転技術を搭載したEVのことです。EVと自動運転は、動力源のモータの電気制御が容易であるというEVの特性やEVのバッテリーを各種センサなどの電源として利用することができることなどから、エンジン車と比べて自動運転技術との親和性が高く、「自動運転技術はEVでこそ真価が発揮される」といっても過言ではありません。自動運転EVをめぐるのは前述した米・テスラをはじめ、中国・小鹏汽車（シャオペン）、百度（バイドゥ）なども開発を進めており、今後、「EV」と「自動運転」という2つの技術セグメントが組み合わせることで、どのような自動運転EVが社会実装されていくのかが注目点です。EVと自動運転技術が同時に進化していくことで、エネルギー問題や交通事故の低減、環境への負荷軽減、移動の利便性向上など、さまざまな社会課題への対応が期待できるでしょう。

第2はソフトウェアによる継続的なEV機能の進化です。従来のエンジン車の生産は、ハードウェアを主体にその性能の範囲内でソフトウェアの性能を規定してきましたが、反対に、ソフトウェアによって自動車全体を定義してから、最適なハードを選択するという手法はSDV（Software Defined Vehicle）と呼ばれます。例えば、テスラは、ECU（Electronic Control Unit）による中央集中型アーキテクチャを採用し、OTA（Over The Air）と呼ぶネットワーク経由によるソフトウェアの保守やアップグレードを可能にし、ソフトウェアによってEVの機能を強化させるソリューション機能も提供しています。今後、SDVが主流となれば、EVの機能性をソフトウェアの更新によってアップデートし充実させることが可能となるでしょう。これによりドライバーや乗客に新しい体験の提供や車両自体の安全性や性能向上等車両自体の価値向上にもつながります。また、EVから運転者や走行車両のデータを送信するなど、EVがさまざまなデータ（例えば、交通状況、車のワイパーの動き等車両に関するデータ）を生成する媒体へと進化し、そのようなデータを蓄積・活用した新たなビジネスが創出

されることも期待されます。

このように、今後、EVと自動運転技術、AIやソフトウェア、通信ネットワークなどのさまざまな技術や、異業界サービス・ソリューションとが組み合わさって、EVは継続的な進化を遂げていくでしょう。今後、EV自体の進化に加え、それによりどのような新しい価値や業界ビジネスが創出されるのかに注目です。

参考文献

- (1) 高橋：“EVショック：ガラパゴス化する自動車王国ニッポン。”小学館，2023。
- (2) 日系BPムック：“テスラ・中国メーカーのEV戦略&技術大解剖。”日経BP，2024。
- (3) JETRO（日本貿易振興機構）：“調整期を迎えた中国NEV産業。政策転換は市場拡大前年の2020年。”2023年12月1日。
- (4) 日本経済新聞：“独BASFと仏企業、インドネシアのニッケル製錬所を中止。”2024年6月26日版。
- (5) トヨタ自動車：“トヨタ、クルマの未来を変える新技術を公開—バッテリーEVの革新技術、水素事業の確立を柱に、技術の力で未来を切り拓く—。”2023年6月13日版。
- (6) トヨタ自動車：“出光とトヨタ、バッテリーEV用全固体電池の量産実現に向けた協業を開始。”2023年10月12日版。
- (7) 日本経済新聞：“車部品メイデー、独大手と提携 ギガキャスト用ねじ開発。”2024年1月13日版。



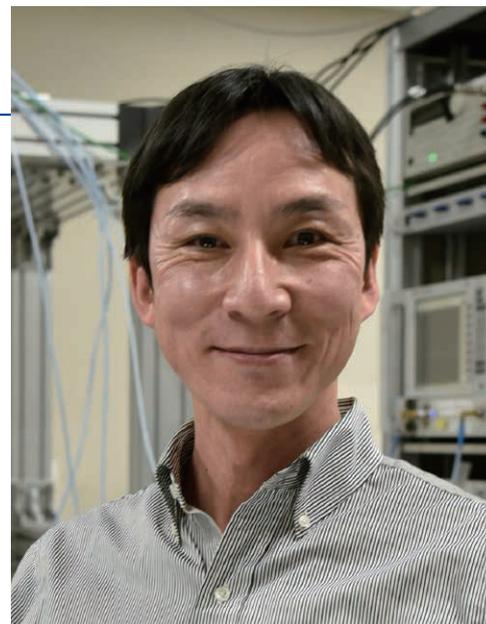
株式会社情報通信総合研究所
 (左から) 主任研究員 山崎 将太/
 主任研究員 小関 真人/
 主席研究員 手嶋 彩子

NTT物性科学基礎研究所
上席特別研究員

齊藤 志郎 Shiro Saito

レッドオーシャンの研究領域の先を見据えたボソニック量子ビットによるエラー訂正に迫る

量子コンピュータの基本要素である超伝導量子ビットは、その寿命が短いという課題があります。この課題を克服するためには、量子ビットの寿命に影響を与えるメカニズムを解明して少しでも寿命を長くするアプローチや、寿命に至るとエラーになることからそのエラー訂正を行うアプローチ等があり、量子コンピュータの実現に向けて研究が進められています。また、量子ビットの寿命を長くすることで、センシングの精度向上も期待できます。一方で、超伝導磁束量子ビットは超伝導電流の向きに対応する、2つの量子状態を有しており、この状態を磁場で制御することで高感度な磁場センサとして機能します。高機能磁場センサと生体試料をハイブリッドに組み合わせ、将来の病理診断への応用をめざす、NTT物性科学基礎研究所 齊藤志郎上席特別研究員に、超伝導磁束量子ビットによる神経細胞中の鉄イオン検出や、レッドオーシャンの研究領域の先を見据えた研究への思いについて伺いました。



 **超伝導量子ビットの特徴のメカニズムを実験で解明し、その応用に向けて前進する現在、手掛けていらっしゃる研究について教えていただけますでしょうか。**

超伝導量子ビットに関して、「超伝導磁束量子ビットによる神経細胞中の鉄イオン検出」「超伝導量子ビットの寿命を制限する欠陥の検出・識別」「超伝導ボソニック量子ビットの研究」の3つのテーマに取り組んでいます。

超伝導量子ビットは超伝導環境において発現する量子状態を利用したビットで、量子コンピュータの基本となる要素です。いくつかの種類がある超伝導量子ビットのうち、超伝導磁束量子ビットは超伝導ループを含む超伝導回路により構成されています。その特性は超伝導ループを貫く磁場で制御することが可能であり、高感度な磁場センサとして機能します。この磁場センサを用いて小さな磁石としての性質を持つ電子スピンを検出することで電子スピン共鳴が行えることを示し、これを応用した微小体積中の少数スピンを含む試料を分析する、新たな電子スピン共鳴 (ESR: Electron Spin Resonance) 法は、前回のインタビュー (2021年9月号) で紹介しました。

「超伝導磁束量子ビットによる神経細胞中の鉄イオン検出」に

ついて、従来の測定方法では、例えば生体検査で脳内の細胞の電子スピンを測ると、すべての細胞の平均値しか測定できませんでした。これに対して、超伝導磁束量子ビットを使うと非常に空間分解能が高いために、細胞ごとのスピンの特徴の検出が可能となることに着目しました。そして、人体にもっとも多く含まれる微量金属元素である鉄の検出をテーマとして研究を進めました。なぜならば、鉄の酸化・還元状態を知ることは酸素運搬や電子伝達系の理解に重要であり、また、アルツハイマー病などの病変における鉄の細胞への沈着といった病理学的な観点でも重要な役割を果たすためです。実際の測定では、この超伝導磁束量子ビットのチップの上に、直鎖状の結晶構造を持つパラキシリレン系高分子であるパリレンの上にニューロンを培養した生体試料を貼り付けて、神経細胞中の電子スピンを検出するために超伝導磁束量子ビットのスペクトルを測定しました (図1)。生体試料中の電子スピンの高温ではバラバラの向き、低温では向きがそろうという違いを反映して磁場が変化して、その磁場の変化をスペクトルのシフトというかたちで検出すること (図2)、言い換えると、細胞1個レベルの空間分解能で、このニューロンに含まれる鉄イオンに起因する電子スピンの検出に成功しました。

この結果は非常に高感度な電子スピン検出で、その試料の量が少なくても検出できるという特徴があるため、将来の病理診断あるいは、例えば小惑星のイトカワで採取したミリグラム程度の砂

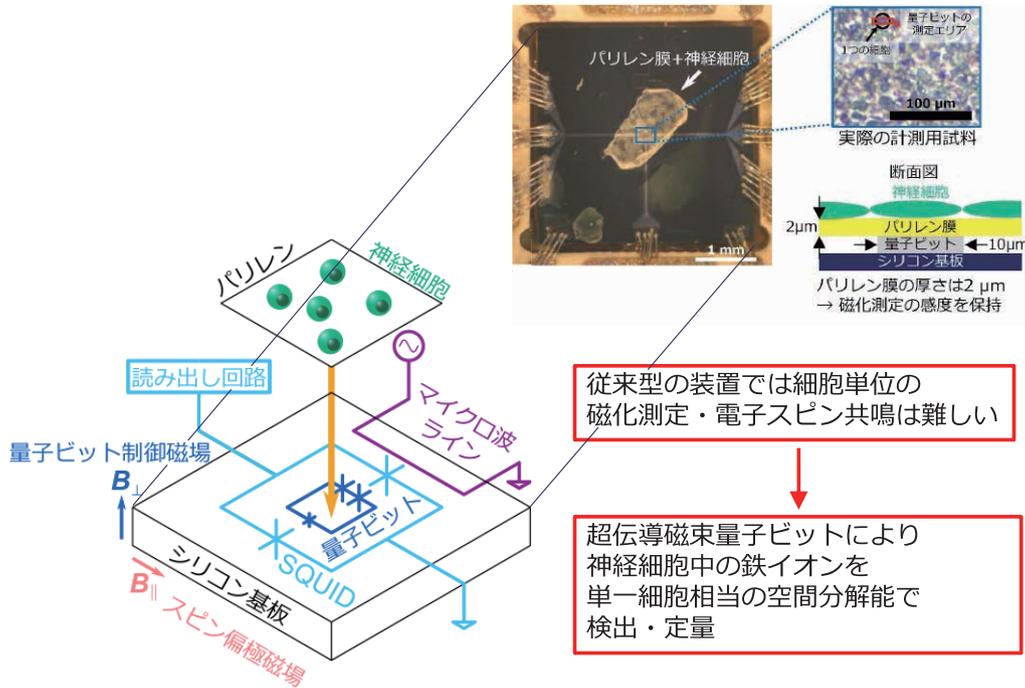


図1 量子ビットのスペクトルを測定することで神経細胞中の電子スピンを検出するための実験装置

のサンプルのように、非常に貴重な試料の測定にも応用できると考えています。今後はESR法でスペクトルを取り、そのスペクトルを測定することで、例えば鉄イオンに起因する電子スピンなのか、あるいは銅イオンに起因する電子スピンなのか等、どのイオンに起因する電子スピンなのかを識別していきたいと考えています。

この研究は、静岡大学との共同研究で、一部は科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 チーム型研究（CREST）「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出（研究総括：荒川泰彦）」、研究課題「超伝導量子ビットを用いた極限量子センシング（研究代表者：齊藤志郎）」（No.JPMJCR1774）の支援を受けて行われ、2023年2月6日に英国科学誌『Communications Physics』に掲載されました。

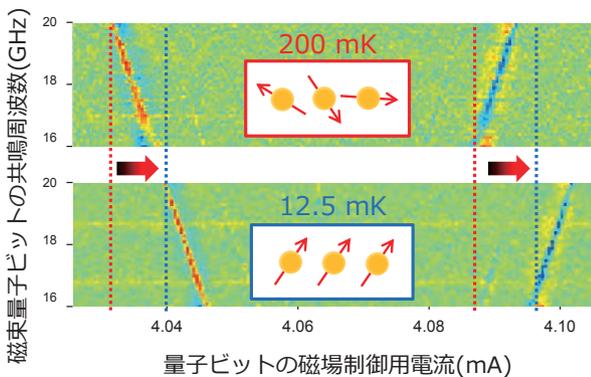


図2 量子ビットのスペクトル

「超伝導量子ビットの寿命を制限する欠陥の検出・識別」とはどのような研究なのでしょう。

「超伝導量子ビットの寿命を制限する欠陥の検出・識別」については、量子コンピュータの基本要素である量子ビットには寿命が短いという課題があるため、この量子ビットの寿命を制限している欠陥を検出・識別することで、寿命を延ばそうとする研究です。

前述の超伝導磁束量子ビットを使ってスピンセンシングを行う研究で、センシングの感度を向上させるために量子ビットの寿命を延ばすことで量子ビットのスペクトルの線幅を細くすることをめざしていたのですが、スピンをセンシングしているときに予測とは少し異なる現象が発見され、それを個別のテーマとして取り組みました。

この量子ビットの寿命を制限している大きなノイズ源が、量子ビットを構成するジョセフソン接合の電荷揺らぎを引き起こす2準位欠陥です（図3）。超伝導磁束量子ビットの超伝導ループの中にジョセフソン接合（図中のJ1~3）が含まれており、このジョセフソン接合部1個を拡大すると、絶縁膜を介して2つの超伝導体が接合した構造となっています。絶縁膜がエピタキシャル成長して原子が綺麗に並んでいると全く欠陥のないものとなり、寿命が非常に長くなりますが、実際今つくられている酸化アルミニウムの絶縁膜は分子が不規則に並んだアモルファス状態です。その中でトラップされた電荷、原子のトンネル現象、未結合手等が2準位欠陥の原因とされています。これまでに理論的に説明された非常に有名な2準位欠陥に関する議論の論文がありますが、2準

挑戦する研究者たち

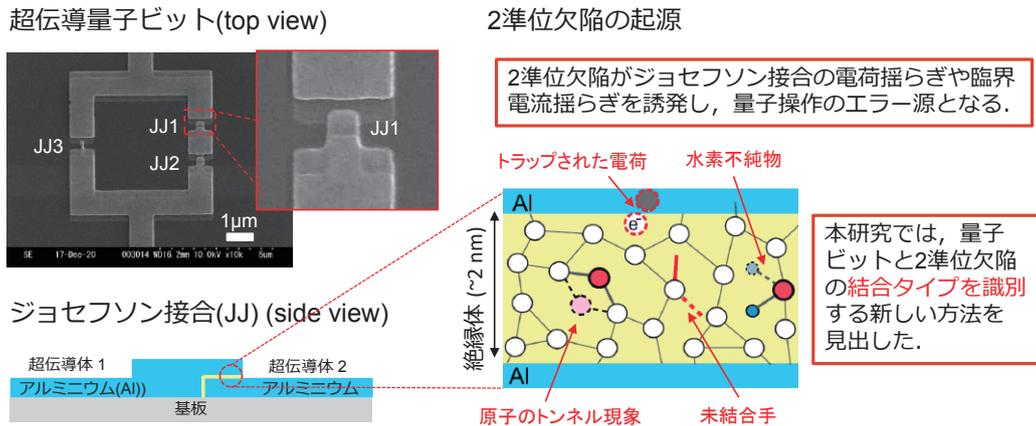


図3 2準位欠陥

位欠陥の存在は明確であってもそれを防ぐことができないというのが現状です。

さて、超伝導量子ビットと2準位欠陥の結合には、主に電荷型と臨界電流型の2種類のタイプが存在します。電荷型では、2準位欠陥の電荷揺らぎがジョセフソン接合の電荷の変位を引き起こすことで2準位欠陥と量子ビットが結合します。臨界電流型では、2準位欠陥の電荷揺らぎがジョセフソン接合の臨界電流の変化を引き起こすことで2準位欠陥と量子ビットが結合します。電荷型の2準位欠陥は、量子ビットの1励起と2準位欠陥の1励起が共鳴することにより、検出されます。一方、臨界電流型の2準位欠陥は、量子ビットの2励起と2準位欠陥の1励起が共鳴することにより検出されます。この検出条件の違いを実験により見出したため、異なるタイプの結合を識別することが可能となりました。

実験では、超伝導量子ビットの遷移周波数を制御しながら、2準位欠陥のスペクトルを測定することにより、量子ビットと2準位欠陥の結合タイプの違いをスペクトル上で可視化することに成功しました。これにより、量子ビットの周波数を掃引することで、異なるタイプの2準位欠陥を識別することが可能となりました。本研究を進めることで、欠陥の特性の解明が大幅に促進され、その結果を試料作製にフィードバックし、作製プロセスや材料を最適化することにより、欠陥のない長寿命な超伝導量子ビットの実現をめざします。また、短期的な応用として2準位欠陥によるノイズのモデル化が可能となることから、現状の量子コンピュータの性能向上に向けた、量子ビットのゲート操作最適化への適用が可能であると考えています。

本研究の一部はCREST「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出（研究総括：荒川泰彦）」、研究課題「超伝導量子ビットを用いた極限量子センシング（研究代表者：齊藤志郎）」(No.JPMJCR1774) および、JSTムーンショット型研究開発事業「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現（PD：北川勝浩）」、研究開発プロジェクト「超伝導量子回路の集積化技術の開発（PM：山本剛）」、研究開発課題「超伝導共振器を用いたボゾニックコードの研究開発（課題推進者：齊藤志郎）」(No. JPMJMS2067) の

支援を受けて行われ、米国東部時間2022年12月21日に、米国科学誌『PRX Quantum』にオンラインで掲載されました。

「超伝導ボゾニック量子ビットの研究」は最近取り組みを始めたそうですね。

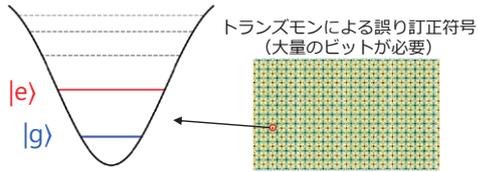
「超伝導ボゾニック量子ビットの研究」については、JSTのムーンショット型研究開発事業研究開発プロジェクト「誤り耐性量子コンピュータ用量子ビット回路の研究開発（PM：山本剛）」の中で、研究課題「超伝導共振器を用いたボゾニックコードの研究開発（課題推進者：齊藤志郎）」として取り組みを始めたものですが、新たな成果が出てきました。

超伝導の量子回路のもっとも重要な応用先の1つが量子コンピュータです。量子コンピュータの性能を上げていくためには、量子ビットの数を増やしていく必要があるのですが、現段階では1000程度まで実現されています。量子ビットの状態は寿命が短く、また、外部の擾乱によっても状態が変わってしまい、エラーとなります。量子コンピュータとしての動作を保証するためには、量子エラー訂正が必要になるのですが、現在主流となっているエラー訂正方式では、トランズモンと呼ばれる量子ビットを用いて表面符号を実装し、量子ビットの数を増やしてその冗長性でエラー訂正を行っています。典型的なエラーレート（～0.1%）の場合、エラー訂正するために1つの論理ビット当たり約1000個の物理量子ビットが必要となるため、有意義な量子計算を実行するためには100万から1億の量子ビットが必要となります（図4(a)）。

それに対してボゾニック量子ビットは、共振器と呼ばれる記憶キャビティと補助量子ビット（トランズモン）の組み合わせで1つの量子ビットをつくり、この共振器中の原理的に無限にあるエネルギー準位の冗長性・自由度でエラーを訂正します（図4(b)）。従来方式と比較して必要な量子ビット数（ハードウェア数）を1～2桁程度減らすことが可能になります。ただし、エネルギー準位が非常に多いため、これを制御するのは非常に困難であり、その制御がボゾニック量子ビットの課題です。

これまで、アルミニウム製の3次元（空洞）共振器を試作し、

(a) 主流の方式：トランズモン量子ビット



(b) ボソニック量子ビット（超伝導共振器）

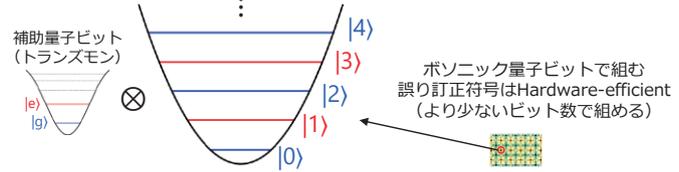


図4 Hardware-efficientなボソニック量子ビット

先行研究と同等以上の 10^8 を超えるQ値〔共振回路の良さ（共振回路の損失の少なさ）を表す指標〕が得られました。さらに、ボソニック量子ビットの設計を最適化し、補助量子ビットの特性の向上にも成功し、ボソニック量子ビットを実装する環境が整いました。そして、第1段階として、記憶キャビティ中の光子数に応じた補助量子ビットのスペクトル分裂を観測することに成功しました。

このようにボソニックコードのエンコーディング等の成果が出始めた状況であり、今後はさらにブラッシュアップをしていくことで、共振器に binomial code を実装するとともに、並行してさらなる高いQ値の実現をめざして、ニオブ製共振器の試作も進める予定です。

レッドオーシャンの研究領域の先を見据えたアプローチで研究に取り組む。その共同研究には人のつながりが大切

研究者として心掛けていることを教えてください。

超伝導量子コンピュータは研究人口も増えてきており、研究も活発に行われている、いわばレッドオーシャンです。その中心では、海外の豊富なリソースに支えられた研究者により、関連技術のメインストリームの研究が行われています。リソース等で圧倒的な差がある中、正面突破することは相当な困難を伴うことになるので、その先を見据えた少し異なるアプローチ、まだ新しく面白くて可能性があるところを狙う、例えばボソニック量子ビットのような、将来逆転できる可能性のある領域をテーマとするよう心掛けています。前回のインタビューでは、現状分析して自分の強みを活かして新規性ができるようなテーマを探るというお話をしましたが、それをさらにパワーアップしています。

さて、前述の2準位欠陥の話ですが、当初はスピン検出の感度を上げて実際に電子スピンを検出することを目標としていたのですが、感度が足りなくて電子スピンの検出ができなかったところに、予測していない現象が検出されました。そこで、ポスドクの研究員と、この方法で逆に何が検出できるのか、という逆転の発想で考えたところ、高周波数の2準位欠陥が検出されたことが分かりました。さらに、私たちの強みである周波数可変の磁束量子ビットを使ってそのスペクトルをとることによって、量子ビットと同じ形を示すスペクトルとその2倍の周波数の形を示すスペクトル

を発見し、原点に帰って2準位欠陥をベースとしてハミルトニアンを計算すると、欠陥を検出・識別できていることが分かりました。想定と異なる結果が出てきても、視点を変えながらさらに深堀することを心掛けて実践してきたことが、新たな発見に結びついたのだと思います。

さらに、この結果を「超伝導の量子計算機とアルゴリズム」という会議の招待講演で発表後、2準位欠陥の理論の研究者が寄ってきて、彼らも2種類の欠陥の識別に関する実験を繰り返してきたが結果が出なかったところにこの発表を聴いて、この結果のすばらしさに感嘆してくれました。私が心掛けてきたことがこうした結果として花開くとともに、将来的にさらに研究が進んで理論的な裏付けが必要になったときに、連携や共同研究のチャンスが生まれたことを大変うれしく思います。

後進の研究者へのメッセージをお願いします。

人とのつながりを大切にしてほしいと思います。

「超伝導磁束量子ビットによる神経細胞中の鉄イオン検出」においては、超伝導量子ビットと生体試料の組み合わせで成果を出すことができましたが、NTT物性科学基礎研究所では、メカトロニクスと光の組み合わせによる成果をはじめ、最近異分野間のハイブリッドな組み合わせによりさまざまな成果が出てきています。これはプロフェッショナルな研究者どうしのつながりで共同研究が進んだ結果で良い成果が出ているのです。さらにNTTのみならず外に目を向けると、日本国内には大学等に優秀な先生方がいらっしゃるって、NTTの中にはない研究をしている方もいるので、アンテナを高くして共同研究できそうなチームを見つける、あるいは海外に目を向ければさらにそのチャンスが広がります。このチャンスを活かして、自分の研究の広がりを持たせるためには、こうした研究者とのつながりが重要になってきます。

そして、何事にも積極的にチャレンジするといいたいと思います。例えば、ムーンショットプロジェクトやJSTのCREST等の大きなプロジェクトにチャレンジしてみることもいいと思います。応募の手続きは結構手間がかかる部分もありますが、研究の目的や計画が明確化されますし、採択されるとそこに人も集まってきます。まさに、人とのつながりをつくるいいチャンスにもなります。

さらに、海外での研究経験も、日本とは違う研究文化に触れることのほか、海外の優秀な研究者と人のつながりができるので、ぜひ積極的に飛び込んでほしいと思います。



NTTコミュニケーション科学基礎研究所
特別研究員

山下直美 Naomi Yamashita

情報技術で心豊かな社会へと導く「人と人のつながりを深化させるコミュニケーション支援」

情報技術は私たちの生活を豊かにする一方で、それを使う私たちにもリテラシーやその功罪を理解することが求められています。例えばAI（人工知能）技術は日に日に進歩を続け、人間とのコミュニケーションまでもが容易になっていますが、それによって人と人のコミュニケーションが希薄化してしまう可能性も秘めていることに注意しなければいけません。今回は情報技術を用いたコミュニケーションの深化に取り組む山下直美特別研究員に、現代社会が抱えるさまざまな問題の解決に向けた研究や研究者としての心構えについてお話を伺いました。

◆PROFILE：2001年京都大学情報学研究科数理工学専攻修士課程修了。同年、日本電信電話株式会社に入社。2006年京都大学情報学研究科社会情報学専攻博士課程修了。博士（情報学）。社会が抱える問題（グローバル化の進展に伴う言語・文化摩擦の問題やメンタルヘルスに関する問題など）を解決するための情報技術の研究に従事。2024年 情報処理学会フェロー、2020年 KDDI財団 奨励賞、2016年 情報処理学会 山下記念研究賞、2011年 長尾真記念特別賞等を受賞。



情報技術を用いた支援で、人と人がつながる 良い循環を生み出す

■はじめに、「人と人のつながりを深化させるコミュニケーション支援に関する研究」とはどのような研究でしょうか。

「人と人のつながりを深化させるコミュニケーション支援に関する研究」では、情報技術を用いて人どうしのコミュニケーション機会を創出し、それに伴って社会課題を解決することをめざしています。情報技術が普及した現代では、簡単に遠隔地にいる人とコミュニケーションできる一方で社会の分断や孤立化などの問題が浮き彫りになっています。例えば近年では「人と話すよりもAI（人工知能）と話すほうが楽で、ストレスなく生活できる」という声をよく耳にします。しかしこれからAI技術が進化してこの状況が続くと、人は本当の意味で「孤立化」してしまうのではないかと私は懸念しています。確かに人と人のコミュニケーションは誤解が生まれたり衝突が起きたりすることも多い一方で、「単純に“面倒くさい”ということで片づけてしまっているのか」、「AIに見守られて死ねばそれでいいだろうか」という懸念もあります。理想の未来社会の姿を提唱する「Society 5.0」では、最終的にAIが人に置き換わるのではなく、人と人をうまくつないでいくような存在になることをめざしており、今後のAI進化の方向性と社会導入の方法が検討されています。

この研究はヒューマンコンピュータインタラクション（HCI）という分野（図1）に属する研究です。この分野は人とコンピュー

タを含むさまざまな情報技術とのかわりを研究する領域で、多くの研究分野がオーバーラップする学際的な領域であることが特徴です。例えば計算機科学のほか、認知科学、心理学、社会学、さらには芸術、文化人類学などの視点や手法、知識を組み合わせることによって多角的に社会課題をとらえ、より人々が住みやすい豊かな社会を実現するための新しい価値を創造する情報技術をめざしています。

その中で私が取り組んできた1つの例として、うつ病患者の社会復帰支援に関する研究があります。この研究をはじめたきっかけは、人と人をつなぐ情報技術をデザインする専門家として「何をすべきか？」という疑問に立ち返り、「社会問題の解決に貢献できるような問題にチャレンジするべきだ」と考えたことに端を発します。以前から講演などに赴いては、情報技術の普及がもたらす多くの社会課題を耳にしていました。例えば赤ちゃんを抱っこしているお母さんが、ひと昔前であれば赤ちゃんを目を合わせて会話していたものの、現在ではスマートフォンに気を取られて赤ちゃんアイコンタクトを十分に取れないというケースです。これに対して文化人類学の分野などからは懸念の声が上がっていて、動物園では親に育てられなかった子どもが大人になったときに同じように子どもを放置してしまったりすることがあり、そうして世代が進むにつれてどんどん子育てができなくなってしまいうようなことが人間に関しても起き得るのではないかと危惧されています。そのような問題に私が考えたのは、もし本当に情報技術が普及することによってこうしたネガティブなサイクル

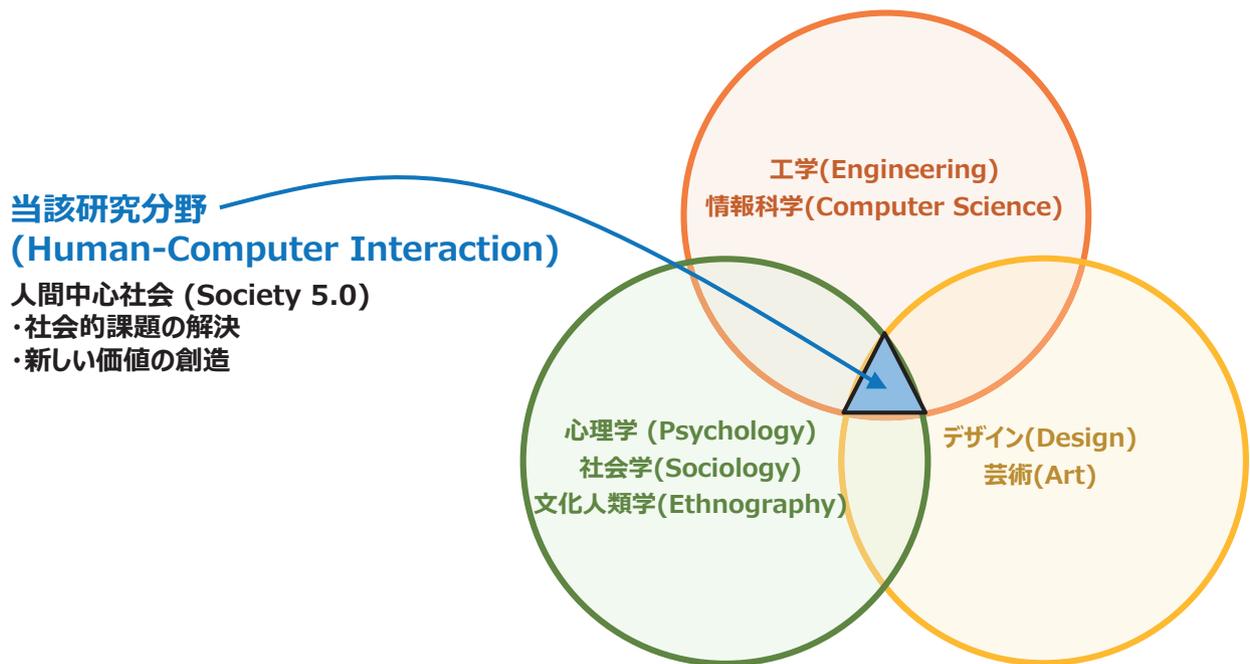


図1 ヒューマンコンピュータインタラクション分野の概略

が起きているのだとすれば、逆に情報技術を使ってポジティブなサイクルも回せるという可能性があるのではないかとことです。

実際に自分の身の回りから考えて検討してみたところ、1つ思い浮かんだ社会が「うつ病」でした。例えば職場でうつ病の人がしばらく会社を休んでその後復職するとなったとき、どうやってその人と接したらいいのか分からず、まるで腫れ物に触るような扱いになってしまい、しばらくするとまたうつ病が再発してしまう、というような話をよく耳にすることがあったのです。もちろんうつ病患者に対する治療は存在しますが、「結局は患者の周りの環境が変わらなければ同じことの繰り返しになるのではないか」、「介入するのであれば患者本人だけではなく患者を受け入れる側の周りも含めて介入しないと問題は解決しないのではないか」と考えました。そしてそのようなところに介入できるのは、やはり医療ではなくて情報学です。そこでプロジェクトを開始し、一連の研究を基に開発されたアプリ「みまもメイト」(図2)は、メンタルヘルスをサポートするNPO法人で運用されました。

■研究ではどのような点に苦勞されましたか。

私はもともと大学時代に数理工学から研究を始めたこともあり数学を武器にしようと考えていましたが、徐々に数字だけでデータを見ることに限界を感じるようになりました。そこで研究の方針を転換し、社会学・心理学といった分野の思想に基づいた研究手法や分析手法を学ぶために多くの方と共同研究を進めました。特に本研究を進めるうえで医療分野の専門家のアドバイスやコメントは非常に重要であると考え、実際にプロジェクトに入ってい

ただいで共同で研究を進めました。

具体的には、これまで患者に対する治療をより効果的・効率的に行うことに焦点が当てられてきたうつ病支援に対して、本研究ではうつ病患者とその家族のコミュニケーションに着目し、両者のコミュニケーション機会を創出するシステムづくりに取り組みました。その理由として、うつ病患者は家庭内環境の影響を受けやすく、協力的な家族介護者を持つ患者は回復が早いことだけは実証されていましたが、家族介護者や家庭内環境の改善に焦点を当てた研究はほとんど存在しないという背景がありました。そこで家族介護者を通して家庭内環境を改善することで、うつ病患者の症状を改善することを考えたのです。

しかしプロジェクト開始当初は思わぬ障壁にぶつかることも多々ありました。例えば最初のアプローチでは、共同研究者である精神科医を通じて患者の家族にアプローチして研究を進めていたのですが、そうした研究は医学部の倫理審査を通す必要があり、それに半年以上もかかってしまいました。さらによく医師を経由した家族介護者へのアプローチができたものの、やはり医師の紹介で患者の了解を得て家族にたどり着いているので、もちろん医師や患者に対して不満があっても家族はそのようなことが言えるわけではなく、悩みや本音を聞き出すにはかなり難しいという問題がありました。最終的には医師と患者を通さず、直接的に家族をスカウトしインタビューすることで、本当に思っていることをかなりフリーに調査できる状況をつくることができました。このようにリクルーティング1つとっても手法を変えるだけで聞き出せることが全く変わるように、研究成果を生み出すまでのそれぞ



記録セクションのページ例

振り返りセクションのページ例



患者の活動を
家族が記録し、ともに振り返る

コミュニケーション機会の創出へ

図2 Webアプリ「みまもメイト」の画面

このプロセスが困難の連続で苦労しましたが、多くの方にご意見をいただき最終的に開発にたどり着くことができました。

■そのほかのような研究を手掛けていらっしゃるのでしょうか。

うつ病患者の支援のほかにも、情報技術を用いてコミュニケーションやコラボレーションを支援することで現在の社会問題を解決する研究に取り組んできました。多国籍メンバー間のコミュニケーションにおける非母語話者の参画支援やLGBTの人々の出会い・交流支援など、さまざまな社会的課題に対してユーザ分析に基づいて多様なステークホルダのニーズをとらえ、これに基づくシステムのデザインを数多く手掛けてきています。例えば腕にセンサーをつけてストレスレベルを測ることができる装置(図3)を産後の方に使っていただき、産後うつ病の解決に取り組みました。具体的にはセンサーによって収集した母親のストレス状況を父親と共有するアプリを用いることによって、夫婦間のコミュニケーション機会を創出させることに成功しています。

自分の感情の機微にこそ、研究のヒントが隠されている

■今後の研究の展望を教えてください。

これまで私が取り組んできた研究の多くは短期的なものでしたが、その一方で社会が直面する少子高齢化、環境問題、生活習慣

病予防など多くの社会課題の解決には、長期的な視点からの意識改革や行動変容などが必要です。今後はさらに研究をスケールアップさせ、より長期的な視点に立った研究を見据えています。若手研究者は成果をコンスタントに出し続けていかなければならないというプレッシャーがあるため、成果創出までに時間がかかる課題に取り組むことにリスクを伴いますが、今の私が取り組むべきは、そういった挑戦が難しいとされる研究課題だと考えています。

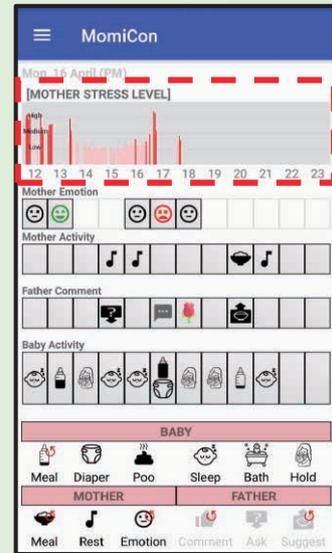
さらに先の展望として、NTTが提唱しているIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) の世界観は、多様性を重んじてさまざまな価値観を持つ他者間の理解や、人與人、人と社会の「つながり」の質の向上を図ることであり、私の研究の方向性と合致していると考えています。前述したとおり、AI技術の急速な進展で利便性の向上や未来予測によるリスク回避などへの期待が高まっていますが、AIの使われ方やユーザに及ぼす影響も大変重要な研究課題です。今後はこれらの技術を提供するかたちを模索しながら、より豊かな未来社会を実現できるよう邁進していきます。

特にこれから挑戦していく社会課題は複雑で、1つの分野や技術によって解決することは困難です。ぜひ多くの方のお力を賜り、多様な視点と知識を融合させることで、より深い洞察と実践的な解決策を生み出し、共に持続可能で豊かな社会を実現していきたいと考えています。

手首に装着するストレス測定機器



アプリの画面例



ストレスレベルを測定し
アプリに反映

図3 社会課題に基づいたデザインの例

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

私が所属しているNTTコミュニケーション科学基礎研究所では、情報技術に関すること、人に関すること、人と情報技術のかかわりに関することを研究しており、研究テーマ選択の自由さが魅力的です。一方で、若手の研究者の方々の中には、日常的な業務に精一杯で、さらにそれをこなしながら研究を進めて成果を出さなければいけないという状況に困難を感じている方もいらっしゃるかと思います。そのようなときには「自分に何が求められているのか」ということを立ち止まって振り返り、勇気を持って何かを捨て去る覚悟を持つことが重要だと私は考えます。それは決して無責任に投げ出すということではなく、「これは不必要ではないか」と提案してみることや、他の人に助けてもらうことでうまく達成することができるのではないかと思います。

そして自分の得意なことやこだわりを突き詰めていくことも重要だと思います。自分のこだわりや力を発揮できるポイントは案外身近なところにヒントがあるものです。日常生活の中で起こる感情の機微こそ、その人の価値観に触れているところですので、例えばもし怒ったりしたときには「どうして自分は〇〇に対して怒っているのだろうか」と考えることで、「自分はこうあるべきだ」という隠された価値観に気付くことができます。そして「果たしてそれが本当にそうあるべきなのか」、「それによって本当にいい社会になるのか」という大きな視点で物事を考えていくと、自分

が一体何をすべきなのかという道が見えてくるかと思います。私自身も若いころにそれができたかというとなかなか難しかったかと思いますが、もし研究の道に迷われている若手研究者の方にとって1つの参考になれば幸いです。



(今回はリモートにてインタビューを実施しました)



株式会社NTTデータ オートモビリティ研究

<https://www.zipc.com/jp/>

NTT DATA

株式会社NTTデータ オートモビリティ研究

AIを活用した自動運転の研究、および その開発環境ツール群の開発を行う会社

近年、100年に一度の大変革をもたらすといわれている、CASE (Connected, Autonomous, Shared & Service, Electrification) と呼ばれる、自動車業界全体の未来像を語る概念が注目を集めています。NTTデータ オートモビリティ研究は、CASEの一翼を担う自動運転について、研究およびその実現に向けた開発環境ツール群の開発を行う会社です。安全で快適な移動を実現し、人々の生活を豊かにすることをめざす、代表取締役社長 CEO 坂本忠行氏に、自動運転における課題を克服する事業と、ラストワンマイルの交通手段による課題解決を、取締役副社長 CTO 渡辺政彦 博士 (工学) に注力しているテーマと実証実験について伺いました。



NTTデータ
オートモビリティ研究
坂本忠行社長、渡辺政彦副社長

レベル4 自動運転パーソナルモビリティにより、ラストワンマイルの交通手段として交通難民という社会課題解決をめざす

■設立の背景と会社の概要について教えてください。

NTTデータ オートモビリティ研究 (ARC) は、AI (人工知能) を活用した自動車の自動運転の研究、およびその実現に向けた開発環境ツール群の開発を行っています。

1973年11月にソフトウェア開発を行う会社として設立された「テスコ株式会社」を母体として、ツール販売やソフトウェア受託制作等へ業容を拡大しつつ、「キャッツ株式会社」へと社名変更、組込ソフトウェア研究所等を設立し、2010年4月にNTTデータMSEとの資本提携によりNTTデータグループの企業となりました。その後、2018年4月に豊田通商グループの株式会社ネクスティエレクトロニクスとの資本提携を行い、2020年12月に社名を自動車の自動運転を標榜する、現在の「NTTデータ オートモビリティ研究」に変更しました。

2025年までに、自動運転領域のツールクリエイターとしてのリーダーポジションに就き、ユニークな完全自動運転プラットフォームを発明することをビジョンに掲げ、ヒトが持つ高度な知恵を駆使した自動化ソフトウェア技術を発明・提供することで、消費者にとって便利で豊かになる次世代モビリティ社会を支える研究機関となることをめざして事業展開しています。

■具体的にどのような事業展開をしているのでしょうか。

車載ソフトドメインでのモデリング力、組込ソフト開発・運用

プロセスを変革するツール構築力、高度な物理数理人材・AI人材、NTTデータのコネクティッドシステム構築力とのシナジーを強みとして、「次世代モビリティに必要なソフトウェア技術の研究開発」「MBD (Model Based Development) ・数理・AIソリューションおよびツールの開発、および販売・コンサルティング」「車載・組込ソフトの開発」「オフショア・ニアショアテスト」の4つの領域で事業を展開しています。

さて、自動運転においてAIの活用が重要な要素となります。AI適用の基準として、交通法規の遵守性といった安全性についてのクライテリアの明確化、いわゆるAI Alignmentの問題が実用化に向けての最大の課題となっています。これに対して、自動運転での必須項目である「安心・安全を担保する品質」の実現については、当社が得意とする「状態遷移表メソッド」は広くその優位性を認められています。一方で、自動運転にまつわる時々刻々と変わる主要な競争ポイントに取り残されないように、常に最先端の技術やトレンドにアンテナを張り巡らし、次世代の「Aligned AI」や「eXplainable AI」の実現に向けて研究開発を続けています。

こうしたAI活用による自動運転システムの開発においては、開発ツールの拡充が必要となります。当社の自動運転システム向け開発環境である「GARDEN」は、国内外で検討されている自動運転システム安全性論証に基づき、自動運転システムが直面する外的要因を構造化したシナリオを生成し、自動運転システムの有効かつ効率的なシミュレーション検証を実現します。「GARDEN」の「シナリオベース開発プロセス」は、自動運転システムの実用化に向けた強力な手法として当社が研究開発した独自アルゴリズムおよびアーキテクチャであり、運転シーンに関するデータやナレッジ

シミュレーションを有効かつ効率的に分析することにより、自動運転システムのバーチャルシミュレーションにおいて実行すべき重要シナリオを網羅的に自動生成する、クラウド型検証基盤ソフトウェアを形成しています。さらに、機械学習による影響範囲分析コスト削減、属人的分析の排除、ソフト変更による影響範囲の見える化、さらには下流領域の評価の効率化、中流・上流領域のリスクのあるコードや設計の抑え込みを可能とするAIテストソリューション「ML TEST」もリリースし、多くのお客さまにご利用いただいています。

安全に「走る、曲がる、止まる」ために、自然言語処理だけではなく哲学や倫理学、社会学、心理学の側面においてもAIを活用

■研究開発は具体的にどのようなテーマに注力されていますか。

主として「自動運転向けaligned AI system (RLHF) 研究」「自動運転向け世界モデル適用研究」「SDV (Software Defined Vehicle) におけるゾーンアーキテクチャと振る舞いモデルの研究」「CV1-Autoによる自動運転実証実験」の4テーマに取り組んでいます。

「自動運転向けaligned AI system (RLHF) 研究」では、自動運転に大規模言語モデル (LLM) を適用するうえで重要な、安全目標や道路交通法に整合したAIシステム (aligned AI system) を研究しています。このAIシステムを人間の意図する目的や嗜好、または倫理原則に合致させることを目的とした、挑戦的な研究が強化学習 (RLHF: Reinforcement Learning from Human Feedback) であり、自然言語処理だけではなく哲学や倫理学、社会学、心理学といった分野からも新たに注目を集めています。

「自動運転向け世界モデル適用研究」では、車載を前提とした、リアルタイムな推論を可能とする世界モデルの研究に取り組んでいます。外界の観測から外界の状態を推測し、現在の観測から将来や未知を予測する世界モデルを自動運転に適用することで、複雑な交通状況を推測し、交通参加者の行動を予測し、安全な行動を行うことができます。

「SDVにおけるゾーンアーキテクチャと振る舞いモデルの研究」に関して、SDVはソフトウェアアップデートにより新機能や性能向上を提供することが特徴の1つです。AIを用いるAD (自動運転) /ADAS (Advanced Driver-Assistance Systems) は常に学習を行い、進化を続けるため、アップデートを前提とするSDVのキラーアプリケーションとなり得ます。さらに、ゾーンアーキテクチャをSDVで採用することにより、ソフトウェア開発工数を削減、またECU (Electronic Control Unit) の数も削減することでコストダウンを実現することができます。こうしたSDVとゾーンアーキテクチャの課題は、「既存資産のソフトウェアの再利用」と再利用時の想定外の「振る舞いの漏れ」です。これらの課題について、30年以上の実績を持つ状態遷移表支援ツール「ZIPC」を用いて解決します。

「CV1-Auto (1人乗り自動運転電気自動車) による自動運転実

証実験」は、高齢者や障がい者、運転免許を持たない方などの交通弱者に関する課題 (特に、地方において顕著・深刻化) に対して、自動運転の技術を活用した解決を図っていきます。具体的な実証実験の取り組み例として、2022年8月に鹿児島県伊仙町、NTTデータならびに当社にて、「高齢者・障がい者向けの自動運転パーソナルモビリティ導入事業」の推進に向けた連携協定を締結し、実証実験を進めています。実証実験では、高齢者、障がい者でかつ運転免許を持たない方および交通弱者向けの安心・安全なL4 (レベル4) 自動運転パーソナルモビリティを提供し (写真1)、自宅から目的地までのドア・ツー・ドアの柔軟な移動サービスを提供することをめざして、テストコース上の走行テスト、車両が自動で障害物 (自転車) を認識して停車、自動走行が難しくなった場合に遠隔操作へ切り替えることによる走行の持続、遠隔からの自動運転ソフトウェアの更新、車両が自動で障害物を回避した目的地までの走行、等の検証を実施しました。



写真1 実証実験で提供している自動運転パーソナルモビリティ

常に技術トレンドの最先端に立ち、開発ツールの提供とAIの活用により自動運転の実現に貢献

■今後の展望についてお聞かせください。

現在、実車による実証実験 (特にラストワンマイルのコンパクトなMaaS (Mobility as a Service)) を各地で進める中で、「走る、曲がる、止まる」ということに対する人としての喜びの最大化について、学び直しています。これらラストワンマイルの交通手段は、現在深刻化している日本の高齢化や地方における交通難民といった社会的問題の解決にも役立つものです。

この実車経験から、新たな強化学習とルールベースを組み合わせたHybrid AI^{*1}を備え、自動運転を用いて効率的に収集されたデータをインプットして、自動運転自体の性能を継続的に向上させることが可能な「SEAS (Sustainable Engineering Autonomous System)」を開発し、順次提供していきます。

SDV時代の到来が叫ばれていますが、これは、要求定義の流れや製造工程での大きな変革も伴うものであり、既存のノウハウ体系・組織構造の変革をも要請するものと推察されています。このような100年に一度の大変革の波の中、さまざまなアイデアで自動運転業界が活性化しています。こうした環境において、常に技術トレンドの最先端に立ち、開発ツールの提供とAIの開発適用により自動運転の実現に貢献していきます。

*1 Hybrid AI: ルールベースのAIである「MARINA (マリーナ)」と強化学習のAIである「REEF (リーフ)」を統合し、最終判断を下すAI。MARINAは「道路交通法に基づいた運転の判断」を、REEFは「不測の事態にも対応する運転の判断」を担当し、Hybrid AIとして、状況に応じた「適切な判断・制御」を下すことができます。

安心・安全な自動運転を実現するために、システムの安全性に関するシナリオ検証を網羅的に対応するプラットフォーム「GARDEN」

第1事業部 技術チーム

参事

眞喜屋 龍 さん



■担当されている業務について教えてください。

第1事業部では、GARDENの開発・維持運用、GARDENの活用を含むエンジニアリングサービスを主な事業として行っています。その中で私は、GARDENの開発を担当しています。

GARDENは、安心・安全な自動運転を実現するために、現実世界で起こり得るさまざまな状況（シナリオ）を考慮しながらシステムの安全性を網羅的に実証する、シナリオ検証プラットフォームです。GARDENは、検証シナリオの作成を大幅に効率化するツール「GARDEN Automation」、GARDEN Automationで作成されたシナリオをリアリスティックなシミュレータ上での検証環境を提供する「GARDEN Simulator」、試験の網羅性の検証や、自動運転システムの苦手シナリオの抽出などを含むシミュレーションや実車試験の結果を集約・分析するツール「GARDEN Analyzer」の3つのツールで構成されています。

「GARDEN Automation」では、例えば、自動ブレーキシステムの検証におけるシナリオ作成のための、ユーザが指定した条件（車両の衝突など）を満たすパラメータを、ツールが自動で計算する機能が組み込まれています。また、実車試験の走行データの取り込みや、取り込んだデータを基に類似シナリオを作成する機能などが搭載されています。これらによりシナリオ作成工数を大幅に削減することができます。

今後も自動運転システムの網羅的かつ効率的な検証ツールの開発に取り組むことで、安心・安全な自動運転の実現に貢献していきます。

システムの不具合予測に基づく効果的なテスト実行順番決定支援ツール「ZIPC MLTEST Test Viewpoint」

第2事業部 技術チーム

主事

下地 美南子 さん



■担当されている業務について教えてください。

第2事業部では、Machine Learningソリューション、Smart Testソリューション、ツール開発ソリューション、ZIPCプロダクト展開、テストビジネスを主な事業として行っています。技術チームの私が所属するセクションでは、現在、AI・機械学習モデルをシステム開発に役立てるための研究・開発を行っています。過去の開発における不具合情報やソースコードの変更ログ等の開発過程で蓄積されたさまざまな情報から、発生する不具合の予測や効果的なテスト実行順番、不具合が発生しそうなソースコード内容などを予測することを課題として取り組んでいます。そして、そもそも機械学習モデルで有効な予測ができるかという理論研究から始まり、お客さまと協力して、実際のデータを使ったPoC（Proof of Concept）としてモデルの精度を上げて、2024年6月に「ZIPC MLTEST Test Viewpoint」（ZIPC MLTEST）というツールをリリースしました。

ZIPC MLTESTでは不具合チケットの情報とソースコードの変更ログを組み合わせたモデルを使用し、ソースの実装完了段階で試験に先駆けて不具合が発生しそうな評価観点や機能を予測することができます。

今後に向けて、お客さまのシステム開発の効率化は開発工程全体で改善することがより効果的であるため、独立した機能の単体ツールではなく、開発工程全体を見通したサービスをZIPC MLTESTソリューションとして提供していくことをめざしています。

自動運転車両の実装と実証実験をとおして、モビリティサービスの実現に向けた課題解決に取り組む

先端研究部

チーフエンジニア

坂本 伸 さん



■担当されている業務について教えてください。

先端研究部ではレベル4自動運転の社会実装実現に向けて、複雑な交通環境に対応する高度な自動運転ソフトウェアやその

開発支援ツール、シミュレーションを活用した安全性評価の効率化などの研究を進めています。また、自動運転車両の実装と公道での実証実験をととして、モビリティサービスの実現に向けた課題解決に取り組んでおり、私（坂本）はその取り組み全体をリードしています。

Level4自動運転システム判断 AI開発担当

謝 ウェイフェン さん

私（謝）は、Level4自動運転システム判断AI開発担当で自動運転を構成するソフトウェア*2の中で、経路周辺のクルマ・人の動きを考慮して、かつ交通ルールにのっとった制御を実行するための判断ソフトウェアの開発を担当しています。市街地での自動運転においても安心・安全な乗車体験、乗客に「危ない」と感じさせない運転をめざし、例えば事故が起きそうな状況において、コンピュータシミュレーション上でAIに自ら試行錯誤しながら事故状況にならないための運転操作を見つけ出させ、その状況を安全に対処する方法を学習させる、強化学習を活用した研究に取り組んでいます。基本的な運転操作である「ハンドルを切る」「減速する」などの操作と、周囲にその操作をしなければならない理由の存在を評価することで、狙った学習が可能なことを突き止め、評価の定式化と、この式を使って効率的に学習トレーニングが実行できる環境としてREEFをチームメンバーとともに構築しました。

今後は、シミュレーション環境で行われている検証を、実験車両用に開発しているソフトウェアを搭載した、現実の環境において実証していきたいと考えています。



車両開発担当

参事

泉名 克郎 さん

私（泉名）は、車両開発担当のレベル4自動運転開発のプロジェクトでは、ソフトウェアの開発、およびそれらを実際の車両に適用して、モビリティサービスを展開することを視野に入れた研究を進めています。シミュレーション環境での検証に加えて、使用予定のセンサ・コンピュータ類をスケールモデルに搭載した機能確認台車での検証、実際に人が搭乗できる車両での実証実験と段階を踏んだ実験の取り組みをととして、ラストワンマイル向けにパーソナルモビリティを活用した自動運転サービスをめざしています。車両1台当りのシステム価格を抑えるために、簡便なセンサで高度な判断を行うための枠組みづくりと、運用環境を見据えた運用条件の洗い出しのため、鹿児島県伊仙町の公道での機能実証をはじめとした実証実験を推進しています。

今後は、さらなる低価格化と信頼性確保を狙った開発を推進し、早期に独自の自動運転モビリティサービスの展開ができるよう取り組んでいきたいと考えています。



*2 自動運転を構成するソフトウェア：カメラやLidarといったセンサから周囲の物体や環境の状況を把握するための「認識ソフトウェア」、指示された経路どおりに通行できない場合に、把握した周囲状況に応じてどのように経路変更をするかを決定する「判断ソフトウェア」、そして、決定した判断を実行するために車両をコントロールする「制御ソフトウェア」に大きく分類されます。

NTTデータ オートモビリティ研究所 ア・ラ・カ・ル・ト

■人とくるまのテクノロジー展2024YOKOHAMA・NAGOYAに出展

2024年5月22～24日にパシフィコ横浜、2024年7月17～19日にAichi Sky Expoにて開催された、将来の車社会を展望する日本最大規模の自動車技術展「人とくるまのテクノロジー展2024」に出展したそうです（写真2）。

「Intelligence for Mobility」というコンセプトのもと、NTTデータ オートモビリティ研究所の主力プロダクトであるツール&エンジニアリングサービス「ZIPC」シリーズや、交通弱者・交通難民といった社会課題の解決に向けたモビリティ関連の取り組みについて紹介したとのこと。

コロナ禍の影響で、久しぶりのリアル出展だったそうですが、ブースに立ち寄りいただいたお客さまとの会話を通じて、今後の取り組みやソリューション提供について、より一層の拍車をかけるための貴重な場となったそうです。



写真2 人とくるまのテクノロジー展2024出展の様子

NTT西日本におけるネットワーク視える化ツールの活用状況（能登半島地震における活用実績）

NTT西日本グループの通信サービスを「24時間365日」監視しているNTTフィールドテクノネットワークサービスオペレーションセンター（NSOC）では、通信障害時の対応を迅速化しサービス品質を高めることを目的に、設備の状態やサービスの提供状況の「視える化」の実現に向けた取り組みを進めています。ここでは、NSOCで導入しているネットワーク視える化ツールを紹介し、2024年1月に発生した能登半島地震時における視える化ツールの活用実績、今後の取り組みについて示します。

ネットワーク視える化ツール導入の背景

NTT西日本が提供する電気通信サービスは、人々の生活に不可欠な重要なインフラです。NTT西日本グループの通信サービスを「24時間365日」監視しているNTTフィールドテクノネットワークサービスオペレーションセンター（NSOC）では、通信サービスの安定性・信頼性確保を最優先事項と位置付け、通信障害が発生した際は速やかな復旧に努めています。また、通信障害の状況をお客さまに適切かつ速やかに発信することも大切な責務と考えており、平時より情報共有の体制を整えています。

しかし、大規模な災害や故障が発生した際には通信ビル間の中継光ケーブルの切断や、大規模ルータの故障が同時多発的に発生することがあります。それに伴い、伝送装置や交換機、集約ルータ、サーバなどから大量のアラームやメッセージが発せられます。これまではオペレータがそれらを1つひとつ分析する必要があったため、障害状況の把握に時間を要してしまっていました。また、一連の復旧対応が終わった後に、発生した事象や対応措置内容を、分析する際にも情報の整理に時間を要しました。

これらの経験を基に、サービス影響や障害個所の早期把握に向けてネットワーク情報を可視化するツールの開発、導入を進めています。

ネットワーク視える化ツールの例

現在、目的に合わせて複数のネットワーク視える化ツールを導入しています。ここでは代表的な3つのツールを紹介します。

1番目はプローブツール（図1）です。NTT西日本エリアの各府県の加入者収容装置に接続したプローブ（試験端末）を用いて、お客さまと同じ環境でインターネットとの自動疎通試験と品質測定を行っています。この結果を可視化することで俯瞰的にサービス影響の有無、範囲を把握可能としました。

2番目はトラフィック情報可視化ツール（図2）です。ルータ間を流れるトラフィックを5分間隔で収集しており、収集・蓄積したトラフィック情報を加工して有益な情報として可視化するさまざまなダッシュボードを用意しています。例えば、トラフィック量を線グラフでリアルタイムに描写しつつ、前日または前週の同一曜日のトラフィック量と重ね合わせる表示をさせるダッシュ

ボードを備えています。また、過去の同一曜日のトラフィック量を学習することでトラフィックの予測値を算出し、実際のトラフィック量が予測値から外れた場合に乖離の大きさに応じて警告を表示するダッシュボードも用意しています。これらのダッシュボードにより、トラフィックの特異な振る舞いを容易に把握することが可能です。

3番目はNTTアクセスサービスシステム研究所が研究開発したネットワークリソース管理技術（NOIM：Network Operation Injected Model）です⁽¹⁾。NTT西日本のネットワークサービスは、光伝送ネットワークやイーサネットワーク、IPネットワークなど、異なる通信プロトコルを組み合わせたマルチレイヤのネットワークによって提供されています。NOIMはTM Forum⁽²⁾で議論されている情報フレームワーク（SID：Shared Information and Data Model）で定義されたエンティティを採用し、汎用的なデータ形式によるネットワーク情報の一元管理を実現しています（図3）。NOIMにより、故障が発生したときの影響を迅速に把握し、故障状況を可視化することが可能です。例えば、自然災害によって物理リソース（ビルやケーブル）が損傷した場合、当該物理リソースに重畳している論理リソースが損傷の影響を受けます。論理リソースが影響を受けると、その論理リソースが提供しているサービスが影響を受けます。NOIMはレイヤをまたがる各リソース間の関係を保持しているため、それらの関係をたどる

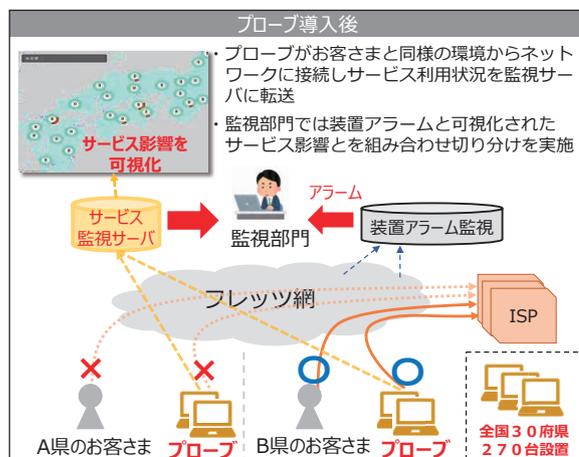


図1 プローブツール

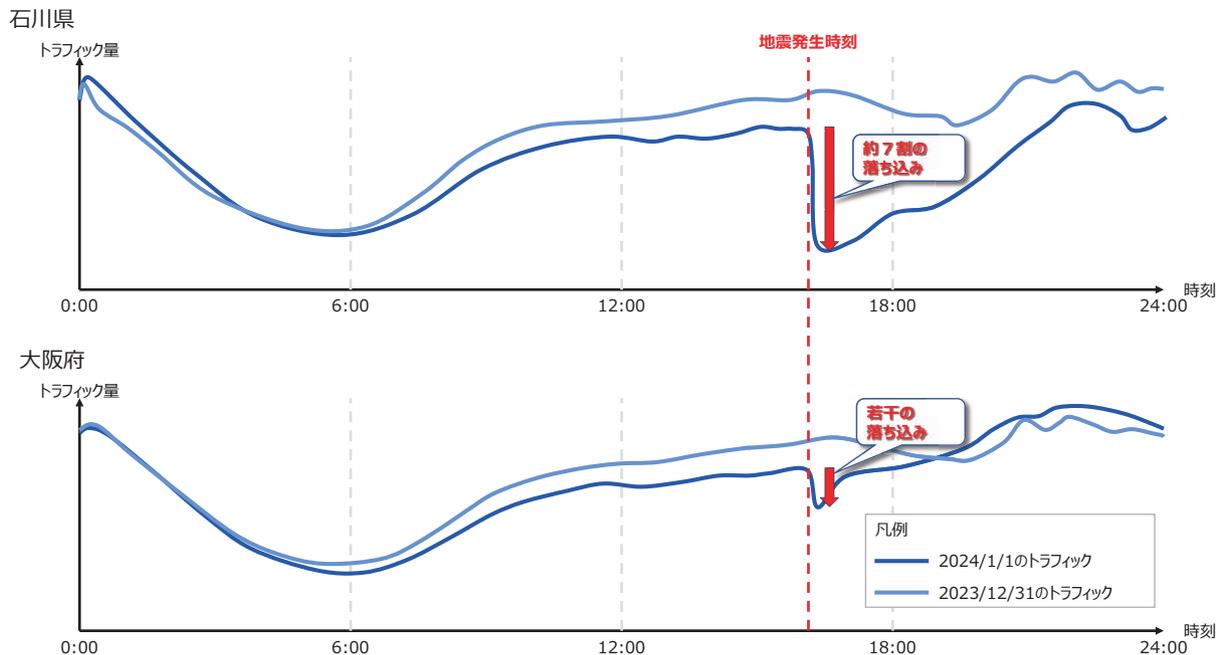


図4 能登半島地震におけるトラフィック情報可視化ツールの活用結果

次にトラフィック情報可視化ツールで被災エリアのリアルタイムのトラフィック量を確認しました。平常時と比べて7割ほどのトラフィックの落ち込みを確認でき、全断ではないもののお客さまの通信に影響が出ている状況を大まかに把握しました(図4)。

本地震では設備の故障が広範囲に及んだことにより、サービス影響を精緻に把握するためには多くの時間と人的リソースが必要でした。しかし、ネットワークを監視するシステムからNOIMに連携されたアラームにより、災害対策本部においてサービス影響の範囲を把握することができました。具体的には、サービス影響を受けている範囲が石川県能登地方に限定されており、石川県の加賀地方および隣接県である富山県では、地震の影響による通信サービスの影響を受けていないことを認識できました(図5)。

このことにより以下の2つの利点がありました。1点目は、アラームの精査に要する時間が大幅に削減されたことです。以前は、複数のアラームから関連性のあるアラームを精査するのに多大な時間が必要でしたが、必要なアラームのみをNOIMへ送信する仕組みを導入した結果、この作業は不要となり、サービスレイヤの影響確認に注力することができました。

2点目は、お客さまへの情報発信が迅速化されたことです。

NSOCと災害対策本部に速やかに情報が集まることにより、迅速な情報発信を行うことができました。また、市町村災害対策本部が設置される庁舎や災害拠点病院に対して正常に通信サービスが提供されているかなど、被害が発生していないことも併せて確認することができました。

また、能登半島地震の復旧対応に対する振り返りでは、トラフィック情報可視化ツールを活用しました。地震の発生時刻前後でのトラフィック量を分析した結果、被災エリアである北陸3県(石川県、富山県、福井県)ではトラフィックが大きく落ち込んだことが確認できました。さらに、このトラフィックの落ち込みは1月1日の22時ごろには地震発生以前の水準まで回復していることが分かりました。また、北陸3県ほどではないものの、トラフィックの落ち込みは西日本エリアの各府県でもみられました。これは、地震発生直後は緊急地震速報を契機にインターネット利用を一時的に中断し、テレビの地震報道の視聴に切り替えるといった行動が影響しているとみられます。今回確認できたトラフィックの振る舞いは、今後の災害に備えたネットワークの設計や災害直後のネットワークオペレーションに活用できると考えています。

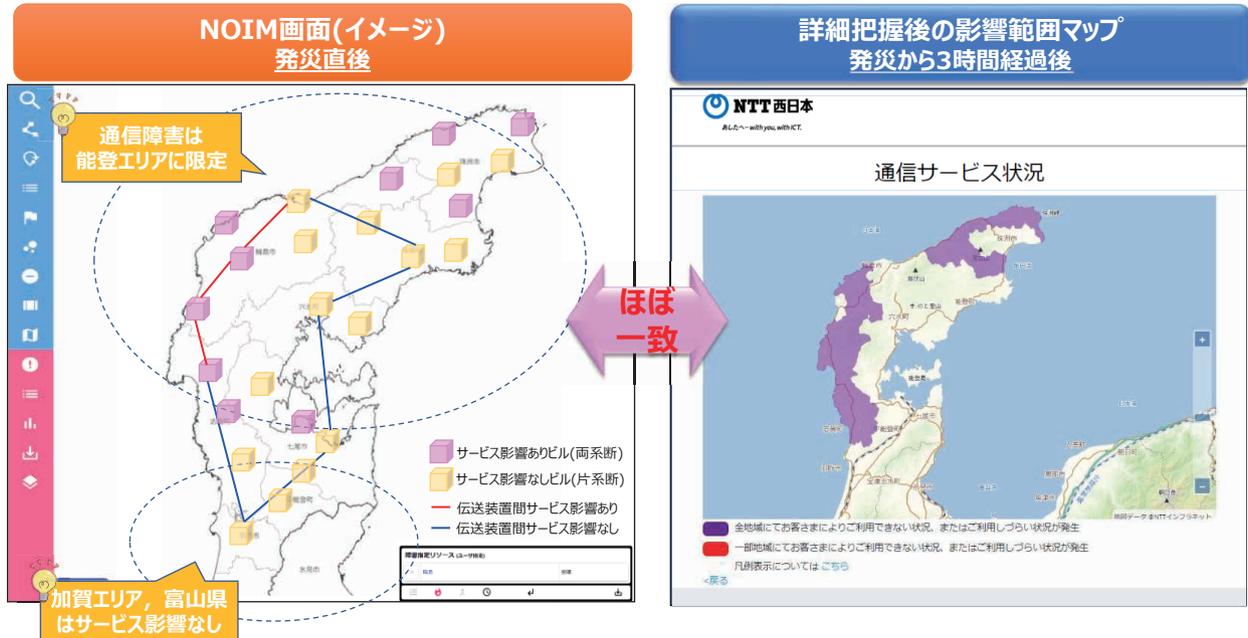


図5 能登半島地震におけるNOIMの活用結果

おわりに

ここでは、NTTフィールドテクノが導入しているネットワーク見える化ツールの概要と、能登半島地震における活用事例について紹介しました。これまで、NTTフィールドテクノではプローブツールとトラフィック情報可視化ツールを内製し導入、活用してきました。また、NOIMについては初期導入以降、災害の実践を通して得られた課題に対しNTTアクセスサービスシステム研究所とともに解決に取り組みツールに反映してきました。

今後の取り組みとしては、今回の災害対応で活用したこれらのツールのデータや機能を一元化し、統合的な分析により、オペレーション品質を一層向上させることをめざしていきます。また、見える化ツールに取り込むデータ種類を増やし、さらにその精度を上げていくことで、情報発信の質の向上とサービス回復の早期化に向けた検討を進めます。

参考文献

- (1) 佐藤・西川・深見・村瀬・田山：“ネットワーク種別に依存しない統一管理モデルを用いたサービス影響把握技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.32, No.8, pp.51-53, 2020.
- (2) <http://www.tmforum.org/>

◆問い合わせ先

NTTフィールドテクノ
サービスエンジニアリング部 ネットワーク設備部門
ネットワークサービスオペレーションセンタ 企画担当
TEL 06-6490-1162
E-mail nsoc-hozen-sys@west.ntt.co.jp



すべての人が自らの力で制御機器・危機を管理できる世界へ！ OT/ICSセキュリティリスク可視化サービス OsecT

近年、企業規模を問わず工場などのOT (Operational Technology) /ICS (Industrial Control System) システムが攻撃される事例が増えており、セキュリティ対策が急務な状況です。その中でNTTコミュニケーションズでは、OT/ICSセキュリティリスク可視化サービス「OsecT」を提供しています。本稿では、本サービスでの私たちのアプローチやユーザーズに寄り添った機能・サービス展開、そして今後の展望を紹介します。

取り組む社会課題と私たちのアプローチ

近年、工場・プラントなどの生産現場や電力・ガスなどの社会インフラが攻撃される事例が国内外で増えています。攻撃の目的としては、金銭目的・製品品質の低下による評判の低下・自らの名声を広範囲にアピールすることなどが挙げられます。このような攻撃が増えてきたことにより、OT (Operational Technology : 制御・運用技術) /ICS (Industrial Control System : 産業制御システム) セキュリティ対策の必要性が高まっています。

しかしながら、OT/ICSシステム環境とITシステム環境では、優先すべき事項や管理状況が異なるため、既存のITセキュリティの手法をそのまま導入することは困難です。

まず、OT/ICSシステム環境では、制御系システムの安定稼働が第一優先です。セキュリティ対策をした結果、制御系システムへの影響があってはなりません。そのため、OSやアプリケーションの最新化はされていないことが多くなります。また、ランサムウェア対策のソフトウェア [EDR (Endpoint Detection and Response) 等] を、制御系システム内に導入することも困難です。

次に、制御系システムの現状が把握できていないケースが多いことです。機器の通信状況が分からないため、攻撃されたことも分からない可能性があります。

さらに、中堅・中小企業の場合、セキュリティ対策に十分なコストをかけられない、セキュリティ担当者の不在といったコスト・人材不足の課題もあります。大企業は一定レベル以上のセキュリティ対策は行っていることから直接攻撃することが難しくなりつつあります。そこで、対策レベルが低い中堅・中小企業を攻撃の

入り口とし、サプライチェーン全体に影響を与えるようなセキュリティ事故が発生しています。そのため、企業規模を問わず、セキュリティ対策を進める必要があります。

これらの課題に対して、私たちは次のようなアプローチで取り組んでいます (図1)。

「制御系システムの安定稼働が第一優先」という課題に対しては、制御ネットワーク内を流れるトラフィックのコピーのみをパッシブに監視・分析し、セキュリティ脅威の予防・早期発見を実現します (検知優先)。既存システムへのソフトウェアインストールなどは不要で、検査通信などをネットワーク内に流すこともないため、制御系システムに影響を与えることはありません。

「制御系システムの現状把握ができていない」という課題に対しては、トラフィックのコピーを分析することで、制御システム内にある機器だけでなく、機器の通信先や通信量、通信サービスなど多様な観点で見える化をしています。

最後に「コスト・人材不足」という課題に対しては、中堅・中小企業でも導入可能な価格帯で提供することと、誰でも簡単に導入・運用できるような設計にしています。特に私たちは、コスト・人材不足でOT/ICSセキュリティに手を出せない、ということを解消できるようなアプローチを重視して、サービスを開発しています。

NTTグループ内製開発によるサービス

私たちが提供するOT/ICSセキュリティリスク可視化サービス OsecT (オーセクト) とは、工場などの制御系システムのセキュ

【課題】

- 制御系システムの安定稼働が第一優先
- 制御系システムの現状把握ができていない
- 対策コストを極力抑えたい
- セキュリティの専担者が不在

【アプローチ】

- 制御系システムへの影響を排除した予防・早期発見策 (検知優先)
- 見える化
- 低価格
- 簡単導入・簡単運用

図1 OT/ICSセキュリティにおける課題とアプローチ

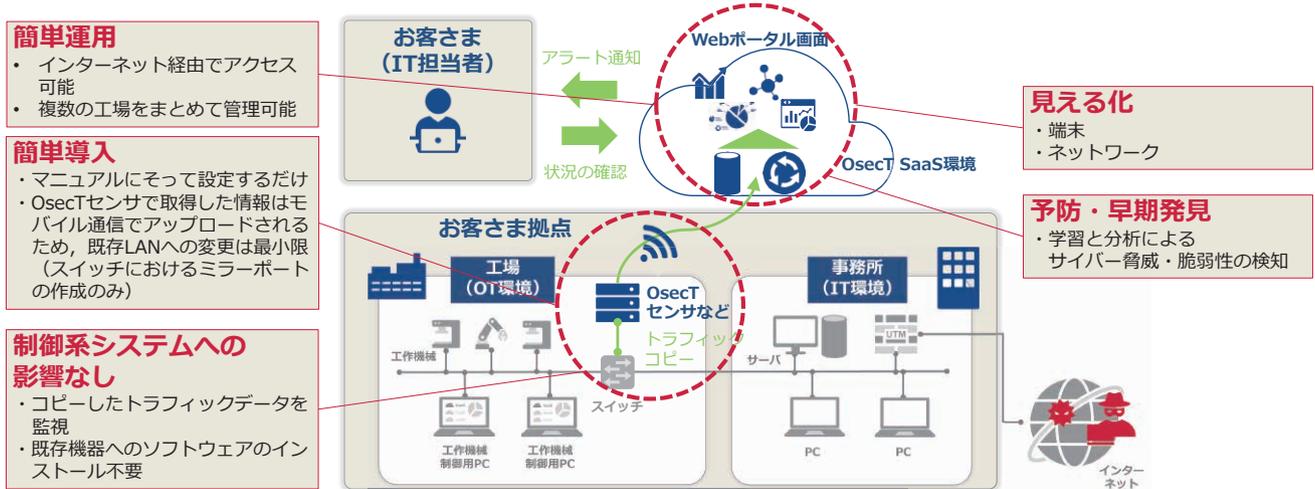


図2 全体構成図とOsecTの特徴

リテリリスクを可視化・検知するサービスです⁽¹⁾。多様化する制御系システムのセキュリティ脅威に対して、トラフィックを解析するセンサ機器をお客さまの工場内に設置するだけで、制御システムへの影響なく、端末・ネットワークの可視化と脅威・脆弱性検知ができます。これにより、早期にリスク感知できる状態をつくり、工場の稼働停止による損失を未然に防ぐことができます。

OsecTは従来のOT-IDS（OT-Intrusion Detection System：OT環境のネットワーク監視による資産可視化・侵入検知システム）と比較して、いくつか大きな違いがあります（図2）。

1番目は価格が大幅に安価である点です。従来のOT-IDSはセキュリティ有識者が詳細な分析に使うための、高機能かつ高価なサービスが一般的でした。一方、OsecTは機器・ネットワークの可視化やセキュリティ脅威を検知するために、必要十分な機能のみに絞ってソフトウェアを実装しています。また、NTTグループの完全内製開発であるため、従来製品と比較して安価にサービス提供できます。

2番目はすでに稼働している制御系システムのスイッチにLANケーブルを接続し、ミラーリングの設定をするだけで、既存システムに影響を与えず、簡単に導入可能である点です。従来製品ではセキュリティ監視のために、既存のネットワークを改修する必要があることが多いです。一方、OsecTでは工場に設置するセンサ機器にSIMが搭載されており、工場内を流れているトラフィックをセンサ機器が取得し、必要な情報のみをNTTコミュニケーションズが提供するモバイル閉域網を経由して、SaaS（Software as a Service）環境に送信・分析するため、既存ネットワークへの影響はありません。

3番目は、インターネット経由でSaaS環境に存在するOsecT管理画面にアクセスできるため、お客さまはどこからでも工場の状態を把握できる点です。従来製品ではセキュリティ監視のために、VPN（Virtual Private Network）などを利用して外部からアクセスするケースがあります。しかしながら、セキュリティ監視を目的とした外部から工場へのリモートアクセスが、工場のセキュリティポリシーに抵触するケースがあります。一方、OsecTでは工場へのリモートアクセスは行わず、SaaS環境で一元管理可能です。また、複数の拠点の情報を1つのSaaS環境で確認できるため、運用のハードルも低くなります。

多様なニーズに対応するOsecTシリーズ

OsecTは「すべての人が自らの力で制御機器を管理できる世界を実現する」というプロダクトビジョンを基に、開発・運用・拡販を続けています。そのため、ユーザや営業担当、パートナー企業へのヒアリングを通じてニーズを収集、誰からも求められるようなプロダクト・サービスにしていきたいことを心掛けています。

現在、WideAngle OsecTに加えて、さまざまなOsecTシリーズを展開中です。

1番目はOsecT Edge（オンプレミス版OsecT）であり、OsecTクラウド環境・分析基盤をお客さま拠点内のオンプレミスサーバに配置するサービスです。この形態ではセンサ・オンプレミスサーバの機種選定からお客さまの要望におこたえできます。例えば、以下のようなニーズがある場合、OsecT Edgeによってニーズを満たすことができます。

- ・お客さまによって、監視データをクラウドにアップロードすることが許容されない場合
- ・プライベートSOC（Security Operation Center）を運用しており、社内ネットワークで完結したい場合
- ・センサ機器設置場所（お客さま工場内など）のLTE（Long Term Evolution）がつながりにくい場合
- ・センサ機器1台当りのモニタリングポート数を増やしたい場合

2番目は、OsecT Free（期間限定版の無償OsecT）であり、お客さま自身で試用いただくためのサービスです。ソフトウェアをVM（Virtual Machine）形式で提供して、お客さま自身で用意したセンサ機器・オンプレミスサーバに導入してお使いいただけます。例えば、以下のようなニーズがある場合、OsecT Freeによってニーズを満たすことができます。

- ・お手持ちのサーバなどで、まずは機能を試したい場合
- ・2024年7月現在サービス提供できていない海外のお客さまが試したい場合

3番目は、OsecT Lite（可視化+新規端末検知のみのOsecT）であり、可視化に重点を置いた、より安価なサービスです。

WideAngle OsecTで提供している機能のうち、可視化と一部の検知機能のみ提供しています。例えば、以下のようなニーズがある場合、OsecT Liteによってニーズを満たすことができます。

- ・まずは、資産・ネットワークの可視化のみをより安価に行いたい場合
- ・セキュリティアラートに対して、専門組織やOTセキュリティ対応する十分な知識がない場合

ユーザヒアリングを通じた機能開発

私たちはユーザニーズを踏まえた複数のOsecTの提供形態の実現だけでなく、ユーザヒアリングを継続的に行ったうえで、真に求められる機能追加・改善を継続しています。ユーザヒアリングを通じて開発した機能として、「台帳連携機能」と「アセスメントレポート出力機能」があります。

台帳連携機能は、お客さまがすでにExcel等で資産台帳を持っている場合に、その台帳をOsecTにアップロードしていただくことで、OsecTが取得した情報と連携できるようにします。これにより、OsecTだけでは取得できない情報（例：設置場所）

The screenshot displays the '台帳' (Inventory) section of the OsecT interface. It features a sidebar with navigation options like 'ダッシュボード', '可視化', '端末', 'ネットワークマップ', 'トラフィック', 'ランキング', 'OTプロトコル', and '台帳'. The main area shows a table of device records with columns for device name, MAC address, IPv4 address, IPv6 address, host name, sensor, device type, and location. Below the table is a network map showing connections between devices. To the right, there is a '適用' (Apply) button and a detailed view of a selected device, including fields for device name, MAC address, IP addresses, location, OS, device type, and a note about the device's status and usage.

デバイス名	MACアドレス	IPv4アドレス	IPv6アドレス	ホスト名	センサー	デバイスタイプ	場所	詳細
デバイス09	00:08:02:1c:47:ae	10.10.7.101	fe80:ce7d9:81e5f3b6:bf32	DESKTOP-USER1PC	デフォルト	ITデバイス	北海道工場 ルーム09	詳細
デバイス314	00:0c:29:cca:d1:03	209.203.50.200	fe80:c20c:29ff:feca:d103	Default	デフォルト	ITデバイス	北海道工場 ルーム314	詳細

検索先端末数	0
役割	サーバー
台帳情報	
デバイス名	デバイス12
MACアドレス	08:30:6b:w0:ed:01
IPv4アドレス	10.2.4.6
IPv6アドレス	fe80:c53:b5d0:8a2:d41
場所	北海道工場 ルーム12
OS	
デバイスタイプ	ITデバイス
詳細	
備考	2023年4月購入（IoT推進室）。 2026年3月に利用終了予定。 2024年3月～：OsecT本部使用中。

図3 台帳連携機能

7. サポート切れOSが搭載されている端末一覧



Windows ME, XP, 7, 8などサポート切れOSが搭載されている端末が**2件**見つかりました。

セキュリティホールとなる可能性がありますので、OSバージョンアップでの対応や、IPS等の仮想パッチでの対応をご検討ください。

IPアドレス	MACアドレス	ベンダー	ホスト名	OS	初回検知日時	最終検知日時
192.168.1.35	08:00:27:b9:d0:0a	PCS Systemtechnik GmbH	SNG-WIN2K	Windows 2000	2024/07/22 21:08:49	2024/08/19 13:58:41
192.168.1.37	08:00:27:fb:de:c8	PCS Systemtechnik GmbH	SNG-WINNT4	WindowsNT 4.0	2024/07/22 21:08:49	2024/08/19 13:58:41

図4 アセスメントレポート機能

を参照できるようになることや、資産台帳にある資産は検知アラートの対象外にして過検知を防ぐといったことができるようになります(図3)。

アセスメントレポート出力機能は、OsecTで分析した情報をパワーポイント形式で出力します。出力された情報には、お客様の機器・ネットワークにおいてセキュリティリスクにつながり得る分析内容だけでなく、推奨される対応案も併せて記載します。パワーポイント形式で出力するため、お客様自身で情報の加筆修正もできます。これにより、セキュリティの専門的知識がなくても、自社の情報セキュリティ部署やB2Bサービスとしてアセスメントサービスを提供する場合のサービス提供先企業に対して、アセスメント結果の提示や状況説明が容易に行えます(図4)。

■参考文献

(1) <https://www.ntt.com/about-us/press-releases/news/article/2022/0425.html>

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーションズ
イノベーションセンター
E-mail osect@ntt.com

今後の展望

現在、工場などを有して直接OsecTをご利用いただくお客様だけでなく、私たちと一緒にOsecTを展開していくパートナーさまも募集しています。また、現在は国内での販売のみですが、アジア・ヨーロッパなどの国外での販売も検討中です。

引き続き、ユーザーニーズに寄り添った開発を続けて、お客様に愛されるプロダクト・サービスをめざしていきます。私たちのサービスに興味を持っていただいた方は、ぜひお問い合わせください。