ISSN 0915-2318 平成2年3月5日第三種郵便物認可
令和3年4月1日発行　毎月1回1日発行　第33巻第4号（通巻385号）

NTT 技術ジャーナル

4 APRIL 2021
Vol.33 No.4

特集

超レジリエントスマートシティの実現に向けたNTT宇宙環境エネルギー研究所の挑戦

人と社会を支えるヘルスケアデバイス・インフラメンテナンス技術

安心・安全な社会実現に貢献するための暗号・セキュリティ技術に関する研究開発

トップインタビュー

藤原 遠　NTTデータ 代表取締役副社長執行役員

from NTT西日本

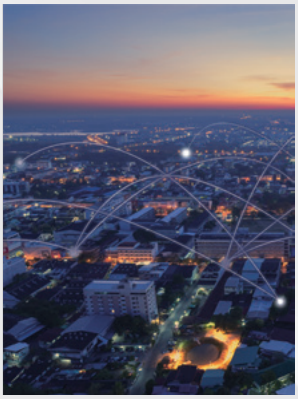
IOWN時代を見据えたNTT西日本の研究開発の取り組み

from NTTデータ

アジリティ高い組織経営を実現するための6つの奥義（Key Success Factor）

特別連載

ムーンショット・エフェクト――NTT研究所の技術レガシー



NTT
技術ジャーナル

4 APRIL 2021
Vol.33 No.4

CONTENTS

4 トップインタビュー
Re-Design by Digital —— デジタルによる社会の再構築　多様性時代における価値観とフィロソフィの共有
藤原 遠　NTTデータ 代表取締役副社長執行役員



10 特集
超レジリエントスマートシティの実現に向けたNTT宇宙環境エネルギー研究所の挑戦

12 宇宙視点から地球環境の未来を革新させる技術の研究開発

16 環境負荷ゼロに貢献する次世代エネルギー活用技術とCO_2変換技術

21 環境負荷ゼロの実現に向けた，エネルギー流通基盤技術

26 持続可能かつ包摂的な社会の実現をめざしたESG経営科学技術

31 安心・安全に暮らすためのプロアクティブ環境適応技術

35 主役登場　花岡 直樹
(NTT宇宙環境エネルギー研究所)



40 特集
人と社会を支えるヘルスケアデバイス・インフラメンテナンス技術

42 持続可能な社会に向けたデバイス技術が切り拓く未来

47 より安心して働ける作業現場の実現に向けた体調管理技術

51 光音響計測技術を活用した非侵襲生体情報センシング

56 ハイパワーレーザデバイスを用いた錆取り技術の実現に向けて

59 コンクリート電柱内鉄筋の水素脆化予測技術

63 主役登場　高河原 和彦
(NTTデバイスイノベーションセンタ)





64 特集

安心・安全な社会実現に貢献するための暗号・セキュリティ技術に関する研究開発

66 安心・安全を実現するテクノロジの創出に向けたセキュリティR&Dの取り組み

70 安心・安全な価値創造プロセスを実現するデータ流通・利活用技術

75 増え続けるオペレーションコストの問題を解決し，被害を極小化する技術の確立と展開

79 量子情報処理によるセキュリティと量子情報のデータ保護

84 主役登場　岩村 誠（NTTセキュアプラットフォーム研究所）

85 特別連載　ムーンショット・エフェクト——NTT研究所の技術レガシー

第8回　シャツが生体情報計測のIoTセンサに

89 from★NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル

1Gから5Gに至るモバイルコミュニケーションの進化を支えた研究開発用「電測車」

99 挑戦する研究者たち

永田 昌明
NTTコミュニケーション科学基礎研究所
上席特別研究員
DIFFERENTはほめ言葉である．
未来を論理的に語る訓練を心掛けよう



36 明日のトップランナー

秋山 一也
NTT宇宙環境エネルギー研究所 グループリーダ
「核融合炉の最適オペレーション技術」
「宇宙太陽光発電」



105 from NTT西日本

IOWN時代を見据えたNTT西日本の研究開発の取り組み

109 from NTTデータ

アジリティ高い組織経営を実現するための6つの奥義（Key Success Factor）

114 テクニカルソリューション

最新の故障事例の紹介
——設備の材料劣化に関するトラブル

読者の声 ……118

5月号予定

編集後記

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

本誌掲載内容についての
ご意見，ご要望，お問い合わせ先

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

本誌ご購読のお申し込み，
お問い合わせ先

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

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

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

©日本電信電話株式会社2021
●本誌掲載記事の無断転載を禁じます●
※本誌に掲載されている社名，製品およびソフトウェアなどの名称は，各社の商標または登録商標です．

／ト／ッ／プ／イ／ン／タ／ビ／ュ／ー／

View from the Top



NTTデータ
代表取締役副社長執行役員

藤原（ふじわら）　遠（とおし）

PROFILE：
1985年日本電信電話入社．1988年NTTデータ通信，2014年NTTデータ執行役員 第四金融事業本部長，2017年取締役常務執行役員，2018年代表取締役副社長 金融分野・欧米分野・グローバルマーケティング担当を経て，2020年6月より現職．

Re-Design by Digital
——デジタルによる社会の再構築
多様性時代における
価値観とフィロソフィの共有

新型コロナウイルスの感染拡大は社会に大きな変革をもたらしました．リモート生活が常態化した今，不確実な状況に適応するサプライチェーン，安心・安全なデータ連携，ビジネス環境を支えるITインフラやセキュリティに期待が高まります．より豊かで調和のとれた社会の実現に貢献することを企業理念に掲げるNTTデータ．中期経営計画とトップの心構えを藤原遠NTTデータ代表取締役副社長執行役員に伺いました．

質を伴った成長を重要視すべき

今年度は中期経営計画の締めくくりの年ですね．概観をお聞かせいただけますか．

NTTデータは15年ほど前からグローバル展開を強化してきました．欧米を手始めに徐々に経験値を積んで大型M&Aを実現し，53の国・地域で事業を運営しています．連結売上高は2019年度で約2兆2700億円，13万人の社員のうち，約3分の2が外国籍で，その中で一番多いのがインド国籍です．

こうした環境の中，2019年からの中期経営計画は，2025年ごろのGlobal 3rd Stage達成に向けて極めて重要な3年間と位置付けています．「変わらぬ信念，変える勇気によってグローバルで質の伴った成長」をめざして，Growth，Earnings，Transformation，Synergyの4つの観点に取り組んでいます(1)．グローバル化をさらに進め，社会のデジタル化は加速するという見通しの下，資源を集中して新しい技術分野での強みづくりを進めています．

キーワードは「質を伴った成長」です．言い換えれば，利益の「額」だけではなく，「率」を重要視しています．ビジネスのボリュームが増えれば売上「額」は増えます．一方で利益「率」増は，お客さまからの評価の高さであると考えています．お客さまに，NTTデータが提供するサービスにはそれだけの価値があると認めていただいたからこそといえるからです．お客さまの評価は私たちの



モチベーション向上にもつながりますから，デジタルを通じた顧客価値の高度化を今後も追求していきたいと考えます．

さて，2021年度は中期経営計画，３年間の締めくくりの年です．１年目の2019年度は計画を順調に遂行してきましたが，ご存じのとおり２年目の2020年度は新型コロナウイルスの感染拡大が社会に大きな影響を与えました．NTTデータでも各グローバル拠点のトップたちと相当な時間をかけて実情の把握と対策の検討を重ねてきました．日本以上に海外は大打撃を受け，欧米では今も約95%の社員が在宅勤務を余儀なくされる等の厳しい状況にあります．

例年５月ごろに前年度の実績と今年度の計画についてご報告しておりますが，昨年５月の期末決算発表当時は緊急事態宣言中でもあり，計画や見通しを報告することは非常に難しい状況にありました．結果的に８月に延期して報告させていただいた通期業績目標は，第３四半期の決算発表時点では達成できる見通しです．これは，なによりも現場の頑張りのおかげですが，新型コロナウイルスによる世の中の変化を，ある意味追い風ととらえて取り組んできた結果，達成できたのではないかとも考えています．

新型コロナウイルスの世界規模の感染拡大は従来のビジネスを大きく変えましたね．

私たちが提供するサービスが停止してしまえば，お客さまのみならず社会に影響を与えます．最初の緊急事態宣言のときは「この状況で本当にサービス継続できるのか」と懸念しましたが，とにかくできることをやり続けました．

パンデミック当初は，アウトソーシングを手掛ける海外の社員が出社できなくても，あるいは，お客さまのもとへお伺いできない状況下でも，サービスを提供し続けられるよう必死で対応しました．中には，国としての環境が満足に整わない中でも，苦労して環境を整えて在宅勤務をしているところもあります．今だから落ち着いて話せますが，当時は世界中の全社員が懸命に環境を整備し，ビジネスを継続するための体制を整えてくれたのです．

大きな支障もなく事業を継続することができたのは，日本を含む世界各国のお客さまのご理解と，現場の社員１人ひとりの努力の結果だと思っています．お客さまにも社員にも心から感謝しています．

前述のとおり，新型コロナウイルスの感染拡大は，社会全体のあり方まで変え，その結果経済的な向かい風ともいえる部分がクローズアップされがちですが，デジタル化にとっては追い風でもありました．新型コロナウイルスの感染拡大によって，強制的にリモート環境整備が加速し，ニーズや課題も明らかになりました．私たちがこれまで積み上げてきたノウハウや，NTTグループ全体のケイパビリティである技術が貢献できる領域が広がってきたのではないかと考えます．

特に１年前と比べて，デジタル化はそのニーズが一気に高まっており，さらに強化していく必要があります．デジタル庁が設立されることとなり，官公庁のデジタル化，そして日本社会のデジタル化に臨む国家的な取り組みは加速すると思われます．これまで官公庁，金融機関などのデジタル化，決済システムなどのインフラ整備を数多く担当させていただいた私たちの強みを活かして，デジタル技術を駆使した社会全体をつなぐ仕掛けづくりに，積極的に取り組んでいきたいと考えています．

価値観やフィロソフィは共振するまで伝え続け，「着眼大局，着手小局」で進める

世界各国で多くの社員が団結して未曾有の事態に臨まれたのですね．

53の国と地域，13万人の社員の心を１つにしてビジネスを展開するために，私は常に利益目標だけではなく，多様性を重要視しつつ，価値観やフィロソフィを共有することが大切であると，一貫して伝え続けています．特にお客さまとの間に「Long-Term Relationships（長期にわたる揺るぎない関係性）」を築くことを大切にしています．一般的に，急成長するIT業界に世の中が抱く印象は「短い期間で技術を売るだけ」というのが多いかもしれませんが，私たちは違います．お客さまと長くお付き合いする，しっかりとした関係性を築くことを重要視しているのです．お付き合いの過程には，お客さまが苦しいときも私たちが辛いときもありますが，互いに理解し合えれば苦難も乗り越えられると信じています．これらは，会社創立30周年を機に掲げたNTTデータのグループビジョン「Trusted Global Innovator」を裏打ちする姿勢です．特にTrusted，つまりお客さまとの信頼関係を築くためにはLong-Term Relationshipsは欠かせません．M&A等により外国籍企業に私たちの傘下に入っていただく際にはこうしたフィロソフィや価値観を共有できるかを確認しています．



グループビジョンの達成にあたって，グループ全社員で共有し，社員が日々実践している価値観は次の３つです．１番目はClients First．私たちが手掛けるシステムインテグレーションはお客さまの考え方や真の目的を咀嚼して，中長期的な視野からお客さまにとっての最善策を提案することです．例えお客さまからの要望であったとしても，将来的にお客さまのプラスにならないと判断したことは，はっきりとそれを伝え，代替策を示します．２番目はForesight，技術や社会の将来を見据え，必要な技術やサービスを社会やお客さまに提案することです．一例として毎年，NTT DATA Technology Foresightとして，先進技術や社会動向の調査分析によるトレンド予測を公開しています．お客さまからも進むべく道の提案を期待され続けるような存在でありたいと考えています．３番目はTeamworkです．私たちだけでできることには限界があり，特に規模の大きな事業は社内だけではなく，お客さまと一体となって築いていかなければ成し遂げられません．難局をともに乗り越えていくことで強固な関係性も築き上げられ，ともに戦いに挑んだ同志という認識も生まれます．私がまだ課長だったころのお客さまとは今でも強い絆で結ばれており，お互いの立場は変わっても20数年来のお付き合いが続いています．こうしたかかわりは個人としての資産だけではなく企業としての資産でもあります．

理念を現実のものとするために，大切にしていることがあれば教えてください．

私は，トップには明確なビジョンを持ち，それを共有するために情報を発信し，周囲を巻き込んでいくことや，社員にビジョンを理解してもらうだけではなく，共振するまで伝え続けてベクトルを合わせることが求められていると思います．社員が自然にそれを語れるようになるまでです．

また，理念は素晴らしくても現実は思いどおりに進まないことはあります．国内外の社員には次の３つを大切にしてほしいと話しています．１番目は「Interactive Communication：双方向コミュニケーション」です．コミュニケーションは相互に行われているかに留意することです．時折「それは伝えましたよね？」といった受け手の理解を意識しない，あるいは耳の痛い話は聞かないワンウェイなコミュニケーションをしてしまうことがありますが，相互にコミュニケーションを図ることを大切にしたいと考えます．２番目は「Mutual Respects：相互の尊重」です．発注者と受注者という立場には，本来，上下関係はないはずですが，時に誤解してしまうことがあります．「互いにプロとしてリスペクトし合いましょう」と，私たちが率先して示すことで相手が言いづらい話も聞かせ



てくれることがあります．3番目は「Passion and Perseverance：やりぬく姿勢」です．リーダーが覚悟をメンバーに示すことは，彼らの安心感ややる気を担保することにつながるため非常に重要だと考えています．正直なところ，意思表明はドキドキしますが，プロジェクトを終えたときに「やはりこれで良かったのだ」と実感しますし，「あの意思表明に心を打たれました」とメッセージが届いた際は，メンバーと共感できたと嬉しく思いました．

そして，私は「着眼大局，着手小局」をモットーに掲げています．常に社会の動向を広い視野を持って眺め，社会やお客さまがNTTデータに期待されていることを，できる限り模索しています．私は経営戦略，人事戦略と同時に技術戦略の責任者でもありますから，技術の発展を通じた社会貢献を追究しながら，大局観を持って技術を活かし，NTTデータを強い会社に成長させることを意識しています．さらにNTTデータらしいグローバルマネジメントを常に念頭に置いています．技術開発力，お客さまとの接点の各レイヤにおいて，NTTデータグループの共通財産を活かして事業を進めていきたいと考えています．

「三方痛し」で信頼関係を確固たるものにする

ところで，藤原副社長はNTT民営化1年目に入社され，NTTデータの発展とともに歩んでこられたのですね．

1985年の入社式はダイナミックループのお披露目を兼ねて行われ，大型ディスプレイに映るループを眺めたことを今でも覚えています．

1988年にはMBA（経営学修士号）取得のために米国留学をさせていただきました．当時米国では技術を十分に理解した経営の重要性が議論されており，私が留学したコーネル大学でもエンジニアリングと経営学のジョイントプログラムを検討していました．MOT（技術経営修士）の原点となる考え方でしょうね．私を含め，各国から技術の専門性をバックグラウンドとする留学生が選抜され，MBAとME（工学修士号）のダブルディグリー（2つの学位）を2年間で修了するというハードな時間を過ごしました．

入社以来，35年の間には何度も苦しい時期がありました．私は日本の金融機関向けシステム開発に多く携わってきましたが，障害が発生すると業務の遂行に致命的な悪影響が出るほど重要（ミッションクリティカル）なシステムを担当させていただいたときのことです．ミッションクリティカルなシステムを構築するときは手堅い手段をとるのが王道なのですが，お客さまも私たちも20年，30年先を見据えたシステムを構築することで合意し，先進的な技術を積極的に取り入れようとかなり大胆な決断をしました．

各レイヤに最先端の技術を駆使したシステムとしただけに，技術的な課題が山積みの状況が続きました．先の見えない状況が続く中，迫りくる期限に向けて社員は外資系ベンダとの丁々発止で疲弊していきます．私は最後までやり抜くと宣言し，ステークホルダと調整を図ろうと必死で「痛み分け」のできる可能性を探りました．時には膝を突き合わせて議論し，硬軟織り交ぜて何とか信頼関係を築き，お互いの譲れるところ，譲れないところを確認しつつ，プロジェクト全体のベクトルをそろえることができたのです．こうした経験もあって私は「三方痛し」，互いが少しずつ我慢をしながらでも前に進んでいける関係性を大切にしています．そして最後までやり抜く姿勢を見せることの重要性も実感しました．

技術分野における今後の展開と技術者の皆さんに向けて一言お願いします．

技術のレイヤでは，AI（人工知能）やBlockchain，そしてSoftware Engineering等の技術を結集して私たちの強みをつくっていきたいのです．これに関しては中期経営計画として，「グローバルデジタルオファリングの拡充」の施策の1つとして，技術集約拠点（CoE：Center of Excellence）の拡充を掲げています．これは，NTTデータグループの世界中に広がるネットワークを活かし，グローバル横断で知識の集約，トレーニング，技術支援，アセット提供等を展開し，お客さまのデジタルトランスフォーメーションに貢献していく取り組みです．これまでBlockchain，Digital Design，Agile/DevOps，AIの4つの領域において活動を進めてきましたが，さらにIoT，Intelligent Automation，Software Engineering Automationを追加し，デジタル化に必要不可欠で当社が差別化すべき先進技術分野のCoEを設立しました．これも着眼大局，着手小局の視点で，すべての課題に同時に取り組むのは難しいですから，着手すべきことを絞り込み，徹底して取り組んでいきます．

そして，技術者の皆さん．技術は世界の共通言語であると同時にご自身の強みです．どんどん出てくる新しい技術に関心を持つことも重要ですが，ご自身の核となる専門性を持ち，それを物差しに活躍できるといいですね．あるとき，電気工学の専門家の方が，揉め事を「ここには抵抗回路があるんだね」等と表現するのを聞いて，思わず感心してしまいました．皆さんきっとご自身の得意な技術はお持ちでしょうから，それを磨き上げ，新しい何かを上乗せしたり幅出ししたりする努力を最大限していただきたいと思います．私自身も新しい積み上げのために，分からないことは，恥ずかしがらずに若手社員に教えてもらったりしています．若手社員のレクチャーは刺激的で楽しいです．技術者としての研鑽は，コツコツ積み上げていかなければならず時間もかかりますが，しっかりと重ねていきたいですね．

（インタビュー：外川智恵/撮影：大野真也）

■参考文献

(1) https://www.nttdata.com/jp/ja/ir/management/plan/

※インタビューは距離を取りながら，アクリル板越しに行いました．

インタビューを終えて

分刻みのスケジュールで働くトップにお話を伺うときは1秒でもその時間を無駄にしないようにスタッフ一同，万全の体制でお迎えします．ところが藤原副社長はお約束の時間前にインタビュー会場に到着され，まだ準備の最中にもかかわらず，時間を共有してくださいました．技術者であったお父さまのお話やバックパック1つで欧州を旅行中に寝台列車で財布泥棒の難を逃れた笑い話，そして留学時代のお話まで，書ききれなかったたくさんのエピソードを朗らかに語られ，私たちをリラックスさせてくれました．

また，副社長のご著書『サステナベーション』はコロナ禍にあった2020年6月に上梓されました．持続可能な社会は常に変化し続けることで永続性を確保できると結ばれた著書には，インタビューで伺った副社長のお考えが事例とともに凝縮されており，まさに羅針盤となる一冊です．藤原副社長のご発言を支える綿密な調査分析力に圧倒されます．

こうした明るく朗らかな語らいの時間や精緻な分析を基に執筆されたご著書を手にして，改めて副社長が多くの方を魅了してこられたことが分かりました．物事をなすとき，遠回りをしても正しい道を歩んでほしいという願いが込められた「遠」という副社長のお名前に，名は体を表すということわざを実感したひと時でした．



特集

超レジリエントスマートシティの実現に向けたNTT宇宙環境エネルギー研究所の挑戦

NTT Space Environment and Energy Laboratories

本特集では,地球環境の再生と持続可能かつ包摂的な社会の実現に向けた革新的技術の創出を目的に，2020年7月に誕生したNTT宇宙環境エネルギー研究所のさまざまな取り組みについて紹介する.



宇宙視点から地球環境の未来を革新させる技術の研究開発 12

NTT宇宙環境エネルギー研究所で取り組んでいる「環境負荷ゼロ研究プロジェクト」「レジリエント環境適応研究プロジェクト」について概説する.

環境負荷ゼロに貢献する次世代エネルギー活用技術とCO_2変換技術 16

環境負荷ゼロの実現に向けた，次世代エネルギー活用技術と，CO_2を効果的に固定し，事業活動トータルでの排出量をゼロ以下にするためのCO_2変換技術について紹介する.

環境負荷ゼロの実現に向けた，エネルギー流通基盤技術 21

再生可能エネルギーを余すことなく活用する仮想エネルギー需給制御技術と，商用電力からの供給が途絶えても安定した電力を地域に供給する直流グリッドをベースとした次世代エネルギー供給技術について紹介する.

持続可能かつ包摂的な社会の実現をめざしたESG経営科学技術 26

企業における長期的リスクマネジメントや新たな収益創出の機会を導出し，企業価値向上に資するESG経営科学技術について紹介する.

安心・安全に暮らすためのプロアクティブ環境適応技術 31

さまざまな影響を予測し，プロアクティブに対応し，人類が適応・受容することでレジリエントな社会を実現するための環境適応技術について紹介する.

主役登場 35

花岡 直樹（NTT宇宙環境エネルギー研究所）
環境負荷ゼロのエネルギーネットワークをめざして

宇宙視点から地球環境の未来を革新させる技術の研究開発

NTT宇宙環境エネルギー研究所は，地球環境の再生と持続可能かつ包摂的な社会の実現に向けた革新的技術の創出を目的に，2020年7月に誕生した新しい研究所です．NTTの研究所で初めて「宇宙」という名前が付いた研究所ですが，宇宙そのものの研究ではなく，太陽を含めた「宇宙環境」から地球を見つめ直し，ダイナミックな視点から地球環境の未来を変えるさまざまな研究に挑戦する研究所です．

前田（まえだ）　裕二（ゆうじ）

NTT宇宙環境エネルギー研究所　所長

はじめに

2018年11月発表の，NTTグループ中期経営戦略『Your Value Partner 2025』に基づき，新たにスマートエネルギー事業の取り組みが始まるとともに，SDGs（持続可能な開発目標）やESG経営への対応が企業の持続的成長に大きく影響するようになってきました．一方，技術面においては，核融合など次世代エネルギー技術実現の可能性が現実味を帯びてきたことに加え，IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想に代表される既存技術の限界を打破し地球環境の再生に貢献できる新技術の可能性も出てきました．このような状況の中，2020年5月にNTTグループの環境エネルギービジョン「環境負荷ゼロ」が発表され，このビジョンの実現に向け，スマートエネルギー分野に革新をもたらす技術と，地球環境の未来を革新させる技術の創出を目的として新研究所が2020年7月に設立されました．

NTT宇宙環境エネルギー研究所は，従来の環境エネルギーの枠にとらわれることなく，宇宙というもっと高い視点，広い視野から我々の住む地球や社会環境を見つめ直し，地球環境の再生と革新に貢献することをめざしています．

研究所のビジョン

NTT宇宙環境エネルギー研究所のビジョンは，次のとおりです．

「地球環境の再生と持続可能かつ包摂的な社会の実現に向け，

・核融合や宇宙発電など次世代エネルギー技術

・レジリエントな環境適応を可能にする技術

の創出をめざすとともに，環境負荷ゼロに貢献する」．

このビジョンを通して実現したい具体的な社会像は，**図1**に示すような超レジリエントスマートシティです．これは，我々の住む社会が地球環境に与える影響を±ゼロにするだけでなく，地球環境の変化による影響を社会が受容できるようにし，クリーンエネルギーの地産地消や自立分散協調型のエネル



図1　実現したい社会像のイメージ

ギーネットワークにより停電ゼロの実現，自然災害による被害もなくすだけでなく台風からエネルギーを取り出す（災害グリーンエネルギー）ことを実現するような社会です（**図2**）．このような超レジリエントスマートシティの実現に向け，次世代の圧倒的にクリーンなエネルギーの実現と活用，CO_2変換を含むサステナブル技術，プロアクティブなESG経営・環境適応といった革新的な技術の研究開発に取り組んでいきます．

取り組んでいる研究テーマ

研究テーマの一覧を**図3**に示します．現在，研究所には2つのプロジェクトがあり，1つは「環境負荷ゼロ研究プロジェクト」，もう1つは「レジリエント環境適応研究プロジェクト」です．詳細はこの後の各プロジェクトの紹介記事に記載されていますので，ここでは概略のみを説明します．

環境負荷ゼロ研究プロジェクト

環境負荷ゼロ研究プロジェクトでは，図3に記載のように3つの研究テーマに取り組んでおり，圧倒的にクリーンな次世代のエネルギーをつくる技術，エネルギーを効率良く流通させるエネルギーネットワーク技術，そして空気中や水中のCO_2を削減するサステナブルシステム技術の研究を行っています．

次世代エネルギー技術については，フュージョンエナジーと宇宙太陽光発電について取り組んでいます．フュージョンエナジーとは核融合を用いた発電技術であり，国際核融合研究機構（ITER）と包括連携を2020年5月に，ITER国内機関である国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（量研）と連携協力協定を2020年11月に結び，ITERの核融合炉の成功をIOWNでサポートしたいと考えています．ITERのトカマク型の実験炉は2025年に運転開始の予定で，炉の中のプラズマの温度が1億5000万℃となるミニ太陽を実現しようとしています．この実験炉から出てくる莫大なセンサデータをIOWNの超低遅延な高速大容量ネットワークでオペレーションセンタまで伝送し，それを活用してデジタルツインコンピューティングで未来予測を行い，オペレーションの最適運用に貢献したいと考えています．

宇宙太陽光発電は，3万6000 km上空の静止軌道衛星で太陽光から得たエネルギーを24時間365日絶え間なく地上に無線で送るという壮大な研究です．無線送電の仕組みにはいくつかの方法がありますが，私たちは特にレーザ光で無線送電する技術にチャレンジしています．これまでNTT研究所では，通信分野での光技術や光電変換技術を培ってきていますので，さらに研究を重ねて高効率で超長距離無線送電可能な技術を早期に実現したいと思っています．

エネルギーネットワーク技術では，NTTグループが得意とする屋内での直流給電技術を屋外に発展させ，NTTビルと周辺地域の需要家を直流でつなぎ，効率良く電力を融通するとともに災害時においても電力を安定的に供給する高レジリエントな自律分散協調型のエネルギーネットワークの実現をめざしています．また，サイバー空間上でエネルギーの需要と発電・蓄電情報を統合的にシミュレートし，最適解を実フィールドに戻して制御することで需給調和を実現する技術や，複数地域間で通信トラフィックや計算処理などの情報処理を空間的・時間的に再配置することで，気象で発電量が左右される再生可能エネルギーを効率的に需要する技術の実現をめざして研究を進めています．

サステナブルシステム技術では，半導体技術と触媒技術を活用した人工光合成（電気化学的アプローチ）と，植物や藻類の能力を最大限に活用する技術（生物学的アプローチ）を対象に，大気や水中のCO_2を削減する技術の実

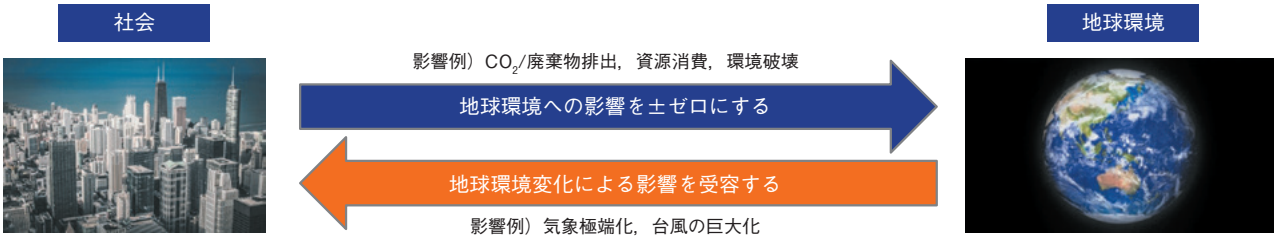


図2　社会と地球環境の関係の将来像



図3　研究テーマ一覧

用化開発に取り組んでいます．電気化学的アプローチでは，マテリアルズ・インフォマティクス*1を活用して，従来の経験則や既存概念では発見できなかったような材料の組み合わせについて検討しており，生物学的アプローチでは，サイバー空間上で多様な育成環境を再現し，ゲノム編集や環境制御の効果を検証したうえでリアル空間に戻して実証するようなデジタルツインを駆使した研究を進めています．

レジリエント環境適応研究プロジェクト

レジリエント環境適応研究プロジェクトでは，ESG経営科学技術とプロアクティブ環境適応技術という2つの研究テーマに取り組んでいます．

ESG経営に関しては，昨今，投資判断基準として重要視されるようになったこともあり，多くの企業が取り組んでいます．しかし，ほとんどの企業では，EnvironmentとSocialとGovernanceをうまく連携できていないというのが実情です．そこで私たちは未来予測・未来変革をキーワードにESG経営のリスクマネジメントに関するESG経営科学技術に取り組んでいます．具体的には，さまざまな環境・社会に関するデータを分析し，デジタルツインコンピューティングを駆使し科学的根拠に基づいて地球環境や社会環境の未来予測を行い，先回りしたプロアクティブなアクションにより，地球環境と人間社会の未来を変革することをめざしています．例えば，未来予測結果から企業価値や企業のWell-beingの評価を行うことで，企業価値の向上に資するアクションにつなげる予報や，その先の未来シナリオ提示などについて研究しています．

プロアクティブ環境適応技術では，極端化する気象や環境に対し積極的に物理的に適応するため，4つの研究テーマに取り組んでいます．環境適応実現のためには，気象・被災予測の高度化がもっとも重要になります．現在でも，気象庁の予測をベースに通信設備被害予測などが行われていますが，これをもっと高度化するため，地球情報分析基盤技術に取り組んでいます．この技術のベースとなるのは，約500 km上空の周回軌道衛星で地上に設置されたさまざまなIoT（Internet of Things）センサ（920 MHz帯）の情

＊1　マテリアルズ・インフォマティクス：材料開発を高効率化する手法であり，AI（人工知能）を含む情報処理技術を活用し，膨大な化合物データ，実験結果，シミュレーション結果等から所望の特性を持つ化合物の候補を探索する手法．

報を一斉に集取し，情報を束ねて地上に落として分析するという衛星を使った全く新たなセンシング手法です[1]．これを活用し，現状ほとんど観測されていない海上，海中あるいは山中におけるセンサ情報を，リアルタイムに収集・分析し，気象予測や被災予測を高精度化していきます．

高精度な気象予測を活用し，先回りして気象を制御する技術の研究にも取り組んでいます．例えば，台風や線状降水帯などの極端気象のエネルギー源である日本近海の海水温を水塊交替*2などにより下げることで勢力を弱めたり，台風のパワーをエネルギーに変換したりする災害グリーンエネルギーについて研究しています．一方，このような気象制御を実際に行った場合の影響ついても検討する必要があります．このため，ESG経営科学技術でも紹介した社会・経済システムを含む地球環境そのものをサイバー空間で再現したデジタルツインコンピューティングを駆使し，気象制御のさまざまな影響評価のシミュレーション・未来予測をサイバー空間上で行い，最適解を導出したうえで現実世界において実行したいと考えています．

気象制御の１つの対象として，雷についての研究も実施しています．私たちは元々通信設備の雷被害対策に関する高度な技術を保有しており，この技術をさらに発展させた雷制御・雷充電技術についても研究しています．具体的には，落雷エリアを高精度に予測し，ドローンを活用してドローンに落雷させる雷制御技術と，雷エネルギーを蓄える雷充電技術について研究しており，将来的には雷エネルギーを含む自然エネルギーのみで自律動作し，雷が落ちる前にエネルギーを吸収する浮遊型雷エネルギー吸収システムの実現をめざしています．

さらに，宇宙の気象問題とも考えられる宇宙線対策についても取り組んでいます．太陽や銀河系由来の宇宙線によって半導体が誤動作する事象をソフトエラーといいますが，従来から保有するソフトエラーの評価技術を拡大させ，地上でのソフトエラー対策だけでなく，宇宙線や電磁パルスの影響を機器・人体がダイレクトに受ける宇宙空間において，これらの影響を予測するとともにプロアクティブに防護する電磁バリア技術について研究しています．現在，宇宙空間では熱処理問題と宇宙線の影響により高性能電子機器の利用や人類の長期宇宙滞在が困難な状況ですが，本技術とIOWNの発展により，例えば宇宙データセンタなどの実現が可能になります．

おわりに

本稿で紹介した研究内容は，まだまだ序章に過ぎません．現在の少ないリソースで取り組み始めた研究内容を紹介しましたが，私たちの夢はもっと壮大です．今後は継続的にリソースを増強し，現在取り組めていない新しいテーマにどんどんチャレンジし，地球環境再生と未来革新に貢献したいと考えています．

コロナ後の経済活動の再開は，気候変動や海洋汚染問題などを解決するレジリエントな社会の実現に向かうべきであり，世界各国の政府，産業界においてこの動きは加速しており，ますますこの分野の研究が重要となってきています．このため，さらにリソースを増強し，さまざまな分野の方々と連携しながら研究を加速させたいと考えています．宇宙視点で環境エネルギー分野の革新的技術創出に挑戦する研究所の成長に，ぜひ期待してください．

■参考文献

(1) https://www.ntt.co.jp/news2020/2005/200529a.html



前田　裕二

研究者の公募を行っています．興味のある方はぜひお問い合わせ願います．一緒に地球の未来を変革しましょう．

◆問い合わせ先
NTT宇宙環境エネルギー研究所
企画担当
TEL　0422-59-7203
E-mail　se-kensui-pb＠hco.ntt.co.jp

＊2　水塊交替：温かい表層の海水と低温な深海の海水を入れ替えて，冷房したり発電したりする技術．温かい海域では，30 ℃以上の温度差がある場合もあります．

環境負荷ゼロに貢献する次世代エネルギー活用技術とCO_2変換技術

本稿では，環境負荷ゼロの実現に向けて，実用化がみえてきた圧倒的にクリーンかつ無尽蔵なエネルギー源を利用可能なものとする次世代エネルギー活用技術と，環境負荷の1つである二酸化炭素（CO_2）を効果的に固定し，事業活動トータルでの排出量をゼロ以下にするためのCO_2変換技術について概説します．

秋山　一也（あきやま　かずや）　高谷　和宏（たかや　かずひろ）
NTT宇宙環境エネルギー研究所

次世代エネルギーの活用に向けた取り組み

NTT宇宙環境エネルギー研究所次世代エネルギー技術グループでは，持続可能な社会の実現に向けて，圧倒的にクリーンかつ無尽蔵なエネルギー源であるフュージョンエナジーに関する技術と宇宙太陽光発電技術という2つのテーマに取り組んでいます．

■核融合炉の最適オペレーション技術

フュージョンエナジーに関する技術は，IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）技術の活用によって核融合炉オペレーションの最適化をめざすもので，2020年5月にITER国際核融合エネルギー機構と包括連携協定を締結しました(1)．また11月には，世界に先駆けた革新的な環境エネルギー技術の創出をめざし，国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構と連携協定を締結しました(2)．フュージョンエナジーとは，太陽をはじめとする宇宙の星々が生み出すエネルギーであり，軽い原子核どうしが融合してより重たい原子核になる核反応を指します．例えば，水素の同位体である重水素（D）と三重水素（T）の原子核が融合するDT核融合反応*1ではヘリウムと中性子ができますが，たった1gの重水素と三重水素の核融合反応から発生するエネルギーは，石油約8t（タンクローリー1台分）を燃やしたときと同じだけの熱に相当します．核融合炉は，まさに太陽で起きている現象を地上で再現するものであり，フュージョンエナジーを発電等に使用することをめざして進められているのがITER計画と呼ばれる超大型国際プロジェクトです（**図1**）．日本・欧州・米国・ロシア・韓国・中国・インドの7極により進められており，2025年の運転開始をめざして，南フランスのサン・ポール・レ・デュランスにて準備が進められています．フュー

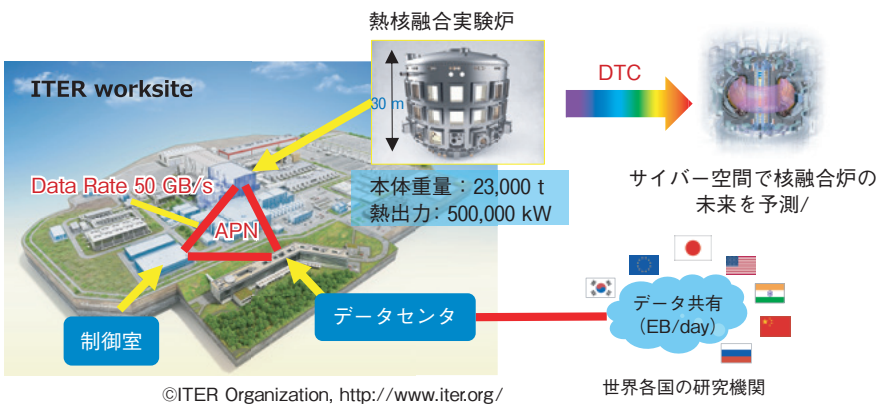


図1　ITERの全体図と核融合炉の最適オペレーション技術

*1　DT核融合反応：D＋T＝He（3.52 MeV）＋n（14.06 MeV）．電荷の反発力に打ち勝ってDとTを衝突させるためには，1000 km/秒以上の速さが必要であり，加熱温度は1億度以上に相当します．

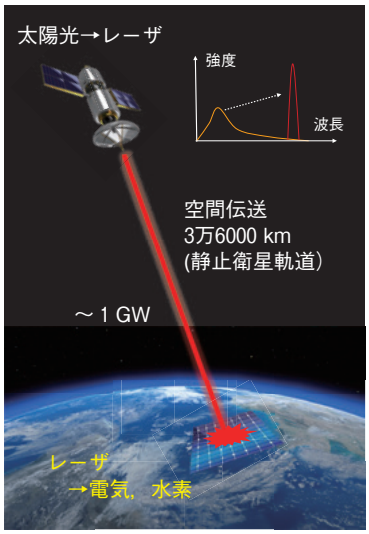


図 2　宇宙太陽光発電技術

ジョンエナジーが実現すれば，太陽光や風力などのより分散型の再生可能エネルギーと相まって，何百万年にもわたって安全かつ確実に世界にエネルギーを供給できるようになると期待されています．

核融合実験炉ITERでは，ドーナツ状の磁場の中に燃料となる重水素と三重水素を閉じ込め，加熱し，プラズマ状態にし，さらに1億5000 万度まで加熱することで核融合反応を発生させます．この核融合炉からエネルギーを取り出すには，プラズマを長時間安定的に発生させることが重要です．そのためには，核融合炉から得られる最大で50 GB/sという膨大なセンサデータをコントロールセンタに転送し，そこで最適な数値を計算し，瞬時にフィードバックしプラズマの形状を制御する必要があり，制御ネットワークの高速化・低遅延化が不可欠です．そこで，IOWNの要素技術の1つであり，高品質・大容量，低遅延が特徴のオールフォトニクス・ネットワークに加え，データ処理の高速・高効率化を実現する新しいコンピューティングアーキテクチャであるディスアグリゲーテッドコンピューティングの活用により，実現をめざしています．加えて，核融合炉が本格的に稼動を開始すると，1日当りEB（exabyte）レベルのデータが生み出されます．このデータを世界各国のデータセンタに蓄積し，かつデータセンタ間で高速にレプリケーションを行うためにも，IOWNの技術が貢献できると考えています．また，将来的にはデジタルツインコンピューティング（DTC）の活用によって，サイバー空間上に核融合炉をリアルに再現し，非常に高度なシミュレーションや核融合炉の未来性能予測を行うことによって，さらなる制御技術の向上に寄与することをめざしています．

■宇宙太陽光発電技術

宇宙太陽光発電技術は，上空3万6000 kmの静止衛星軌道上で太陽光発電を行い，そのエネルギーを地上にレーザやマイクロ波で送り届け，再度地上で電力などのエネルギーに変換するという技術です（**図2**）．静止衛星軌道上では，ほぼ24時間365日太陽からのエネルギーを受けることが可能なうえに，地球の大気によるエネルギーの吸収や散乱の影響を受けないことから，地上と比較し単位面積当りで約10倍のエネルギーを安定して受けることができます．2030年以降の実用化をめざして，宇宙航空研究開発機構などを中心に研究開発が進められており，実現すればクリーンで無尽蔵のエネルギーを利用することが可能となります．私たちはマイクロ波よりも波長が3～4桁ほど短いため，ビームの広がり角が小さく長距離を伝送させやすいという観点を重視し，レーザによるアプローチを試みています．

宇宙太陽光発電を実現するためには，大きく3つの技術領域があります．1番目は，静止衛星軌道上で太陽光をレーザに高効率で変換する技術です．私たちは，太陽電池によって発電された電力を用いてレーザ発振を行う従来の方法とは異なり，太陽光を特殊な結晶に直接照射しレーザを励起させることで，高効率でレーザ発振を行うシステムの研究を行っています．2番目は，レーザを地上のターゲットに正確に照射する技術です．レーザは長距

離を伝送させやすいことが特徴ですが，3万6000 km離れた静止衛星軌道上からレーザを±10 mの精度で照射するためには，0.3 μrad（2×10^{-6}度）の方向制御精度が必要となります．加えて，通過する大気の揺らぎに影響も取り除かなくてはなりません．そこで，ベッセルビーム*2等の焦点深度の深い光学系や，天文分野で大気を伝搬する光の揺らぎを取り除くために用いられている補償光学*3を活用したビーム伝送方式について研究を行っています．3番目はレーザをエネルギーに高効率で変換する技術です．レーザ光は，さまざまな波長の光が混ざり合った太陽光とは異なり単一の波長であることから，特定の波長で高い変換効率を持つ太陽電池の研究を行っています．また，太陽電池を用いてレーザを電力に変換する場合，約半分のエネルギーが熱となってしまうという問題があります．そこで，レーザを直接電気に変換するのではなく，熱化学反応を用いていったん水素やアンモニアといった違う形態にエネルギーを蓄える方法についても検討を行っています．私たちは，本技術が水素社会を実現するためのキー技術になり得ると考えています．

二酸化炭素（CO_2）排出量ゼロ以下に向けた取り組み

サステナブルシステムグループでは，地球環境の再生と持続可能な社会の実現に貢献するため，あらゆる環境負荷をゼロ以下にするサステナブルなシステムの研究開発とその社会実装に取り組んでいます．ゼロ以下にするとは，排出を減らすだけではなく，すでに存在しているものを減らすことを意味します．環境負荷といってもさまざまな要因が存在しますが，この1つにCO_2があり，パリ協定等において，CO_2排出量を削減することが求められています．そのため，当グループでは，CO_2削減のための研究開発を2つのアプローチにより進めています（**図3**）．

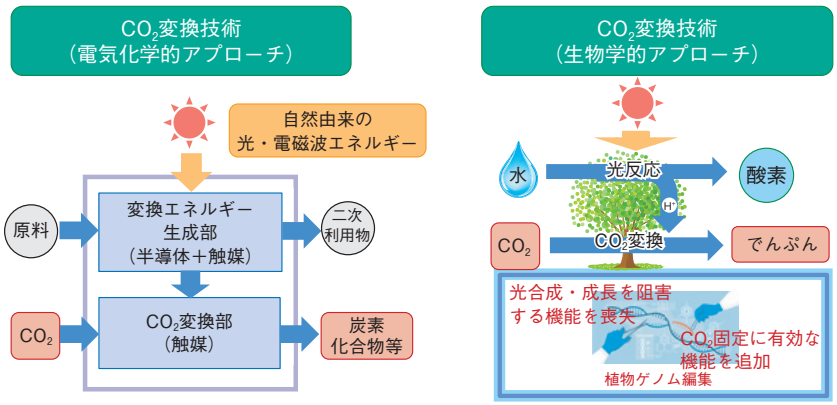


図3　CO_2変換技術の確立に向けた2つのアプローチ

■CO_2変換技術（電気化学的アプローチ）

アプローチの1つは，通信用デバイスに用いられる半導体技術や燃料電池などに用いられる触媒技術を応用した電気化学的アプローチであり，太陽光などの光・電磁エネルギーを活用して，水（H_2O）とCO_2からメタン（CH_4）などの炭化燃料や貯蔵可能な水素キャリアであるギ酸（HCOOH）などを生成するとともに，大気中のCO_2を削減することが可能なCO_2変換技術の研究開発です．この太陽光などの光エネルギーを利用して，H_2OとCO_2から炭水化物を合成する植物の光合成を模していることから「人工光合成*4」とも呼ばれています．電気化学的アプローチの利点は，太陽光などの自然由来のエネルギーを用いて，貯蔵可能な燃料（エネルギー源）を生成できることであり，生成された燃料はさまざまな用途に活用できるほか，カーボンニュートラルなエネルギー源としても期待されています．

その一方で，実用化のためにはいくつかの課題が残されています．例えば，太陽光のエネルギーを利用して，水素イオン（H^+）と電子（e^-）を生

*2　ベッセルビーム：回折現象によりビームが広がらない非回折ビームの一種．

*3　補償光学：Adaptive Optics（AO）．大気等によって生じた画像の揺らぎを波面センサで計測し，それを動的に補正することで画質を改善させる技術．

*4　人工光合成：植物が太陽エネルギーを使ってCO_2と水からでんぷんと酸素を生み出す働きを模したもので，太陽エネルギーを活用した化学反応により，CO_2と水を原材料に有機物を生成する技術．

成する半導体デバイス（材料）は，電極として水中に設置されることにより，その表面がイオン化（腐食）し，性能が劣化してしまうため，長時間安定して反応し続けるように長寿命化する技術が必要となります．このとき，エネルギーとして利用できる光の波長は半導体デバイスの物性に依存して限定的であるため，さまざまな波長のエネルギーを吸収できる広帯域化が求められています．同様に，CO_2を還元するための触媒も，化学反応を繰り返すことによる性能劣化を低減する長寿命化技術の確立が求められています．そのため，当グループでは，半導体デバイスや触媒に関する経験とスキルを有するNTT先端集積デバイス研究所とのコラボレーションにより，長寿命化と高効率化の実現に取り組んでいます．

また，電気化学的アプローチによるCO_2変換技術の実用化に向けては運用・安全面の課題も存在します．例えば，世の中で開発中の人工光合成システムの多くは，実験室などの比較的制御が容易な環境でその性能が評価されていますが，実環境ではいくつかの制約条件が加わります．具体的な例としては，実験室では純度の高い高濃度のCO_2をガスボンベから加えている場合が多いと考えられますが，実際は，大気中の約0.04%の濃度のCO_2に対して高効率に作用する必要があります．そのため，大気中から低濃度のCO_2を直接回収する「Direct Air Capture（DAC）」と呼ばれる技術の研究開発も進められています．ただし，DACとの組合せが必須となると，さらに高コストとなり，どちらかがボトルネックとならないような最適設計が必要となります．さらに，電気化学反応の原料となるガスや生成ガスには，水素（H_2）や一酸化炭素（CO）も含まれており，これらが有事の際にも大気中に放出されることを防ぐ強固な安全設計も必要となります．このように，電気化学的アプローチによるCO_2変換技術の実用化に向けては，単に効率を追い求めるだけでは不十分であるため，運用・安全面の課題を同時に解決する最適解を探索することが不可欠と考えています．

■CO_2変換技術（生物学的アプローチ）

CO_2変換技術のもう1つのアプローチは，ゲノム編集*5や育種・生育環境の最適制御により，植物や藻類の持つ光合成機能を最大化させる生物学的アプローチです．この30年で，地球上の森林面積は増加傾向にありますが，温暖化や人為的な伐採により，その多様性や健全性は低下しているという報告があります．これは，その森林を形成する植生とそこに住む生物・微生物の共生や，共存に必要な自然界本来の役割分担が円滑でないことを示唆しているのかもしれません．そのため，生物学的アプローチによるCO_2変換技術では，ゲノム編集技術や生育環境制御技術をフルに活用し，植物が光合成機能を活発化する時期を早くすること（早期成長）や，その時期を長く維持させること（長期健全化）によって，植物1個体当りの光合成能力を最大化することをめざした研究開発を進めています．樹木1個体当りの光合成能力を高めた森林の面積を増加させることができれば，結果として，植物による長期炭素固定が実現できることになります．また，食料や工業用資源となる野菜や樹木などに特化すれば，高品質を維持しながら，早期成長を促すことで，生育期にはCO_2をより多く吸収し，収穫や伐採後は，他のカーボンサイクルで活用することが可能となります．藻類についても同様に，ゲノム編集技術や生育環境制御技術を活用し，短期間で増殖させることで，水中に溶け込んでいるCO_2の効率的な吸収が可能となり，湿地・海草藻場の環境改善に貢献することが可能と考えています．

一方，生物学的アプローチによるCO_2変換技術の課題を挙げます．例えば，炭素を長期固定することが可能で，光合成能力の高い樹木は，遺伝子数が多く，ゲノム解析や早期成長・長期健全化に作用するゲノムの特定に多大な時間を要することが知られています．また，ゲノム編集を施せたとしても，樹木の成長には長い年月を要するため，その効果を確認することも容易ではありません．藻類については，遺伝数の少なさからゲノム解析やゲノム編集が比較的容易な反面，増殖後，付加価値を高めるための資源化（加工）や有効利用できない部分の廃棄に必要

*5　ゲノム編集：生物が持つゲノムの中の特定の塩基配列（DNA配列）を編集することで，その生物の特性を変化させる技術．

なエネルギー量が課題となっています．

そこで，樹木に対するゲノム編集の効果を検証する時間短縮手段の１つとして，IOWNの要素技術の１つであるDTCの活用を検討しています．仮想空間上に植物と生育環境の解析モデルを構築し，仮想的な生育シミュレーションを行うことができれば，栽培などのリアルな検証を実施しなくても，短期間でその効果を予測することが期待できます．さらに，種や苗の段階で病害リスクの少ない遺伝特性を選定することが可能となれば，優良育種選定にも応用できます．藻類の廃棄の課題については，エサや資源として他の生物や他のカーボンサイクルに提供するなど，いくつものカーボンサイクルを効率的に連携させることが重要であると考えています．

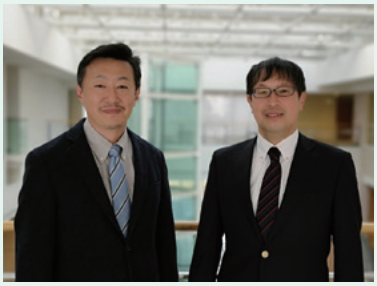
今後の展開

本稿では，次世代エネルギー技術とCO_2変換技術について取り組み内容を概説しました．核融合炉オペレーションの最適化で培われた技術は，リアルタイム制御によるサイバーフィジカルシステム連携のユースケースとして，今後他産業へ展開していく予定です．宇宙太陽光発電技術については，その確立過程において，地上におけるドローンなどのモビリティへの給電による長時間運転の実現や，避難所や離島への非常用給電技術として順次切り出して，実用化していく方針です．

また，２つのCO_2変換技術については，実用化や社会実装に向けて解決すべき課題がいくつかありますが，その課題を解決した際の地球環境への貢献度は非常に大きいと考えられます．そのため，本稿で述べた課題をより早い時期に解決できるように，電気化学材料の物性探索，植物・藻類の有用ゲノム特定，仮想生育シミュレーションなど，ICTの効果が期待できる側面に重きを置いて研究開発を推進していきます．

■参考文献

(1) https://www.ntt.co.jp/news2020/2005/200515c.html
(2) https://www.ntt.co.jp/news2020/2011/201106a.html



（左から）秋山　一也／ 高谷　和宏

地球環境の再生と持続可能かつ包摂的な社会の実現に向けて，次世代エネルギー技術とサステナブルシステム技術の創出をめざすとともに，「環境負荷ゼロ」に貢献します．

◆問い合わせ先
NTT宇宙環境エネルギー研究所
企画担当
TEL　0422-59-7203
E-mail　se-kensui-pb @ hco.ntt.co.jp

環境負荷ゼロの実現に向けた，エネルギー流通基盤技術

田中 徹　南 裕也
田中 憲光　中村 尚倫
林 俊宏　香西 将樹
樋口 裕二　花岡 直樹
岩本 美帆

NTT宇宙環境エネルギー研究所

近年，再生可能エネルギーの普及が拡大していますが，さらなる導入に向けては，エネルギーの効果的な流通やレジリエンスが求められます．エネルギーネットワーク技術グループでは，再生可能エネルギーを余すことなく活用する仮想エネルギー需給制御と，商用電力からの供給が途絶えても安定した電力を地域に供給する直流グリッドをベースとした次世代エネルギー供給に関する研究開発を進めています．本稿では，これらの技術について紹介します．

再生可能エネルギーの導入と災害時の対応

資源の枯渇や地球温暖化に対する危機感の高まりから，再生可能エネルギーの導入が進められている中，ESG投資*1や主力電源化といった観点も加わり，エネルギーを取り巻く状況が大きく変化しています．かつて，再生可能エネルギーは高コストなため普及が困難でしたが，各国による固定価格買取制度（FIT）等の施策により，メガソーラーや大型風力発電など大規模な再生可能エネルギーの導入が進んだことでコストが飛躍的に低減され，価格面での障壁が下がってきています．最近では，ESG投資やTCFD*2など環境に対する投資や経営を進めていくことが，企業活動にも欠かせない要素となってきており，国レベルでも再生可能エネルギーの主力電源化など，再生可能エネルギーの普及に対する取り組みは，もはや当たり前の流れになっています．

しかし，再生可能エネルギーの発電量は天候によって大きく変動するため，普及が進むほど消費電力とのバランスを取ることが難しくなります．これまでさまざまな需要制御の取り組みが行われてきましたが，大規模かつ高速な変動吸収がますます求められてきています．

一方，2019年9月に千葉で台風直撃により起きた大規模停電に続いて2021年2月の福島県沖地震でも首都圏で大規模な停電が発生し，電力供給の重要性が改めて認識され，各避難所へのバックアップシステムの構築などの強靭化対策が国を中心に進められています．

しかし，商用電力が使用不能となった場合には，再生可能エネルギーの電力が送れないこともあり，設置されたバックアップ設備の継続的な維持が困難になるといった懸念があります．さらに，今後の電子機器の普及に伴い，これまで経験した災害に加え，電磁パルスや宇宙線等新たなリスクにも対処していく必要があります．

本稿では，これらの問題を解決する仮想エネルギー需給制御技術と次世代エネルギー供給技術について紹介します．

仮想エネルギー需給制御技術

再生可能エネルギーの発電量が天候により大きく変動する問題に対しては，これまでにも，その発電量の予測，商用電力の火力発電や揚水発電等での発電量の調整，需要家側の空調や照明等の消費電力量の制御，蓄電池等への

＊1　ESG投資：環境・社会・企業統治に配慮している企業を重視・選別して行う投資．
＊2　TCFD：G20の要請を受け，金融安定理事会により設置された，Task Force on Climate-related Financial Disclosures（気候関連財務情報開示タスクフォース）の略称．気候変動に対する企業の取り組みにかかわる情報開示を促すフレームワーク．

余剰電力の貯蓄など，発電量の変動を吸収するさまざまな対策が講じられています．さらに最近では，新たな需給制御システムとして，多数の小規模な発電設備や，複数の需要家設備を１つの発電所のようにまとめて制御する仮想発電所（VPP）や，電気自動車（EV）用の蓄電池も活用するシステムの開発や導入が進んでいます．

しかし，それでも再生可能エネルギーが特定の地域で大量に導入されると電力が余剰もしくは不足したときに当該地域での電力変動制御が量的および時間的に困難になる可能性があります．したがって各地域の電力系統でどの瞬間にも電力が余剰となったり不足したりしないよう，消費電力量を大規模かつ高速に制御することが求められます．NTTグループでは，日本の消費電力の約１％を消費しており，また各地に通信ビルやデータセンタが点在していることから，地域間で消費電力を変化させるポテンシャルを有しています．この消費電力の変化を通信トラフィック量や計算データの情報処理量を制御することで実現していきます．例えば，降雨により太陽光発電（PV）の発電量が低下して電力が不足しそうな地域の通信ビルから，晴天で電力が余剰となりそうな地域の通信ビルへ，情報処理を移行させることで，降雨の地域では消費電力を下げ需給逼迫を回避し，晴天の地域では消費電力を上げPVの発電量を余すことなく使い切ることができます．このような地域をまたいだ情報処理量の移行を実現するために，再生可能エネルギーの発電量に応じて情報処理量を追従し，情報処理量とICT装置の消費電力量の追従性を高めることや，各地域の需給バランスに応じて情報処理を移行する量とタイミングを最適化することに取り組んでいます．この最適化の実現にあたり，通信サービスの品質や設備の安定性に悪影響を及ぼさないよう制御する研究開発も進めています（**図１**）．さらにNTTビルには大量の蓄電池が通信サービスのバックアップ電源として設置さ

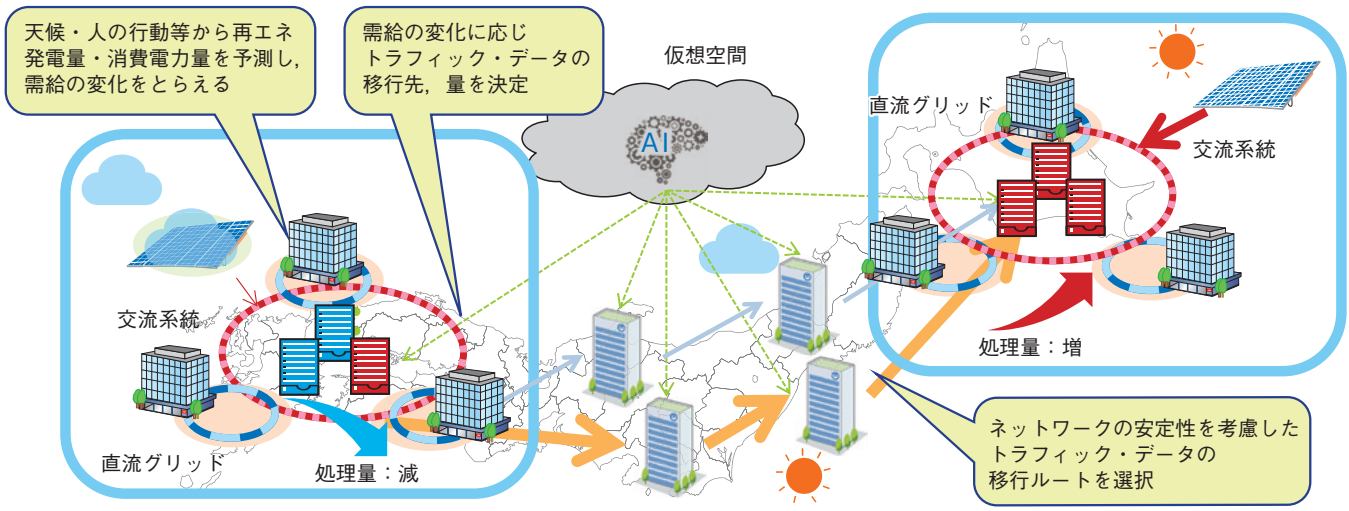


図１　仮想エネルギー需給制御技術

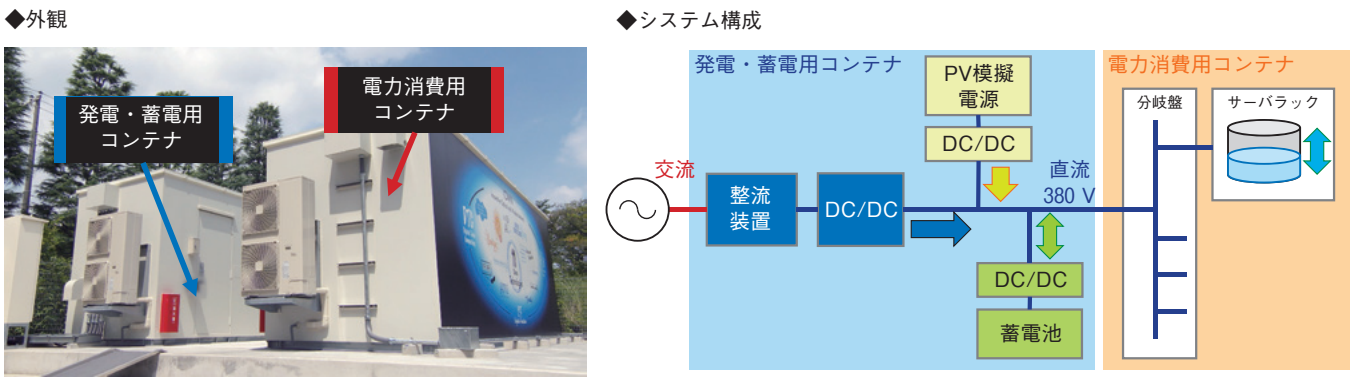


図２　コンテナ型実証サイト

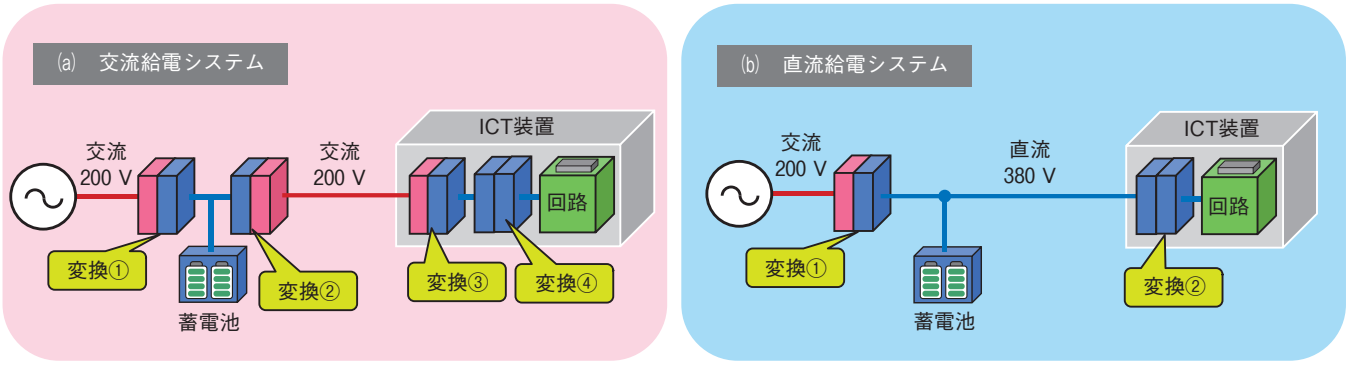


図3　交流給電システムと直流給電システム

れており，この蓄電池に加えてEVの蓄電池も活用し運行情報と連携してダイナミックに運用することで，より大きな電力の充放電が可能となります．

前述の技術を確立するため，最初のステップとしてNTT武蔵野研究開発センタにコンテナ型のテストベッドを構築し，整流装置，PV模擬電源，蓄電池，情報処理を行うサーバ等を設置し，エネルギー需給制御の検証を開始しました（**図2**）．このテストベッドを活用し，遠方の通信ビルやデータセンタとの需給制御の実証を計画しています．

次世代エネルギー供給技術

近年，大規模地震等の災害による電力供給途絶を低減する強靭化対策が各地で進められており，NTTにおいてもビルの耐震強化や水防，バックアップシステムの強化等の取り組みを進めています．しかし，極端気象以外にも，例えば，高高度核爆発攻撃による電磁パルス照射や，太陽フレアによって放出される宇宙線によって，電子機器および電力供給機器の破損や停止，誤動作等のリスクが想定されます．これらの事象は稀であるともとらえられていますが，今後の半導体デバイスの微細化・高集積化とともに，電子機器のさらなる普及をかんがみると，電力供給にかかわるシステムの障害が社会に及ぼす影響は深刻です．この問題を解決するため，当グループでは，さまざまな事象に対しても安定した電力供給が可能なエネルギー供給システムの開発に着手しました．

これまで，NTTの通信ビルにおける給電システムは直流-48 Vによる直流給電システムを採用しており，最近ではICT装置の消費電力増加に伴い，電圧を直流380 Vに上げた高電圧直流（HVDC）給電システムを導入しています．このHVDC給電システムは，**図3**に示すように，直流で動作するICT装置に直接直流の電力を供給することから，交流給電システムに比べて変換段数が少なく変換ロスが低減できるため高効率なシステムであり，またバックアップ用としての蓄電池は直流バスに直結していることから極めて高信頼なシステムです．この高効率・高信頼なシステムをベースに，**図4**に示すように，NTTの通信ビルと周辺地域の需要家を直流380 Vでネットワーク化する直流グリッドを構築することで，効率の良い電力融通と停電しない供給システムの実現が期待できます．通常時においては，周辺地域での再生可能エネルギーで発電した電力が余剰となった場合には，通信ビルの蓄電池に効率良く蓄え，災害時等においては電力会社からの電力供給が途絶えた場合でも定置や車載の蓄電池と，再生可能エネルギーとを組み合わせることで電力を融通することができます．この直流グリッドは複数の発電装置と複数の需要家を結ぶ構成であり，短絡・地絡や雷等の事象が発生すると影響範囲が大きくなるため，これら事象に対しても安定した電力供給が必要となります．

当グループでは，**図5**に示すように，3つのステップで検討を進めており，ステップ1では供給側と需要側を1対1で接続した形態，ステップ2では複数機器を接続し双方向で電力融通する形態，そしてステップ3では電力をネットワーク化した直流グリッドへと拡張した形態における電力供給の安定化について研究開発を進めていきます．現在進めているステップ1では，通信ビルと災害時に避難所となる小中学校を1対1（給電距離：～400 m）で接続可能とする技術を検討しています．特に，**図6**に示すように，直流380 Vの電力を屋外に延長することから，システムの火災や作業者の感電による重大事故を防止するため，電気的な安全性にかかわる電力品質技術の確

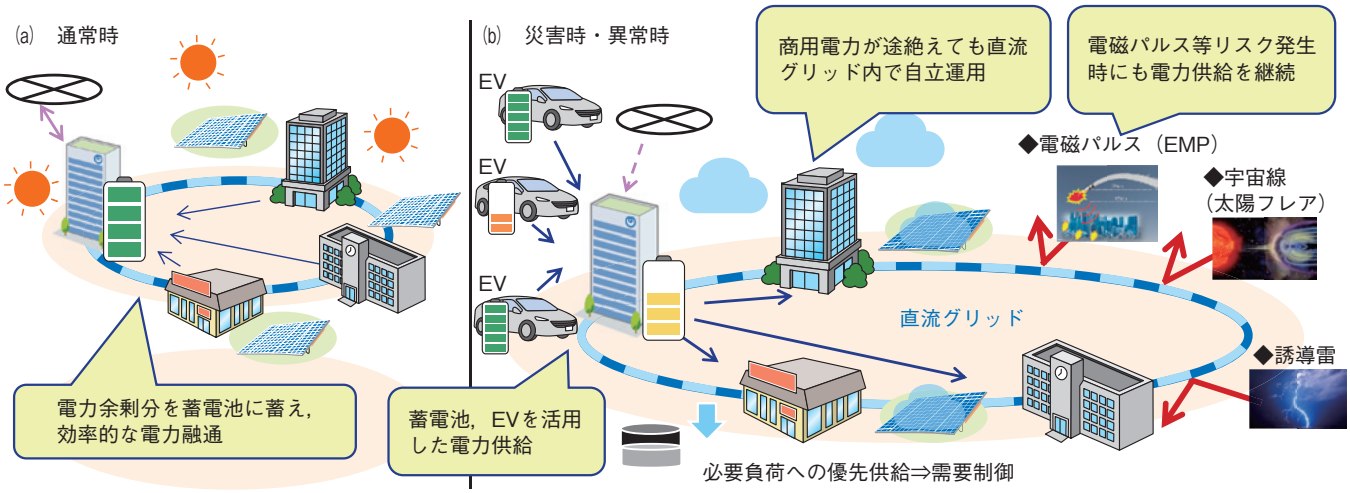


図 4　次世代エネルギー供給技術

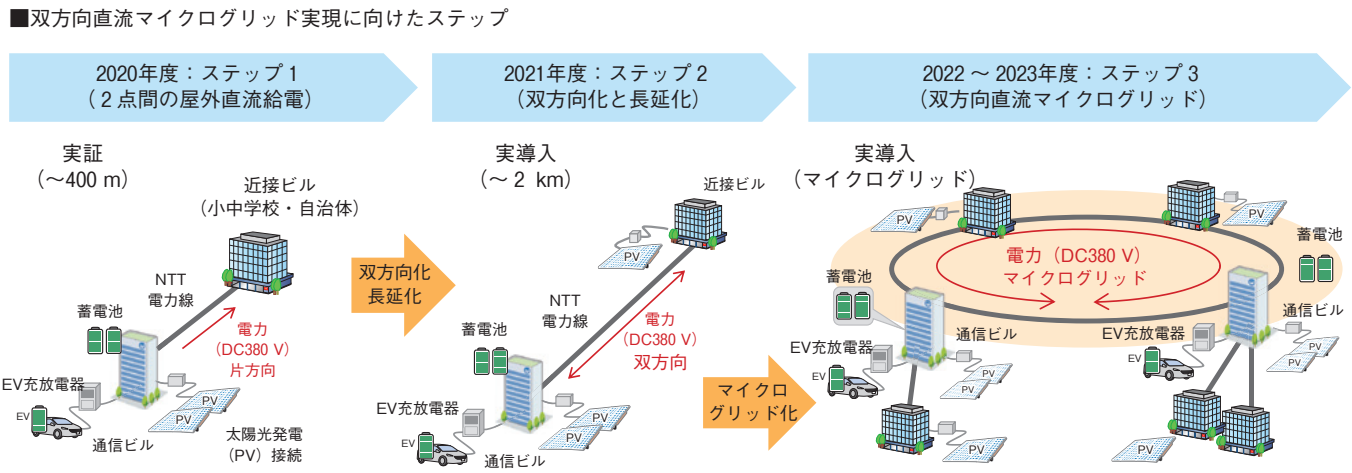


図 5　直流グリッドに向けた実証ステップ

立を最優先で取り組んでいます．屋外への給電距離が長くなると，短絡が生じた際に，短絡電流が小さくなり，かつ直流のため，通信ビル側で事故の検出が困難となり，安全に遮断できない恐れがあります．これを，従来のヒューズに加え，直流給電装置内部の過電流保護機能（ゲートブロック）と組み合わせて，短絡時に高精度に検出・遮断する仕組みを確立しました．また，通信ビルは高い信頼性が特に必要であり，PV等で発電された電力を通信ビルに引き込むと，雷サージの侵入リスクが高まるため，電圧を抑制する技術が必要となります．これに対しては，避雷器（SPD）および接地線の配線条件の最適化により，雷サージの電圧を大幅に低減する手法を確立しました．ここで確立した技術はエネルギー事業を柱とするNTTアノードエナジー[1]を中心に提供し，千葉市におけるバックアップ電源事業の実証に展開しています[2]．

これらの技術をベースとして，電磁パルスや宇宙線等のさらなるリスクにも対応していきます．交流システムの場合，これらの事象が発生すると同期制御*3する制御系のソフトエラーにより，同期が外れ電力供給が途絶えるリスクがありますが，直流システムでは直流バスに蓄電池が直結されているため，リスクが低減されます．この直流システムのメリットを最大限活用して，さまざまなリスク事象に対しても電力供給が途絶えないシステムを確立

*3　同期制御：交流システムの電圧は周期的にプラスとマイナスを繰り返しており，この繰り返しのタイミングをシステム間で一致するように制御すること．

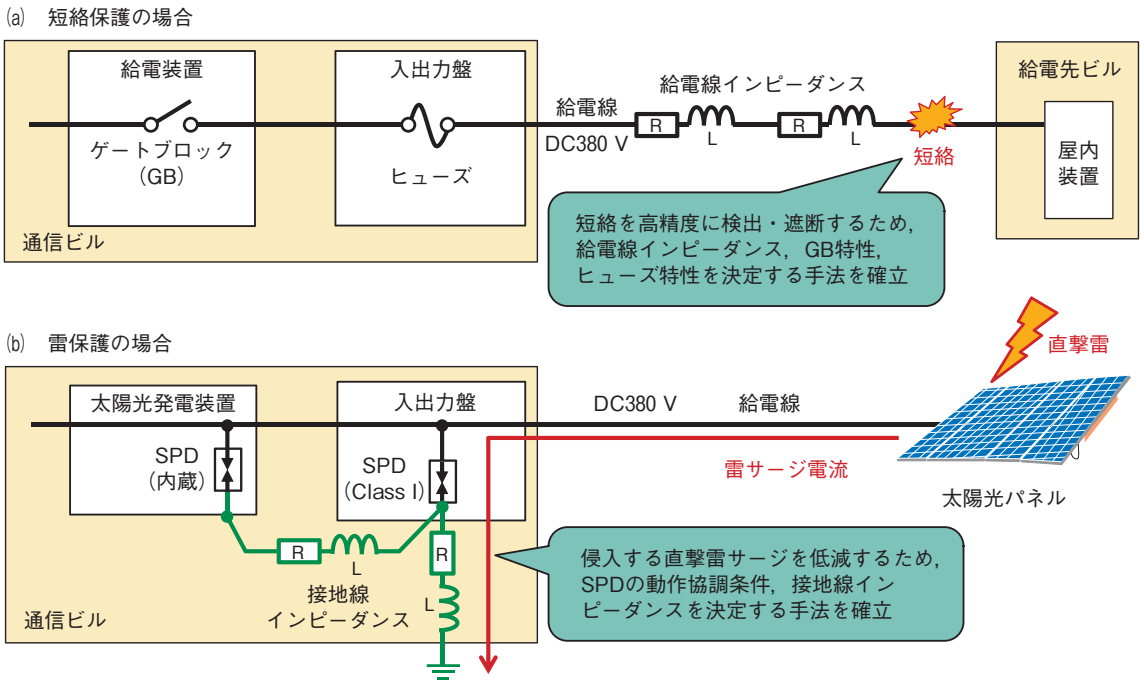


図 6　短絡保護，雷保護のイメージ

していきます．

今後の展開

本稿で紹介した 2 つの技術をさらに発展させていき，NTT が掲げる IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想における，オールフォトニクス・ネットワークや用途に応じて多様なコンピューティングデバイスを地理的に分散協調させることで高速・高効率なデータ処理をねらうディスアグリゲーテッドコンピューティングと連携し，光活用型の高速遮断による，直流グリッドの電力ネットワーク品質の向上や，再生可能エネルギーとコンピューティングデバイスを一体化することで，情報ネットワークとエネルギーネットワークを融合した新たなネットワークシステムの研究開発に挑戦していきます．

これまでの集中管理型のエネルギーネットワークシステムから自律分散型の協調制御した新たなエネルギーネットワークシステムに移行することで，再生可能エネルギーを余すところなく効率的に活用した地産地消と，さまざまな事象が生じても電力供給が途絶しない超レジリエントなスマートシティの実現に貢献していきます．

■参考文献

⑴ https://www.ntt-ae.co.jp/
⑵ http://tncross.co.jp/information/detail20200423.html



（後列左から）花岡 直樹／田中 憲光／香西 将樹／林 俊宏／樋口 裕二
（前列左から）岩本 美帆／南 裕也／田中 徹／中村 尚倫

若いメンバを中心に，コロナ禍に負けず議論，実験を精力的に進めています．エネルギー流通のファンタジスタとなって，環境負荷ゼロに資する新たなエネルギーネットワークの実現をめざしていきます．

◆問い合わせ先
NTT宇宙環境エネルギー研究所
企画担当
TEL　0422-59-7203
E-mail　se-kensui-pb＠hco.ntt.co.jp

持続可能かつ包摂的な社会の実現をめざしたESG経営科学技術

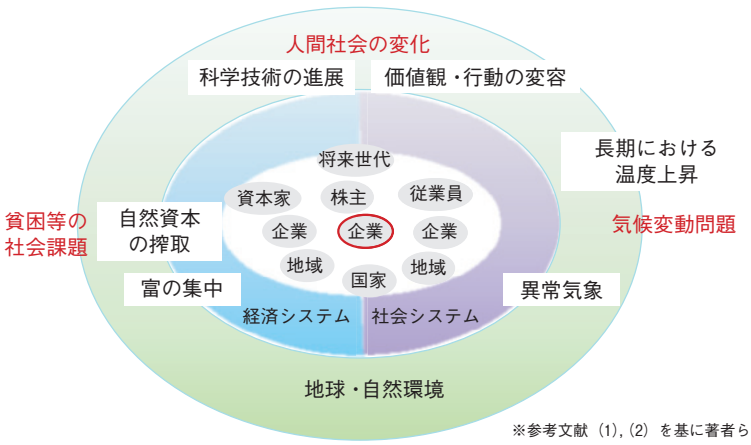
本稿では，昨今の気候変動や人権に関する問題等を念頭に，持続可能かつ包摂的な社会の実現をめざし，地球環境と社会・経済システムの関係について分析し未来を予測，さらに企業における長期的リスクマネジメントや新たな収益創出の機会を導出し，企業価値向上に資するESG経営科学技術について紹介します．

田中（たなか） 百合子（ゆりこ）　張（ちょう） 暁曦（ぎょうぎ）
篠塚（しのづか） 真智子（まちこ）
NTT宇宙環境エネルギー研究所

ESG経営科学技術のあらまし

近年，国連で採択されたSDGs（持続可能な開発目標）をはじめ，気候変動等の自然環境の変化に伴う問題や，貧困等の社会問題への対応が注目されています．そして現在，世界的なパンデミックの下，社会や経済のあり方の見直しがより問われる状況となっています．このような問題の解決には，環境的，社会的，経済的側面を統合し，それらの相関や因果を認識する必要があります(1)．**図1**に示すように，グローバルでとらえた地球と人間の関係では，気候変動問題や，資本主義社会を中心とした富の集中や自然資本*1の搾取による貧困等の社会問題が，それぞれ複雑に密接につながり，5～10年もしくはそれ以上の年月を経て大きな危機となって表出することも考えられます(2)．また，人口動態や経済成長の変化に加え，科学技術による社会の変革，人々の価値観・行動の変容等により，未来は現在の延長線上にあるとは限りません．そして，企業活動も環境や社会へ影響を与える一要素であり，持続のためには長期的な視点での経営戦略やアクションが重要となります．そのため，企業においては財務情報だけではなく，環境（Environment），社会（Social），ガバナンス（Governance）等の非財務情報がより重視されるようになっていますが，これらに配慮した戦略やアクションの与える影響の評価・検証には至っていません．

ESG経営科学技術の概要を**図2**に示します．環境・社会に関する情報をインプットデータとして，未来予測シミュレーションを行います．これらのデータは，企業を取り巻く各ステークホルダーの価値観，状況等を含み，ESG戦略を策定するうえで重要な要素となります．そして，未来予測シミュレーションでは，地球規模のデジタルツインコンピューティング（DTC）(3)の一環として，環境・社会



※参考文献（1），（2）を基に著者らが作成

図1　地球環境，人間の社会・経済システムにおける課題や変化

＊1　自然資本：森林，土壌，水，大気，自然資源等，自然によって形成される資本．

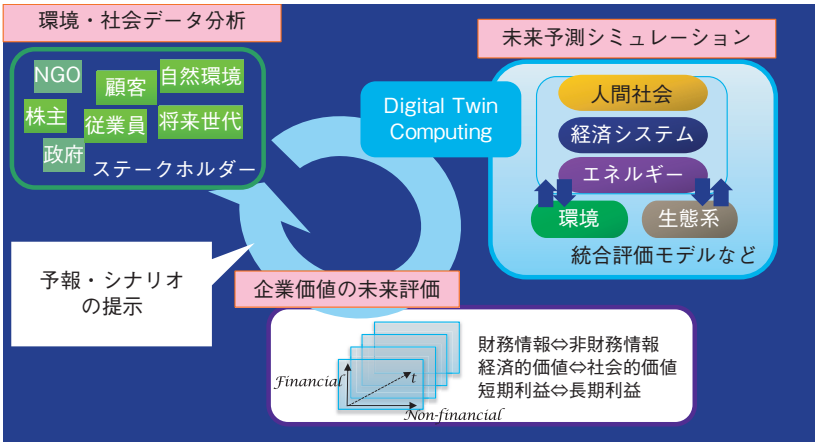


図 2　ESG経営科学技術の概要

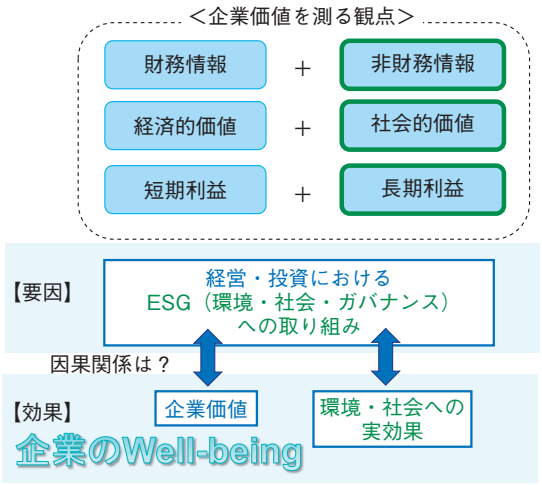


図 3　企業価値とESG

の各事象（例えば，米大統領選や脱炭素政策，災害，企業業績等）の因果関係等をモデル化しシミュレーションを行い，既存の統合評価モデルや新規モデル等を組合せ連成させることで，未来を予測します．その予測結果をさらにDTC上で評価し，さらなる予測，そして未来変革につなげます．いくつもの未来を見通したうえで，企業のESG戦略につながる予報や未来シナリオを提示することをめざし，企業価値向上に資する未来評価手法について研究開発します．これまでの企業価値の考え方に，非財務情報や社会的価値，長期利益の観点をより強化し，企業アクションにおける「要因」と環境・社会への「効果」をつなぐ因果関係を明確化することで，企業のWell-being*2の評価を試みたいと考えています（**図 3**）．

次に，未来予測シミュレーションを実現するための，ESGに着目した「未来予測技術」について，具体的に紹介します．

ESGに着目した未来予測技術

未来予測を実現するための１つのアプローチとして，国レベルにおける社会変化を予測し，それを踏まえて企業経営に影響する企業レベルの変化をさらに予測する方法が考えられます．国レベルの社会変化を予測するために，ESG経営科学技術グループは，2020年度から国立環境研究所等の研究組織と連携*3し，気候変動や日本が直面する少子高齢化等の社会課題を背景に，日本社会のさまざまな側面を考慮したいくつかの未来像を設定し，社会経済・環境側面の変化を定量的に予測する技術を開発しています．例えば，Society 5.0[4]にも掲げられている「サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させた，経済発展と社会課題の解決を両立する社会」のような未来像は，重要な１つであると考えています．今後，経済・環境および人々の生活の変化を先んじて把握することにより，社会や地球環境にポジティブな効果を最大限に発揮させ，ネガティブな影響をできるだけ回避することをNTTのESG経営を通じて実現することをめざします．同時に，予測したマクロレ

*2　Well-being：身体的，心理的，社会的に良好な状態，または，人間の心の豊かさや満足に関する概念．

*3　本研究は（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費JPMEERF20201002により実施．

表1　評価対象とするICTと直接的な導入効果

導入するICT	BAU	ケース1	ケース2	ケース3	直接的な導入効果
農業用ロボット/自動トラクター	—	○	◎	●	労働代替 生産性向上
植物工場/センサ	—	—	◎	●	安定生産
食品流通プラットフォーム	—	—	—	●	輸送距離削減（地産地消） 食品ロス削減

※ ○，◎，●が普及度合いの小，中，大を表す．

ベルの社会と経済・環境の変化をNTTの経営戦略にフィードバックし，よりプロアクティブな戦略立案を検討することができると考えています．

将来のIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）*4をはじめとする情報通信技術（ICT）により，どのような未来となるかを予測することをめざし，生産側面と消費側面に着目した予測技術について紹介します．

社会全体の環境経済へのインパクト予測技術

まず，生産側面に着目した「社会全体の環境経済へのインパクト予測技術」を説明します．ICTは，生産効率の向上や労働力の代替等により，経済を押し上げる効果はいうまでもないのですが，環境側面においては，ICT機器の利用による環境負荷（電力消費による温室効果ガスの排出）が発生する影響を持っています．一方で，生産・消費効率の向上による原材料投入の減少や脱物質化等を通じ，環境負荷の削減への効果があります．そこで，本技術では日本の産業連関表[5]をベースに，応用一般均衡モデル[6]を用いて，ベースとなる未来社会におけるマクロ経済の状況（生産や消費等）およびエネルギー消費量・温室効果ガス排出量をシミュレーションします．それを踏まえて，さまざまなICTが各産業に普及する際に，普及による直接的な導入効果（原材料投入の削減，移動削減や生産効率向上等）をモデルに入力し，その際の社会のマクロ経済の状況，さらにエネルギー消費と温室効果ガス排出量をシミュレーションします．

例として，2050年までに農業におけるいくつかのICTを導入する際の効果を示します．**表1**では，今回対象とした技術とその技術の普及度合い，直接的な導入効果を示します．今回は4つのケースで試算しており，ベースとなるケース（BAU）では，ICT普及が現状のままと設定しています．また，ICTの導入効果を評価するために，ケース1～3では，農業用ロボット・自動トラクターや，植物工場，食品流通プラットフォームのそれぞれの技術の普及度合いが小，中，大の3つのレベルに分けて導入されることを想定します．**図4，5**では，これらのICTの導入効果（農業の生産量と温室効果ガス排出量の変化）をモデルでシミュレーションした結果を示します．ICT普及度合いが小さいケース1では，農業の生産額を保ちつつ，温室効果ガス排出量が少し減少する結果が示されました．ICT普及度合いが大きいケース2と3では，農業の生産を向上する効果があり，食料自給率を高める一方で，環境負荷も高くなる可能性が示唆されました．

今後は，このような分析・予測を各産業分野で横断的に行うとともに，温室効果ガスやGDPの評価にとどまらず，資源，土地利用や水利用等を含む統合的で地球規模での評価について，DTCによる実現をめざします．

人々のライフスタイル変化を通じた環境影響予測技術

次に，消費側面に着目した「人々のライフスタイル変化を通じた環境影響予測技術」について説明します．ICTは，人々のライフスタイルを変化させ，産業の生産活動，さらには地球環境にも影響をもたらします．例えばテレワークシステムを利用し，通勤せずに在宅勤務をする人が増えると，自家用車や公共交通機関の利用の減少による環境負荷の低減が期待できます．しかし，自宅の照明や家事・家電製品の利用に伴う電力消費の増加を通じた環境負荷の発生が見込まれます．また，通勤時間が節約されることで趣味等の新たな活動時間も増加します．このよう

＊4　IOWN：NTTが2030年ごろの実用化に向けて推進している次世代コミュニケーション基盤の構想．

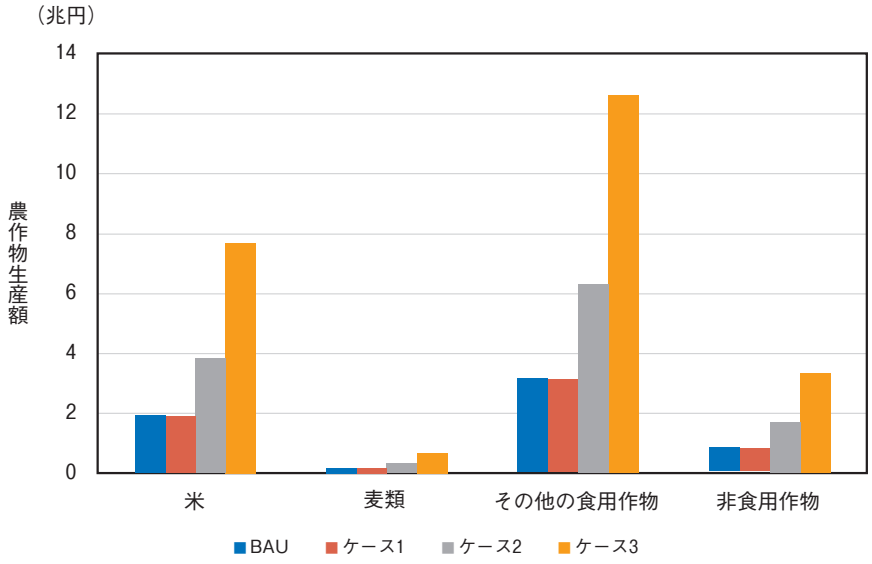


図4　各ケースにおける農作物生産額（2050年）

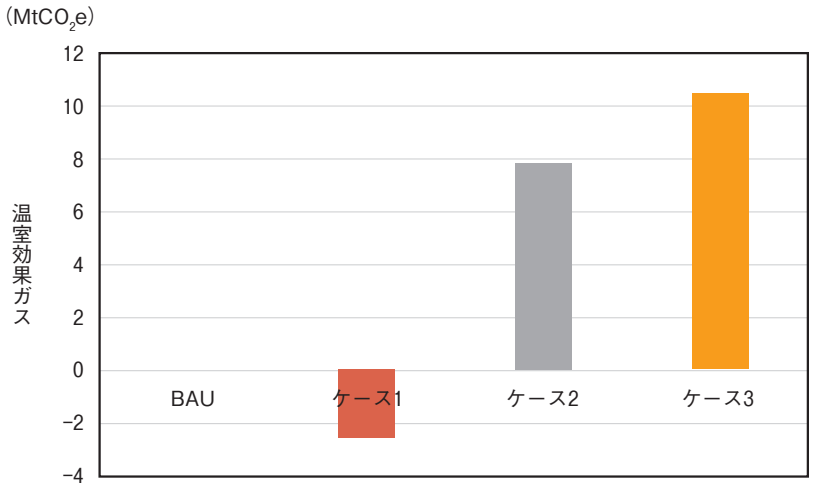


図5　各ケースとBAUの温室効果ガス（GHG）排出量の差分（2050年）

に，ICT利用を通じて移動等による環境負荷が低減される一方で，居場所の変更や時間節約に伴う活動変化により，環境負荷が増大することがままあります．

ライフスタイルの観点で社会の変化を予測するための一検討として，テレワークやオンラインショッピング，オンライン授業といったICTサービスが消費者の生活に広く浸透（ICT化）する際の環境影響の分析例を紹介します．人々の24時間の生活行動に着目し，統計データや調査資料を基にICT化による時間の使い方の変化を想定します．通勤し出社する業務から在宅勤務に切り替わり移動時間が減少すると，個々人での食事準備や余暇活動に割く時間が増加します．さらに，活動場所の変化や，読書や学習等の手段がICT化することを踏まえ，**表2**のように各行動について，ICT化による，活動時間や単位時間当りの温室効果ガス排出量の変化を整理します．各行動の内容や活動時間から必要なエネルギーやモノの消費を考慮し，Life-Cycle Assessment手法[7]により，環境負荷を温室効果ガス排出量として算定します．ICT化する前後で温室効果ガス排出量の変化の要因を分析し，減少をより促進するとともに増大を抑えるために重要な要素を特定します．生活行動に伴う環境負荷は，住まい方や電源構成といった社会状況にも影響を受けるため，そのような社会状況とICTの効果の関係性を反映することも必要になります．また，在宅疲れのようなICT化による負の影響にも着目し，社会課題を積極的に解決する企業のアクションにつなげる選択肢を創造できるようにし，より良い社会の実現に貢献したいと考えています．

DTCの取り組みの一環として，未来社会の姿を探索する技術，地球と社会・経済システムの包摂的な平衡解を導出する技術等により，個人の多様性や機会・可能性の拡大，社会構造の複雑化，地球規模の不確実性が増す未来において，Well-beingと表現されるような個人の生きがいや心の豊かさを増進しながら，地球・社会・個人の間で調和的な関係が築かれる未来の実現

表 2　ICT化による影響の構成要素例

行動	ICT化の前後での変化	
	活動時間	単位時間当り温室効果ガス排出（原単位）
通勤	在宅勤務に伴い減少	通勤手段自体は変わらず，原単位の変化なし
買い物	移動時間の減少	電子機器の電力消費に伴い増加
趣味	通勤の減少に伴い増加	趣味内容自体は変わらず，原単位の変化なし
・ ・ ・		

をめざしています[3]．

おわりに

今後，これらの技術をベースに未来予測技術を確立するとともに，企業価値や企業のWell-beingの評価手法を構築します．社会構造の複雑化，地球規模の不確実性が増していく未来社会を予測し，気候変動問題等に対するICTのさまざまな影響・効果を先んじて把握し，それらを企業のESG戦略に反映，プロアクティブに対応することにより，地球環境と人間社会の持続可能性かつ包摂性の実現とともに，企業価値の向上をめざします．

■参考文献

(1) https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h29/pdf.html
(2) 斎藤：“人新世の「資本論」,” 集英社, 2020.
(3) https://www.ntt.co.jp/news2020/2011/201113c.html
(4) https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/
(5) https://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/ichiran.htm
(6) http://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/74/column4.html
(7) https://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/3r_policy/policy/pdf/text_2_3_a.pdf



（左から）篠塚　真智子/ 田中　百合子/ 張　　暁曦

新しい研究テーマとして立ち上がったばかりです．今後，さまざまな社内外の連携を通じて，壮大なテーマにチャレンジしていきます．

◆問い合わせ先
NTT宇宙環境エネルギー研究所
企画担当
TEL　0422-59-7203
E-mail　se-kensui-pb @ hco.ntt.co.jp

安心・安全に暮らすための プロアクティブ環境適応技術

地球における環境の変化は，私たちの社会生活に大きな影響を及ぼすことが想定されます．本稿では，さまざまな影響を予測し，プロアクティブに対応し，人類が適応・受容することでレジリエントな社会を実現するための環境適応技術（地球情報分析基盤技術，気象予測・制御，雷制御・充電，電磁バリアなど）について紹介します．

加藤（かとう）　潤（じゅん）

NTT宇宙環境エネルギー研究所

はじめに

近年，国内外で極端気象*1の発生頻度が高くなっています(1)．特に日本において，豪雨や台風が極端気象の特徴事象となっていますが，豪雨や台風は観測・予測が難しく，予期しない災害をもたらします．このため高精度な気象予測が重要となっており，予測技術はかつての予報技術者の経験や主観などに基づいた技術から，気象レーダー等の観測技術，スーパーコンピュータによる数値解析技術などにより著しく進歩しました．しかし，台風の予測，特に勢力予測では現在でも衛星写真による予測が行われています．

気象観測は，地球規模での陸域と海域，そして宇宙からの観測データを基礎とする観測・予報システムのもとで定常的に行われていますが，局地的大雨などの激しい気象現象は発生から成熟期までわずか15分程度かつ数km単位(2)の空間内での急激な変動となるため，人工衛星やアメダス（自動気象データ収集システム）などの観測では，時間的，空間的に対応できない場合があります．

また，温暖化に伴う海面水温の上昇による台風への水蒸気供給量の増大や中緯度偏西風の蛇行など，全球的な気候変動による影響が指摘されています(3)．気候変動は，長期的な地球の自然気候変動があるものの，人間活動による影響もあるという指摘がなされています(4)．地球の気候の状態を調べ，理解し，診断することが長期的な気候変動の予測および人為起源の影響を抑制する政策を実施するうえで極めて重要です．地球の気候の状態を評価するためには広域な観測を実施する必要があります．人工衛星によってその観測を実施することができますが，観測精度（大気の鉛直成分や海水面下の観測など）に課題があると考えます．

そこで私たちは，極端気象や気候変動などの地球環境変化について高精細に予測し，事前に対策を実施することで影響を受容可能とすることを目的とし，後述する技術開発に取り組んでいます．

地球情報分析基盤技術

今までほとんど観測されていない海上，海中および山中の情報を幅広く活用し，気象予測や被災予測をリアルタイムかつ高精度に行うための検討を進めています．現在，国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）によって，2020年5月に革新的衛星技術実証テーマとして採択された「衛星MIMO技術を活用した920 MHz帯衛星IoTプラットフォームの軌道上実証」(5)をベースとし，地上通信インフラでは情報を収集できないエリアをカバーすることを検討しています．このシステムは，500 km上空の衛星で地上のさまざまなIoT（Internet of Things）センサの情報を一斉に取得し，地上に束ねて情報を送信し，地上で分析する新たなセンサネットワークシステムです．

本ネットワークを用い，IoTセンサを所望の位置に設置することできめ細

*1　極端気象：極端な高温・低温や強い雨など，特定の指標を超える現象のことを指します．

かい気象観測を実施し，変化の激しい局所豪雨や台風などの極端気象の予測に資するデータ取得・データ同化*2が可能となります（図１）．

気象予測・制御技術

地球情報分析基盤技術を活用して気象情報を収集し，そのデータよって地球全体の気象現象のデジタルツイン*3を構築し，デジタルツイン上での気象予測と気象制御のシミュレーションの実現をめざします．

気象予測では高精細な気象観測に取り組みます．特に極端気象である台風に関する気象データを海洋や空中から観測するシステムの設計と実測を行っています．また台風の気象モデルについても大学等と連携して検討を進めます．

気象制御の例として，台風と雷について説明します．台風の制御については，深海と浅海の水を入れ替える水塊交替によって近海の温度を下げて台風の勢力を弱くする技術や，台風のエネルギーを電力に変える技術などについて検討しています（**図２**）．

次に，雷制御については**図３**に示すように飛行体を利用して落雷を安全な場所に導く技術の開発をめざし，ドローンなどの飛行体に雷撃を受けても飛行を維持するための装備や機能を検討しています．**図４**にドローンに格子状のファラデーケージ*4（Faraday cage）を取り付けたものに雷撃を当てた瞬間の写真を示します．同型のドローンは雷撃後にコントロールを失い墜落しましたが，ファラデーケージを取り付けたものは雷撃を受けた後も飛

*2　データ同化：主に地球科学の分野において数値モデルの再現性を高めるために行われる作業です．簡単にいえば，モデルに実際の観測値を入力してより現実に近い結果が出るようにすることを指します．

*3　デジタルツイン：現実の世界から収集したさまざまなデータを，まるで双子であるかのように，コンピュータ上で再現する技術．コンピュータ上では，収集した膨大なデータを基に，限りなく現実に近い物理的なシミュレーションが可能となり，自社製品の製造工程やサービスのあり方をより改善するうえで有効な手段となります．

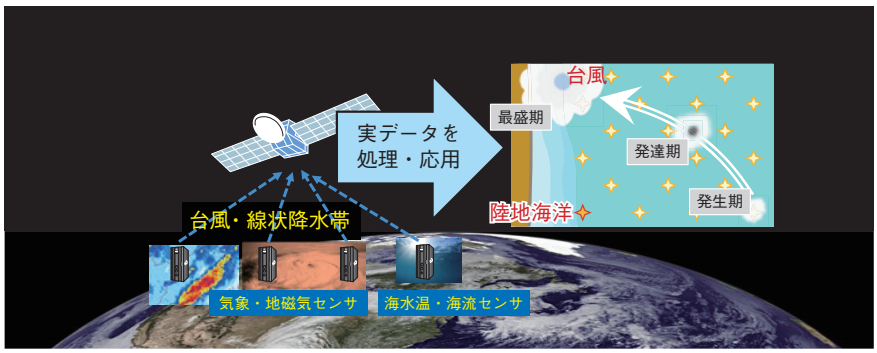


図１　衛星IoTプラットフォームを活用した地球情報分析の実現イメージ



現状：センシングが十分できていないため気象，被害予測の精度が向上されていない．
課題：新しいセンシング手法の確立．
台風のリアルタイム観測，社会インフラなどの脆弱性センシングを手法の実現．

現状：高精度のシミュレーションがないために気象制御の実施，エネルギー変換の効率化ができていない．
課題：気象＋インフラ，人，モノなどの複雑な要素を取り入れるため，DTC技術を用いたモデリング手法を確立する必要がある．

現状：極端気象に対して社会が適応できていないため被害が大きくなる．
課題：電磁波・レーザによる台風等極端気象のリスクを制御，およびエネルギーに変換することで環境適応可能な社会を実現する必要がある．

図２　気象予測・制御技術の概要

行を継続し，耐雷撃性能が高いことが確認されました．

さらに雷のエネルギーを取得・利用する手法についても検討し，雷のエネルギーのみで自律運行する落雷制御システムを構築し，安心・安全な社会を実現します．

また当グループでは，宇宙視点で人類の社会，環境の未来を革新させる技術の創出をめざした研究開発にも取り組んでいます．

電磁バリア技術

将来，人類が宇宙に進出し，居住空間を形成し長期間居住するためには，太陽や銀河から到来する強力な宇宙線*5による人体と精密機器への影響を低減させることが大きな課題となることから，宇宙線の評価および宇宙線を防ぐバリア技術の確立に取り組んでいます．

地上での宇宙線の影響は主に中性子由来ですが，宇宙空間では陽子が主となります．陽子は電荷を持つため強力な磁界や電界，遮蔽シールドによって宇宙線を遮断・屈折させる電磁バリア（**図5**）を形成できます．

この技術を検討するために宇宙空間での検証が必要となりますが，宇宙へ実験資材を搬送することは容易ではありません．そこで，宇宙船や宇宙ステーション，月面基地をサイバー空間上にデジタルツイン化し，仮想空間で電磁バリアを設計可能とする技術の確立をめざしています．

本検討では，私たちが有する地上での中性子線による影響評価技術[6]をベースに陽子による影響評価技術を確立するため，宇宙空間での事象を再現可能な陽子加速器での試験や簡易なシミュレーションを行います．

本研究が進めば長期間宇宙で生活できるようになるばかりか，有人惑星探査や月面基地も夢ではなくなります．また宇宙空間に超高セキュリティ，高信頼なデータセンタを構築することもできます．

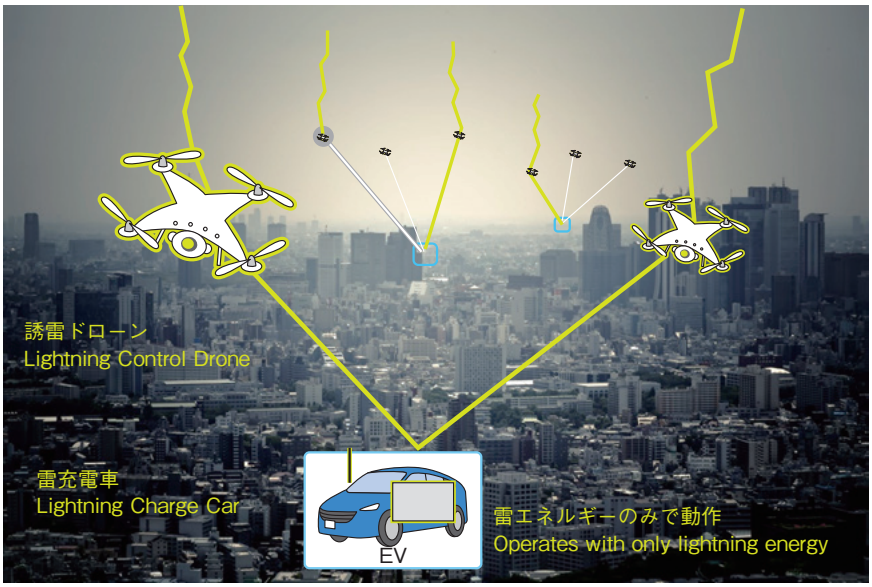
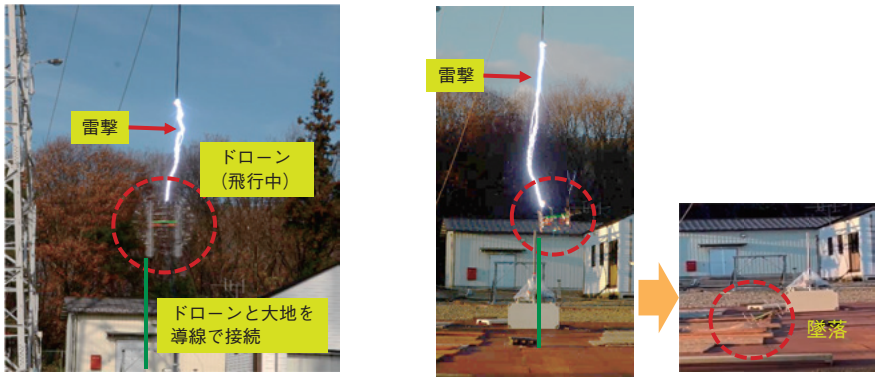


図3　ドローンを用いた雷制御・雷充電システムのイメージ



ケージあり【この後も飛行継続】　ケージなし【雷撃後に墜落】

図4　ドローンの耐雷撃性能試験模様（ファラデーケージによる効果）

まとめ

私たちは，今後より影響が大きくな

*4　ファラデーケージ：導体に囲まれた空間，またはそのような空間をつくり出すために用いられる導体製の籠や器そのもの．導体に囲まれた内部には電気力線が侵入できないため，外部の電場が遮られ，内部の電位はすべて等しくなる．ファラデーシールドとも呼ばれます．

*5　宇宙線：宇宙空間を飛び交う高エネルギーの放射線のことです．主な成分は陽子であり，太陽および銀河を起源としています．長期間の宇宙線被ばくにより電子機器や生体への影響が懸念されます．

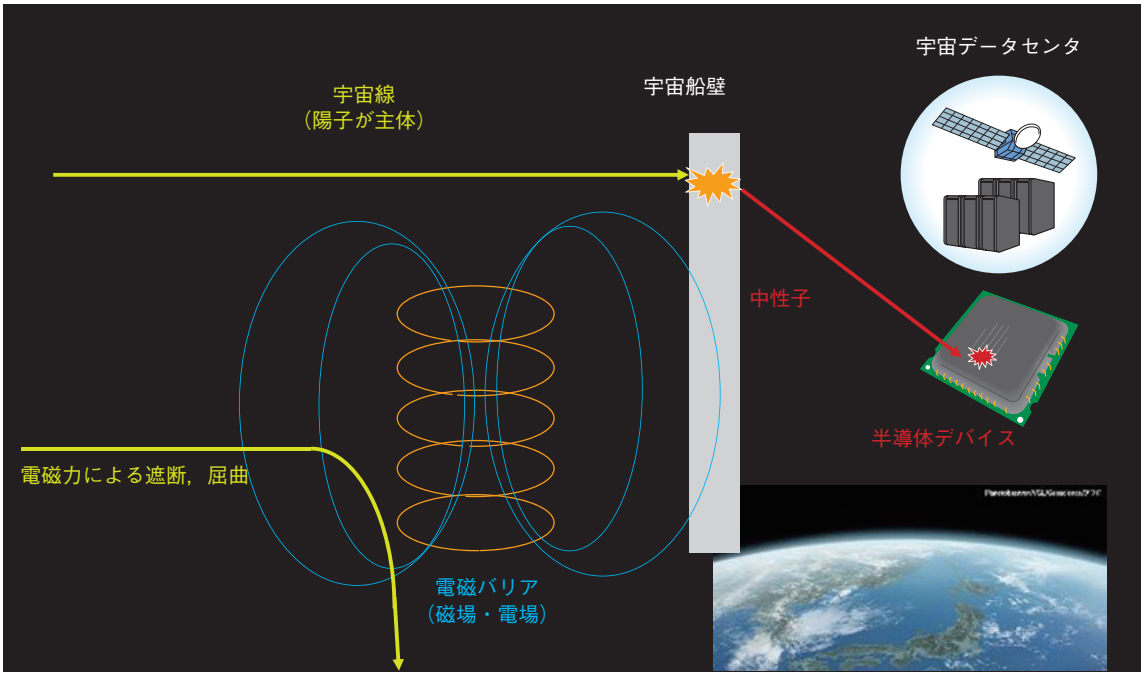


図 5　宇宙空間における電磁バリアシステムのイメージ

ると予想される極端気象や気候変動に対し，高精細に予測し，事前に対策を実施するため，新しいネットワークプラットフォームを用い，現在よりきめ細かい気象観測を実施しつつ，デジタルツインによる解析を活用した気象予測技術を確立し，影響を受容可能とすることを目標に取り組みます．また宇宙線を遮断・屈折させる電磁バリアの検討を進め，人類の社会，環境の未来を革新させる技術の創出をめざします．

■参考文献

⑴ 豊田：“極端気象と観測・予測技術，”極端気象の予測と防災：科学技術に関する調査プロジェクト，2019.
⑵ 中北・佐藤・山口：“ゲリラ豪雨予測の高精度化に向けた積乱雲の鉛直渦管生成メカニズムに関する研究，”京都大学防災研究所年報，第60号 B，pp. 539-558，2017.
⑶ S. C. Herring, N. Christidis, A. Hoell, J. P. Kossin, C. J. Schreck III, and P. A. Stott：“Explaining Extreme Events of 2016 from a Climate Perspective，”Special Supplement to the Bulletin of the American Meteorological Society，Vol. 99，No. 1，pp. S1–S157，Jan. 2018.
⑷ IPCC：“Climate Change 2007: The Physical Science Basis，”Working Group I contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change，Cambridge University Press，2007.
⑸ https://www.ntt.co.jp/news2020/2005/200529a.html
⑹ https://www.ntt.co.jp/news2020/2011/201125a.html



加藤　潤

極端気象や気候変動の予測の実現に必要な研究要素を引き上げるだけでなく，世のため人のためにどのように新たな価値を提供できるのかも併せて考え続けていきたいと思っています．

◆問い合わせ先

NTT宇宙環境エネルギー研究所
企画担当
TEL　0422-59-7203
E-mail　se-kensui-pb＠hco.ntt.co.jp

主役登場

環境負荷ゼロのエネルギーネットワークをめざして



花岡　直樹
NTT 宇宙環境エネルギー研究所
研究主任

近年，自然災害が激甚化・頻発化しており，被災地域を中心に自然災害への対応力の向上（レジリエンス）が重要となっています．また，地球環境への配慮やエネルギー自給率の向上を目的として太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー（再エネ）の導入拡大が求められています．NTTグループでは，2020年5月に環境エネルギービジョン「環境負荷ゼロ」を策定し，NTTグループ全体で再エネ利用の割合を2030年度までに30%以上に引き上げることを掲げ，さらには地球環境の再生と持続可能かつ包摂的な社会の実現に向け，革新的な技術を創出することをめざしています．

このビジョンを実現するため，NTT宇宙環境エネルギー研究所の環境負荷ゼロ研究プロジェクトでは，「エネルギーネットワーク技術」「次世代エネルギー技術」「サステナブル技術」を3本柱として研究しています．この中で私たちは，「エネルギーネットワーク技術」における，双方向直流マイクログリッドの実現に向けた研究を進めています．私たちの考える双方向直流マイクログリッドとは，NTTの通信ビルで培った通信機械室向けの直流給電技術を強みに，再エネによる発電システムと蓄電池を備えた通信ビルと避難所双方の電気設備を通信・電力線で接続した直流給電システムのことです．実現すれば，平時は再エネによる電力の地産地消が可能となり，大規模災害時に停電が長期化したときは通信ビルから避難所に電力を供給することが可能となります．

双方向直流マイクログリッドを実現するために，中でも重要な課題は，自然災害や人災による，火災や感電の重大事故の発生を未然に防ぐための安全なシステムを構築することです．重大事故を引き起こす主な要因には，「屋外直流配線における短絡（ショート）・地絡」および「屋外直流電気設備への直撃雷・誘導雷」があります．

私は特に「屋外直流配線における短絡・地絡」について，事故時に流れる大電流を安全に遮断する技術開発に取り組んでいます．屋外直流配線の長さは屋内と異なり，時には数kmに及びます．配線自身のインピーダンスの変化に応じて，事故点に流れ込む電流も大きく変化するため，屋内の電流遮断技術をそのまま適用することができません．さらに，電気通信事業に求められる高い信頼性と電気事業に求められる高い安全性を両立することが必要です．そのため，NTTグループ会社をはじめ業種の異なるさまざまな企業，大学，自治体と意見交換をしながら，新しいエネルギー供給のあり方について検討を重ねています．

私は，これらの研究を積み重ね，将来的に高い信頼性と安全性を兼ね備えた双方向直流マイクログリッドを社会実装につなげたいと考えています．そのために環境や経済の側面を含む多面的な観点から技術の開発を継続していきます．NTTグループのスマートエネルギー事業を支えることを通して，環境負荷ゼロの安定したエネルギーネットワークを実現し，1人ひとりが自然とともに安心・安全に暮らせる社会づくりに貢献していきたいと考えています．

明日のトップランナー

NTT宇宙環境エネルギー研究所

秋山一也 グループリーダ

「核融合炉の最適オペレーション技術」
「宇宙太陽光発電」



2020年７月に発足したNTT宇宙環境エネルギー研究所．地球環境の再生と持続可能かつ包摂的な社会の実現に向け，次世代エネルギーを含めたスマートエネルギー分野に革新をもたらす技術と，地球環境の未来を革新させる技術の創出とを目的とした新たな研究所です．今回は環境負荷ゼロ研究プロジェクトの研究のひとつ，次世代エネルギー技術グループを率いる秋山一也グループリーダにお話を伺いました．

◆PROFILE：1997年NTTに入社，環境エネルギー分野の研究に従事（うち2009年～2013年はNTT西日本技術革新部に出向）．2015年株式会社エネット・経営企画部長に就任．2017年NTT技術企画部門にて，合弁会社立ち上げなどに携わる．2018年NTTファシリティーズにて，ソリューション開発や販売などに携わる．2020年７月宇宙環境エネルギー研究所 環境負荷ゼロ研究プロジェクト 次世代エネルギー技術グループ グループリーダに就任）．

宇宙環境エネルギー研究所とは

◆宇宙環境エネルギー研究所について教えてください．

もともとNTTには「環境エネルギー研究所」という研究所があり，NTTの通信ビルの省電力化，電柱や電線といった通信設備の長寿命化などに取り組んできました．その後，事業会社と一体になってR&Dに取り組もうということで環境エネルギー研究所は2015年春に廃止となりました．それから５年を経て，NTTグループという狭い視野ではなく，地球全体の未来を変えようという壮大な目的で，まったく新規で次世代エネルギーを含めたスマートエネルギー分野に革新をもたらす技術の創出と，地球環境の未来を革新させる技術の創出をめざした宇宙環境エネルギー研究所が2020年７月に発足しました．

研究所内には「環境負荷ゼロ研究プロジェクト」および「レジリエント環境適応研究プロジェクト」の２つのプロジェクトがあります（**図１**）．

「環境負荷ゼロ研究プロジェクト」は，これまでのNTTグループの研究所ではあまり扱わなかったテーマを扱おうというプロジェクトで，次世代エネルギーの活用技術を研究する「次世代エネルギー技術グループ」，仮想エネルギー流通基盤技術を研究する「エネルギーネットワーク技術グループ」，CO_2変換技術や環境負荷低減技術を研究する「サステナブルシステムグループ」の３グループで構成されています．

一方，「レジリエント環境適応研究プロジェクト」は，少し毛色の違ったプロジェクトで，ESG経営リスクマネジメント技術を研究する「ESG経営科学技術グループ」，環境適応リスクマネジメント技術を研究する「プロアクティブ環境適応技術グループ」の２グループで構成されています．

私が属する「次世代エネルギー技術グループ」は，圧倒的にクリーンかつ無尽蔵なエネルギー源の創出テーマとし，「核融合炉の最適オペレーション技術」と「宇宙太陽光発電」の２つの研究テーマに取り組んでいます．

◆「核融合炉の最適オペレーション技術」について教えてください．

核融合というと「原子力発電所とどう違うのですか」と良く聞かれます．原子力発電所で使われている技術は核分裂で，ウランのような重い原子が分裂するときに放出されるエネルギーを取り出すものです．

一方，水素のような軽い原子どうしが融合するときに放出されるエネルギーを取り出すものが核融合です．核分裂が放っておくと連鎖反応により際限なく続くのに対し，核融合では原子を非常に正確にコントロールしないとすぐに止まってしまいます．

現在，平和目的の核融合エネルギーが利用可能であることを実証するため，人類初の核融合実験炉を建設運転しようとする超大型国際プロジェクト（ITER計画）が日本・欧州連合（EU）・米国・ロシア・韓国・中国・インドの７極により進められています（**図２**）．

核融合実験炉ITERで核融合を起こすには，まずドーナツ状の磁場の中に燃料となる重水素，三重水素を閉じ込めてプラズマ状態にし，１億5000万度まで加熱します．ここからエネルギーを取り出すにはプラズマを長時間安定的に発生させる必要がありますが，そのためには核融合炉から得られる膨大なデータをコント



図１　宇宙環境エネルギー研究所

ロールセンターに転送し，そこで最適な数値を計算し瞬時にフィードバックする必要があります．その実現には制御ネットワークのさらなる高度化，低遅延化が不可欠となりますが，そこにNTTが現在研究開発を行っているIOWN構想のオールフォトニクス・ネットワークやディスアグリゲーテッドコンピューティングなどが貢献できるのではないかと考えています．



また，将来的にはデジタルツインコンピューティングを活用し，サイバー空間上に核融合炉をリアルに再現することで，高度なシミュレーションや未来性能予測によりさらなる制御技術の向上にも寄与する計画です．

現在は2025年のファーストプラズマ達成に向けて，IOWNが貢献できないか検討を進めています．

◆「宇宙太陽光発電」について教えてください．

「宇宙太陽光発電」は，地上36000キロ上空の静止衛星軌道上で太陽光発電を行い，そのエネルギーを地上にレーザーやマイクロ波で送りとどけ，再度地上で電力などのエネルギーに変換するという構想です．静止衛星軌道上では，ほぼ24時間365日太陽からのエネルギーを受けることが可能なうえに，地球の大気によるエネルギーの吸収や散乱の影響を受けないことから，地上と比較し単位面積当たりで約10倍のエネルギーを安定して受けることができます．我々はマイクロ波よりも波長が３～４桁ほど短いため，ビームの広がり角が小さく長距離を伝送させやすいという



観点を重視し，レーザーによるアプローチを試みています．

技術要素としては大きく分けると３つあり，１つめは太陽のエネルギーを効率よくレーザーに変換する技術，２つめはレーザーを地上のターゲットに正確に照射する技術，そして３つめは宇宙から届いたレーザーを効率よく電気に変換したり，電気以外の形態に変換して効率よく蓄えたりする技術です．

１つめの技術については，太陽光の各波長成分をシフトさせ，単色，つまり特定の波長のレーザーに変換する「スペクトルシフトレーザー技術」を検討しています．太陽光を直接レーザーに変換できるため，高い変換効率が期待できます．

また，宇宙から地上に送るレーザーは，非常に長い距離を大気の揺らぎなどを取り除いた上で，高いエネルギー密度で伝送させる必要があります．そこで，２つめの技術については焦点深度の深い光学系を活用する方式や，いくつものビームを重ね合わせることによってエネルギー密度を高める方式を検討しています．

３つめの技術については，通常はエネルギーを電力に変換する場合には太陽電池を利用しますが，我々の身近にある一般的な太陽電池の変換効率はおおよそ20%しかありません．残りの80%は表面で反射や透過などによって熱として失われています．そこで単色のレーザー光を効率よく変化する素子の研究に加えて，熱化学反応や触媒を用いていったん水素やアンモニアといった違う形態にエネルギーを蓄える方法についても検討を行っています．この技術は水素社会を実現するためのキーにもなりうるのではないでしょうか．

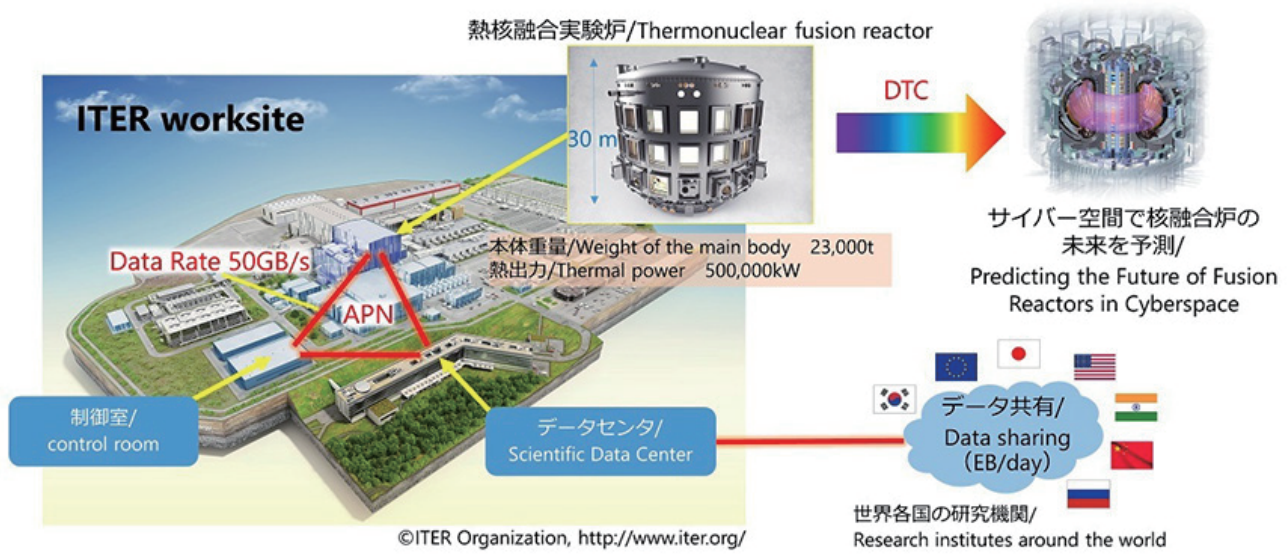


図２　核融合炉の最適オペレーション技術

宇宙環境エネルギー研究所はまだ発足したばかり



◆今後の展開についてお聞かせください.

ITER計画では，ファーストプラズマが2025年，本格的な試験開始が2035年に予定されています．商業的にペイするかどうかの検討はそのタイミングで行われ，実用化されるのは2050年以降になるでしょう.

現在は核融合炉の最適オペレーションの実現に向けて研究開発を行っていますが，最難関のここでしっかりとIOWN技術のユースケースを創っておけば，超高速で低遅延のネットワークを使って機器をリアルタイムで制御する技術や，大容量のデータを高速で処理してデータを伝送する技術は他の産業や分野にも適用可能だと思います.

「宇宙太陽光発電」も同様で，現在は21世紀中頃の実現が目標とされています. こちらも数十年を要する非常に気の長い話です. そのため，研究で得られた成果を早めに切り出し，社会に貢献することを考えています.

例えば最終的には36000キロの伝送を目指しますが，一足飛びにそこを目的とするのではなく，それよりも短い距離で，例えばドローンや自動車などの移動体にレーザーを照射してエネルギーを伝送する技術，また災害時にNTTの通信ビルから被災地の公民館や避難所などに向けてエネルギーを伝送する技術への転用などが考えられるでしょう.

◆NTTの強みはどのような点にあるとお考えでしょうか.

私がNTTグループの研究所について面白いな，と感じる点は，色がついていない，特定の分野に偏っていないということです.

NTTは通信産業を担う会社ですが，研究分野は通信に限られておらず，エネルギーサイエンスやコミュニケーションサイエンスなどさまざまな研究を行っています．そのため，いろいろな分野の専門家が身近にいて議論をすることができます．我々もネットワークに関しては情報ネットワーク総合研究所，情報処理で言えば先端技術総合研究所やサービスイノベーション総合研究所などの各研究所をはじめ研究企画部門などとも連携し，まさに「オールNTT」体制で研究にあたっています.

また，エネルギー分野に革新をもたらす技術の創出，地球環境の未来を革新させる技術の創出という非常に高いビジョンを掲げていることもあり，フラットな立ち位置で研究に臨めるということがNTTの強みではないかと思います.

◆研究者，学生の方へメッセージがあればお願いします.

現在，宇宙環境エネルギー研究所はまだ発足したばかりですし，新しい分野へのチャレンジですので，我々にスキルやノウハウが足りないところも多々あります．通信だけでなく，核融合や宇宙分野を専門とする方などが必要です. そうした点を補うため，NTTグループに留まらず，さまざまな技術をお持ちの研究所，大学，企業の方と今後も積極的に連携していきたいと考えています.

今回のインタビューを通じ，少しでも興味を持たれた方がいらっしゃれば，ぜひ我々にアクセスして欲しいと思います．また，お話しした２つの研究テーマ以外でも，エネルギー分野に革新をもたらす技術についてアイディアがあれば，ぜひ宇宙環境エネルギー研究所の門を叩いてほしいと思いますね．この研究所ではそれをやれるだけのチャンスを得られると思いますよ.

特集

人と社会を支えるヘルスケアデバイス・インフラメンテナンス技術

Healthcare Device and Infrastructure Maintenance Technology

本特集では,人の健康やインフラの老朽化に配慮した持続可能な社会の実現に向け,NTT研究所が取り組んでいるヘルスケアデバイスやインフラメンテナンス技術について解説するとともに,実用化間近の研究成果や最先端技術を紹介する.



持続可能な社会に向けたデバイス技術が切り拓く未来 42

NTT研究所が培ってきたデバイス技術を活用したスマートヘルスケア技術，およびインフラメンテナンス技術の方向性について紹介する．

より安心して働ける作業現場の実現に向けた体調管理技術 47

NTTデバイスイノベーションセンタがこれまで培ってきたウェアラブルデバイス技術，データ解析技術に，温熱生理学・運動生理学の知見を加え開発した，より安心して働ける作業現場の実現に資する体調管理技術を紹介する．

光音響計測技術を活用した非侵襲生体情報センシング 51

NTT先端集積デバイス研究所の，光が持つ特定の成分を選択的に測る特徴と，音(超音波)が持つ生体内をよく伝搬する特徴を組み合わせた光音響計測技術により，生体内部にある情報収集をめざした非侵襲生体情報センシング技術について紹介する．

ハイパワーレーザデバイスを用いた錆取り技術の実現に向けて 56

NTTデバイスイノベーションセンタがこれまで培ってきた回折素子をベースにしたハイパワーレーザデバイスを組み込んだ，小型で軽い錆取り技術の概要について紹介する．

コンクリート電柱内鉄筋の水素脆化予測技術 59

NTT先端集積デバイス研究所で研究開発している，水素脆化加速試験および統計的データ解析を用いたコンクリート電柱内鉄筋の水素脆化予測技術について紹介する．

主役登場 63

高河原 和彦（NTTデバイスイノベーションセンタ）
ウェアラブルセンサによる新たな価値をパートナーと共創

持続可能な社会に向けたデバイス技術が切り拓く未来

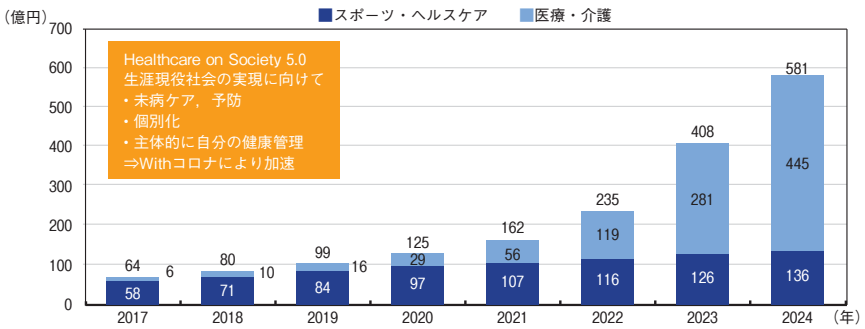
本稿では，人の健康やインフラの老朽化に配慮した持続可能な社会の実現に向けて，NTTが取り組む研究開発について概説します．国内外の社会課題の解決に向けた潮流について簡単に触れ，NTT研究所が培ってきたデバイス技術を活用したスマートヘルスケア技術やインフラメンテナンス技術の方向性について述べます．具体的な研究事例として，人やインフラの状態を把握・推定し，予防・保全に役立てることが可能な実用化間近の研究成果や最先端技術を紹介します．

とみざわ　まさひと
富澤　将人[†1]　　おかだ　あきら
岡田　顕[†2]

NTTデバイスイノベーションセンタ　所長[†1]
NTT先端集積デバイス研究所　所長[†2]

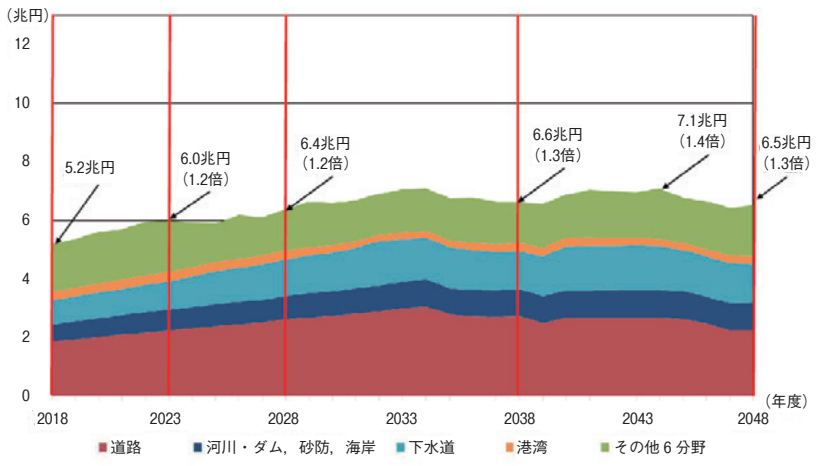
持続可能な社会実現に向けた課題

少子高齢化，地球温暖化，エネルギー問題，食糧危機など世界中でさまざまな問題が顕在化してきており，文明の発展に伴い人類が享受してきた経済成長を今後継続的に発展していくためのターニングポイントが2030年ともいわれています．世界では持続可能な社会の実現に向けてSDGs（持続可能な開発目標）が制定され，日本においてもSociety 5.0に向けた取り組みが重要課題として位置付けられています[(1), (2)]．そのような状況で経済や地政学的な世界秩序の再編時代に入り，情報化社会をどのように見直していくのかが大きな課題となっています．このような課題を解決していくためには，社会システム全体に視野を広げながら世の中のニーズをとらえ，産業として継続的な事業が実現できるような技術開発が必要になってきます．すなわち，社会課題の解決と事業の継続性を両立させることが，真に持続可能な社



出典：野村総合研究所第273回ＮＲＩメディアフォーラム（2018年12月６日発行）
野村総合研究所のデータを基にNTTが作成

図１　Health Techの国内市場規模推移



※推計値は幅を持った値としているため，グラフは最大値を用いて作成．

出典：「国土交通省所管分野における社会資本の将来の維持管理・更新費の推計」（国土交通省）
（https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/_pdf/research01_02_pdf02.pdf）

図２　インフラ維持管理・更新費の推移

会を実現することになります．

このような取り組みに挑戦しようとする場合，人を中心とした取り組みが１つの大きな糸口になると考えます．人を中心ととらえた場合，人そのものの健康やヘルスケアと，人を取り巻く環境という２つの側面があり，人と環境に配慮した技術開発を行うことで事業の継続性を実現しながら社会課題の解決に大きく貢献できると考えます．人の健康に着目した場合，生涯現役社会の実現による経済効果は33兆円，Health Tech市場は500億円以上ともいわれており（**図１**），日常的なモニタリングによる早期介入と個別指導による未病ケア・予防など，主体的に自分の健康を管理していく時代がくると考えられます．このような課題認識は以前から指摘されていましたが，昨今の感染症拡大により健康のDX（デジタルトランスフォーメーション）化の必要性が一気に高まっているといえます．環境に配慮した技術については，情報化社会のもっともベースとなるインフラ設備のメンテナンスをいかに効率良く維持していくかという問題があります．国内のインフラ維持管理・更新の費用は５～７兆円規模が必要と推定され，その費用は莫大です（**図２**）．インフラメンテナンスは，設備がさまざまな環境下で長期間使用されるため，10年単位の物理現象を評価・解明する必要があるなど，極めて難しい技術領域になります．現在は人手による作業が多くなっていますが，技術の力でDX化ならびに点検の自動化を実現することが求められています．

このような背景のもと，持続可能な社会の実現のため，NTTではスマートヘルスケア技術およびインフラメンテナンス技術の研究開発に注力しています（**図３**）．

スマートヘルスケア技術・インフラメンテナンス技術の方向性

■スマートヘルスケア技術

人の健康やヘルスケアを日常的にサポートしていくためには，日々の生活の中で存在を意識せずに必要な情報を取得したり，また状況に相応しい情報を提示したり，自然なかたちで生活に

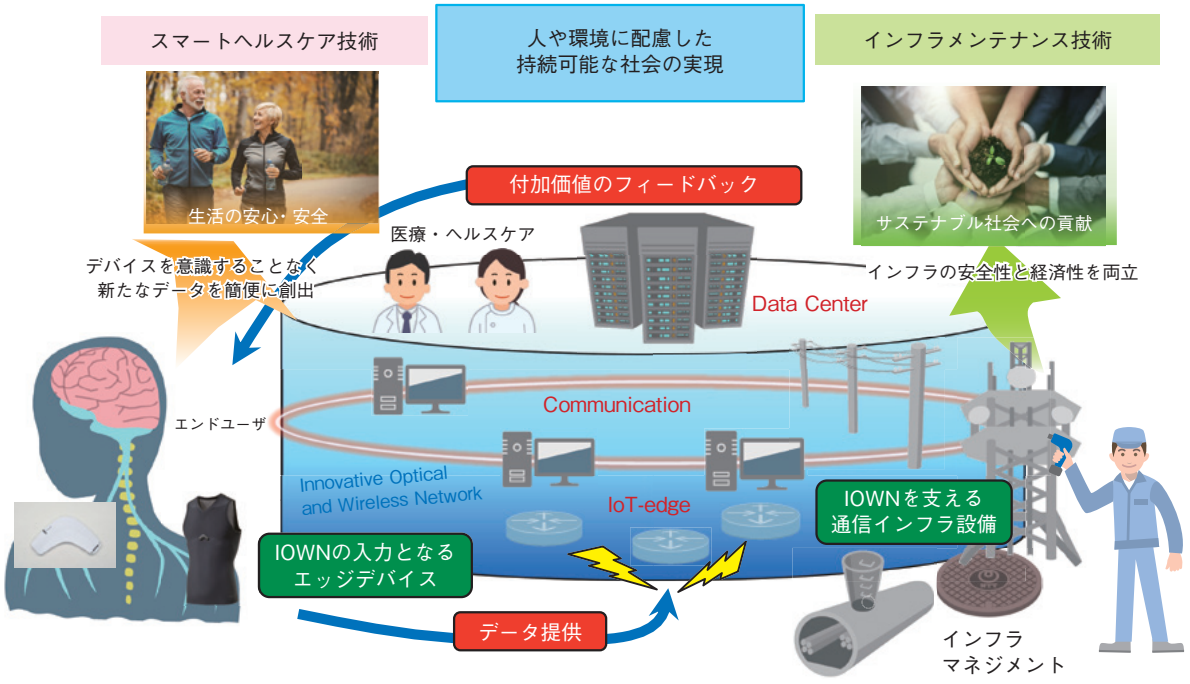


図３　持続可能な社会実現に向けたスマートヘルスケア・インフラメンテナンス技術

溶け込み暮らしを豊かにするデバイス技術の創出が求められます．今までも携帯型の心拍や脈拍を計測するバイタルセンサ端末やスマートウォッチなどが商用化されてきており，さまざまな場面でその有用性が認められ始めていますが，社会課題の解決と市場の立ち上がりという観点ではまさにこれからという状況です．大きなトレンドとしては，今までのフィットネスレベルの活用から医療グレードに踏み込んだメディカル応用ともいうべき真のヘルスケアへと展開していく潮流が始まっています．NTTでは，低電力マルチセンサデータ処理技術や高精度センシング技術を新たに開発し，従来の心電計測や加速度センサだけでなく，ウェアラブルデバイスとしては初めて温湿度センサも内蔵したウェア型の小型低電力トランスミッタを実用化しました[(3)]．本デバイスを活用することで，体内温度の変動や身体負荷の推定が可能となり，今まで分からなかった身体情報がリアルタイムで把握できることにより付加価値の高いサービスが展開できます．その先の技術としては，非侵襲の高選択・高感度モニタリングを可能とする光音響センシング技術や分子標識技術を研究開発しています．患者数が年々増加している生活習慣病・慢性疾患において従来では測れていなかったバイタル情報やバイオマーカを対象として，唾液・血液などの検体採取が不要でより簡便なバイオセンサデバイスの実現をめざしています．

■インフラメンテナンス技術

さまざまな過酷な環境下で数十年という長期間使用されるインフラ設備は，多くの人手と経験に支えられているのが実情で，効率的な作業に寄与する技術開発はまだまだ不十分であり，さらにはインフラ設備を構成する材料等の10年単位での劣化進行度など不明なことも多い状況です．今後は安全性と経済性を両立した持続可能なインフラ保全を実現していくことが極めて重要になります．インフラ保守は主に，①保守計画，②点検，③診断，④補修・補強・改修というステップで構成されます．より効率的で安全なインフラ保守を実現するには，事前の計画をできるだけ正確に立てること，人手で支えられている補修作業等を効率化することがポイントになります．インフラ設備は主に鉄鋼とコンクリートでできており，インフラメンテナンスは鉄鋼とコンクリートの保守といっても過言ではありません．そこで，NTTとしては，インフラ保守を予防保全という観点で，鉄鋼やコンクリート電柱にフォーカスし，既存技術では極めて解決困難な「錆除去作業の効率化」と「劣化推定」に資する技術を研究開発しています．通信鉄塔をはじめとする鉄鋼製のインフラ設備は，錆の発生によって老朽化が進行するため，それを除去することが重要です．NTTで培った光回折素子技術を活用しハイパワーレーザと組み合わせることで市中製品と比較して数倍軽量化が可能になり大幅な作業効率の向上が期待されます．

また，コンクリート電柱については，電柱内鉄筋の劣化現象は水素脆化が起因していることが知られていますが，その詳細は未解明なところが多いです．NTTでは，電気化学，材料などのコア技術を駆使し，水素脆化予測技術を確立すべく研究開発を推進しています．

本特集のトピックスと構成

本特集では，スマートヘルスケア技術とインフラメンテナンス技術において，それぞれ実用化に近いテーマと中長期的テーマについて取り上げ，最新の研究成果として以下の4つの技術を紹介します（**図4**）．

■ウェアラブル生体・環境センサ技術を活用した体調管理技術

NTTでは，機能素材「hitoe®」*を電極として縫製したウェアに装着して，心拍数・心電波形などの生体情報に加えて，ウェア内の温度や湿度といった環境情報を取得・送信するウェアラブル生体・環境センサ技術を実用化しています．この技術は，3つのセンサ（心電，加速度，温度・湿度）のデータを効率良く信号処理が可能な技

＊ hitoe®：東レとNTTが開発した機能素材で，最先端繊維素材であるナノファイバ生地に高導電性樹脂を特殊コーティングすることで，耐久性に優れ，非金属素材でありながら生体信号を高感度に検出できます．体表面にhitoe®を密着させることで，心拍数や心電波形，R波の間隔から推定される睡眠データなどの生体情報が取得できます．また，ナノファイバを使用することで，家庭洗濯への耐久性があり，さらに肌への密着性も上がるため衣服や帽子など人の体に密着したかたちで生体信号が取得でき，より高感度な測定が可能となります．



図 4　NTTが取り組んでいる人や環境に寄り添う技術

術で，低電力小型のウェアラブル端末を実現しています．この技術を活用することで，生活のさまざまなシーンにおいて生体情報と個人の環境情報を快適かつ簡単に取得できるようになり，暑さ対策などのスマートヘルスケア応用が可能になります．本技術をベースに，暑熱環境下の作業者が着るだけで体調管理できる手法を新たに確立しました．これにより今まで分からなかったリアルタイムの身体情報が把握できるようになり，ネットワーク工事の作業現場で検証し，その有効性と実用性を確認しました．

■光音響計測技術を活用した非侵襲生体情報センシング

体内の生体成分に特定の光を照射した際に発生する超音波を計測する光音響法を用いることで，採血等により体を傷つけることなく非侵襲で生体情報をセンシングする技術について紹介します．光音響法は，ＯＣＴ（Optical Coherence Tomography：光干渉断層撮影）や超音波法等の他の手段に比べ，計測深度や空間分解能に優れ，さまざまな生体成分に対応できるポテンシャルを有しているため，生活習慣病等に関連するさまざまな生体成分のモニタリングの実現が期待される技術です．非侵襲化により連続的に生体情報を計測することが可能となるため，医療やヘルスケアでの活用が期待され，日々さまざまに変化する生体情報のモニタリングの実現が期待できます．このような生体情報センシングデバイスの技術確立に向け，皮膚へのプローブの浸透度，生体機序の影響などの生体物理モデルを構築し，皮膚表面から内部にかかわる電気的・光学的パラメータと生体機序との相関から生体成分を計測する研究開発に取り組んでいます．

■光回折素子を活用した小型・軽量ハイパワーレーザ除錆技術

通信鉄塔をはじめとする鉄鋼製のインフラ設備は，錆の発生によって老朽化が進行します．鉄塔の維持管理をするうえでは，まずは錆を除去し，その後に塗装することで表面を保護していきます．塗装の性能を発揮・維持し，鉄塔の耐久性を高めるためには，下地である鉄鋼の表面状態が重要であり，いかにきれいに錆を除去するかがポイントになります．ハイパワーレーザを鉄鋼表面に照射することで錆を除去しますが，NTTの光デバイス技術である小型軽量な光回折素子を組み合わせることで，レーザのプロファイルを制御することが可能になり，効率的に錆の除去を行うことができるようになります．この結果として，市中製品と比較して数倍軽量という特長を達成することができます．現状の作業現場で

は，狭隘部など入り組んだ個所の錆取りに金属ブラシを用いていますが，本技術を活用することで作業負担の軽減と時間短縮を図ることが期待されます．

■コンクリート電柱内鉄筋の水素脆化予測技術

通信サービスを支えるインフラ設備の１つであるコンクリート電柱のより安全かつ経済的な維持管理を可能とする，コンクリート電柱内鉄筋の劣化現象である水素脆化を予測する技術を紹介します．コンクリートは圧縮には強いのですが引張に弱いため，コンクリートに圧縮応力がかかるよう内部鉄筋に引張応力を付加した状態で製造されます．コンクリート電柱は内部鉄筋により強度を担保していますが，張力が印加された状態の鉄筋では水素脆化と呼ばれる劣化が進行することが知られており，水素脆化の進展により折損事故につながる危険もあります．しかし，内部の鉄筋は目視で確認できないため，コンクリート電柱の劣化状況を把握することが難しく，保守上での課題となっています．予防保全という観点に立ち，水素脆化加速試験，水素量評価方法などの評価手法を構築し，統計学的データ解析などの分析手法を活用し，水素脆化メカニズムを解明してモデルを構築することで「水素脆化推定式」の定式化に取り組んでいます．

今後の展開

今回紹介したようなスマートヘルスケア技術やインフラメンテナンス技術について，できるだけ早く皆様のお手元に届くように実用化開発を加速しつつ中長期視点で挑戦的テーマの研究開発も推進していきます．それにより，人と環境に配慮した持続可能な社会の実現に貢献し，人々が豊かで幸せを享受できるような未来を切り拓いていきたいと考えています．

■参考文献

(1) https://www.env.go.jp/earth/sdgs/index.html
(2) https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html
(3) https://www.ntt.co.jp/news2019/1911/191108a.html



（左から）富澤 将人／ 岡田 顕

NTT研究所が培ってきたデバイス技術を活用し，人やインフラの状態を把握・推定し，予防・保全に役立てる「スマートヘルスケア技術やインフラメンテナンス技術」の研究開発を推進することで，持続可能な社会の実現に貢献していきます．

◆問い合わせ先
NTTデバイスイノベーションセンタ
NTT先端集積デバイス研究所
企画担当
TEL　046-240-2403/2022
FAX　046-240-2222/4328
E-mail　dic-kensui-p @ hco.ntt.co.jp
sende-kensui-p @ hco.ntt.co.jp

より安心して働ける作業現場の実現に向けた体調管理技術

高河原 和彦[†1]　橋本 優生[†1]
松永 賢一[†1]　樋口 雄一[†1※]
松浦 伸昭[†1]　桑原 啓[†1]
都甲 浩芳[†1]　川原 貴[†1]
平田 晃正[†2]　田中 英登[†3]
宮澤 太機[†4]

NTTデバイスイノベーションセンタ[†1]
名古屋工業大学[†2]
横浜国立大学[†3]
至学館大学[†4]

酷暑による熱中症の防止など，作業現場の安全性を高めるため体調管理の重要性が高まっています．NTTデバイスイノベーションセンタでは，これまで培ってきたウェアラブルデバイス技術，データ解析技術に，専門家との協業による温熱生理学・運動生理学の知見を加え，より安心して働ける作業現場の実現に資する体調管理技術を構築しました．本稿では，体調管理における課題と，それらを解決する要素技術の概要，および本体調管理技術を実際の作業現場で検証した結果の概要について紹介します．

技術開発の背景

近年，夏季の酷暑化の影響等もあって熱中症による救急搬送者数や死亡者数が増加しており，社会全体で大きな課題になっています．総務省消防庁の調査では，2020年６月１日から10月４日にかけ熱中症により救急搬送された人員数は６万4770人，厚生労働省の公表では，2019年における職場での熱中症による死傷者（死亡・休業４日以上）は829人，うち死亡者は25人となっており，厚生労働省等により，職場における熱中症予防対策の指針やマニュアルが公開されています(1)．このような社会課題を解決し，より安心して働くことができる現場の実現に向けて，NTTではウェアラブル生体・環境センサを活用した体調管理技術の研究開発に取り組んできました．

課　題

本体調管理技術は，「暑熱による体調不良リスクのリアルタイムな回避」と「短・中期的な稼働マネジメントによる事故リスク低減」という２つの側面からより安心して働くことができる作業現場の実現をめざしています．

暑熱環境下での活動による体調不良の発生メカニズムの概略を**図１**に示し

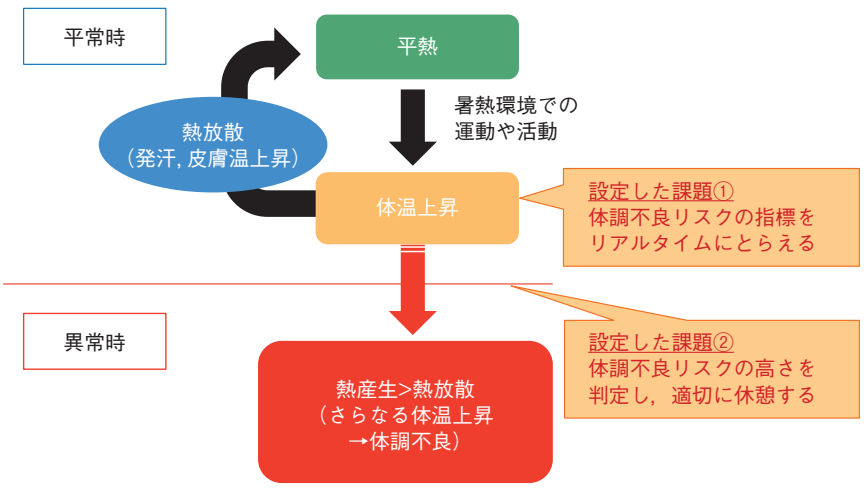


図１　暑熱下での体調不良メカニズム

※　現，NTTテクノクロス



図 2　ウェアラブル生体・環境センサ

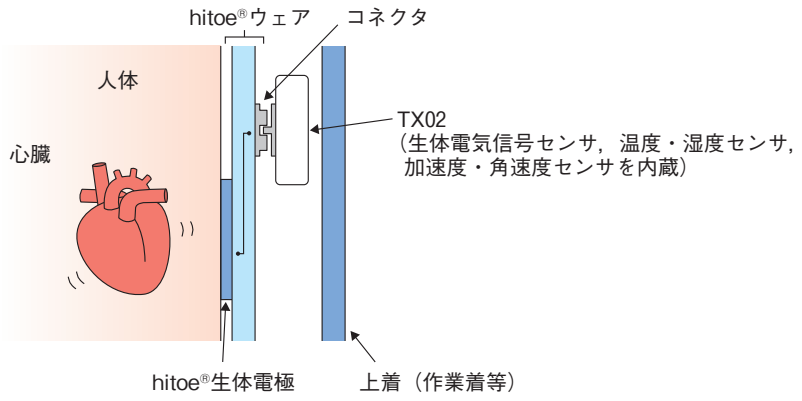


図 3　データ取得の概略図

ます[2]．人間の身体は，平常時には運動などによって体温が上がっても，発汗や皮膚温度の上昇によって熱が外気に放散され，体温調節が行われます．しかし，外気温が高いと熱が外気に逃げにくくなります．また，発汗により失われた水分や塩分の補給が不十分だと，血液の流れが悪くなり，体内に熱がこもりやすくなります．このようにして熱の産生と放散のバランスが崩れ，体温の上昇に歯止めがかからなくなると，体調不良を引き起こすことになります．

このメカニズムにおいて，解決すべき課題は２つ考えられます．１つは，作業現場における外気温や湿度などの環境や，作業・運動の強さは１人ひとり異なり，また時々刻々変化するため，個人ごとの体調不良リスクを示す指標をリアルタイムに把握する必要があるという点です．もう１つは，体調不良を引き起こす前に適切に休憩や水分取得を促すために，得られた指標から体調不良リスクの高さを判定する必要があるという点です．

また，「短・中期的な稼働マネジメントによる事故リスク低減」は，スポーツ選手の傷害・体調不良のリスクを低減する練習プランニングに有効であると着目されているAcute: Chronic Workload Ratio（ACWR，急性：慢性身体負荷率）[3]の考え方を作業者にも適用したものです．これは，１カ月程度の長期的な身体負荷に対する１週間程度の短期的な身体負荷の比率（AC比）が高すぎても低すぎてもケガ等のリスクが上がるため，AC比がリスクの低い領域になるように日々の稼働をマネジメントするという考え方です．解決すべき課題として，日々の作業による身体負荷の定量化が挙げられます．

私たちはこれらの課題を解決するため，生体・環境情報を取得するためのウェアラブルセンサを開発し，温熱生理学・運動生理学に基づくセンサデータの解析技術を確立しました．

要素技術

■ウェアラブル生体・環境センサ

個人ごとの体調不良リスクを示す指標をリアルタイムに把握するには，作業を妨げることなくさまざまな生体・環境情報を取得する必要があり，そのためのデバイスとして私たちはウェアラブルセンサが有効であると考えています．

本技術で用いるウェアラブル生体・環境センサを**図 2**に示します．NTTデバイスイノベーションセンタで研究開発したウェアラブル生体・環境センサ技術[4]をベースにして，NTTテクノクロスが商用化したトランスミッタ（TX02），東レ株式会社のhitoe®＊1作業者みまもり用シャツ・hitoe®使用ベルト，もしくは株式会社ゴールドウインのC3fit IN-pulseから構成されます．データ取得の概略図を**図 3**に示します．ユーザは，hitoe®生体電極が肌に直接接触するようにウェアを下着として着用し，TX02をコネクタを介してウェアに装着します．心臓が拍動する際に発生する微弱な生体電気信号がhitoe®生体電極によって取得され，コネクタを介してTX02に入力され，生体電気信号センサにより心電位データとして記録されます．TX02には，生体電気信号センサのほか，温度・湿度センサ，加速度・角速度センサを内蔵しています．このようにして，心

＊1　hitoe®：東レ株式会社とNTTが開発した，体から発している微弱な電気信号である生体信号を，無意識に近い状態で収集するための機能素材です．機能素材hitoe®は両社の商標登録です．

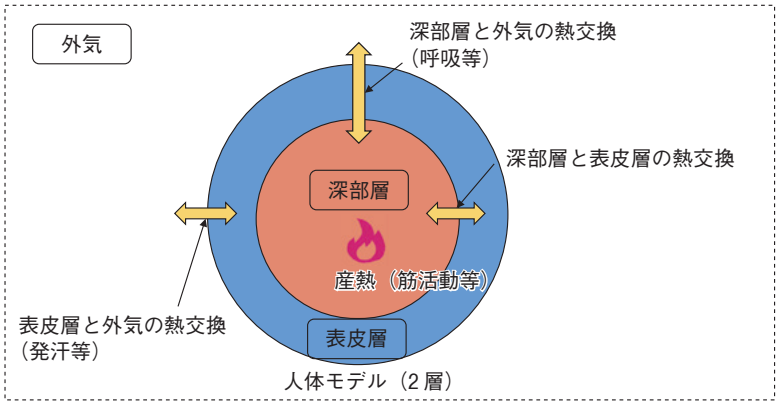


図4　体内温度変動の計算モデル

電位，衣服内の温度や湿度，上半身の加速度や角速度のデータを計測することができます．また，計測したデータを基に心拍数，心拍間隔，歩数，上半身の傾き等のさまざまな特徴量を解析します．

■体内温度変動推定技術

個人ごとの暑熱による体調不良リスクを示す指標として，体内温度*2，心拍数，めまいや吐き気の自覚症状が挙げられています(5)．体内温度は，従来食道や直腸に温度計を挿入して計測するため，専門的な技術が必要であり，作業や運動などの活動中にリアルタイムで計測することは困難でした．

そこで，私たちは国立大学法人名古屋工業大学（名工大）との共同研究により，体内温度変動を活動中にリアルタイムに推定するための新たな手法を確立しました．本手法は，ウェアラブルセンサ等からの取得情報を新たに構築した計算モデルに入力して体内温度変動を推定します．計算モデルの概要を**図4**に示します．本モデルでは，人体を深部層と表皮層に分割し，各層間および外気との熱のやり取りを，人の活動による産熱，発汗等による体温調節機能，服装といった要素を考慮した名工大独自のアルゴリズムを応用し定式化しています．このモデルに対してウェアラブル生体・環境センサでリアルタイムに取得した心拍数，衣服内温度・湿度の情報，別途アプリで取得する本人情報（年齢，身長，体重，性別，服装等）を入力し，体内温度（深部層温度）の変動を計算しています．本モデルを用いることによりスマートフォンの処理能力でもリアルタイムに体内温度変動を計算できるようになりました．

また，本推定技術の有用性を確認するため，NTTと国立大学法人横浜国立大学（横国大）と至学館大学（至学館大），名工大で共同実験を行いました．本モデルによる体内温度変動推定と直腸温度計による直接計測を同時に行う臨床実験*3を至学館大の人工気象室内で実施し，体調不良リスクを把握するために十分な推定精度であることを確認しました．

■体調不良リスク判定技術

個人ごとにリアルタイムの体調不良リスクを示す指標を把握した後には，得られた指標から体調不良リスクの高さを判定するための基準と判定アルゴリズムが必要となります．私たちは，横国大と至学館大，名工大との共同実験の知見から，温熱生理学をベースとし，心拍数，推定体内温度変動，主観情報の3つの指標に対して年齢や運動負荷を考慮した基準を設定し，3つの指標の状態から総合的な体調不良リスクを判定し高リスクの場合にはアラートを発出するアルゴリズムを構築しました．

■身体負荷推定技術

日々の作業による身体負荷を定量化するには，従来は作業終了後，なるべく記憶があるうちに作業の負荷の強さをどの程度であると自覚しているか（主観的運動強度）をアンケートで取得する必要がありました．私たちは，運動生理学に基づく心拍数解析によってアンケートによらず身体負荷を推定する技術を構築し，早稲田大学ラグビー蹴球部の協力を得て有効性を確認しました(6)．

作業現場での有用性の検証

本体調管理技術の作業現場での有用性を検証するため，NTT東日本の協力を得て，2020年8～9月に東京，神奈川，北海道エリアの工事作業者を対象とした検証を行いました*4．

本検証の概要図を**図5**に示します．体内温度変動推定技術，体調不良リスク判定技術，身体負荷推定技術をアプリケーションとして実装し，ウェアラブル生体・環境センサを着用した工事作業者の体調状態をクラウド経由で遠隔モニタリングするとともに，高リスクと判定された場合は作業者本人へアラートが通知されるデモシステムを構築しました（本デモシステムは医療機器ではありません）．

体内温度変動推定技術や身体負荷推定技術の作業現場での有用性を確認するため，本検証では作業者から温冷感

*2　体内温度：頭や体幹の内部の温度．医学用語では核心温，深部温度といいます．本技術は医療機器・医療用プログラムではないため，本稿では「体内温度」という独自用語を用います．
*3　至学館大学研究倫理審査委員会　受付番号124.
*4　日本生活支援工学会倫理審査委員会　倫審第286号.

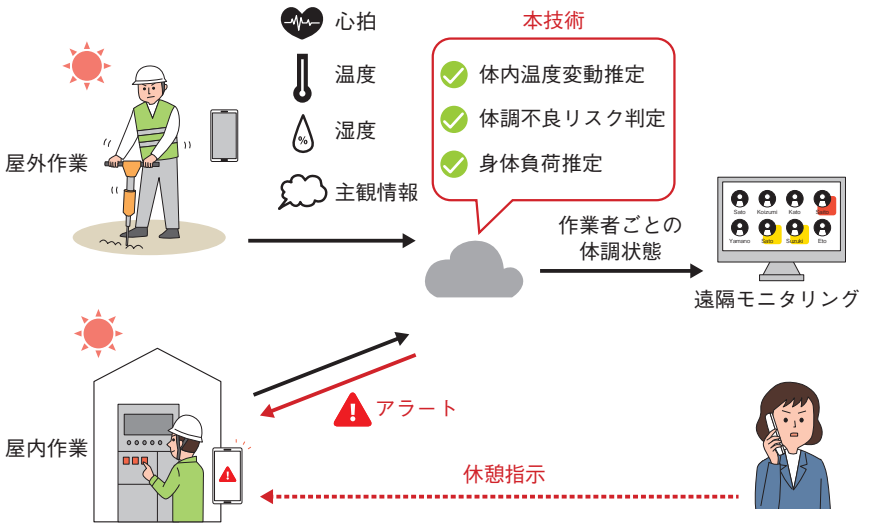


図 5　作業現場での検証概要

や主観的運動強度等の主観情報を取得し，推定結果との関連を評価しました．その結果，推定した体内温度変動と温冷感とに相関があること，推定した身体負荷と主観的運動強度とに相関があることを確認しました．これらの結果は，作業者の主観をアンケートによらず可視化できる可能性を示しており，ウェアラブル生体・環境センサデータに基づく体内温度変動推定および身体負荷推定の有用性を示していると考えます．

また，検証期間において，本体調不良リスク判定技術で設定した心拍数，体内温度変動，主観情報の 3 つの指標が補完し合うことで幅広くリスクケースを検出し，遠隔でモニタリングしている管理者および作業者本人にアラートが通知されました．本検証において熱中症等の重大な体調不良事例は発生しなかったことから，本体調不良リスク判定技術は有用であると考えています．

これらの結果から，本体調管理技術は作業現場の安全性の向上に対して有用であると考えています．

今後に向けて

作業者がより安心して働くことができる作業現場の実現をめざし，ウェアラブルセンサを活用した体調管理技術について，要素技術の構築から作業現場での検証までを完了しました．今後は，より多くの作業現場での導入によって知見を深め，さらなる改善を進めていきます．

■参考文献

(1) https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000164083.html
(2) https://www.wbgt.env.go.jp/heatillness_manual.php
(3) T. J. Gabbett: “The training-injury paradox: should athletes be training smarter and harder?,” Br. J. Sports Med., Vol. 50, No. 5, pp. 273-280, 2016.
(4) 桑原：“スマートヘルスケアに向けた心電，加速度，温度・湿度の計測を可能にする低電力・小型ウェアラブルセンサを開発，” NTT技術ジャーナル，Vol. 32, No. 3, pp. 57-58, 2020.
(5) ACGIH: “Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices,” 2019.
(6) 樋口・赤堀：“科学的なトレーニング支援技術を開発しラグビー選手を対象に有効性を実証，” NTT技術ジャーナル，Vol. 32, No. 7, pp. 60-62, 2020.



（上段左から）高河原　和彦/
橋本　優生/ 松永　賢一
（中上段左から）樋口　雄一/ 松浦　伸昭/
桑原　　啓
（中下段左から）都甲　浩芳/ 川原　　貴/
平田　晃正
（下段左から）田中　英登/ 宮澤　太機

NTTデバイスイノベーションセンタでは，人間に寄り添うウェアラブルデバイスの研究開発をミッションとしています．今後も，実際にプロダクトを使うユーザの声に真摯に耳を傾けながら，健康で豊かな暮らしの実現に向け，研究を進めていきます．

◆問い合わせ先
NTTデバイスイノベーションセンタ
ライフアシストプロジェクト
TEL　046-240-2296
FAX　046-270-2323
E-mail　kazuhiko.takagahara.ka @ hco.ntt.co.jp

光音響計測技術を活用した非侵襲生体情報センシング

近年，採血なしで簡便に血液成分を測定する生体情報センシング技術に注目が集まっています．NTTは，光が持つ特定の成分を選択的に測る特徴と，音(超音波)が持つ生体内をよく伝搬する特徴を組み合わせた光音響計測技術を用いた生体情報センシングの研究開発を行っています．本稿では，光音響計測技術により，生体内部にあるさまざまな情報の収集をめざした非侵襲生体情報センシング技術を紹介します．

田中（たなか） 雄次郎（ゆうじろう）　田島（たじま） 卓郎（たくろう）
瀬山（せやま） 倫子（みちこ）
NTT先端集積デバイス研究所

非侵襲測定技術による生体情報センシングの高度化

近年，情報通信技術（ICT）の進展と健康管理に対する意識向上により，ウェアラブルデバイスで取得した生体情報を利用してパーソナライズされたヘルスケアサービスがさかんになってきています．個人の日常生活でモニタされた情報は行動変容を促すシステムや医療ビッグデータへの適用が期待されています．一方で，現在，ウェアラブルデバイスで計測される生体情報は，活動量，心拍，呼吸，体温，血圧といった，主に物理センサで計測される情報です．例えば，体調が悪いと感じるときに，現在のウェアラブルデバイスの取得する生体情報では，客観的に状態を提示できても，原因や対処法の示唆にはつながりません．そこで，さらに，血液の成分情報といった生化学的な生体情報をウェアラブルデバイスで取ることが望まれています．現在，血液の成分情報は，病院などで採血した血液サンプルに対して項目ごとにさまざまな検査装置で分析します．これに対し，ウェアラブルデバイスにて血液の成分情報を取得するためには，身体を傷つけることなく“非侵襲的に”連続的なデータをより簡便に取得する技術の確立が必要です．非侵襲的な生体センシング手法として，近年，光音響効果を利用した生体イメージング技術が世界的に研究開発されています．光音響効果を利用した生体センシング手法は，生体成分を選択的に測る光の特徴と生体内をよく伝搬する音の特徴を合わせ持つため，生体内部を知るための有力な手法となります．言い換えれば，光が透過しにくい生体でも深くまで測定できるのが光音響測定のメリットになります．医療現場では生体内部を見たいというニーズが高く，X線CT，MRI，PETなどの画像診断装置が現在は使われています．これらの画像診断技術に対し，光源とマイクで構成される光音響装置は，可搬性や簡便でユーザの負担が少ないというメリットがあります．いつでもどこでも測れる技術確立の観点からこの光音響測定を生化学情報測定に適用する研究開発を行っています（**図1**）．本稿では，まず光音響効果の原理について簡単に述べ，NTTにおける研究の進展状況について紹介します．

光音響効果を利用した測定

光音響効果は，1880年に電話の発明で知られるA.G.Bellによって，物質に光を断続的に照射したときに音が発生するという現象として発見されました．これが1965年にM.L.Vengerovによって，ppmレベル（1万分の1%）の濃度のガス分析への適用が提案され，以来，分子レベルの化学構造が分析できる手法として確立されてきました．

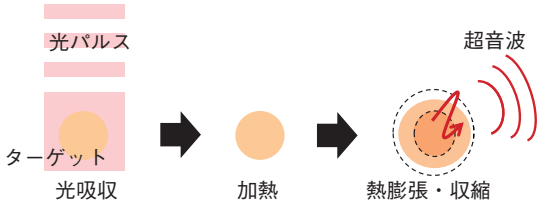
光音響効果を簡単に説明します．**図2**(a)に示すように，物質が光を吸収すると，その光エネルギーは熱に変換され，この熱エネルギーが物質の熱膨張を引き起こし，断続的な光照射で繰り返し熱膨張により弾性波，つまり音（超音波）が発生します．これを光音響波と呼びます．

そして，近年のICTの進展に伴い，

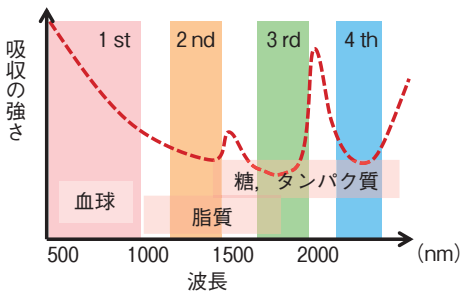


図 1　生体センシング情報と応用

時間制御性の高い光パルスを発生できる光源や切り替え可能な光スイッチ，音を高感度に検出する音響技術や多様な信号処理を行うエレクトロニクス技術の目覚ましい進歩の恩恵を受け，現在では材料分析，ガス分析，イメージングと幅広く応用されるようになってきました．音響効果を利用した生体測定では，生体内のターゲット物質によって吸収された光の量を，体の中をよく伝搬する超音波に変換し，光音響波として検出することで物質の濃度を推定します．物質は各々の特性に応じて吸収しやすい光の色（波長）があります．この特性を利用して生体内の成



(a)　光音響効果の概要



(b)　生体成分と光吸収スペクトルの模式図

図 2　光と物質の関係

分情報やその分布を知ることができます．例えば，図2(b)に示すように血球などは500 nm周辺（可視光）を，脂肪は1000 nm周辺（近赤外光），ブドウ糖やタンパク質は1500 nm周辺（近赤外光）によく吸収する波長領域があります．この性質を利用すれば生体にさまざまな色の光を当て，その光が吸収される量を測ることで成分情報が分かります．また，生体はその半分以上が水によって構成されていることがよく知られていますが，水にも光を吸収する性質があります．そのため，一般に光を用いて測定する場合は水の吸収が小さい波長の光を選択することが求められます．水の吸収がなければ光があまり減衰せずに入っていきやすいためです．このような光の波長は“生体の窓”と呼ばれています．一方で，光で測れる生体の深さには限界があり，さまざまな成分によって複雑に構成された私たちの体の中を通った光がどの経路でどのように吸収されたか知ることは非常に難しい問題です．このような問題に対して，光音響測定では，光が吸収された量を，体の中をよく伝搬する超音波に変換し検出するため，体の中での反射の影響を抑えることができます．また，ターゲット物質による光吸収からの光音響波の強さ（音圧）だけでなく，伝搬時間，周波数特性を測ることでも生体内を非侵襲的に調べることができます．

光音響効果による非侵襲生体成分測定方法

光音響効果を利用して非侵襲的に生体成分を測定する方法には，大きく分けて2つのアプローチがあります．1つは，生体に非常に短い時間のパルス光（パルス幅：数ns）を照射し，ターゲットとする物質で吸収され，そこで発生した光音響波が返ってくるまでの時間とその音圧から光を吸収する成分の位置を測定する方法です．**図3**(a)に示すような光音響波が得られ，音が体内を伝搬する時間と速度からどの程度の深さにターゲット物質があるかが分かります．図3(b)に生体を模擬した材料の中に“N”のアルファベットを埋め込んだものを3Dでイメージングしたデモンストレーションを示しています．もう1つは，図3(c)に示すように，生体に周期的にON/OFFした光を照射して，ターゲット物質から生じる光音響波を何度も反射させて定在波を発生させ，その音圧からターゲットの濃度を測定する方法です．

前者は成分とその位置情報が分かるため，例えば，栄養をたくさん必要とするがん細胞がその近傍で細かい血管がたくさん形成される様子をイメージングし，がん診断への応用研究が数多くなされています．しかし，一般に装置が大型で高価になります．また，生体成分情報を含む信号が弱く雑音の影響を受けやすいという課題もあります．

一方で，後者はターゲット物質の位置情報が得られない代わりに小さな光強度の低廉な光源と1つのマイクロフォンでも比較的大きな信号対雑音比を得ることができるため，成分濃度の測定や装置の小型化に有利になります．ただし，成分測定ではイメージングの際の血管のような明確な輪郭がありません．照射された光は，その成分濃度に応じてグラデーションを持って吸収されるため光音響波の伝搬波形が崩れてしまうという問題があります．そこでNTTでは，光音響波を何度も反射させるための工夫として，音波の閉じ込めが可能なセンサ構造を提案しました．例として耳たぶをクリップで挟み，一方の面から光を照射して，対向する面にマイクが組み込んであります．光の照射面と音の受音面の間で光音響波を何度も反射させることで定在波を発生させ，大きな信号を得る手法を図3(d)に示しています．光音響波の周波数は照射する光を当てる周波数で決まりますが，その周波数の選択がポイントになります．なぜなら，低い周波数では人間の声や生活音（～数10 kHz）の影響を受けやすく，高い周波数（～数MHz）では体の中での減衰が大きくなるからです．そこで，

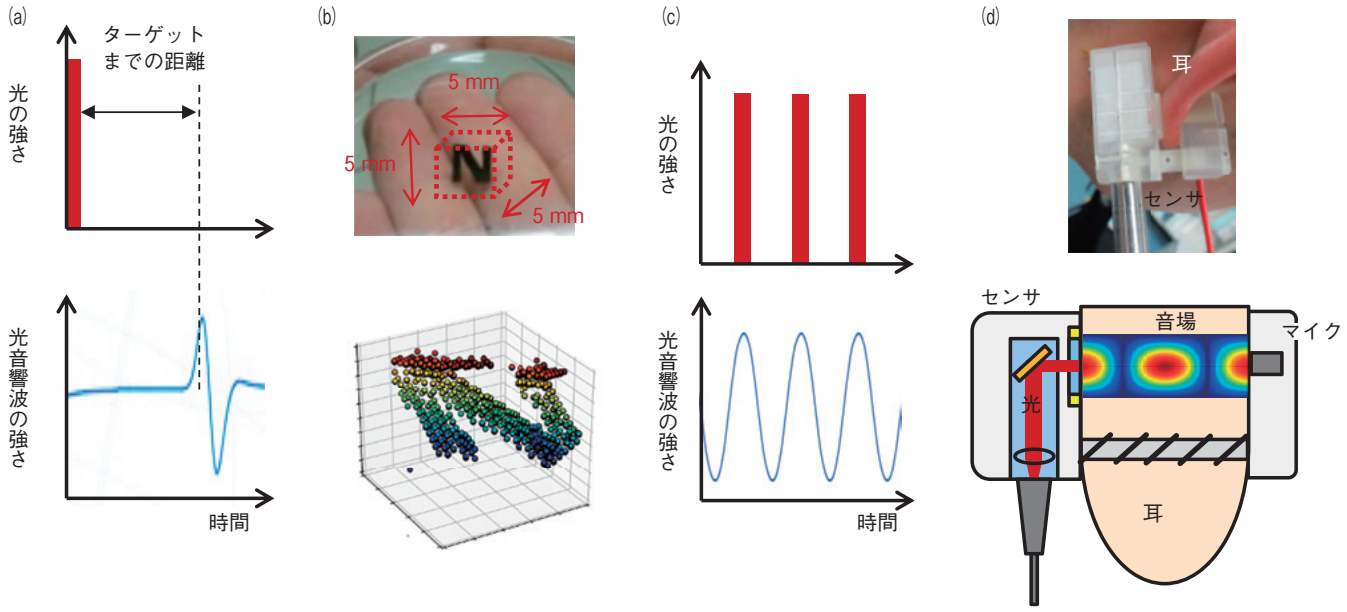


図 3　光音響効果を利用した生体測定

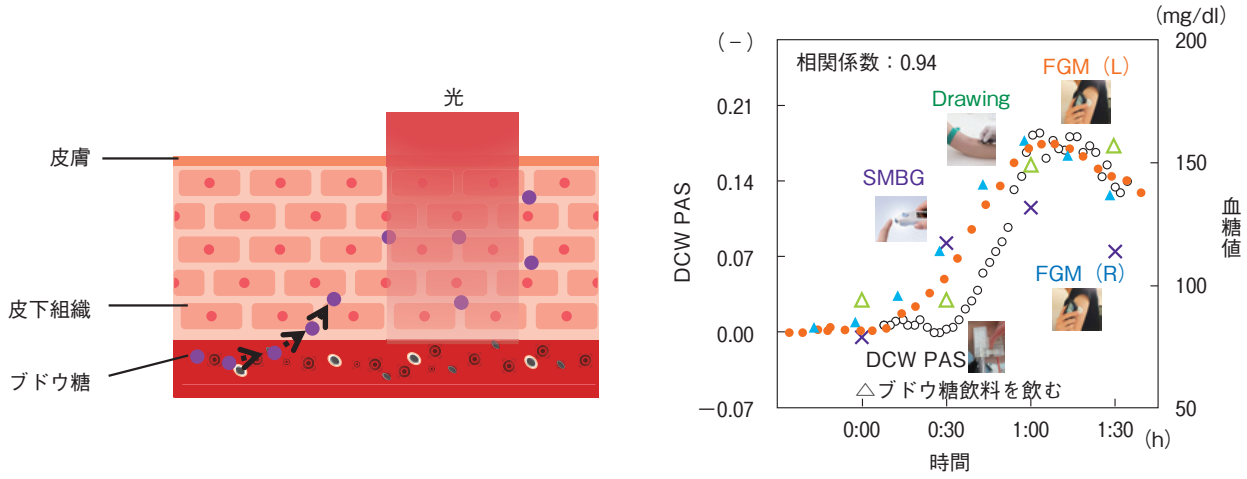
NTTではこの間の周波数（数100 kHz）帯の光音響波を利用して測定を行っています．

生体測定への適用例

最後に光音響効果を生体成分測定に適用した例を紹介します．センサは前述した耳たぶをクリップのように挟むセンサを用いました．ここでは健常者にブドウ糖を多く含む飲料を飲んでもらい，その後の間質液中のブドウ糖濃度変化の様子を測定しました[2]．間質液中のブドウ糖濃度とは，血液中のブドウ糖濃度（いわゆる血糖値）と異なり，**図 4** (a)に示すように血管からしみ出して細胞に供給された間質液の中のブドウ糖濃度を指します．間質液中のブドウ糖の濃度は血糖値とほぼ同じように変化していることが知られています．図 4 (b)は，光音響計測技術による測定値とさまざまな侵襲型の血糖値センサと比較です．青のプロットが光音響計測技術（図中DCW PAS），その他のプロットは採血や体に刺して留置して測る，いわゆる“侵襲的”な方法によって測定したものです．侵襲的な方法によれば，血糖値はブドウ糖飲料を飲んだ後15～30分程度で60 mg/dl程度増加し，1時間後には徐々に減少を始めます．光音響技術でも，この60 mg/dlの変化によく追従して測定できることが確認できました．この技術は，光の波長をターゲット物質に合わせることで，よく注目される生体成分である，コレステロールや中性脂肪といった脂質など，さまざまな成分への応用が可能な技術であると考えています．

今後の展望

本稿では光音響効果による生体情報センシングの可能性と生体内の成分を



(a)　間質液と血糖値　　(b)　光音響技術と侵襲的な技術の比較

図 4　血糖値測定への応用例

測定する技術への適用について紹介しました．従来では日常生活の常時モニタリングの対象ではなかった生化学的な情報のセンシングが可能になれば，例えばコロナ禍で普及の進んだオンライン診断に役立つ技術としてなど，さまざまな応用への展開が期待されます．日常生活でのモニタリングに向けては，非侵襲性だけでなくデバイスのサイズやユーザビリティも重要になってきます．気体，液体，固体問わず高い精度で分析できるポテンシャルを有する光音響計測技術を活用し，生体成分，呼気の成分などの生化学的な情報を日常で常時モニタリングできる技術をめざして研究開発に取り組んでいきます．

■参考文献

(1) Y. Tanaka, T. Tajima, M. Seyama, and K. Waki: "Differential Continuous Wave Photoacoustic Spectroscopy for Non-Invasive Glucose Monitoring," IEEE Sensors Journal, Vol. 20, No. 8, pp. 4453-4458, 2019.

(2) Y. Tanaka, T. Tajima, and M. Seyama: "Acoustic modal analysis of resonant photoacoustic spectroscopy with dual-wavelength differential detection for noninvasive glucose monitoring," IEEE Sensors Letters, Vol. 1, No. 3, pp. 1-4, 2017.



(左から) 田中　雄次郎 / 田島　卓郎 / 瀬山　倫子

今回紹介した光音響効果だけでなくさまざまな物理現象や生理現象に注目して，新たな生体センサの研究開発を進めています．また，こうしたセンサを活用して疾病の予防や早期発見へとつながる高付加価値な情報創出をめざしていきます．

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所
ソーシャルデバイス基盤研究部
TEL　046-240-2774
FAX　046-240-4728
E-mail　yujiro.tanaka.cw@hco.ntt.co.jp

ハイパワーレーザデバイスを用いた錆取り技術の実現に向けて

通信サービスを支えている鉄塔など通信インフラ設備の長寿命化に欠かせない錆取り作業において，人の手や電動工具では届きにくい，狭い場所の錆取りが課題となっています．私たちはこれまで培ってきたハイパワーレーザデバイスを用いて錆取り作業を効率化する技術を開発しています．本稿では，回折素子と呼ばれるハイパワーレーザデバイスを組み込んだ，小型で軽い錆取り技術の概要を紹介します．

川村 宗範（かわむら そうはん）
坂本 尊（さかもと たかし）
赤毛 勇一（あかげ ゆういち）
上野 雅浩（うえの まさひろ）
岡 宗一（おか そういち）

NTTデバイスイノベーションセンタ

通信インフラ設備における錆取り技術の課題

現代の生活に欠かせない通信サービスを安心・安全に提供するためには，鉄塔をはじめとするさまざまな通信インフラ設備が必要です．これらの設備は日光や風雨にさらされることで劣化することにより強度が低下しますが，建て替えが困難であることから，長期にわたって利用する必要があり，定期的な点検と補修を実施してきました．ところで，NTTグループが保有する鉄塔は小型のものも含めると国内に約２万基あり，これらの多くは高度経済成長期に建設されたものであることから老朽化が進んでおり，点検・補修に必要なコストや人的リソースは年々増加しています．このコストや人的リソースの削減が，今後の点検・補修を持続可能とするうえで重要となります．現在，NTTでは錆の発生を抑制する塗料や，塗料の劣化試験技術，鋼材の腐食予測技術，錆を除去する技術を開発しています．

鉄塔の長寿命化には，錆の発生を抑制する技術とともに除去する技術が重要です．錆の除去には電動工具や金属ブラシを使っていますが，狭い場所やボルト周りの錆が除去しにくいという問題があります．狭い部分の錆を除去する技術として，砂を高速に打ち込むサンドブラスト法が挙げられますが，砂を回収する手間がかかるため利用が困難です．そこで近年，高出力レーザ光を用いた錆取り工具（除錆レーザ）が注目されていますが，市販されている除錆レーザは，手で保持するレーザ光出射ヘッドが大きいうえに重いため，作業員が登って錆取り作業を行う鉄塔では使いにくいという課題があります．

私たちは現場で使いやすい小型で軽い除錆レーザを開発するために，後述する回折素子と呼ばれるデバイスを使用する方法を考案しました．

ハイパワーレーザ用回折素子技術

回折素子は基板上の微細構造で入射光の位相を変調するホログラム技術を応用したデバイスであり，**図１**に示したとおり，入射するレーザ光の形状を所望の形状に変換できます．この特長を活かして，金属や樹脂の加工に使用されています．

図２は，私たちが開発したハイパワーレーザ加工用回折素子の概略図です．レーザ光の吸収による温度上昇と，それに起因する破損を防ぐため，熱伝導率が大きなシリコンカーバイド基板を用い，冷却が容易な反射型にすることで，10 kWのレーザ加工を可能にしました[1]．回折素子の重量は数gと軽いうえに，装置の構成をシンプルにできる特長があります．

私たちは，この回折素子技術を使い，後述する除錆レーザの小型軽量化技術を考案しました．

NTTがめざす除錆レーザ

図３に示したように，現在市販されている除錆レーザは，作業者が手を動かさずに一定の面積の錆を除去できるよう，レーザ光をミラーとモータで１次元または２次元に走査しています．

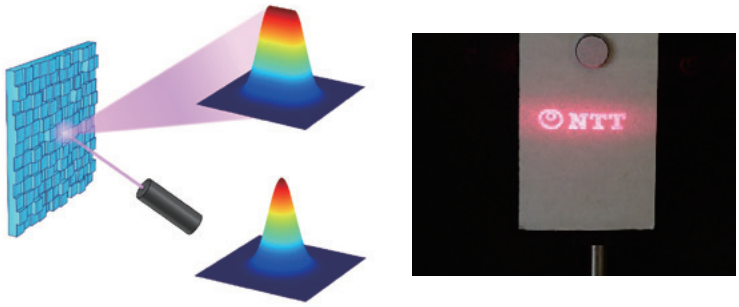


図1　回折素子を用いたレーザ光成形の例

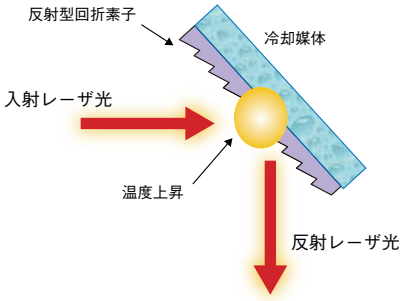


図2　10 kW加工用反射型回折素子の概略図

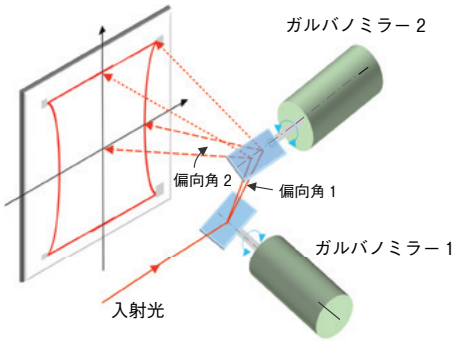


図3　ガルバノミラーを用いたビーム走査方法の例

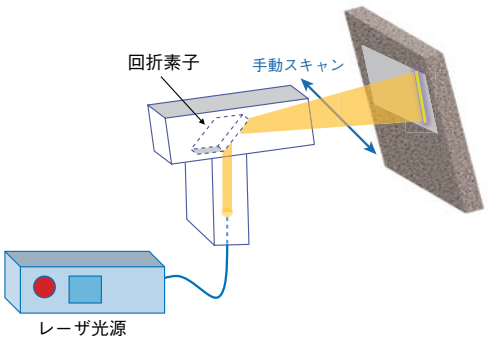


図4　回折素子を用いた除錆レーザのイメージ図

この方式では，作業者が手で保持するレーザ光出射ヘッドが大型かつ数kgと重いため，作業者の負担が大きくなり，鉄塔での利用は容易ではないと考えられます．これに対し，私たちは**図4**に示すアイデアを考案しました．これにより，数gの回折素子で細長い直線のレーザ光を形成し，作業者が手で走査することにより，モータが不要となるため，小型軽量でありながら従来技術と同等の作業効率を実現できます．

回折素子を低価格に

前述したように，これまで私たちは，ハイパワーレーザの回折素子にシリコンカーバイドを使用していましたが，これは高価な材料です．錆取り作業では回折素子に汚れや破損が生じる可能性が高いことから，安価に回折素子を交換できることが望まれます．そこで私たちは，回折素子を用いた除錆レーザを普及させるために，より安価な材料に置き換えることを考えました．

ご存じのようにシリコンは，半導体産業において微細加工技術が確立されている材料であり，比較的安価であるうえに，手に入りやすいという特長を併せ持つため，回折素子の低価格化に適しています．一方で，錆取りに使用する波長1.06 μmの光を吸収するため，温度が上昇して破損するおそれがあります．金属膜を付けることによって反射率を高くし，光吸収を抑制できますが，膜が厚くなるとDOE（回折光学素子）表面の微細構造の角が丸くなるため，レーザ光の形状に誤差が生じます．つまり，十分な反射率とレーザ光形状の誤差の低減を両立する金属と，その膜厚が重要なポイントです．

私たちは，高い反射率と高い熱伝導率を示す金（Au）について，膜厚と反射率を計算し，実測しました．**図5**に示すように，反射率は厚さ50 nm以上で最高となり，その範囲内で，レーザ光の形状の誤差が十分小さい膜厚を検討した結果，錆取りに必要なパワーをはるかに超える10 kWのレーザ加工を可能にしました．これにより，回折素子にシリコンを使用することで，低価格化できることを実証しました[2]．

コンパクトで使いやすい除錆レーザの実現

図6は，つくばフォーラム2020で展示した除錆レーザのレーザ光出射ヘッドの試作機です．回折素子を使うことにより，市販されている装置では困難な500 gのレーザ光出射ヘッドの可能性を実証しました．このヘッドは電動工具と同程度に小型であり，かつ，軽量であるため使いやすく，作業現場での普及が期待できます．**図7**は電動工具が届きにくい，狭い場所の錆を除去した実験結果です．レーザ光を使用するため，電動工具のような振動や対象への押し付けがないので，作業者の負

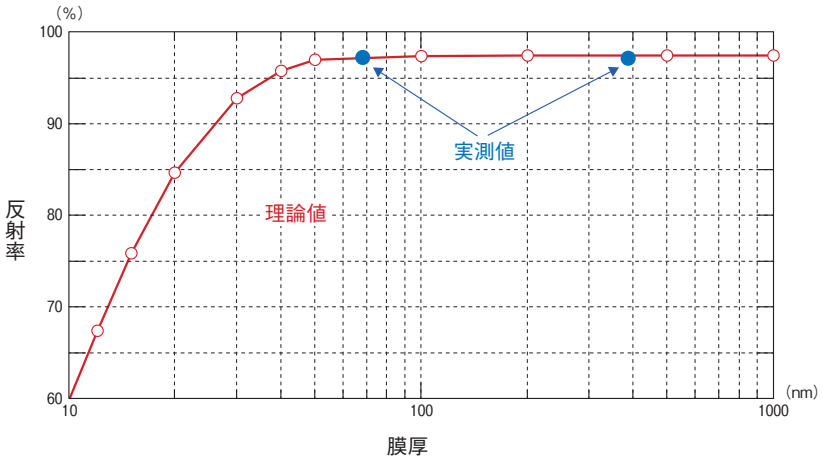


図 5　金（Au）膜厚と反射率の相関

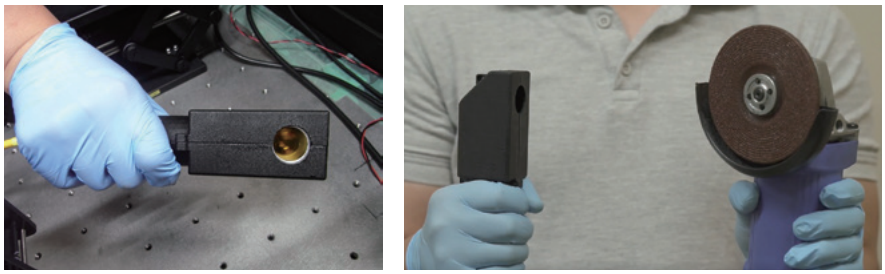


図 6　除錆レーザの試作機と電動工具

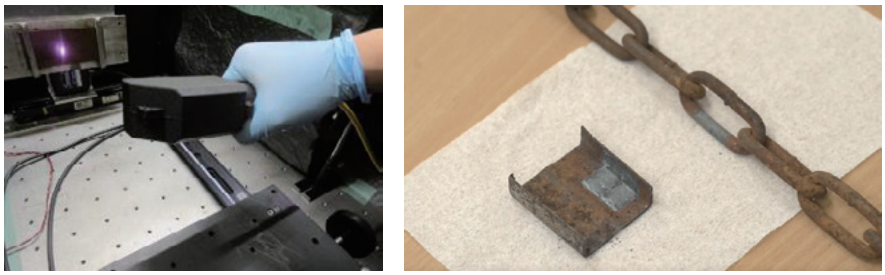


図 7　試作機を使った除錆実験の例

担を小さくできます．

このように，回折素子を使うことで，市販されている装置のサイズと重量の制約要素であったモータを不要にし，鉄塔でも使いやすい，小型で軽い除錆レーザが実現可能性であることを実証しました．

今後の展望

冒頭で触れたように，鉄塔をはじめとする通信インフラ設備の長寿命化には，錆を除去する技術と併せて，塗料が剥がれにくい表面状態にする技術が重要です．

レーザ光を照射する条件は表面状態に影響を与え，塗料の付着力の強弱につながります．レーザ光で錆を除去した後の表面状態と塗装付着力の研究は通信インフラの長寿命化に欠かせない取り組みです．私たちはこれを進め，現場で使いやすく，塗料が剥がれにくい，新たな価値を創出する除錆レーザを実現します．

ま と め

持続可能な社会に貢献するために，私たちが開発している除錆レーザ技術を紹介しました．NTTが培ってきた回折素子の材料をシリコンに置き換え，低価格化を実現しました．加えて，市販されている装置の大きさと重さの課題を解決し，低価格で小型で軽くて使いやすい除錆レーザの可能性を実証しました．今後は，塗料が剥がれにくい表面状態を研究し，インフラメンテナンスにおける新たな価値の創出をめざします．

■参考文献

⑴ 赤毛・今井・川村・岡・藤谷・奥田：“10 kW級レーザ過去加工用ビーム成形デバイスの開発，”第94回レーザ加工学会，2020.
⑵ S. Kawamura, S. Toyota, and S. Oka：“Reflection-type diffractive optical element employing SiC and Si for application to high power laser material processing,” Proc. of SPIE, Vol. 11273, San Francisco, U.S.A., 2020.



（上段左から）川村　宗範／坂本　尊／赤毛　勇一
（下段左から）上野　雅浩／岡　宗一

通信に欠かせないインフラ設備のメンテナンス技術開発を進め，快適な通信サービスの提供に貢献します．

◆問い合わせ先
NTTデバイスイノベーションセンタ
企画担当
TEL　046-240-2403
E-mail　dic-kensui-p@hco.ntt.co.jp

コンクリート電柱内鉄筋の水素脆化予測技術

通信サービスを支える重要なインフラ設備の1つであるコンクリート電柱は，安全を確保するため多大な維持管理コストが払われています．コンクリート電柱内鉄筋の劣化現象である水素脆化を正確に予測することができれば，コンクリート電柱をより安全かつ経済的に維持管理することができるようになると期待されます．本稿では，水素脆化加速試験および統計的データ解析を用いたコンクリート電柱内鉄筋の水素脆化予測技術について紹介します．

上庄 拓哉　石井 龍太
津田 昌幸
NTT先端集積デバイス研究所

コンクリート電柱の維持管理

コンクリート電柱は日本の通信サービスを支える重要なインフラ設備であり，私たちの生活圏内に数多く設置されている大変身近な存在です．もしコンクリート電柱が折損してしまった場合，物損事故や人身事故につながるおそれがあることから，すべてのコンクリート電柱に対して劣化による折損が起こらないよう計画的に維持管理がなされています．このコンクリート電柱の維持管理には多大なコストが払われており，安全は担保しつつ，かつ経済的な維持管理技術が求められています．

コンクリート電柱には，コンクリートのひび割れを抑制するため，内部の鉄筋にあらかじめ引張応力を付与することでコンクリートに圧縮応力を作用させているプレストレストコンクリートが用いられています．プレストレストコンクリートに用いられている鉄筋は，通常の使用条件では問題はありませんが，さまざまな悪条件が重なった場合に水素脆化と呼ばれる劣化現象が進行するおそれがあることが指摘されています[(1)〜(3)]．コンクリート電柱は内部の鉄筋により強度が担保されていることから，鉄筋が劣化してしまうと電柱の折損につながるおそれがあります．コンクリート電柱内鉄筋の水素脆化を正確に予測することができれば，劣化リスクに基づいた点検や更改が実現でき，コンクリート電柱をより安全かつ経済的に維持管理することができるようになると期待されます．そこで私たちは，コンクリート電柱内鉄筋の水素脆化を予測する技術の確立に向けた研究開発を行っています．

水素脆化予測技術

水素脆化とは，金属材料中に侵入した原子状水素が引張応力下で金属材料の強度を低下させ，割れや破断をもたらす現象です．定荷重下の金属材料中への水素侵入の後，ある時間経過後に破断が発生することから「遅れ破壊」と呼ばれる場合もあります．プレストレストコンクリートに用いられる鉄筋は常に引張応力が作用しているため，水素の侵入による水素脆化のリスクがあります．通常，コンクリート内はアルカリ性環境であるため鉄筋の腐食はほとんど起こりませんが，コンクリートにひび割れが発生すると空気中の二酸化炭素によりひび割れ部が中性化し，ひび割れ部からコンクリート内に侵入した雨水などにより鉄筋が腐食する場合があります．鉄筋が腐食すると水素が発生することから，鉄筋中に水素が侵入し水素脆化が発生するおそれが生じます．このように，プレストレストコンクリートに用いられる鉄筋で水素脆化が発生する環境要因は解明が進んでいます．

一方，水素脆化そのもののメカニズムは学術的にも未解明な部分が多く残されています．そのため，現状では水素脆化メカニズムに基づいた演繹的な手法による水素脆化の予測は困難と考えられます．そこで私たちは，中性化したコンクリート環境中での水素脆化を再現する試験を行って水素脆化の挙動を調べることで，データ解析に基づいた帰納的な手法による水素脆化の予

測を試みています．将来的には帰納的な手法の結果により水素脆化メカニズムの理解を深めることで演繹的な手法による予測を可能とし，演繹的な手法の結果を活用することで帰納的な手法による予測精度がさらに高まるといった好循環をめざしています．

水素脆化を再現する際，実際の環境中で水素脆化が発生するには長時間を要すると予想されることから，鉄筋中の水素濃度を増加させて短時間で水素脆化破断を発生させる加速試験を用いて検討を行っています．水素脆化加速試験の外観写真および概略図を**図 1** に示します．水素脆化加速試験では，中性化したコンクリート環境での水素脆化を模擬するために，試験セル内部で鉄筋を弱アルカリ性の試験溶液に浸漬させ（中性化したコンクリート環境の再現），引張試験機を用いて鉄筋に所定の引張応力を付与し（鉄筋にかかるプレストレスの再現），鉄筋に電流を流すことで水の電気分解により水素を発生（腐食による水素発生の再現）させています．発生させる水素量は電流の大きさにより制御できることから，実際の環境に比べて十分多くの水素を発生させることで鉄筋中の水素濃度を増加させ，水素脆化を加速させています．水素脆化加速試験を用いて水素濃度と破断時間や破断確率の関係を求め，この関係を実際の環境中での水素濃度に外挿することで，実際の環境中での水素脆化の予測を試みています．

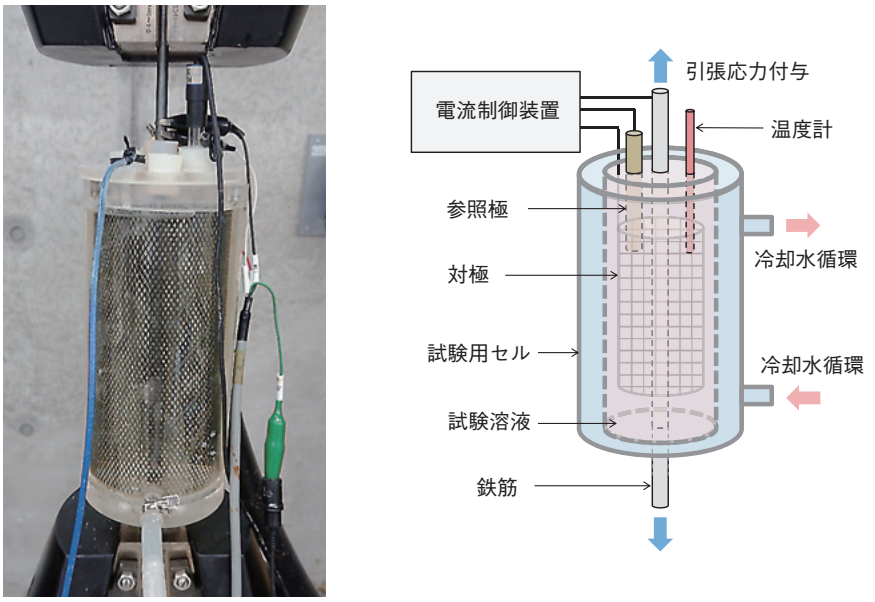


図 1　水素脆化加速試験の外観写真および概略図

水素脆化加速試験による破断時間および破断確率の推定

鉄筋の水素脆化は，同一の環境条件であっても破断時間が大きくばらつくという特徴があります．一般的な回帰分析では破断時間の平均値を予測することしかできず，平均値のみの予測では確率的に発生する短時間の破断に対処することができません．一方，破断時間の確率分布を予測することができれば，平均値よりも短時間の破断に対してもリスクに応じた対処が可能になります（**図 2**）．そこで私たちは，水

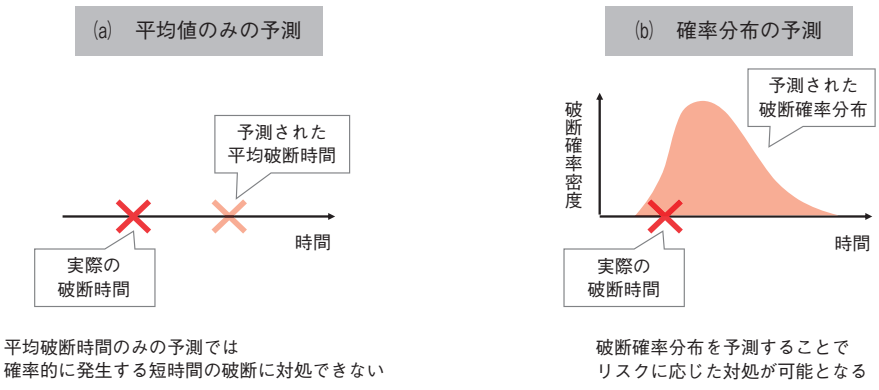


図 2　確率分布を含めた破断時間の予測の効果

素脆化加速試験によって取得した大量の破断時間データに対し，統計モデリングを用いることで確率分布を含めた破断時間の予測を試みています．

水素脆化加速試験の結果から，鉄筋表面の水素濃度と破断時間の平均値の関係は指数関数で近似でき，同一水素濃度での破断時間のばらつきはワイブル分布に従うことが分かっています．これらの結果から統計モデルを作成し，破断時間データに対し最尤法を用いることで，水素濃度と破断時間の確率分布の関係を推定することができます．最尤法とは，取得したデータが得られる確率がもっとも高くなるよう確率分布のパラメータを推定する方法で，ワイブル分布など正規分布以外の確率分布のパラメータ推定に用いることができます．最尤法では，取得したデータの確率密度の総乗（尤度）が最大になるようパラメータの値を探索することによって，取得したデータからパラメータを推定します．**図 3** は水素脆化加速試験による破断時間データと，回帰分析による平均値のみの推定結果および統計モデリングを用いた確率分布を含めた推定結果の一例を示しています．このように，統計モデリングを用いることによって平均値だけでなく破断時間の確率分布の推定が可能となります．

鉄筋の水素脆化では，ある環境条件に曝された際に，ある時間で破断する鉄筋と，いくら時間が経過しても破断しない鉄筋が出てくることが知られており，将来的な破断の有無は破断確率として表すことができます．鉄筋に加わる引張応力や鉄筋表面の水素濃度が大きくなると破断確率は大きくなり，引張応力や水素濃度が十分低くなると破断確率はほとんどゼロとなります．コンクリート電柱の維持管理を考えるうえでは，水素脆化による鉄筋の破断確率が重要な要素となります．

水素脆化加速試験の結果から，鉄筋表面の水素濃度と破断確率の関係はシグモイド曲線で近似できることが分かっています．そのため，ロジスティッ

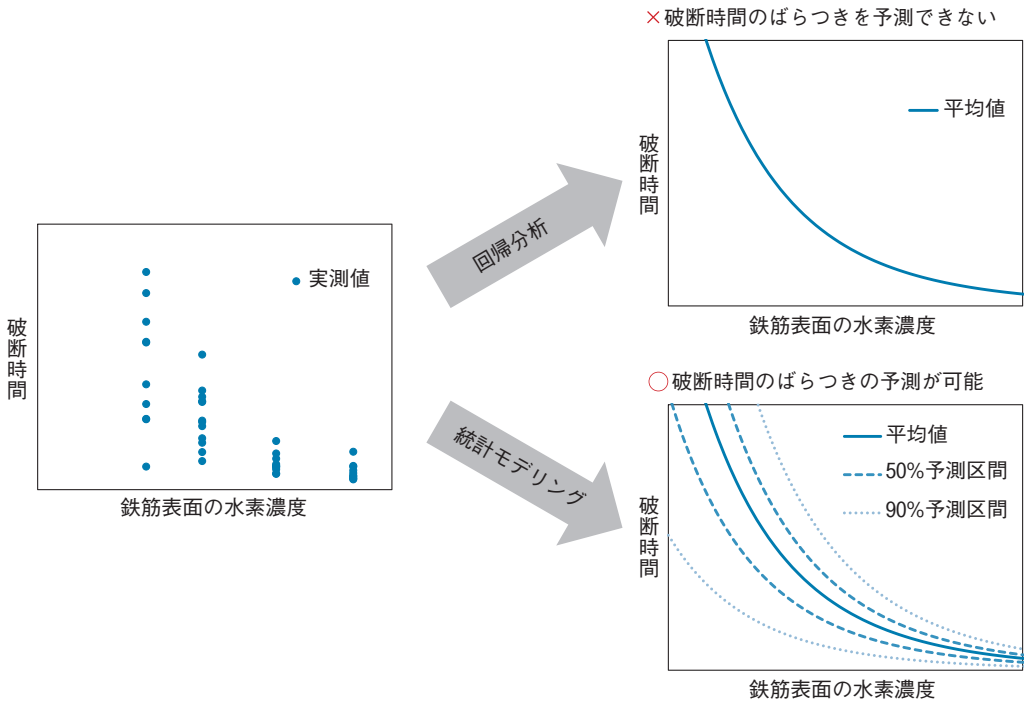


図 3　統計モデリングを用いた破断時間の確率分布の推定

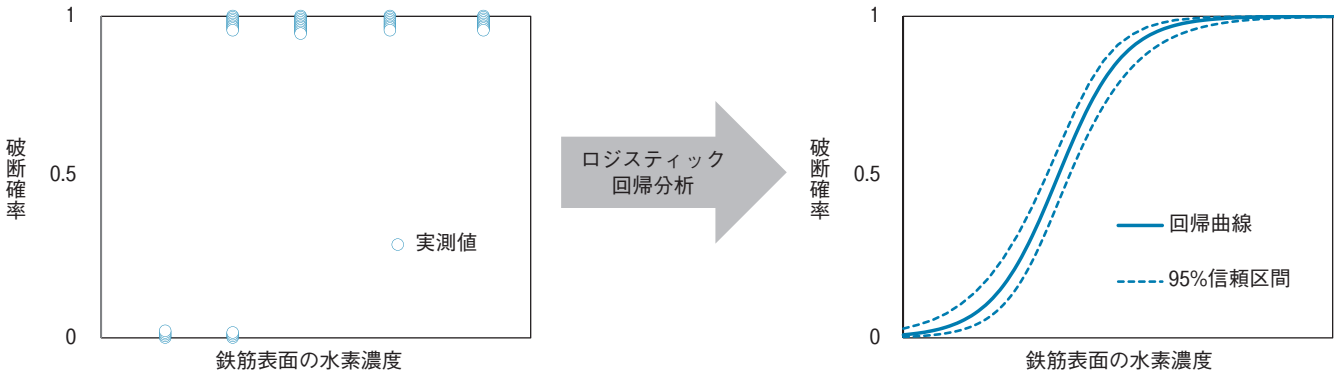


図 4　水素脆化加速試験による破断有無の実測値および推定された破断確率

ク回帰分析などを用いることで水素濃度と破断確率の関係を推定することができます．ロジスティック回帰分析は，ある事象が発生するか否かといった 2 値変数を目的変数にとる場合の事象の発生確率を推定することができる方法です．ロジスティック回帰分析では回帰モデルにロジスティック関数を用い，最尤法によりロジスティック関数のパラメータを推定します．**図 4** は，引張応力，鉄筋表面の水素濃度，温度を変えて水素脆化加速試験を行い，取得した破断有無データから破断確率を推定し，引張応力と温度をある値に固定したときの鉄筋表面の水素濃度と破断確率の関係を示しています．解析では水素脆化加速試験で鉄筋が破断した場合を 1，破断しなかった場合を 0 と定義し，ロジスティック回帰分析で破断確率の回帰曲線と95%信頼区間を推定しています．このように，水素脆化加速試験により取得した破断有無のデータから，鉄筋表面の水素濃度と将来的な破断確率の関係を推定することができます．

今後の展望

今後は，水素脆化加速試験により求めた水素濃度と破断時間および破断確率の関係を実際の環境での水素濃度に外挿することで，コンクリート電柱内鉄筋の破断時間と破断確率の予測を行います．外挿には標準的な実環境中での鉄筋の表面水素濃度の推定値を用いることとし，鉄筋中に侵入した水素を検出する新たな測定系を構築することで推定に必要な鉄筋の表面水素濃度データを取得していく予定です．また，予測結果を検証するため，大学と連携して材料科学的観点から水素脆化機構のモデル化に向けた研究も進めていく予定です．

■参考文献

⑴ 松山：“遅れ破壊，”日刊工業新聞社，pp.45-48，1989.
⑵ 白神：“土木建築用素材としてのPC鋼棒の現状，”ふぇらむ，Vol. 13，No. 9，pp. 611-615，2008.
⑶ M. Elices, A. Valiente, L. Caballero, M. Iordachescu, J. Fullea, J. Sanchez-Montero, and V. Lopez-Serrano：“Failure analysis of prestressed anchor bars,” Engineering Failure Analysis, Vol. 24, pp. 57-66, 2012.



（左から）上庄　拓哉／石井　龍太／
津田　昌幸

インフラ設備の維持管理はNTTのみならず日本の社会的課題となっています．安全で経済的なインフラ設備の維持管理の実現をめざして，今後も研究開発に取り組みます．

◆問い合わせ先
NTT先端集積デバイス研究所
ソーシャルデバイス基盤研究部
インフラ見える化基盤技術研究グループ
TEL　046-240-2236
FAX　046-240-4047
E-mail　takuya.kamisho.aw@hco.ntt.co.jp

主役登場

ウェアラブルセンサによる新たな価値をパートナーと共創



高河原　和彦
NTTデバイスイノベーションセンタ
主任研究員

NTTは，東レ株式会社との共同開発によって電気を通す繊維「hitoe®」を創出し，2014年には着るだけで心電位・心拍数等の生体情報を計測可能な着衣型ウェアラブルセンサを提案，他社に先駆けて実用化を行いました．以降，NTTデバイスイノベーションセンタでは，健康で豊かな暮らしの実現に向け，人間に寄り添うウェアラブルデバイス技術の研究開発をミッションの１つとしてきました．

2014年に実用化したウェアラブルセンサでは，マラソンなどにおいて心拍数をモニタリングしながらトレーニングを行うといったスポーツ用途をターゲットとしていましたが，作業者の見守り，安全管理といった用途でも引き合いをいただき，何度かトライアルを実施させていただきました．その結果，激しい動きでも心拍数を正確に計測できるようにチューニングしたスポーツ用ウェアでは，電極を肌に密着させるための圧力が大きく，人によってはきついと感じるため作業者用にチューニングしたウェアが必要であること，心拍数の可視化だけではなく作業者の安全管理に有用な価値を提供する必要があるという課題を見出しました．

特集記事で紹介したウェアラブル生体・環境センサを用いた体調管理技術は，このような経緯から取り組んだテーマです．暑熱対策や身体負荷のマネジメントといった作業者の安全管理にとって大きな課題にターゲットを絞り，それらに対して大きな価値を提供できるよう，温熱生理学や運動生理学を専門とする大学の先生方と共同し，体調不良を防ぐためのウェアラブルセンサの活用方法を検討してきました．その中で，私たちの研究グループの強みであるデバイス技術やデータ解析技術をより深化させて体調管理に必要な生体・環境情報を取得するための新しいセンサ端末を開発しました．並行して，作業者の方にとって着心地の良いウェアを，素材や縫製を得意とする東レ株式会社やゴールドウイン株式会社と共同で開発しました．また，これらの要素技術を統合したシステムを開発し，グループ会社の協力を得て実際の作業現場で本技術を検証しました．このように，本成果は私たちの研究グループだけではなく，専門的な知見・技術を持つパートナーとそれぞれの強みを活かしながら共同することで，初めて創出することができました．本技術を少しでも多くの方に活用いただき，安心して働ける現場の実現に貢献することを願っています．

今後，NTTではIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）の構成要素の１つであるデジタルツインコンピューティングの一形態として，サイバー空間における人それぞれの身体および心理の精緻な写像（バイオデジタルツイン）を実現し，心身の状態の未来を予測することで，人間が健康で将来に希望を持ち続けられる未来への貢献をめざしています．そのためには，さまざまな要因によって日々刻々と変化している個人の生体データおよび環境データの継続的な取得とデータの活用法の開発が不可欠です．本成果をその端緒として，今後も私たちの強みを磨きつつ，パートナーとの協力関係を築きながら研究開発を進めていきます．

特集

安心・安全な社会実現に貢献するための暗号・セキュリティ技術に関する研究開発

Cryptography and Security Technology

NTTグループの取り組みを安心・安全に実現するテクノロジを創出するために,将来に向けた先端技術やIOWN(Innovative Optical and Wireless Network)の特徴を活かした技術を含め,中長期的なテーマの目的である「データ流通・利活用」と「被害を極小化」の実現に向けた研究開発を進めている.本特集では,NTTのセキュリティR&Dの取り組みについて紹介する.



安心・安全を実現するテクノロジの創出に向けたセキュリティR&Dの取り組み 66

将来にわたって安心・安全な社会にしていくために，社会環境の変化やICTを取り巻く技術の発展による未来像（10年後のSmart World）について紹介する．

安心・安全な価値創造プロセスを実現するデータ流通・利活用技術 70

NTTのセキュリティR&Dの取り組みとして，「データ処理権の管理・制御」というデータ流通の新しいパラダイムと，これを実現するためのプラットフォームや要素技術について紹介する．

増え続けるオペレーションコストの問題を解決し，被害を極小化する技術の確立と展開 75

サイバー攻撃等の新たなサイバーセキュリティの脅威に対応しつつ，そのオペレーションを自律化・自動化する技術について紹介する．

量子情報処理によるセキュリティと量子情報のデータ保護 79

量子誤り訂正と量子誤り抑制，新たな応用の可能性としての偽造防止，および量子ネットワークをめざすための基盤技術となる量子中継の研究について紹介する．

主役登場 84

岩村 誠（NTTセキュアプラットフォーム研究所）
未知なるリスクを排除せよ

安心・安全を実現するテクノロジの創出に向けたセキュリティR&Dの取り組み

さまざまな状勢により世の中が大きく変革していく中，NTTが取り組んでいるセキュリティR&Dの将来像を語るには，目の前で起きている問題だけでなく，来る社会のあり方とセキュリティについて考えることが重要です．本稿では，その先の未来を見据えたセキュリティR&Dの取り組みについて紹介します．

平田（ひらた）　真一（しんいち）

NTTセキュアプラットフォーム研究所　所長

はじめに

新型コロナウイルス感染症によって私たちの社会，生活にさまざまな影響が及ぼされました．オリンピック・パラリンピックをはじめとするさまざまなイベントが開催の延期を余儀なくされ，ソーシャルディスタンスの確保を前提とした社会活動，生活様式へ移行せざるを得なくなったことから，オンライン化が急速に進んだことによる働き方の変革や，社会の分断化・非接触化がさまざまな面で生じています．

コロナウイルスによる影響の全世界的な拡大や事態の長期化が予測されていることから，世の中の変革（アフターコロナの新しい生活様式，社会秩序の再構築）が加速され，それに伴ってデジタル化・オンライン化に向けたさまざまな取り組みが急速に進んでいます．また，従来の社会活動を前提としていたサプライチェーンが機能不全となり，個人だけでなく社会の枠組みのレベルでもさまざまな場面で大きな変化が起こっています．

その一方でセキュリティやプライバシに関する懸念や被害も広がっており，在宅勤務などの普及に伴って急増するテレワークをねらったサイバー攻撃や，人の不安に乗じた攻撃による被害はますます深刻になっています．また，感染拡大防止に向けた感染者やその疑いのある人を割り出すための監視や行動追跡などはプライバシへの十分な配慮も求められます．

サプライチェーンにおいても，急速なデジタル化・オンライン化をねらった広域的な攻撃も激化しており，安全なサプライチェーンの再構築が求められています．

NTTでは，安心・安全な社会の実現に貢献するためのセキュリティに関する研究開発を進めています．

世の中が大きく変革していく中，目の前で起きている問題だけでなく，その先の未来を見据えたセキュリティR&Dに取り組んでいくために，来る社会のあり方とセキュリティについて考えていくことが重要です．

将来にわたって安心・安全な社会にしていくために，社会環境の変化やICTを取り巻く技術の発展による未来像（10年後のSmart World）について考えます．

10年後のSmart Worldとは

AI（人工知能），IoT（Internet of Things），ロボットやビッグデータといった革新技術が浸透した社会は，産業革命による工業化社会への発展，コンピュータ技術の発達による情報化社会への発展に続く，社会発展の歴史における5番目の新しい社会（Society 5.0[(1)]）であり，生活をより豊かにしていく未来のあり方（Smart World）として期待されています．

さまざまな革新技術によってサイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）が高度に融合されたSmart Worldにおいては，フィジカル空間から集積されるセンサ情報などの膨大なデータが，高知能化されたサイバー空間でのデータ分析・予測に活用され，フィジカル空間へ自律的にフィードバックされます．

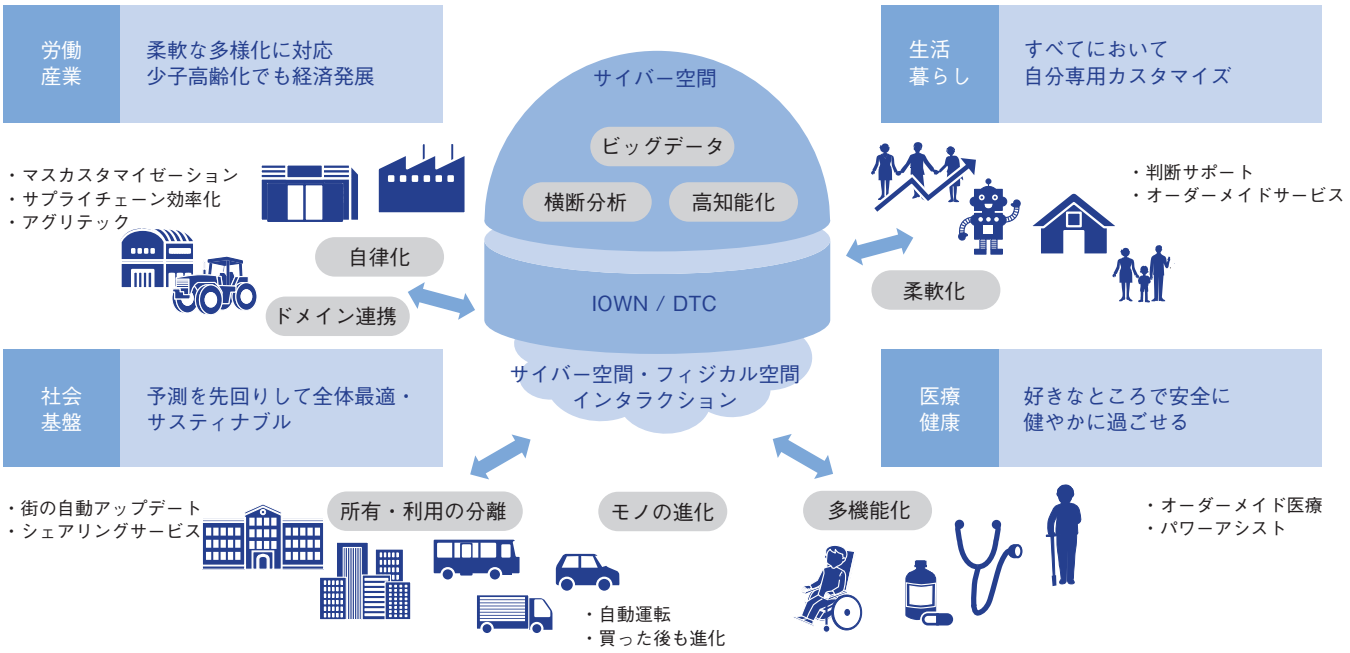


図1　10年後のSmart World

その結果，さまざまなサービスや社会基盤において，利用者個人への最適化と社会全体の最適化の両方が進展し，すべての人が安全に自分らしく暮らせる社会（真のSmart World）が実現されると考えられます．

例えば，個人の暮らしや生活にかかわる面では，個々人の状況に合わせた究極のカスタマイズされたサービスを享受できるようになります．社会インフラにかかわる面では，AI予測によって先回りの対応を行い，社会全体の最適化やサスティナブル（持続可能な）提供が可能になります．経済・産業にかかわる面では，多様化にも柔軟に対応し，少子高齢化が進む社会環境であっても経済を発展させることが可能になります（**図1**）．

一方で，このような理想の世界の実現を支える技術・インフラの高知能化，自律化，柔軟化，ドメイン連携などによって，「脅威にさらされる機会」や「被害の程度・範囲」も一気に拡大してしまうという負の側面も考えられます（**図2**）．

膨大なデータを分析したり利用する際に，プライバシが十分考慮されなかったり，倫理に反するような利用がされるおそれや，意図せぬ情報の漏洩といったことも考えられます．

データ分析アルゴリズムが悪意のある者の手によって改ざんされてしまうという脅威も現実味を帯びてきています．従来はあらかじめ設計されたアルゴリズムに従って作成されたプログラムに直接手を入れたり，プログラムをすげ替えたりしなければ改ざんも難しかったものが，AIが普及した状況では，AIの学習やAIによる判断に対して誤作動を引き起こさせるといった直接的な改ざんを伴わない攻撃が行われるおそれがあります．具体的には，AIに学習させるデータに不正な値を混入させて攻撃者が意図するような判断をさせる，AIに認識させるデータを細工することによって判断を誤らせるといった攻撃や，AIの動作から学習したデータを推測することによってプラ

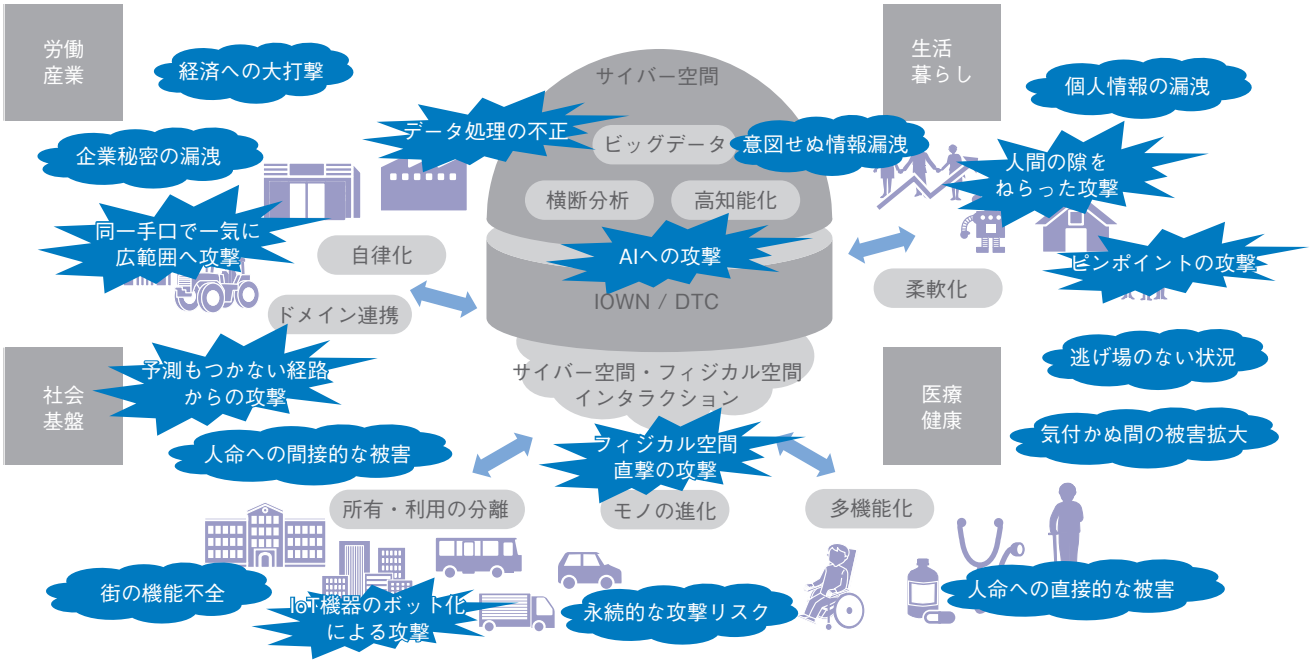


図 2　10年後のSmart Worldに潜むセキュリティ脅威

イバシの侵害に及ぶようなデータを不正に入手されるといった新たな攻撃が考えられます．

アルゴリズムが改ざんされると，データが意図的に漏洩されるだけでなく，分析結果を悪意のあるものに変えられてしまうおそれもあります．悪意のある分析結果がフィジカル空間にフィードバックされてしまうことによって，さまざまなサービスや社会インフラに多大な影響が及んでしまいます．

真のSmart Worldを実現するためには，このようなサイバー空間とフィジカル空間が高度に融合されたことによって新たな脅威となる側面を考慮し，肥大化・巧妙化する攻撃に対抗しつつ，利便性の向上を両立させることのできるセキュリティR&Dをめざしていかなければなりません．

長期的な視点でのセキュリティR&Dの考え方

セキュリティリスクは，攻撃の脅威（人間や社会を含む広い意味での），システムの脆弱性，守らなければならない（情報，金銭面だけでなく人命なども含めた）資産の大きさに依存します．サイバー攻撃が肥大化・巧妙化し，サイバー空間とフィジカル空間の高度な融合によって従来よりもさまざまな脅威にさらされてしまう状況においては，セキュリティリスクは飛躍的に増加してしまいます．

一方でセキュリティ対策を強化することになると相応のコストがかかってしまうため，企業がセキュリティ対策にかけられるコストにも限界があります．今後のサイバー攻撃の拡大に対抗するためには，既存のセキュリティ対策の延長や単なる増強だけではすべての脅威への対策技術を実現することは困難なため，サイバー攻撃に対する防御，対策能力の抜本的な向上が必要です．

そのため，長期的な視点に立ったセキュリティR&Dとしては，①Smart Worldにおける価値の創造をサポートするために新たな脅威へ対応し，創造

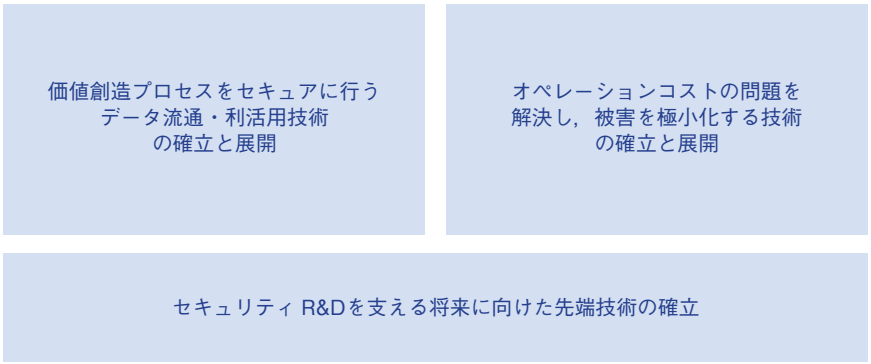


図3　セキュリティR&Dに必要な観点

するための環境を守る技術に注力することと，②脆弱性のリスクをゼロにする技術や，攻撃を予測し事前対処を行う技術など，攻撃者優位の状況を変える技術を創出していくこと，をめざして取り組んでいくことが求められます．

また，NTTグループが今後取り組んでいくビッグイベントへの対応体制の強化，中期経営戦略に基づいた新たな分野（街づくり，エネルギー，ヘルスケア）への展開には安全なデータ利活用の実現，ゲームチェンジをめざすIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想の実現に必要なセキュリティが求められることから，今後取り組んでいくべきセキュリティの研究開発としては以下の観点が重要なポイントになります（**図3**）．

⑴　価値創造プロセスをセキュアに行うデータ流通・利活用技術の確立と展開

データの囲込みやプライバシ侵害，不正利用の問題を解決し，分野横断的にデータを利活用できる柔軟で安全なデータの共有・分析の仕組みの実現．

⑵　オペレーションコストの問題を解決し，被害を極小化する技術の確立と展開

新たな脅威への対応をしつつ，サイバー攻撃対応のオペレーションを自律化・自動化する技術の確立によって，人は対処の確認および創造性が必要となる新しい脅威の対応に注力できるようにすることにより，総合的な対応力を強化．

⑶　セキュリティR&Dを支える将来に向けた先端技術の確立

セキュリティCoE（Center of Excellence）として，暗号・情報理論，量子情報セキュリティ技術など，将来に向けた基礎技術の確立．

NTTグループに求められる「安全・安心のコミュニケーション」を将来にわたって持続していくために，私たちは将来に向けた先端技術やIOWNの特徴を活かした技術を含め，中長期的なテーマの目的である「データ流通・利活用」と「被害を極小化」の実現に向けた研究開発に取り組んでいきます．

■参考文献

⑴　https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/



平田　真一

いろいろなことが絡み合いながら変化していく昨今，自らの意識の変革も含めて，既存の枠・価値観にとらわれず進めていけることが大事であると考えています．世の中のこれからの動きを見つつ，私たちの技術により世の中を変えていけるような大きな成果にご期待ください．

◆問い合わせ先

NTTセキュアプラットフォーム研究所
企画担当
E-mail　scpflab＠hco.ntt.co.jp

安心・安全な価値創造プロセスを実現するデータ流通・利活用技術

Society 5.0の実現には組織や業種・業界を超えたデータの利活用が必須ですが，期待されるほどには行われていません．本稿では，その障壁となっているデータ授受に伴うリスクとその原因について概説します．そして，この問題の解決に向けたNTTのセキュリティR&Dの取り組みとして，「データ処理の管理・制御」というデータ流通の新しいパラダイムと，これを実現するために研究開発中のプラットフォームや要素技術を紹介します．

鷲尾 知暁（わしお ともあき）
折目 吉範（おりめ よしのり）
森田 哲之（もりた てつし）
千田 浩司（ちだ こうじ）
森村 一雄（もりむら かずお）
大嶋 嘉人（おおしま よしひと）
NTTセキュアプラットフォーム研究所

Society 5.0とクロスドメインデータ流通

経済発展と社会的課題の解決を両立した将来の社会像として，サイバー空間とフィジカル空間とを高度に融合させたシステム「Society 5.0」が提唱され[(1)]，その実現に向けた取り組みが盛んに行われています．Society 5.0では，さまざまなデータを駆使することで現状認識や課題発見，未来予測や最適解導出などが可能となり，それらが経済の発展と社会的課題の解決をもたらすとされています．言い換えると，組織や業種・業界を超えたデータの利活用（これをクロスドメインデータ流通と呼ぶことにします）が活発に行われることがSociety 5.0の生命線であるといえます．

クロスドメインデータ流通を阻む障壁とその原因

しかし，クロスドメインデータ流通，特に，機密性や希少性の高いデータの流通は，思うほどには進んでいません．その最大の障壁は，データ提供者とデータ利用者の双方に存在するリスクです．

データ提供者は，提供したデータが漏洩してしまったり，予期せぬ方法で利用されて自らや第三者に損害を与えたりするリスクを負います．一方のデータ利用者は，提供されたデータの守秘管理に伴うリスクや，提供されたデータの適法性に関するリスクを負います．

別の観点では，データ利用者は提供されたデータが従前期待していたような結果や価値を生み出さなかったり，データの提供に伴い課せられた条件（例えば，支払う対価）に見合わなかったりするリスクを負います．一方のデータ提供者は，提供したデータが想定以上の価値を生み出す（受領する対価が過小である）リスクを負いますし，逆に想定した価値を生み出さないことでデータ提供の目的（例えば，得られた結果の共有や社会への還元など）が果たされない場合があります．

上記のリスクが生じる根本的な原因は，従来のデータ流通の方法がデータそのものを渡してしまう・受け取ってしまうものであったことにあります．データは使い方次第でさまざまな価値や問題を生み出す可能性があり，それらすべてをあらかじめ見定めることは困難です．このような不透明性や不確実性が存在していては，クロスドメインデータ流通が活発に行われるはずがありません．

データ処理の管理・制御という新たなパラダイムへ

この問題を解決するには，データそのものを授受してしまう「データ参照の管理・制御」という従来のパラダイムから，「データ処理の管理・制御」という新たなパラダイムにシフトすることが必要です．この新たなパラダイムでは，データ最小化の原則に則り，データそのものではなくデータに対して合意した（データ利用者が望み，データ提供者が認めた）処理を行った結果のみをデータ利用者に渡します．こうすることで，そのデータ利用で生じ得

る価値も問題も限定的で予見しやすくなり，前述したリスクも大きく低減されるのです（**図1**）．

クロスドメインデータ流通プラットフォームの概観

私たちは，上記の新パラダイムに基づいた，信頼できる*1クロスドメインデータ流通のプラットフォームを実現し，そこに参画するあらゆるデータ提供者・利用者があらゆるデータを安心して共有し利活用できるようにすることをめざしています．同プラットフォームの主要な要件には，①データを保護しつつ必要な処理を加えられること，②データの提供者と利用者の合意内容や法に従ってデータ処理を制御できること，③扱うデータやその処理について透明性を確保すること，の3点があります（**表**）．

このプラットフォームは以下の3つの機構から構成されます（**図2**）．

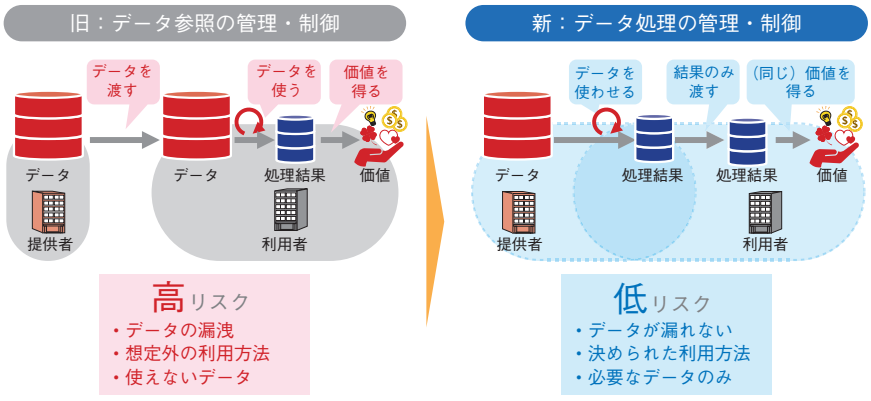


図1　データ流通方法のパラダイムシフト

表　クロスドメインデータ流通プラットフォームの主要要件

区分	主な要件
データの保管と処理の保護	データについて，その機密性や完全性を高度に保ちながら，利用者が望むさまざまな分析・加工等の処理を実行できること
	データ処理の結果（派生データ）についても，上記のように扱えること
	プラットフォームの運用者であってもデータや派生データを参照したり書き換えたりできないこと
データ処理権の管理と制御	提供者と利用者が合意したデータ処理のみを実行すること
	対象のデータや派生データに応じて必要な法（個人情報保護法など）に適合した処理のみを実行すること
	処理にかかわるデータ提供者や利用者，対象データなどについて正確かつ詳細に把握したうえで実行の可否を判断すること
データやデータ処理の透明性確保	データや派生データの特徴や出自について，データ利用者が確認できるようにすること
	データや派生データに対して実行された処理の事実や履歴について，データ提供者やデータ利用者が確認できるようにすること
	データの保管や処理にかかわるプラットフォームの動作について，データ提供者や利用者が確認できるようにすること

(1)　データ保護・活用機構

・　データ（派生データ*2を含みます．以下同様）を秘匿したまま，データ利用者が必要とするさまざまな分析・加工等の処理を実行します．

・　認可機構が許可した処理のみが許可したとおりに実行されることを保証し，また，処理の事実や履歴，派生データの出自を証明します．

(2)　データ処理認可機構

・　データ保護・活用機構へのデータ処理の要求について，データ提供者が定めたデータ利用ポリシー*3やデータの提供者と利用者とが合意した内容に従い，また，適法性も加味し，その実行の可否を判断します．

・　データの提供者や利用者，あるいは，対象データについて，トラストデータ管理機構からの情報を基に正確かつ詳細に確認したうえで可否を判断します．

(3)　トラストデータ管理機構

・　データの提供者や利用者，あるいは，対象データに関する属性（トラストデータ）を管理し，認可機

＊1　信頼できる（プラットフォーム）：データの提供者や利用者が期待するとおりに動作し，その役割を的確に果たしていることをプラットフォーム自らが示し，データの提供者や利用者からの信頼を獲得できるものであることを指します．

＊2　派生データ：データ提供者からプラットフォームに託されたデータを処理した結果を指します．派生データを処理した結果も含みます．

＊3　データ利用ポリシー：どのようなデータ利用を許すか・許さないかをあらかじめ規定したもの．対象のデータ，利用を要求する主体，利用の内容（データ処理の方法）などを用いて認可対象を指定し，それに対して許可・不許可や，許可時に満たすべき条件などを定めます．



※データの検索やマッチング，課金や決済などの機能は省略しています．

図２　クロスドメインデータ流通プラットフォームのアーキテクチャ

構や必要とする者に提供します．

・　データ保護・活用機構によるデータ処理の事実や履歴，派生データの出自を証明する情報もトラストデータとして管理し，必要とする者に提供します．

クロスドメインデータ流通の要素技術

前述の各機構を実現する要素技術のうち主要なものについて，その概要を以下に示します．

■秘密計算技術

秘密計算技術は，データを暗号化したまま一切復号することなく計算できる技術です．これにより，プライバシにかかわる情報や企業の機密情報など機微なデータの安全な利活用が可能となります．また，他組織に開示することが難しいデータを持ち寄った分析が可能となり，分析対象データの種類や量の増加による新たな価値の引き出しが可能になると期待されます．秘密計算技術では安全性はもちろん，処理の性能と多様性が重要です．NTTセキュアプラットフォーム研究所はこれまで，世界最高速レベルでの統計処理が可能な秘密計算システムを実用化しました[(2)]．現在はディープラーニングの学習や予測を暗号化したまま行える秘密計算AI（人工知能）技術の開発を進めており[(3)]，画像データなど大規模データを扱うためのさらなる高速化，必要とされるAIアルゴリズムの拡充などに取り組んでいます．

■データ処理機密性・真正性保証技術

クロスドメインデータ流通ではさまざまなステークホルダの計算環境でデータが処理されるため，データのアクセス制御（機密性を保証すること）やデータ処理結果の真正性を保証することは容易ではありません．しかし前述のとおり，クロスドメインデータ流通プラットフォームが信頼され，広く利用されるにはこれらの要件を満たすことが必要です．具体的には，①提供データが許可された範囲でのみ利用されているかをデータ提供者が確認可能であること，②データ処理結果が要求どおりの正しい結果であるかをデータ利用者が確認可能であること，の２つの要件が特に重要と考えています．私たちはこれら要件を実現するため，TEE（Trusted Execution Environment）と呼ばれるセキュアな実行環境[(4)]を援用した安全な処理手続き（プロトコル）の確立に取り組んでいます．

■属性ベース認可技術

プラットフォームには大量のデータが次々と登録されますし，登録されたデータを誰が利用しようとするのか事前には分かりません．そのため，データ利用ポリシーを「どのような属性を持つデータをどのような属性を持つ主体が利用できるか」というかたちで規定しておき，認可判断の際にはそこに対象データやデータ利用者の属性値を当てはめて評価する，属性ベースの認可が有効です．例えば，データ利用者が有する資格（例：ISMS認証，Pマーク認証）を必要な属性としてデータ利用ポリシーで指定するといったことです．

属性ベースの認可自体は新しい考え方ではありませんが，後述するように適法性を考慮した認可判断を行うには，データ利用ポリシーにかかわらず，データの特性に応じて所定の属性の有無や値を確認して判断することなどが必要です．また，誤った認可判断を回避するために，データ利用ポリシーで指定された属性の有無およびその真正性（第三者機関による証明有無など）を厳格に判断することが必要です．さらに，データ利用の認可判断においては，許可・不許可の二値だけではなく条件付きで許可するなどの柔軟性も必要と考えています．例えば，要求され

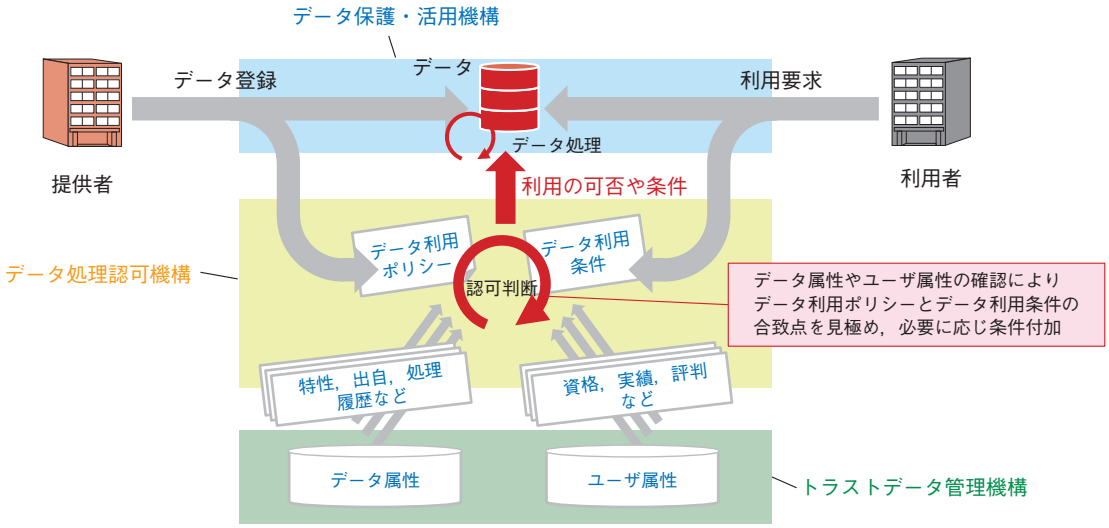


図 3　属性ベースの認可判断

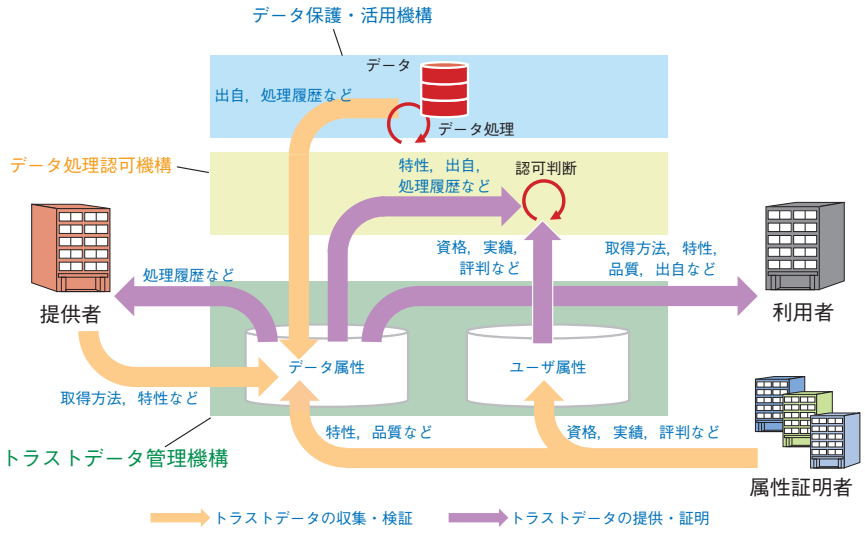


図 4　トラストデータの流れ

たデータそのものの利用は認められないが，匿名加工したものであれば許可するなどです．データの提供者と利用者の双方の要求を調整しながら柔軟な認可判断を行うことで，データの流通機会の拡大に資すると考えています（**図 3**）．

■トラストデータ管理技術

トラストデータ管理機構は，データの提供者や利用者などプラットフォームのユーザの属性（資格や実績，評判など）や，プラットフォームで扱われるデータの属性（種別，項目，収集方法などのデータ特性や，出自，処理履歴など）を収集，管理し，ユーザやデータがどのようなものであるかを確認する際の信頼の拠り所となる情報「トラストデータ」としてデータ処理認可機構やデータ提供者・利用者などに提供します（**図 4**）．

トラストデータは信頼の拠り所となるため，その確からしさを保証できる多様な主体により証明されていることや，その内容の正しさを検証できるようにする必要があります．一方で，トラストデータ自体が機密性を持つ場合もあり，いつ・誰に・どの部分までを開示して良いかを適切に判断する必要があります．さらに，必要とするときにいつでも利用できる可用性も求められます．これらさまざまな要求にこたえるトラストデータ管理技術とその仕組みを実現していきます．

■トラストデータと認可判断における法的要求事項の実装

データの提供者や利用者は，授受するデータに関する適法性についても配慮しなくてはなりません．データがどのように取得されたかをデータ利用者が把握することは難しく，違法に取得されたデータが紛れていても気付けない可能性があります．また，個人情報

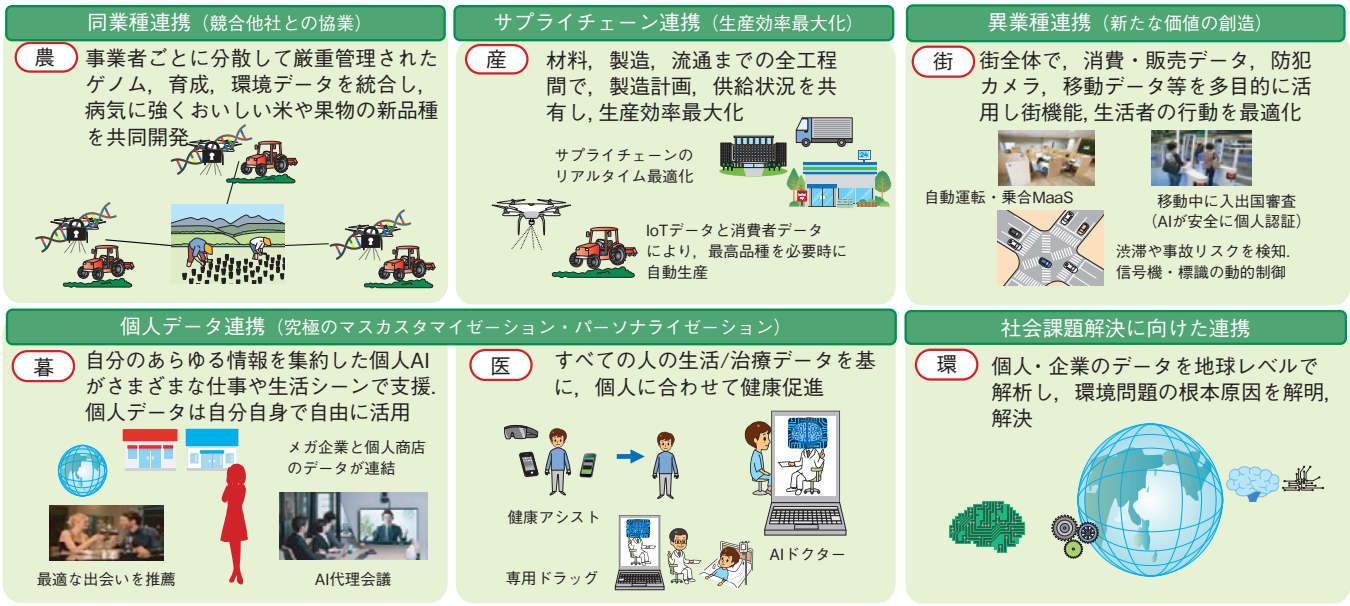


図 5　クロスドメインデータ流通が実現する世界

にあたるデータについては，取得時に本人に示した利用目的の範囲外で使用することや，本人の同意を得ずに第三者へ提供することなどが個人情報保護法で禁じられており，これを守るためにデータの提供者も利用者も多くの注意を払う必要があります．

このような適法性への配慮の負担を軽減するため，データと合わせて法的要求事項を実装した属性データを付与し，トラストデータとして管理し認可判断の際に確認する方法についても検討しています．

今後に向けて

信頼できるクロスドメインデータ流通プラットフォームにより，これまで困難だった同業種・異業種間での協業や連携が加速され，新たな価値の創造や大きな社会課題の解決が可能になると考えています（**図 5**）．

その実現に向け，私たちは，要素技術の研究開発だけではなく，クロスドメインデータ流通を志向するパートナーと連携した仮説検証や，国際標準化活動，社会受容性の確保に向けた活動などを加速していきます．

■参考文献

(1) https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/
(2) https://www.ntt.co.jp/news2018/1808/180808a.html
(3) https://www.ntt.co.jp/news2019/1909/190902a.html
(4) https://globalplatform.org/specs-library/?filter-committee=tee



（上段左から）鷲尾 知暁／ 折目 吉範／ 森田 哲之
（下段左から）千田 浩司／ 森村 一雄／ 大嶋 嘉人

私たちは，本稿で紹介したクロスドメインデータ流通プラットフォームの研究開発を通じてIOWN上に新たな価値創造のプロセスを構築し，Society 5.0/Smart Worldの実現に貢献していきます．

◆問い合わせ先
NTTセキュアプラットフォーム研究所
企画担当
E-mail　scpflab＠hco.ntt.co.jp

増え続けるオペレーションコストの問題を解決し，被害を極小化する技術の確立と展開

古賀 祐匠　中嶋 良彰
千葉 直子　三好 潤
小山 高明　司東 秀浩
宮島 麻美
NTTセキュアプラットフォーム研究所

サイバー攻撃等の新たなサイバーセキュリティの脅威に対応しつつ，そのオペレーションを自律化・自動化する技術の確立によって抜本的に効率化します．オペレータが機械的には対応できない高度な脅威に関する対策により専念できるようにし，総合的なセキュリティ対応力の強化を図ります．

背　景

サイバー攻撃は年々増加しており，加えてその手法は複雑化・巧妙化しています．特に「人」をねらうサイバー攻撃の増加が著しく，それに伴って企業のセキュリティ対策費は増大を余儀なくされています．

ユーザの価値観が多様化し，ロングテールへの対応が必要な将来，さまざまな通信機器や端末・デバイスが接続された超高速光通信ネットワーク上では，サーバやソフトウェアが連携して多種多様なアプリケーションが提供されることが想定されます．そのような環境では，サイバー攻撃が発生する都度行うかたちの対策ではコスト効率があまりにも悪く，企業のデジタルトランスフォーメーションやビジネス価値創出を妨げる要因にもなり得ます．

本研究開発の目標

本研究開発では，サイバー攻撃やそのターゲットとなるさまざまな脆弱性に対して，常に先回りして自動的にセキュリティ対策を実施可能にすることをめざしています．

サイバー攻撃による被害発生を回避し，企業の経営を圧迫するセキュリティオペレーションの人的リソース不足の問題を解消するとともに，ユーザが安心して価値を享受できるICT環境を提供します．このような環境が，企業をセキュリティ脆弱性等の都度対応（もぐらたたき），インシデント発生時の後追い対応（いたちごっこ），そして被害によって生じるビジネス損失から解放します．

セキュリティオペレーションにかかるトータルコストの軽減によって，企業がサービスの「開発」や「運用」に集中できる状況をつくり出し，Smart Worldにおいてビジネス価値を短いサイクルで繰り返し創出し続けられるようにサポートします．

本研究開発が実現する基盤のイメージ

セキュリティオペレーションの現場では，「監視」「分析」「対処」の多くのセキュリティ対策を人手によって実施しているため，その対応力は人的リソースに深く依存しています．

本研究開発では，インフラやサービスを構成する機器やアプリケーションの状態を常に監視し，脆弱な状況を見つけ次第，先回りしてサービスやインフラを構成するシステムにセキュリティ対策を自動実行する基盤を実現することによって，効果的かつ効率的なセキュリティ対応を安定実施可能にします（**図1**）．

基盤の実現に向けた課題

常に先回りしてセキュリティ対策を自動実行するために，以下の3つの技術の確立をめざす研究開発に取り組むとともに，これらの研究開発を通じて**図2**に示すインテリジェンスを創出していきます．

(1)　脆弱性の積極的な可視化・最小化と自動修正サイクルを実現する技術

脆弱性の積極的な可視化・最小化と自動修正サイクルの実現により，セ

キュリティ対策のシフトレフトを可能にして強固なセキュリティを提供します．

⑵　環境変化に追随するインテリジェンスを創出・活用する技術

通信キャリアならではのインテリジェンスを自動生成するとともに，インテリジェンスを意識する必要のない自動活用技術によって，多種多様なICT環境に継続的・自律的にセキュリティ対策を実施します．

⑶　ヒトに起因するリスクを対策する技術

ヒトに起因するリスクに対応可能なセキュリティ技術を確立し，セキュリティ被害につながるヒューマンエラー，ヒトをねらう詐欺攻撃，および従業員等による内部不正行為等に関するリス

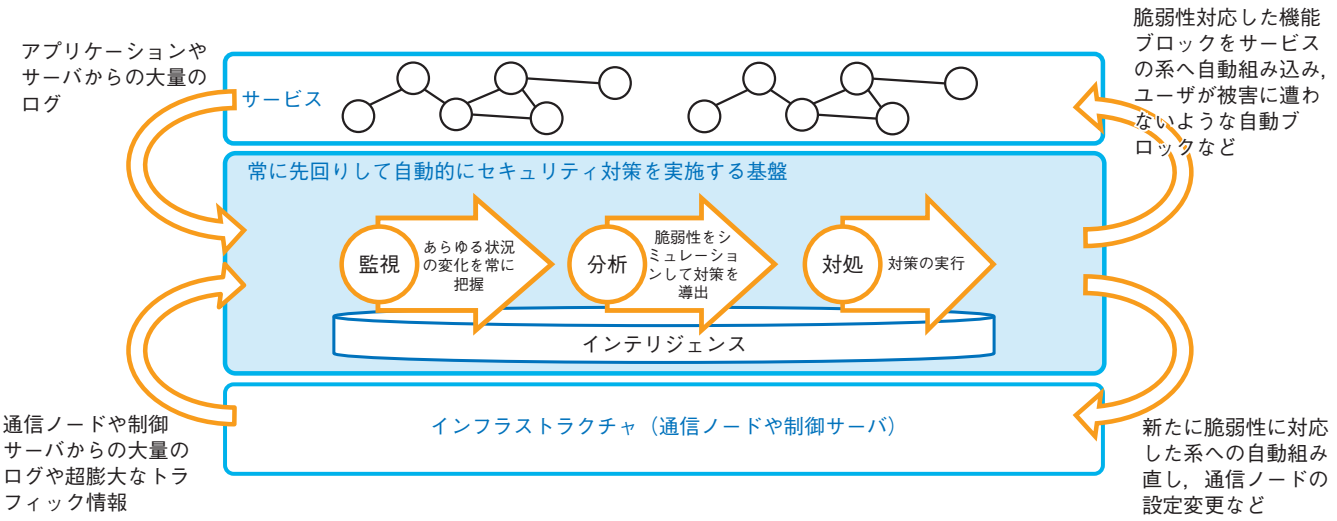


図１　本研究開発で取り組む基盤のイメージ

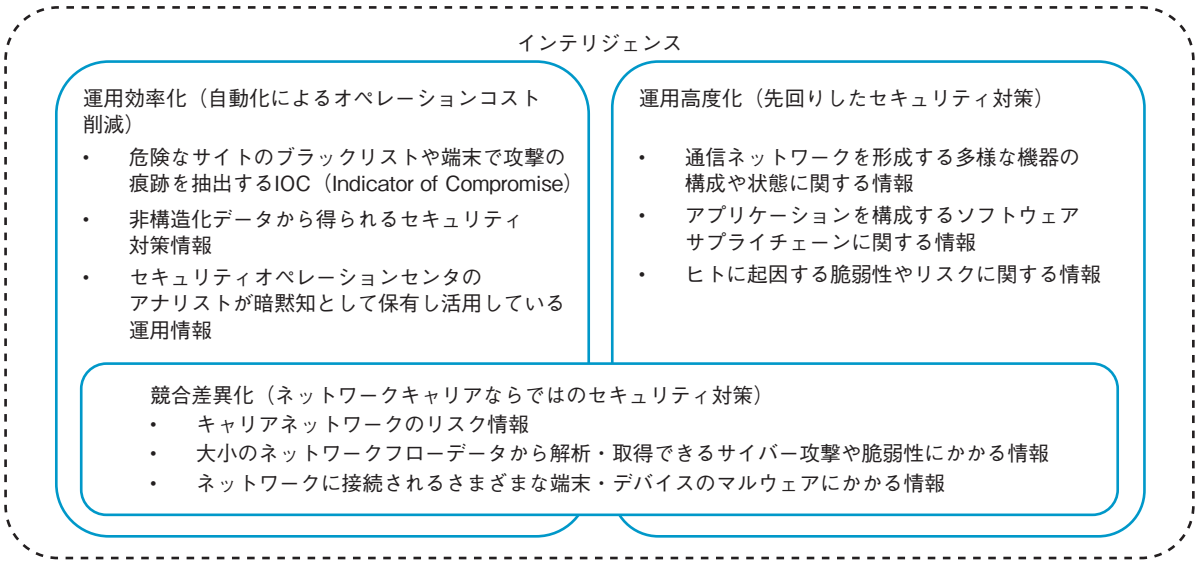


図２　本研究開発で創出するインテリジェンス

クを抜本的に低減します．

以降では，上記の研究開発に関して，現在の代表的な取り組みを紹介します．

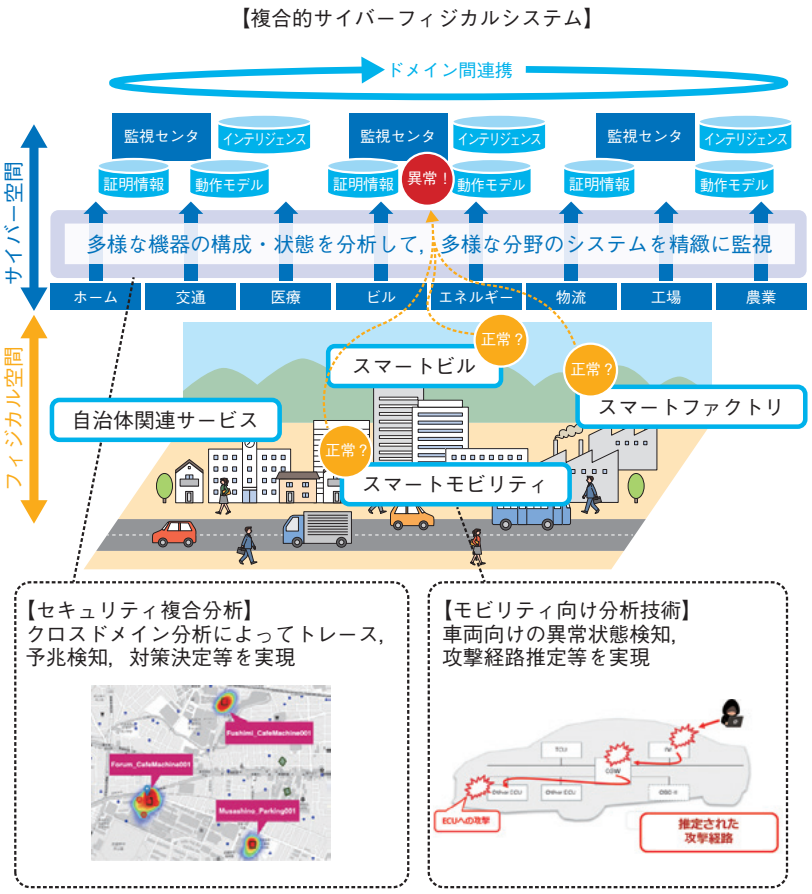


図 3　構成・状態分析技術

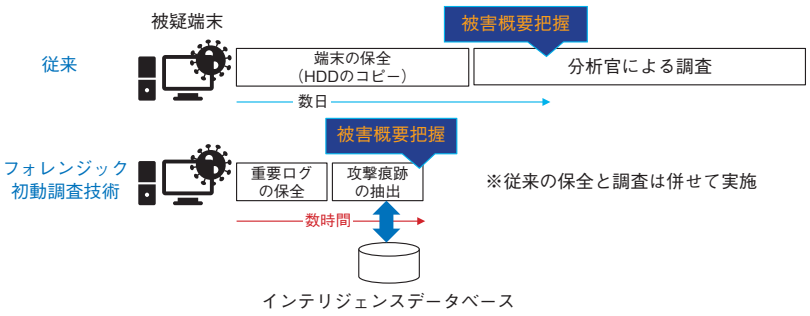


図 4　フォレンジック初動調査技術

現在の取り組み

⑴　構成・状態分析技術

スマートシティのような多様な要素によって構成される複合的サイバーフィジカルシステムを守るセキュリティ対策技術として，現在，ヒトやモノの構成・状態を分析するエージェントと通信解析エンジンの研究開発を行っています．今後は，構成・状態に加えてシステムやサービスをまたいだ要素間の関係性もとらえ，従来は困難であったセキュリティ異常の予兆検知，原因推定を行うクロスドメイン分析技術の研究開発を行っていきます（**図 3**）．

⑵　フォレンジック初動調査技術

一般的にフォレンジック調査では，被疑端末を保全し，分析官が攻撃の痕跡を抽出します．この調査は詳細な分析が可能な一方，分析官の経験に依存しており，期間は数日にわたることから，いち早く被害概要を把握する初動調査のフェーズで正確性・迅速性に課題が残ります．そこで，重要なログのみを保全し，攻撃の痕跡を自動的に抽出できる技術の開発に取り組んでいます．この技術は，攻撃者がよく使う攻撃の流れをインテリジェンスとしてデータベース化し機械的な処理を通して，分析官の習熟度によらず，数時間で初動調査ができることをめざしています（**図 4**）．

⑶　ヒトの心理や弱みをねらったソーシャルエンジニアリング攻撃検出技術

世界的なスポーツイベントの開催や

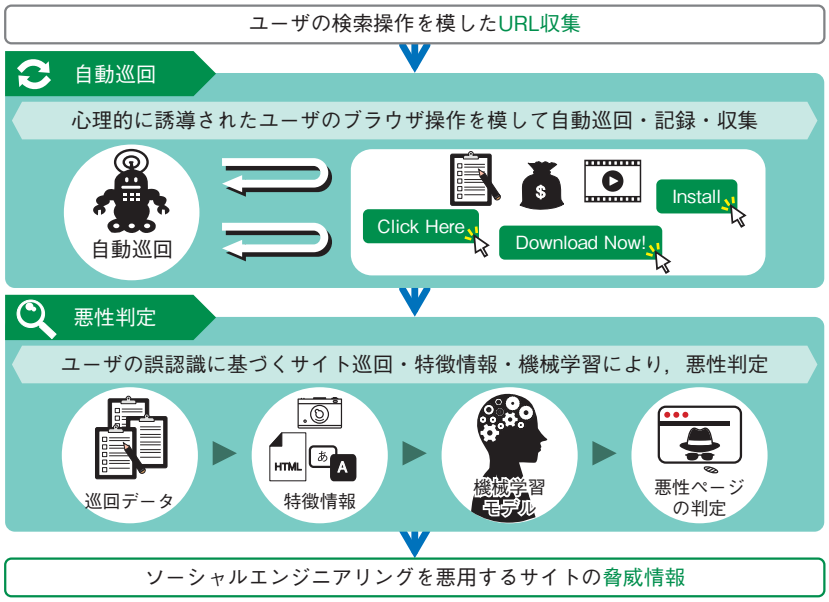


図5　ヒトの心理や弱みをねらったソーシャルエンジニアリング攻撃検出技術

新型コロナウイルス感染症の流行に伴い，人々の好奇心・恐怖心等を悪用したサイバー攻撃の被害が非常に増えています．攻撃者は，人の興味関心をひくコンテンツや偽の警告画面などにより，利用者を悪性サイトへ巧みに誘導し，マルウェア感染や金銭・個人情報の窃取を引き起こします．この取り組みでは，そのような人をねらった詐欺被害等を低減させることを目的に，騙される人のブラウザ操作をエミュレートして，Webページを自動で巡回・収集し，画像や言語，到達経路の特徴量から悪性サイトを高精度かつ迅速に検出する技術を研究開発しています（**図5**）．

今後に向けて

サイバーセキュリティリスクは，今や国家を脅かし得るものとなり，人類にとって極めて深刻な社会問題の1つといえます．攻撃側優位な状況が依然として続く中，私たちは本研究開発の推進によって，このサイバーセキュリティの厳しい現状を根本から打開し得る新たなセキュリティ技術を創出し，社会の発展に貢献していきます．



（上段左から）古賀　祐匠／中嶋　良彰／千葉　直子／三好　潤
（下段左から）小山　高明／司東　秀浩／宮島　麻美

私たちはサイバーセキュリティ対策やその運用にかかわるコストが企業のデジタルトランスフォーメーションを進めるうえでの妨げにならないような技術を創出することが，豊かな社会を創ることに資すると考え，この研究開発を推進しています．

◆問い合わせ先
NTTセキュアプラットフォーム研究所
企画担当
E-mail　scpflab＠hco.ntt.co.jp

量子情報処理によるセキュリティと量子情報のデータ保護

量子情報処理を用いると高速計算以外にもセキュリティに対して原理的な安全性，コピー防止など独特の応用が期待されています．その実用に向けてはノイズに弱い量子情報を保護する誤り耐性処理が必須となり，ネットワーク化のためには量子中継をベースとした量子通信の誤り耐性処理が鍵となります．これらに対するNTTセキュアプラットフォーム研究所の取り組みを紹介します．

徳永 裕己（とくなが ゆうき）
鈴木 泰成（すずき やすなり）
遠藤 傑（えんどう すぐる）
西巻 陵（にしまき りょう）
北川 冬航（きたがわ ふゆき）
為近 彩智（ためちか さち）

NTTセキュアプラットフォーム研究所

はじめに

近年，量子情報処理による新たな高速計算の可能性が注目されていますが，量子情報処理を用いた新たなセキュリティおよび量子情報のデータ保護も重要な研究テーマです．まず，量子情報は非常にノイズに弱いことが知られていて，正しく情報処理を行うためには，量子情報をノイズやエラーから守ってあげる必要があります．このような情報処理の「可用性」を守ることも，セキュリティの3要素*の1つであり，セキュリティの重要な役割の1つとなっています．これができない限り，いくら計算が速くても，新たなセキュリティ応用があったとしても，正しく情報処理がこなせないことになります．この量子データをノイズから保護する機能は量子情報処理の最重要課題であり，量子情報処理の屋台骨を支える量子情報処理自体のセキュリティであるといえます．また量子情報処理を用いた新たなセキュリティの可能性としては，ある意味このノイズに対する弱さを逆手にとったものともいえますが，盗聴や偽造を行おうとして量子状態に触れるとどうしてもノイズとしての痕跡が残ってしまうという量子状態の性質があります．これを大いに活かして，盗聴者の検出を行い原理的な安全性を保てるのが量子暗号の仕組みです（量子暗号は通常，秘密鍵の配送に用いるため量子鍵配送とも呼ばれます）．さらにそれを偽造防止という方向に用いることも可能であり，コピーによる偽造は原理的に不可能となる量子マネーや量子著作権保護といった応用の可能性があります．またこのような機能は量子的なネットワークが充実してきてより利用価値が高まるものであり，そのためには量子中継を実現して規模の大きな量子ネットワークの構築をめざす必要があります．量子通信も損失やノイズに弱いため，量子通信のデータをノイズから保護する機能は，量子通信を保護する量子通信自体のセキュリティともいえます．

本稿では，まず量子情報のデータを保護するための2種類の重要な技術である量子誤り訂正と量子誤り抑制の紹介をし，次に新たな応用の可能性としての偽造防止について，そして量子ネットワークをめざすための基盤技術となる量子中継の研究を紹介し，最後に展望を述べます．

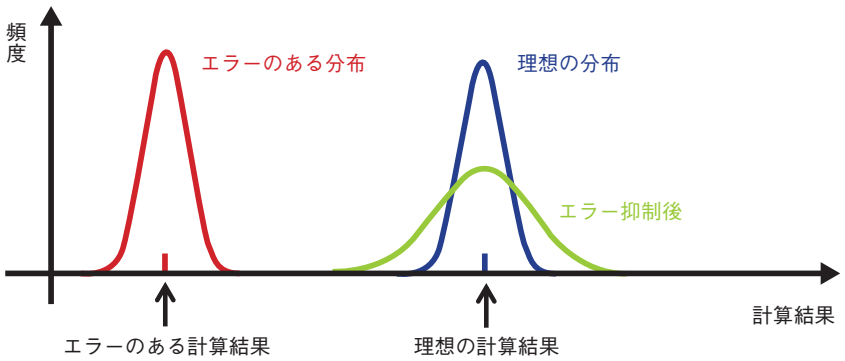
量子情報のデータを守る誤り耐性技術

量子情報処理の多くの応用において，計算中に誤りが生じる確率は十分小さい必要があります．量子誤り訂正は，複数の量子ビットを用いて量子ビットの情報を符号化し，これを逐次的に誤りを検出，訂正することで，実効的な誤り率を大幅に低減することができる技術です．量子誤り訂正を用いながら量子計算を行う誤り耐性量子計算[(1)]は，スケーラブルに誤り率を低減できる手法であり，将来，規模の大きな量子情報処理の実現するうえで必須になると予想されます．しかし一方

＊情報セキュリティの3要素：「機密性（Confidentiality）」「完全性（Integrity）」「可用性（Availability）」．

で，量子誤り訂正は多くの量子ビットやフィードバックなどの複雑な処理を必要とするため，実用的な性能の誤り耐性量子計算機を構築することは容易なことではありません．したがって，実用的な誤り耐性量子計算機を構築するには，多くのトレードオフやボトルネックの問題に立ち向かうことで，ソフトウェアからハードウェアまで一貫して効率的なアーキテクチャを研究開発することが求められます．私たちのグループは，実用的な誤り耐性量子計算機の実現をめざして，特にソフトウェア基盤の研究開発に取り組んでいます．具体的には，分散型処理を意識した誤り耐性量子計算手法[2]，小規模な符号の復号回路を機械学習で最適化する手法[3]，復号アルゴリズムを中心とした低レイテンシな制御を行う周辺装置の設計[4]，集積化された量子ビットを精度良く制御するための校正手法[5]，高速に実験を実施するフレームワークの構築，そしてこれらを包括的に評価し精度を高めるための一連の基盤ソフトウェアの開発を行っています．

また，近年near-term量子計算という研究が非常に注目を集めています．なぜなら，2019年10月に，非常に特定の，実用的ではない問題ですが，既存のコンピュータでは解くのに非常に長時間かかるといわれた問題を53量子ビットの小規模な実際に作製された量子コンピュータを用いて高速に解くことができたとGoogleが発表し，脚光を浴びたからです．現在，このような量子デバイスをどのように実用上役立てれば良いかと世界中の研究者が検討しており，例えば機械学習や化学計算などへの応用が注目を集めています．ただし，このような小規模な量子コンピュータの計算能力を引き出すには計算エラーを抑える必要があります．計算エラーを取り除くために長年研究されてきた分野として量子誤り訂正がありますが，この手法は量子ビットをエラー抑制のためのリソースとして用いるため，量子ビット数が限られる現在，および近い将来に実現し得る規模の小さな量子デバイスとは相性が良くありません．そこでその代わりに，量子誤り抑制（または量子ノイズ補償）という量子ビット数を（大幅に）増やさずにエラーを抑制する手法が提案され，最近多くの論文が発表されています．量子誤り抑制は量子アルゴリズムにエラーを抑えるための操作を加え，さらに読み出される測定結果に対して既存の古典情報処理をすることによって計算エラーを実効的に抑制する手法です（**図1**）．その際，量子誤り抑制に必要なリソースはより多くの測定回数（計算回数）です．多くの測定から得られる情報を基にエラーを抑えるので，オーバーヘッドがかかり，この手法はスケーラブルな手法ではないですが，計算エラーの頻度が量子アルゴリズム中で少数回であれば，効果的にエラーを抑えることができると示されています[6]．また最近，私たちのグループは誤り耐性量子計算に対しても量子誤り抑制手法を組み合わせて用いることで，実行的に誤り耐性量子計算に必



near-term の量子アルゴリズムでは測定結果の平均値を計算結果として得る．量子誤り抑制をしたあとは，確率分布は正しい平均値（計算結果）のまわりに分布するが分散が増加するため，より多くの測定回数が必要となる．

図1　量子誤り抑制の機能についての概念図

要な量子ビット数の削減が可能であることを示し，量子誤り抑制が広い用途を持つ技術であることを示しました[7]．

暗号と量子情報技術の融合による安全なコピー防止技術

一口に量子情報処理と暗号といってもその内容は一意に定まりません．この2つが関連する技術は大きく分けて①量子コンピュータに対しても安全な暗号技術（耐量子暗号技術），②暗号通信を行うために量子情報処理を利用する量子暗号，③量子情報処理を使って初めて実現される新しい暗号技術，の3つに分類できます．本稿では③が主題ですが，まず①と②について簡単に説明します．①は暗号技術そのものには量子情報処理や量子コンピュータの力は必要ありませんが，攻撃者は量子コンピュータを使用して攻撃するという前提で安全性が考えられた暗号のことです．②は暗号技術にも量子情報処理あるいは量子コンピュータが用いられますが，達成される暗号機能そのものは基本的に既存の技術と変わらない暗号のことです．例えば秘匿通信自体は量子の力がなくとも実現できますが，量子の力を使うことでより安全性を高めることができます．それに対して主題の③は量子の力なくしては絶対に達成できない機能を持つ暗号技術です．具体的な例がデータあるいはソフトウェアのコピー防止です．

デジタルデータはいくらでも複製可能であるので，データやソフトウェアのコピーを防ぐことは原理的に不可能です．しかしそれは量子情報技術を考慮しない場合の話です．量子情報理論には「未知の量子状態はコピーできない」という複製不可能定理[8],[9]が存在するので，これを暗号技術に応用することでコピー不可能なデータやソフトウェアを実現できる可能性があります．特にコピーを防止したいデータとして通貨が考えられ，絶対にコピー不可能な量子マネーが提案されています[10]（**図2**）．

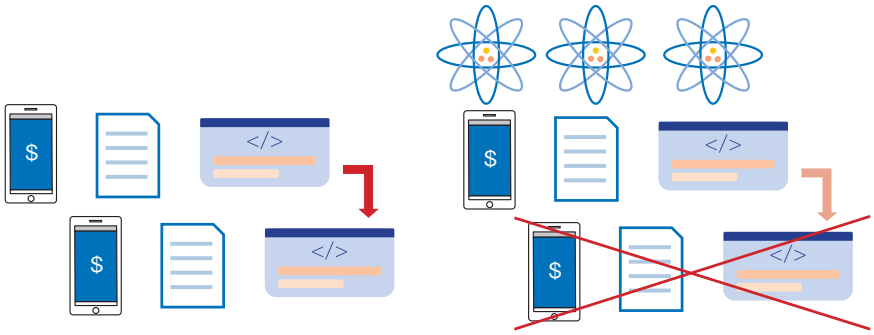


図2　量子技術によるコピー不可能性のイメージ図

現在のソフトウェアはデジタルデータであるため海賊版の作成を防ぐことが原理的に難しく，安全性を保証できるコピー防止策はこれまで存在しませんでした．安全性が証明可能なソフトウェアコピー防止は暗号と量子技術を用いてソフトウェアのコピー作成を完全に不可能にする技術です．当グループではこの実現を目標の1つとしています．コピー防止技術は量子マネー，ソフトウェアコピー防止以外にも応用が多く，例えばクラウドに預けていた（暗号化）データを手元に戻したときにクラウドにはコピーが残らないようにすることが可能であり，忘れられる権利（General Data Protection Regulation 第17条）の実現につながります．またソフトウェアを期間限定で貸し出し，返却後の使用を完璧に防ぐといったことが可能となります[11]．当グループでは以上のような量子情報の力を利用して初めて達成可能な新しい暗号技術を実現するために研究開発を行っています[12]．

量子ネットワークに向けた量子中継技術

現在のコンピュータを用いた計算や通信の技術はすべて古典物理のルールに基づいたものであり，古典物理が許す範囲の計算や通信しか行うことができません．これはセキュリティについても同様です．現在は古典物理が許す

限られた範囲のセキュリティしか提供することができませんが，量子力学を用いることで私たちが提供するセキュリティの可能性を広げることができます．例えば共通鍵配送において盗聴者の検知が可能になり[13]，秘密計算においては1台のサーバで情報理論的に安全かつ簡潔なプロトコルが行えるようになります[14]．

このような量子力学の効果を出すための通信としてのリソースはエンタングルメント（量子もつれ）と呼ばれる量子力学特有の相関であることが分かっています．量子力学に基づいたセキュリティのアプリケーションを地球規模で利用可能にするためには，量子力学特有の相関であるエンタングルメントを作成し，そのエンタングルメントを長距離かつ複数個所に共有できる量子ネットワークを構築する必要があります（**図3**）．

エンタングルメントを長距離間で共有したい場合，量子状態はコピーできないという性質から単純な増幅ができないため，従来の通信で用いている中継手法を使うことはできません．損失によりエンタングルメントの片側を直接伝送できる確率は指数関数的に小さくなるため，何らかの方法での中継が必要となります．ここでは要点だけを以下にかいつまんで述べます．まず損失が多大にならない程度の距離に中継器を置くことで直接伝送の距離を短くし損失を減らします．しかし，ある程度の損失やエラーは避けられないので，中継地点ごとに冗長に複数の通信を重ねて行い，それらに対して量子誤り訂正に相当する処理を行うことで損失やエラーを抑えた伝送を可能にします．これはエンタングルメント通信の誤り耐性処理といえ，複数の不完全なエンタングルメントから完全に近いエンタングルメントを取り出す作業となるので，エンタングルメント蒸留（純粋化）とも呼ばれています．

私たちのグループでは超低損失ナノ光ファイバ共振器[15]を用いた量子中継器の構築をめざしています．超低損失ナノ光ファイバ共振器とは超低損失テーパーファイバと超低損失ファイバブラッググレーティングの2つの要素を組み合わせたものです．これを量子メモリ部分に用いることで以下のように性能を上げる手法を検討しています．通常のファイバより格段に細いテーパーファイバ近傍に量子メモリとなる原子を捕獲することで，テーパーファイバを通る光子と原子の作用を可能にします．このように中継の系全体をファイバ内にすることで，従来いったん光子を自由空間に出して原子と作用していた損失の多い過程をなくし，光損失を減らすことが可能となります．また，ファイバブラッググレーティングによる共振器構造を用いて量子メモリから放射される光がファイバに結合する確率を上げることができます．これらは結果として量子メモリへの書

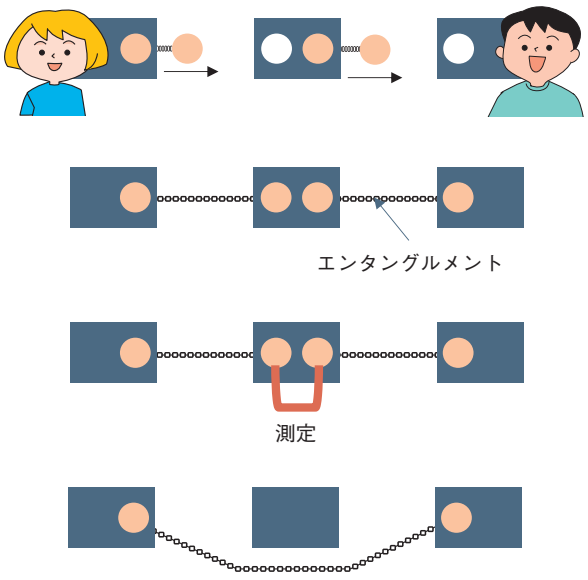


図3　量子中継器を用いたエンタングルメントの共有方法の概略図

き込みや読み出しの操作の成功率を上げることにつながり，全体の中継器としての性能を上げることができます(16)．

また，高性能な量子中継器を用いた量子ネットワークの実現により，さまざまなセキュリティのアプリケーションを提供することができるようになります．特に想定されるターゲットとしては外交や防衛といった安全保障分野や遺伝子情報を扱う医療分野，また金融機関などが挙げられます．

おわりに

量子情報や量子通信自体のデータ保護となる誤り耐性技術，量子中継技術は量子情報処理を正しく安全に実行するために欠かせない重要課題であることを最後にもう一度強調しておきます(17)．量子情報処理の誤り耐性処理のための優れたアーキテクチャは未開拓な部分が多く，今後の研究によるブレークスルーが期待されます．また量子情報処理のセキュリティ応用としては，原理的に安全な秘匿通信やコピー防止以外にも，量子秘密計算や量子を活用した通信計算量の削減など新たなものが期待されます．まだ規模のそれほど大きくないnear-term量子セキュリティというものも今後に期待される研究テーマです．

■参考文献

(1) A. G. Fowler and C. Gidney：“Low overhead quantum computation using lattice surgery,” arXiv:1808.06709 , 2018.
(2) K. Fujii and Y. Tokunaga: “Fault-Tolerant Topological One-Way Quantum Computation with Probabilistic Two-Qubit Gates,” Phys. Rev. Lett., Vol. 105, No. 25, 250503, 2010.
(3) A. Davaasuren, Y. Suzuki, K. Fujii, and M. Koashi: “General framework for constructing fast and near-optimal machine-learning-based decoder of the topological stabilizer codes,” Phys. Rev. Research, Vol. 2, No. 3, 033399, 2020.
(4) Y. Ueno, M. Tanaka, Y. Suzuki, Y. Tabuchi, and M. Kondo: “Quantum Error Correction with a Superconducting Decoder,” QCCC 2020, Dec. 2020.
(5) K. Heya, Y. Suzuki, Y. Nakamura, and K. Fujii: “Variational Quantum Gate Optimization,” arXiv:1810.12745, 2018.
(6) S. Endo, S. C. Benjamin, and Y. Li：“Practical Quantum Error Mitigation for Near-Future Applications,” Phys. Rev. X, Vol. 8, No. 3, 031027, 2018.
(7) Y. Suzuki, S. Endo, K. Fujii, and Y. Tokunaga: “Quantum error mitigation for fault-tolerant quantum computing,” arXiv preprint arXiv:2010.03887, 2020.
(8) W. Wootters and W. Zurek：“A single quantum cannot be cloned,” Nature, Vol. 299, pp. 802-803, 1982.
(9) D. Dieks：“Communication by EPR devices,” Phys. Lett. A, Vol. 92, No. 6, pp. 271-272, 1982.
(10) S. Wiesner：“Conjugate Coding,” SIGACT News, Vol. 15, No. 1, pp. 78-88, 1983.
(11) P. Ananth and R.L. La Placa：“Secure software leasing,” CoRR, abs/2005.05289, 2020.
(12) F. Kitagawa, R. Nishimaki, and T. Yamakawa：“Secure software leasing from standard assumptions,” CoRR, abs/2010.11186, 2020.
(13) https://www.ntt.co.jp/journal/0608/files/jn200608049.pdf.
(14) T. Morimae：“Measurement-only verifiable blind quantum computing with quantum input verification,” Phys. Rev. A, Vol. 94, 042301, Oct. 2016.
(15) S. Ruddell, K. E. Webb, M. Takahata, S. Kato, and T. Aoki：“Ultra-low-loss nanofiber Fabry–Perot cavities optimized for cavity quantum electrodynamics,” Opt. Lett., Vol. 45, No. 17, pp. 4875-4878, 2020.
(16) 為近・鈴木・徳永・青木：“ナノファイバー共振器QED系を用いた量子中継の検討,” 日本物理学会第76回年次大会，2021.
(17) https://journal.ntt.co.jp/wp-content/uploads/2021/03/JN202103043.pdf



（上段左から）徳永　裕己/ 鈴木　泰成/ 遠藤　傑
（下段左から）西巻　陵/ 北川　冬航/ 為近　彩智

量子情報処理をセキュリティに応用するまでにはまだ時間はかかりますが，実りの多い将来が待っていると期待しています．量子情報を守る誤り耐性処理，量子ネットワークに向けた量子中継などの必須の技術を着実に進歩させ，新たな応用を生み出していきます．

◆問い合わせ先
NTTセキュアプラットフォーム研究所
企画担当
E-mail　scpflab＠hco.ntt.co.jp



主役登場

未知なるリスクを排除せよ

岩村　誠
NTTセキュアプラットフォーム研究所
特別研究員

前回，この主役登場へ寄稿させていただいたのは2010年，あれから11年が経ちました．残念ながらサイバー攻撃やマルウェア（悪性ソフトウェア）の高度化はとどまることを知らず，未然に侵入を防ぐことは困難になってきています．こうしたマルウェアの侵入を前提とした状況を踏まえ，私たちはマルウェアの振る舞いやそれらが残す痕跡をIoC（Indicator of Compromise）として抽出，IoCを基にマルウェアの振る舞いを早期に発見する技術の研究開発に取り組んでいます．さらなるサイバー攻撃の激化に対抗するべく，今後もマルウェアの早期発見，対策といった取り組みは継続していくことが肝要です．

ところで，こうしたマルウェアにそもそも感染しないようにするにはどうすれば良いのでしょうか？　マルウェアに感染する大きな原因の１つにソフトウェアの脆弱性があります．これまで脆弱性対策は，利用しているソフトウェアの最新化で対応してきました．しかし脆弱性についても2010年以降，憂慮すべきケースが増えてきています．2010年に出現したStuxnetは，４つの未知の脆弱性を組み合わせて感染を広げました．また2017年に出現したWannaCryは，同年に修正された脆弱性を悪用していましたが，その脆弱性を悪用するモジュールはWnnaCry出現の５年以上前にすでに存在していたとの報告があります．そう，今ではソフトウェアの最新化は脆弱性対策の銀の弾丸ではなくなってしまったのです．最新版のソフトウェアであっても修正されていない脆弱性は，ゼロデイ脆弱性と呼ばれています．未修正である理由はさまざまですが，私が過去に発見したものにも多くのゼロデイ脆弱性があります．一例として，2006年に発見したWinnyというソフトウェアの脆弱性（CVE-2010-2360）をみてみましょう．当時からこのソフトウェアの修正は社会的に困難な状況にあり，今後も修正されることはないでしょう．私たちとしては修正不能な脆弱性は公にできないという立場から公開を控えましたが，2010年に海外のセキュリティ研究者がこの脆弱性を発見，警鐘を鳴らすべく公表したことにより，その存在が明らかにされました．未修正の脆弱性の公開を控えた私たちの判断が正しかったのか，発表に踏み切る行為が正しかったのか，今でも自分の中で答えは出ていません．ただいえるのは，ゼロデイ脆弱性というのは身近に数多く存在し，それらはいつ悪用されてもおかしくない状態にあるということです．今後はソフトウェアの最新化はもちろん，攻撃者に悪用される前に脆弱性を発見し，対処することが重要になっていくでしょう．私たちとしても引き続き，脆弱性発見や脅威実証の取り組みを推し進め，未知のリスクの排除に取り組んでいきます．そして，脆弱性発生や攻撃のメカニズムの体系化を進め，脆弱性が生まれることのないICTシステムの実現に邁進していく所存です．その実現の暁には，サイバーセキュリティの研究者がこの“主役登場”に現れることもなくなっているでしょう．

特別連載

ムーンショット・エフェクト——NTT研究所の技術レガシー

第8回　シャツが生体情報計測のIoTセンサに

ノンフィクション作家の野地秩嘉（のじつねよし）氏より「ムーンショット・エフェクト——NTT研究所の技術レガシー」と題するNTT研究所の技術をテーマとした原稿をいただきました．連載第8回目は「シャツが生体情報計測のIoTセンサに」です．本連載に掲載された記事は，中学生向けに新書として出版予定です（NTT技術ジャーナル事務局）．

■コネクティッドされた身体

IOWN構想の核となるのがオールフォトニクス・ネットワーク（APN）だ．ネットワークに接続するすべてのデバイスを対象にして，情報伝送と演算処理を光技術で行うこと．その実現のために光トランジスタを開発している納富（雅也），光ファイバ通信の実用化技術を進展させた宮本（裕），そして曲げフリー光ファイバを開発した中島（和秀）….

彼らを筆頭にNTT研究所のメンバーたちはAPNの実現に総力を挙げている．

また，IOWN構想にかかわる技術の実用化時期についてNTTは2030年を目標としている．しかし，それでは遅い．

NTT研究所の俊英たちからは「勝手なことを言うな」と叱られるかもしれないが，少なくとも3年は前倒ししてもらわないと，日本と世界が困るのである．

新型コロナ禍による在宅勤務の影響もあって，インターネットのトラフィックやIoTデバイスで扱われる通信量はさらに増加している．また，自宅にこもって孤独を感じる個人はスマホを酷使することもあり，ICT機器の消費電力は増える一方だ．

少しでも早く光電融合型の処理を行うAPNを実現しなくてはならないのだが，当面は増大した消費電力を補うため発電量を増やさざるを得ない．

それを太陽光発電や風力発電等で賄うには限界があるため，今まで以上に化石燃料を使用することにつながり，温室効果ガスの排出量をゼロに近づけるという人類の目標に逆行してしまうのである．だからこその目標前倒しだ．

光電融合型技術がAPNをはじめ，さまざまな電子機器で使われるようになれば，スマホの充電は1年に一度くらいでよくなるだろうし，むろん，多くの電子機器が使われている家庭での消費電力も激減するから全体の発電量を抑制できる．

そうしたAPN社会に向けて活用が期待されている技術のひとつが生体信号計測素材のhitoe®*だ．

■hitoe®に触れる

わたしがhitoe®の実物を見たのは新型コロナ禍のさなか，2020年の初秋だった．秋とはいえ，東京はまだ暑かった．晴海にあるビルのなかでネットワーク設備の工事があり，そこで働くNTT社員が実証実験の一環としてhitoe®を使ったシャツを着用していたのである．空調設備の工事中のためエアコンは切れていた．内部にこもった熱気で室温は40度近かったのである．hitoe®を使って，体温，脈拍や心電図のような生体信号を計測できれば，熱中症の予兆もわかるかもしれない，そう思いを巡らせていたわたしにhitoe®について説明してくれたのはNTTデバイスイノベーションセンタの主幹研究員，都甲浩芳だ．

都甲は「初めまして」と言った途端，薄いジャケットを脱ぎ始めた．

「何をするんだ，いきなり何が始まったんだ」と思っているうちに彼はアンダーシャツ1枚になった．この

＊：機能素材hitoe®は東レ株式会社と日本電信電話株式会社が共同で開発した機能繊維素材であり，両社の登録商標です．

シャツこそがhitoe®で作られたシャツで胸の部分には小型のトランスミッタ（送信機）が付いている．トランスミッタはクレジットカードの3分の1くらいの大きさでハート型をしていた．

「これがhitoe®です．実物を見ていただいた方が理解しやすいと思ったので」．

なるほど，裸になる癖があるわけではないのだなとわかった．

下着の裾を延ばし，彼は説明を始めた．

「hitoe®はからだに接触すると，身体の電気信号を計測できる布状の電極のことです．導電性（電気を通す性質）の素材をナノファイバ繊維に塗布し，固定化することで，金属を使用せず，からだに優しい電極を作製しています[(1)]（**図1**）．

たとえば，心臓は動く時に電気信号を出しています．脳も脳波として電気信号を出します．この電気信号を捕まえて，トランスミッタから外部に信号を送り出します．

これまでにも電気を通す銀や銅が編みこんである繊維や布はあったのですが，金属アレルギーのある方だと皮膚に影響が出てしまうことがありました．その点，hitoe®は生体親和性が高く，皮膚に優しいのです」．

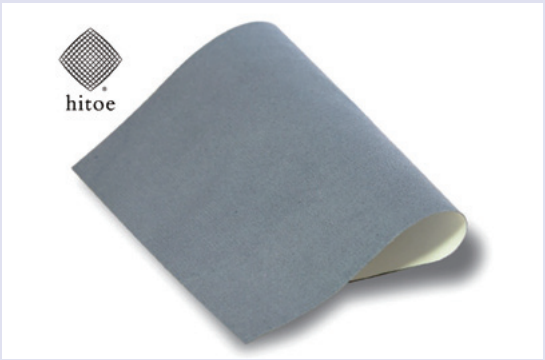


図1　hitoe®の生地

hitoe®のポイントは繊維に塗り込んである導電性高分子のPEDOT-PSSだ．だが，PEDOT-PSSは水に濡れると非常にもろい性質を持っている．水分が多い環境で利用される生体電極には向かなかったのである．

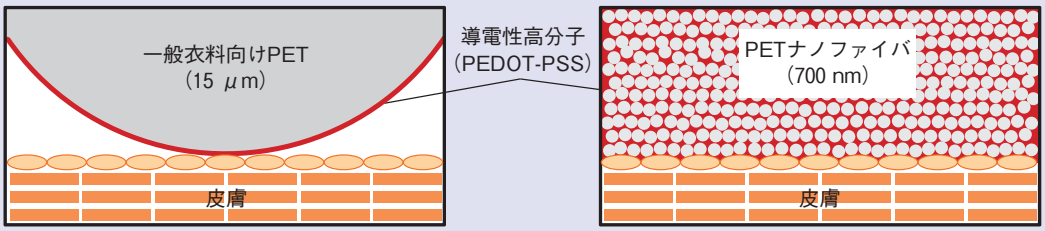
それをhitoe®の開発者であるNTT物性科学基礎研究所 フェローの塚田信吾と主席研究員の中島寛が考えをめぐらせて解決した．元々医師だった塚田が絹の縫合糸（手術後に縫い合わせる糸）にPEDOT-PSSをコーティングし固定化する手法を見出し，水に濡れても使えるようになったのである．

NTT研究所は東レ株式会社と一緒に研究を始め，絹の繊維を繊維径700 nm（ナノメートル）のポリエステルナノファイバに置き換え，hitoe®として実用化したのである．なお，ナノメートルとは10億分の1メートルで，髪の毛の太さの10万分の1くらいだ．人間の目に見える長さではない．これにより肌への密着性が格段に向上してからだを動かしても安定して計測できる[(1)]（**図2**）．

hitoe®は機能素材であるが，それを衣料として織り込んで，計測した信号をデータとして送信し，その結果を心電図のように身体の状態を見守るシステムとして活用する．

「例えば，心電図は病院に行って機器を取り付けたときにしか計測できません．日々の生活の中では，ホルター心電計という小型の計測機器を常に持ち歩いて計測・蓄積し，病院に行って結果を診てもらわなければなりません．ところが，hitoe®のシャツを着ているだけで病院等にデータが送られるのです」（都甲）．

hitoe®で計測されたデータはhitoe®製のシャツやベ



「ナノファイバ間細分化空隙への導電性高分子高含浸」による「高導電性」と「実用耐久性」
「皮膚への密着・変形効果」による生体信号の「高信頼検出」性能を達成

図2　一般的な繊維（左）とナノファイバ（右）の肌との接触イメージ

ルトに付いているトランスミッタからブルートゥースでスマホに飛ぶ. また, スマホからは無線と光ファイバネットワークを通じて，モニタリング・センタに飛ぶ．つまり，光通信技術が進んで，多くの体調情報を送れるようになれば，用途は広がるのである[(2)]（**図 3**）.

■今のところは暑さ対策

熱中症になりそうなくらい暑い日に屋外で働く人間の心拍数と衣服内の温度，湿度を計測し，本人と外部のスマホにアラームで通知する．通知をもらった本人は休むなり病院に行く.

「そんなこと自分で判断できるだろう」.

素人はそう考えるけれど，熱中症はめまい，けいれん，吐き気などの症状が出たり，最悪の場合は死に至る．症状が出る前に発見して，休む，水を飲む，体を冷やすことが重要だ．hitoe®を用いて熱中症が出る前のサインを発見するのである.

hitoe®について説明をしてくれる都甲にわたしはひとつ訊ねた.

「いずれは新型コロナなどの感染症対策に使えるようになるのでしょうか？」.

hitoe®製のウェアを着ているだけで新型コロナを発見するPCR検査の代用になるとは思っていない．しかし，少なくとも自宅で療養する人たちの心拍数をつかむことはできる．あとはまた研究開発を続ければいいのではないか.

都甲の答えは慎重だった.

「これを着れば新型コロナに感染しているかどうかがわかるということを目的にしていません．ですが, 直接，接触しなくても体調の一部データを取ることは可能ですからそれを応用することはできるわけです.

今のところは暑いなかで働く人，真夏の屋外や空調のない屋内で働く人を主な対象に，熱中症の要因がさまざまあるなかで，暑さ対策を意識しています」.

■オリンピックをサポートする人たちが着る

東京オリンピックパラリンピック2020のバドミントン競技の日本代表，桃田賢斗選手はNTT東日本の所属でもある.

オリンピックに出場する選手ではないが，NTT社員はネットワークの設営などの作業で会場予定地へ出向くことになる．真夏の屋外や空調のない屋内での作業だから，当然，熱中症の心配が出てくる．hitoe®は彼らが着用するにも最適だ.



図 3　hitoe®の応用例

「ええ，そうなんです．2019年のことでしたが，テストを兼ねて競技場予定地に行ったことがあります．真夏でしたから手持ちの温度計が40度を超えていました．もう，いるだけで熱中症になりそうでした．

また，熱中症は真夏だけでなく，実は５月，６月も多いんです．暑熱馴化といって，まだ暑さ慣れしてない時期にも気を付ける必要があります．

熱中症の救急搬送データを調べると，山が２回あって，ゴールデンウィークと真夏なんです．ゴールデンウィークは暑さ慣れしてない人たちが，天気が良くなって運動や屋外作業して熱中症になってしまう．

これまでにも暑さ対策の実証実験をやってきたのですが，結果としては熱中症になった方はひとりもいませんでした．hitoe®による暑さ対策のおかげというよりも，これを着けていたことによって，みなさんが気を付けたのかもしれません」．

■hitoe®が取るデータ

hitoe®トランスミッタはウェラブル生体環境センサでもある．つまり，生体情報だけでなく，環境のデータも取っている．では，生体情報のひとつとしては心拍数として，「環境」とは何なのか．

都甲は「環境とは衣服のなかの温度と湿度のことをさしています」と言った．

「心拍数と衣服内の温度，湿度を組み合わせると，体内温度の変動が推測できます．

運動したり体を動かすと，心拍数が上がって，体温も上がる．そうすると，体は一生懸命放熱しようとして汗をかくのですが，衣服内の湿度が高いとそれ以上，汗が蒸発しなくなる．すると，体温が上がって熱中症という症状になりやすい…．

こういった体温調節機能を数式でモデル化してhitoe®で測定した心拍数と衣服内温度・湿度を用いて体内温度の変動を推定することが新しい．数式は名古屋工業大学の平田晃正教授と構築し，モデルの妥当性は横浜国立大学の田中英登教授や至学館大学の宮澤太機准教授と実証してきました．元国立スポーツ科学センター長の川原貴リサーチプロフェッサに監修いただいて技術が完成しています」[3]．

■使用できる期間

hitoe®は繊維に導電性素材を練りこんである．では，耐久性はどうなのだろうか．暑い日に着用するから汗で濡れる．当然，洗濯する．むろん，トランスミッタは付けたまま洗濯できないが，シャツ部分（あるいはベルト部分）は洗濯しているうちに繊維から導電性物質が剥離してしまうのではないか．

「今のところ，電極部分は洗濯に対して100回以上の耐性があります．ウェアは自宅で洗濯し，トランスミッタは洗濯時には取り外して充電することで，繰り返し使用することができます」．

hitoe®の暑さ対策応用についていえば完成している．やるべきことはウェアラブルデバイスにさまざまなデータが取れるような機能を追加することだろうか．そして，繰り返しになるが，APNを進展させる．そうすればリモート医療の検査衣料としての未来が見えてくる．

都甲は「ええ」と言った．

「私たちもこれからのことをいろいろ考えています．暑さ対策だけでなく医療分野でも，お手伝いしていきたいとも思っています」．

hitoe®を使った衣料はさまざまな可能性が考えられるスマート衣料だ．だが，使い方，付属品についてはまだまだ研究開発の余地がある．特に必要なのは発想だろう．

「膨大な量のデータを取って遠隔地にリアルタイムで送る」ことは光通信技術のもっとも得意とする点だ．暑さ対策だけに使うのはもったいない．使い方を広く募集するくらいの度量があっていい．だから，わたしはhitoe®については多くの人に存在を知ってもらいたいと思っている．

■参考文献

⑴ https://www.ntt.co.jp/journal/1402/files/jn201402015.pdf
⑵ https://www.rd.ntt/forum/exhibition.html
⑶ 高河原・橋本・松永・樋口・松浦・桑原・都甲・川原・平田・田中・宮澤：“より安心して働ける作業現場の実現に向けた体調管理技術，”NTT技術ジャーナル，Vol. 33，No. 4, pp. 47-50, 2021.

野地秩嘉（のじつねよし）



1957年東京都生まれ．早稲田大学商学部卒業後，出版社勤務を経てノンフィクション作家に．日本文藝家協会会員．人物ルポルタージュをはじめ，食や美術，海外文化などの分野で活躍中．著書は『高倉健インタヴューズ』『キャンティ物語』『サービスの達人たち』『ニューヨーク美術案内』など多数．『トヨタ物語』『トヨタに学ぶカイゼンのヒント』がベストセラーに．『TOKYOオリンピック物語』でミズノスポーツライター賞優秀賞受賞．近著は『日本人とインド人』（翻訳　プレジデント社）．

挑戦する研究者たち
CHALLENGERS



永田昌明

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
上席特別研究員

DIFFERENTはほめ言葉である．未来を論理的に語る訓練を心掛けよう

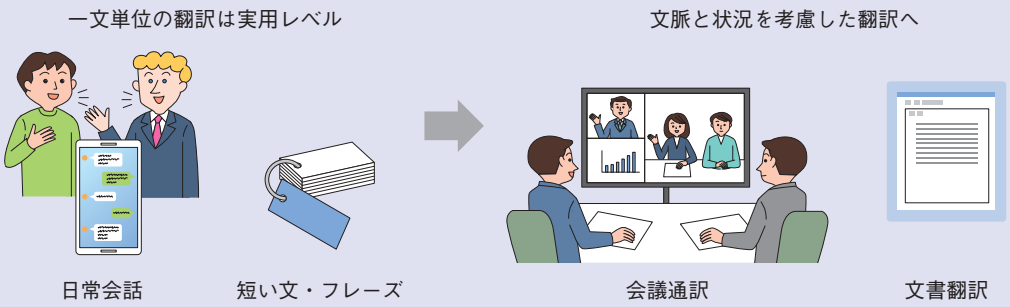
近年，ニューラルネットワークを用いた機械翻訳の研究は急激に進歩し，機械翻訳の精度は大幅に向上しました．Webサイトやスマートフォンのアプリによる翻訳が普及してきている中，その精度にはまだまだ課題が残されています．この精度向上をめざして研究者は文脈や状況，文化等をも反映したさらに高度な対訳技術研究に勤しんでいます．今回は，文脈・状況に基づくニューラル機械翻訳を追究する永田昌明NTTコミュニケーション科学基礎研究所　上席特別研究員に，研究の進捗と研究者としてのあり方について伺いました．

自然言語処理のトップレベルの国際会議で高評価

現在，手掛けている研究内容について教えてください．

前回お話させていただいた2013年から一貫して，ある言語を別の言語に翻訳する技術を追究していますが，対象は単語の対訳と文法をベースとした統計的機械翻訳から文脈・状況に基づくニューラル機械翻訳へと変化しました（**図1**）．2014年ごろからAI（人工知能）技術が急激に進歩し，囲碁の勝負でAIが人間に勝ち，難しいとされていた音声認識が可能となるばかりかその質が劇的に向上する等，AI関連の各研究分野に大きな変化が現れてきました．こうした中，私が手掛けていた機械翻訳の分野においても，2016年ごろに翻訳の精度が急速に向上し，ヒューマンパリティ，つまり人間並みの翻訳ができるようになりました．これまで不可能だと思われていたことが突然できる時代がやってきたのです．このような時代の流れを受けて，今後の研究テーマを模索する中で，前後の文により翻訳文の文意が変わってくるといった課題が山積していることに気付き，この解決をめざして文脈・状況に基づくニューラル機械翻訳というテーマにたどり着きました．

Webサイトやスマートフォンのアプリによる翻訳機能を使うと，その精度は高く高校生の宿題程度の英作文なら機械翻訳のほうが上手ではないかと思えるほどです．私は



ニューラルネット（深層学習）により翻訳精度は大幅に向上し，一文単位の翻訳は実用レベルになった．今後は文脈と状況の考慮が課題．

図１　機械翻訳の現在の到達点と次の目標

貸自転車屋さんで店員と外国人がスマートフォンの翻訳機能を使って交渉している場面に遭遇し，そのやり取りを見ながら「すごいな，翻訳技術もここまで来たか！」と感心しました．一方で，２人の間の会話は円滑とはいえるものではありませんでした．それは，微妙な言い回しや，ニュアンスは翻訳できていないからでした．

これは，ニューラル機械翻訳の少し困った特徴で，文章そのものとしては母語話者並みに流ちょうな訳文を生成する反面，訳文が原文の意味を忠実に再現しないことがあるためです．従来の機械翻訳システムは文を基本的な入力の単位としていたので，たとえ１つずつの文の翻訳精度が人間に匹敵したとしても，文書や会話のような複数の文から構成されるテキストを翻訳すると，文脈や状況を考慮していないために照応関係が一致しない，訳語に一貫性がないという問題が生じてしまうのです．

このような現在の技術をさらに進化させるためにご研究に臨まれているのですね．

これに対応するための課題は３つあります．１番目は日本語の会話では往々にして主語や目的語が省略されますが，その省略された主語や目的語を文脈から判断して翻訳すること．２番目は会話に登場してくる人物が誰かを反映した翻訳にすること．これには例えば「脳外科医」には男女両方いるにもかかわらず，つい男性を連想してしまうようなジェンダーバイアスの問題も含まれます．そして３番目は１つの単語が保有する複数の意味や表現から適切な意味や表現を見つけ出して反映することです．

文脈や状況を考慮した翻訳の例として日本語を英語に翻訳する場合を考えます．日本語の第１文に依存して，日本語の第２文の英語訳が決定される仕組みです（**図２**）．

「申し訳ありませんが，先生は午後，少し遅れているのです．診察するまでに20分ほどかかると思います」という日本語を英訳すると，“I am afraid that the doctor is running a bit late this afternoon. It might be about 20mins before he can see you.”が正答として提示されます．しかし，日本語の第２文において「先生」という主語が省略されているため，“It might be about 20mins before we can see you.”のように，ドクター（三人称単数）に該当するはずの主語が「私たち」になってしまうことがあるのです．さらに，これには，ジェンダーバイアスが存在します．英語では代名詞を選択する際には性別を特定しなければいけません．しかし，機械は「ドクターは男性である」という認識の下，“he”と翻訳してしまうのです．

このように日本語から英語に翻訳する際，日本語において省略されてしまう主語や目的語をうまく解釈しないと，

	原言語	目的言語
先行文	申し訳ありませんが，先生は午後少し遅れているんです．	I’ m afraid that the doctor is running a bit late this afternoon.
入力文	診察するまでに20分ほどかかると思います．	正解: It might be about 20 minutes before he can see you. 誤り: It might be about 20 minutes before we can see you.

	原言語	目的言語
先行文	昨日，渋谷へ行った．	I went to Shibuya yesterday.
入力文	すごい人だった	正解: There were a lot of people. 誤り: He was a great man.

さらに英語の代名詞に性別の区別があるため「先生」や「人」の訳語にジェンダーバイアスの問題が生じる．

図 2　文脈の考慮が必要な翻訳の例

意味が変化してしまうことに加えて，訳語が文脈によって変化してしまうのです．例えば「昨日，渋谷に行った．すごい人だった」という日本語における「すごい」のニュアンスは「渋谷に行った」を受ければ「人出の多さ」だろうと考え，“There was a lot of people.”となるでしょう．しかし，文脈を反映せずに別の意味で解釈されると，“He was a great man.”等と，文としては間違いありませんが前の文に呼応しない翻訳文になってしまうのです．

さらに，どんなに翻訳精度を高めても完璧な翻訳はできませんから，誤訳にどうアラームを鳴らすかも重要です．例えば誤訳が発見されたとき，統計的機械翻訳の場合，翻訳された文章が元の文章のどこにあたるかを調べたいときには，カーソルを文章に当てるとその部分を示すことができました．ところがニューラル機械翻訳は文全体を解釈して意味ベクトルを作成し，そのベクトルに従って翻訳がなされるので対応する部分を具体的に特定できないのです．

こうした状況をかんがみて，単語対応，文対応といわれる，入力した文章と出力した文章の対象を具体的に示すことを目標に研究を進めました．そして，2020年に自然言語処理・計算言語学の分野での世界最大の国際学会の１つであるEMNLP(Empirical Methods in Natural Language Processing)において，文脈を反映してお互いに翻訳になっている部分とそうでない部分を判別できることを発表しました（**図 3**）．この取り組みは先駆的で精度が著しく高く，画期的だと評価されました．

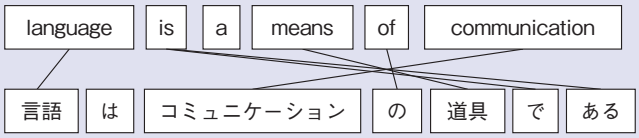


人と違うことをして，できるだけ物議を醸す

素晴らしい研究成果を上げられたのですね．研究活動をするうえでは何を大切にしていらっしゃいますか．

私は人と違うことをすること，できるだけ（いい意味で）物議を醸し出すことをしたいと心掛けています．ニューラル機械翻訳において単語対応ができないのはとても不便であるなどの問題意識を持っており，この問題を解消するため，他の人とは違う方法を試して模索した結果，偶然ではありますが，「言語が違っていても，ニューラルネットに，ある単語と別の単語が意味的に近い存在であるかを学習させるのは，実は簡単で，300文程度の単語対応の正解データがあれば高い精度で単語対応を求められる」ことを発見したのです．

発見に至るプロセスは，まずmultilingual BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers)*で学習した単語の意味ベクトルを眺めて



language is a means of communication
Q. 言語
A. Language
Q. は
A. No_Answer
Q. コミュニケーション
A. communication
…

日本語文の単語（スパン）に対して英語文で対訳となる単語列（スパン）を求める．
双方のスパンの意味ベクトル表現から対応関係を決める．

図 3　言語横断スパン予測に基づく単語対応の例

みたところ，多言語間の対訳文をデータベース化した，いわゆる対訳コーパスを学習に全く使用していないにもかかわらず，でき上がったモデルの中では，実は似たような単語はベクトル空間上の割と近い場所に存在している状態にあることに気付いたことです[1]．

その理由は言語が違っても数字やアルファベット等で表記された部分は共通であることや，日本語と中国語も漢字を使用することで重なるように，近い言語どうしであれば何らかの共通部分があるからです．それを眺めたときに，共通する表記や言葉がピボットとなってそれを中心に各言語が独自の世界を広げるという状況が起きているのかもしれないと考えました．この着想からニューラルネットにある単語と別の単語が意味的に近い存在であるかを学習させるのは実はとても簡単で，300文程度の単語対応の正解データがあれば高い精度で単語対応を求められることを導き出したのです．

試行錯誤を繰り返して「こんなやり方もあるかもしれないな」と何気なく取り組んだことが画期的な発見に結びついて驚きましたが，これも人と違うことをして，物議を醸すことをしようという心掛けによるものです．

こうした考えに至ったのは30代前半に米国で勉強させていただいた経験に由来するのかもしれません．私は２度渡米しています．１度目はCMU（Carnegie Mellon University）での経験です．彼らは誉め言葉として“He is a different.”と表現していたのを聞き，“different”は誉め言葉だと知りました．また，２度目のAT&Tでのスーパーバイザであるケネス・チャーチ博士も，「私は人と違うことをして，物議を醸すものをねらう」と話しており，私は研究者としてその姿勢に深く共感しました．この経験をきっかけに「違う」ことは良いことなのだと価値観が変わりました．

また，２度の渡米を経てサーベイの重要性を学びました．人と違うことをするには人と同じ部分を理解していなくてはなりませんから，自らの研究がどのポジションにあるか，

＊ BERT：Googleによって開発された，Transformerと呼ばれる深層学習法を用いて大量のテキストから事前に学習された言語の意味表現モデル．テキスト分類など目的別の正解データを用いてさらに学習すると高い精度が得られる．Multilingual BERTは104言語のテキストから1つのモデルを学習したもの．

何が分かっていないか等のサーベイには今も真摯に取り組んでいます．

米国での経験は研究者としての歩みに大きく影響したのですね．

CMUでは研究者の心構えも教えていただきました．米国の大学の新学期にあたる夏から秋にかけて，研究についてのガイダンスが開かれていました．そのときに「研究とは人間の知能の最前線にあって未解明の物事に英知を持って臨む」と学びました．研究とは何か，何に貢献すべきか，といった基礎となる概念を明確に教えていただく機会はそれまでの研究者生活においては少なかったので，早い段階でそれ知ることができてラッキーだったと感じています．また，米国では博士課程において，当時から研究の方法や成果，到達度等，博士号への評価指標が具体的に示されていましたから，研究への取り組み方や目標設定をしやすかったのを覚えています．

NTTにも「テーマ企画」と呼ばれる非常に良い伝統があります．これは入社1，2年目の研究者の研究企画発表会です．登壇者は3，4年間の研究計画を理論立てて発表します．これは米国の大学院の“Thesis proposal（論文計画書）”ととても良く似ています．どちらにおいても，自らが研究したこと，いわゆる過去について語ることは，研究者として経験を重ねることでおのずと身についてくることですが，計画を語る，いわゆる未来を論理的に語ろうとすることは訓練が必要です．その機会を若い研究者にシステムとして与えるのは非常に良いことだと思います．こうした活動から自らの立脚点を理解して，使命を明確にすることが人と違う研究につながり，物議を醸す研究成果を上げることにつながると考えます．

こうした考えに基づいて，私は常に自分の研究を客観的に眺め，新しいことに取り組むようにしています．最近は言語の外側にある現実世界の「状況」をニューラル機械翻訳に反映するためにグラフニューラルネットワークの勉強を始めました．グラフニューラルネットワークはさまざまなところで実用化されています．例えば，最近実用化されたのはGoogleマップで到着時間を予測する機能です．道路のすべての交差点と道路のリンクの間，人の移動の計測をして，A地点からB地点へ移動するのにかかる時間を時刻ごとに予想します．また，Uber Eatsのレコメンデーション機能も同様に，注文者と注文した物等を組み合わせて当事者が次回に注文する物を予測しています．このグラフニューラルネットワークのように言語化されない現実世界の「状況」に関する情報を反映することで，翻訳の精度をさらに向上させることができると考えています．



前代未聞の「辞めます」宣言

これまでの研究活動を振り返って印象に残っていること，そして今後はどのようなことに取り組むのかを教えてください．

2016年の夏に口にした「統計的機械翻訳辞めます」宣言が印象に残っています．30年ほど機械翻訳について研究してきましたが，ニューラル機械翻訳の登場による技術変化によって機械翻訳の研究は大きく変化し，過去の研究が帳消しになるほどのインパクトでした．これにより，ニューラル機械翻訳の分野の研究者は一斉にスタートラインに立つことになりました．こうした状況の中，私は研究方針を報告する会議で「統計的機械翻訳はニューラル機械翻訳には勝てません，だから辞めます」と宣言したのです．今から思うと前代未聞だっただろうなと思います．

それまでチームで取り組んでいた統計的機械翻訳の研究において，年長でリーダーだった私は，第一線から退いたような感覚でした．一方で，技術革新に伴ってそれまでのチームから個人で研究できるようになり，1人の研究者として復活することができました．そして，管理職としてチームを率いる立場の年齢になって，再度第一著者(first author)として論文発表することができたことはとても感慨深いものがあります．

今後は研究の土台になるような何かを残したいですね．どんな研究をするうえでも，データは非常に重要な存在です．機械翻訳を研究していくうえでは，土台が対訳コーパ

スや翻訳データベースではないかと思います．多言語間の対訳文をデータベース化したものを対訳コーパスと呼びますが，これを作成するのに必要なのがデータ源なのです．初期には国際機関の文書をデータ源としていたのですが，現在の機械翻訳の典型例といわれる，Google翻訳はWebをデータ源としています．一方で，Googleのような１つの企業が独占的に情報を蓄積するのは良い状況とはいえないという意見もあり，Webをクロールしてデータを一般に提供することを目的とするNPOであるCommon CrawlのWebアーカイブから，大規模に対訳文を抽出して対訳コーパスを作成する試みがいくつか行われています．

このCommon Crawlを利用したヨーロッパ言語―英語間の大規模な対訳コーパスを作成するプロジェクトParaCrawlでは，4000万文を集積した段階で機械翻訳の精度が人間と同等になったといいます．日本語はそこまで蓄積がありませんから，このままだと機械翻訳業界は欧州においていかれてしまいます．このため私はNTTが作成した日英対訳コーパスJParaCrawlを充実させ，日本語の翻訳研究の発展に尽力したいと考えています．

過去に定年退官間近のある大学教授が学生たちを動員して，後にtatoebaと呼ばれる大規模な翻訳データベース製作に臨まれていました[2]．実は当時，「定年間近でこんなことを始める意味は何だろう」と，その先生の熱い思いを理解できなかったのです．しかし，自分自身がその年齢に近づいた今はその気持ちが分かります．多くの人がアクセスできるデータベースを作成する活動には引き続きかかわっていきたいと考えています．

若い研究者へアドバイスをお願いできますでしょうか．

研究者にとっては，自分の興味を持ったテーマを長期にわたって追求するほど有利な状況になります．そのためには，他者に分かりやすく説明できる力を身につけること，そして，定期的に自分の研究と向き合うことの２つを大切にしてほしいと考えています．

定期的に自分の研究と向き合うことは，研究企画書を書くことでもそのスキルを養えます．NTTでは毎年，１年間の研究計画を提出します．その際に１年前の研究計画に目を通すことになるのですが，ベストエフォートの計画とはいえ，いかに自分の予測が当たらないかを目の当たりにすることになるのです．ところが，何度か繰り返すうちに実行できたことや予測どおりになったこと，あるいは反対に実行できないこと，予測に反したことが分かるようになります．経験を重ねることでより現実的な予測に基づいた研究計画を立てられるようになり，第三者にそれを分かりやすく伝えるためのスキルも養えます．

さらに，長期的に取り組むためには興味のあるテーマでなければなりません．私自身，自分の将来の見通しが立っていたかというとそうでもありません．かつては５年，10年を見据えて動いてはいましたが，リアリティがあるのは最初の１，２年かもしれません．しかも，変化の激しい今の時代において５年，10年先の未来を予測することは困難極まります．こうした状況においても，想像できる範囲で，想像した未来において自分はどうありたいかを描いてみることが大切だと思います．

若い研究者の皆さん，研究者ほど現役が長い仕事は他にないかもしれません．自分が長く付き合えるテーマを見つけて研究活動を続けていってください．

■参考文献

⑴ https://www.aclweb.org/anthology/2020.emnlp-main.41.pdf
⑵ https://tatoeba.org/jpn/

IOWN時代を見据えた NTT西日本の研究開発の取り組み

NTT西日本は，社会を取り巻く環境変化がもたらすさまざまな課題に対し，ICT を活用して解決する先駆者「ソーシャルICTパイオニア」として社会の発展に貢献し，地域から愛され，信頼される企業に変革し続けることをめざしています．その中で，2030年のIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想の実現と，2025年大阪・関西万博を見据え，IOWN準備ワーキンググループ（WG）を設立しました．ここでは，IOWN準備WGのめざす未来と研究開発している具体的な事例を紹介します．

IOWN構想実現に向けた NTT西日本での取り組み

NTT西日本では，2020年11月より，IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想の実現による社会課題の解決という中期的な視点のもと，IOWN技術等を活用したユースケースの創出，早期ビジネス化に向けたサービス実現を目的にIOWN準備WGを設立しました．

IOWN準備WGでは，将来，地域で抱える課題等をユースケースとして，IOWN構想の概念や技術とこれまでR&Dセンタ等で培ってきた技術を組み合わせ，NTT西日本の強みを活かした新しいビジネス価値創出をめざしています．また，ベンチャーやスタートアップ企業との共創による新サービス・アイデアの検討を行う予定で，それに向けた市場リサーチと，オープンイノベーションを生むため各企業や大学などと議論を交わす場を積極的に設けています（**図1**）．

IOWN準備WGでは，**図2**に示す方向性で技術開発を進めています．

・光アクセス，Wi-Fi，ローカル5G（第5世代移動通信システム）等，異なる種類のアクセスを統一的なインタフェースで収容するマルチアクセス技術

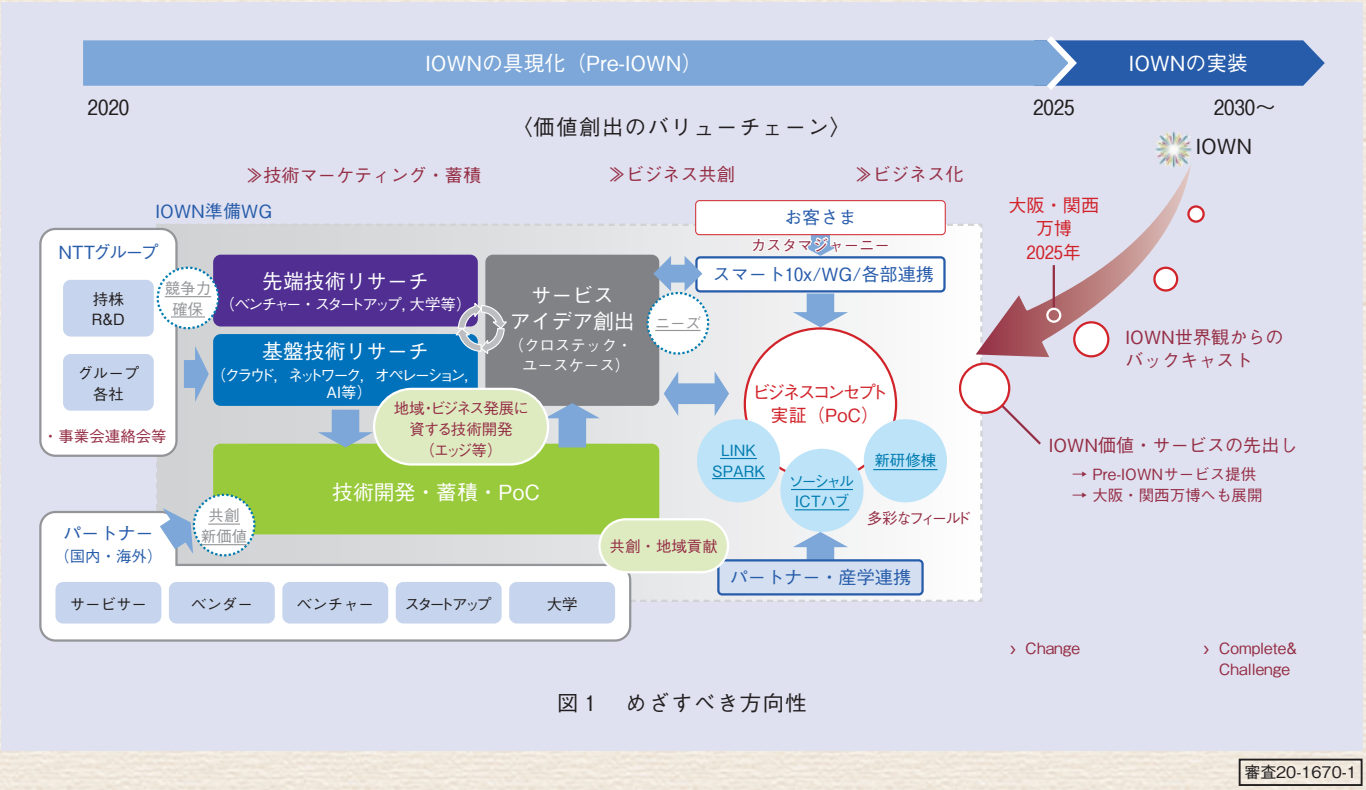


図1　めざすべき方向性

審査20-1670-1

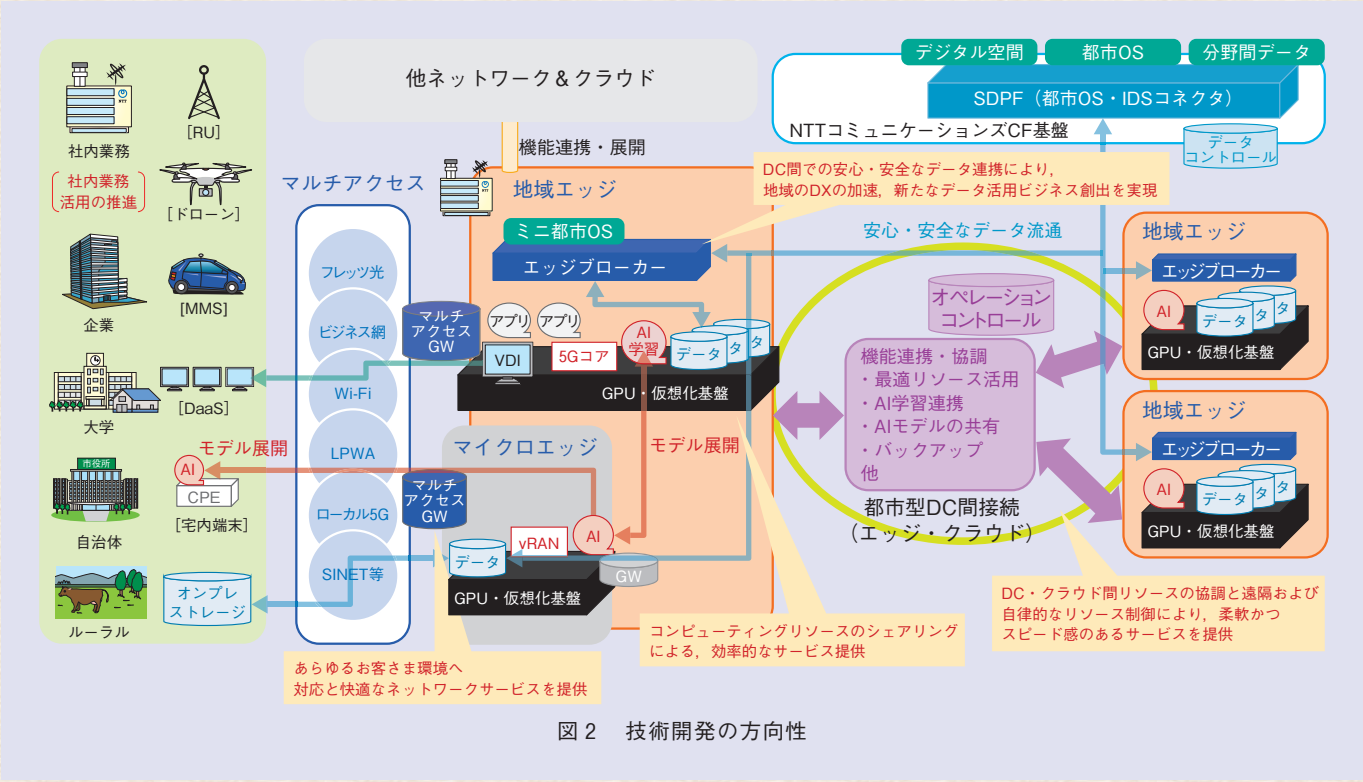


図２　技術開発の方向性

・特定の地域内において，より低遅延でよりセキュアにデータの処理を可能とする地域エッジコンピューティング技術（地域エッジ）．

これらのお客さまとの接点，データの入り口であるアクセスライン・エッジを強みとして快適なIoT（Internet of Things）プラットフォームの提供と新たな技術やリソースの提供による今までにない新たなデータ活用ビジネスの創出による地域社会の活性化をめざしています．

これらの技術開発に向けてはNTT研究所やNTTコミュニケーションズなどから積極的に技術を取り込むことでスピード感のあるサービス展開をめざし，NTT西日本ではこれらの取り組みをPre-IOWNと位置付け，2025年大阪・関西万博への展開をめざします．

お客さまニーズに柔軟に対応できるネットワークの構築

地域エッジを推進するうえで，ユースケースに応じて最適なアクセスラインに接続する必要がありますが，複数のユースケースに対応する中で，さまざまなアクセスライン，端末，アプリケーションが混在している環境の運用が必要になり，その環境下では柔軟にアクセスラインと，端末，アプリケーションを追加することができるマルチアクセスという概念が必要となります．マルチアクセスの実現に向けて，複数のネットワークとの接続を想定したネットワークスライシングと，さまざまなベンダーの端末との接続を想定したProgramming Protocol Independent Packet Processors（P4）の研究開発を進めています．

ネットワークスライシングは広域イーサネット網や地域IP網等，他ネットワークを重畳することをめざすものです．現在はネットワークごとに装置を設置しサービスの提供をしていますが，今後は，4K･8K映像配信，自動運転，遠隔医療，IoT等の発展に伴い，ネットワークの重畳化が求められます．そのためには，多様化する事業者（Middle B）のニーズに柔軟かつ迅速に対応できるアーキテクチャを構築しなければなりません．しかし，現在の方法では新サービスを導入するたびに新装置を導入する必要があり，期間およびコストがかかるという課題があります．こうした課題を解決するために，NTT西日本は，新たな転送技術として複数のネットワークを重畳するネットワークスライシング技術の１つであるセグメントルーティング（SR）の検討を進めてきました．SRの運用により，シンプルなネットワーク設計と柔軟なサービス提供が可能となります（**図３**）．NTT西日本は，すでにネットワークスライシング自体の機能，複数スライス時における影響，異メーカー間の接続等の試験を実施し，基本的な技術確認を完了していま

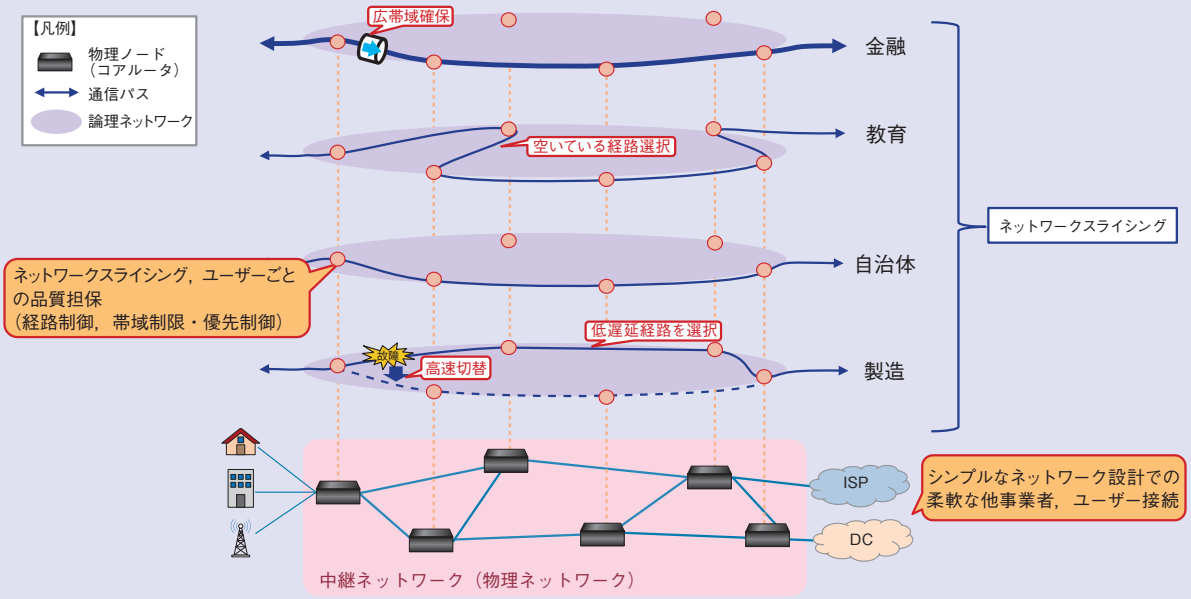


図 3　ネットワークスライシング

す（**図 4**）．今後，SRの他キャリアとの相互接続を含め，運用面での課題抽出・検討を行い，早期の商用導入をめざす予定です．

もう 1 つ技術開発を進めているものはP4です．P4とは，特定のメーカーに依存しない柔軟なネットワーク機能の追加を実現するため，ASIC（Application Specific Integrated Circuit）によるパケット転送処理をプログラム可能とする技術です．さまざまなものをシームレスにつなぎ，ユーザーの要望に応じた適切なネットワーク環境を提供するためには，固定網とは異なるプロトコルのネットワークとの連携，パケット制御が必要になります．しかし，データプレーン処理機能はルーター・スイッチメーカーの実装に依存しているうえ，メーカーの機能追加は大手ユーザーの意向に影響されるため，必要な機能を必要なタイミングで利用することは難しいものです．そこでNTT西日本では，P4を用いたキャリア網でのパケット制御の実現に取り組んでいます．

地域エッジの実現に向けた取り組み

現在，NTT西日本で技術開発を進めている地域エッジとは，特定の地域で生成されたデータを，その地域のデータセンタで集約，加工，解析などを実施することで，より早くより安心してさまざまなデータ活用ビジネスの創出を推進する技術です．例えば，防犯カメラなどの画像解析などには高価なGPUサーバーが必要となりますが，地域エッジにGPUサーバーが搭載されているとお客さま自身が高価なサーバーを準備することなく画像解析サービスを活用することができるようになります．NTT西日本では地域エッジのユースケースを検討しており，その 1 つとしてゲーミングエッジに関する実証実験を行いました．

近年，eスポーツの市場が拡大し，関心が高まっている一方で，快適にプレイできる環境を整備するには，高価なものでは数十万円規模のゲーミングPCを準備する必要がある，また，さまざまな場所で快適にプレイするためには，ゲーミングPCをプレイ場所ごとに用意しなければならないといった課題の解決に向けて，NTT西日本は，ゲーミングエッジ技術の実証実験を行いました．具体的には，熊本県の公立高校 2 校とともに，高速に画像を処理するGPU サーバーをNTT西日本のネットワーク上に設置し，ゲームの高精細な画像処理を行い，手元のPCに処理後の映像を転送しました．実験の結果，安価なPCでもゲーミングエッジ技術により低遅延でe スポーツを実施できることが確認することができました（**図 5**）．

また，地域エッジについては地域創生クラウドでの活用やヘルスケアに関する実証事業に取り組んでおり，GPUサーバー等を活用した地域エッジ技術のユースケースの検討を進めていきます．

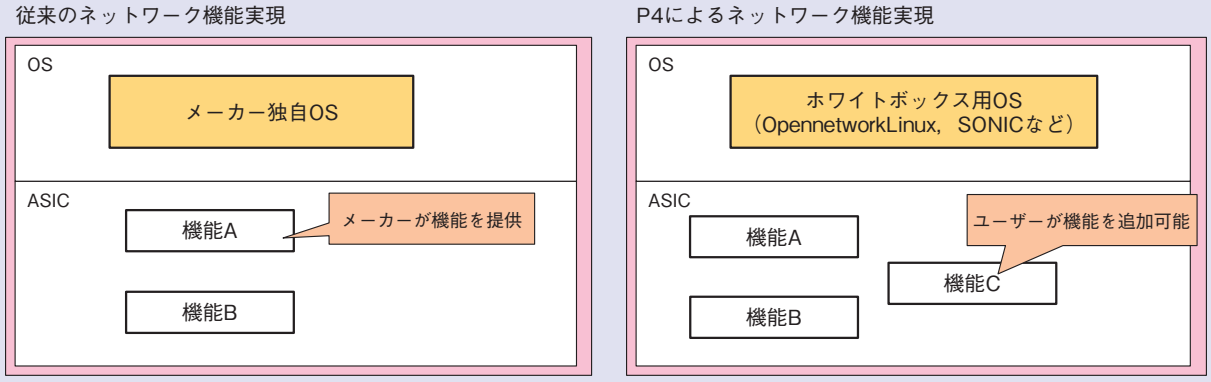


図 4　Programming Protocol-Independent Packet Processors（P4）

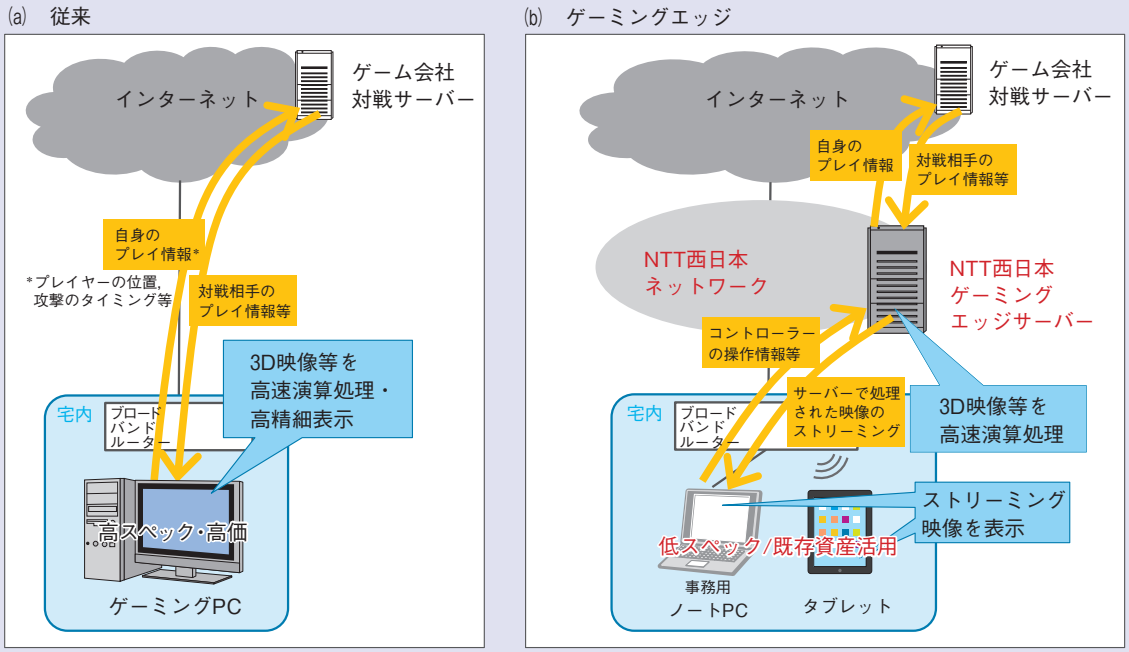


図 5　ゲーミングエッジ

今後の展開

このように，NTT西日本R&Dセンタでは，IOWN構想の実現に向けて，将来的に実用化が期待される新技術の開発や検証による知見の蓄積だけでなく，実際の社会課題やビジネス課題の解決に向けたトライアルや実フィールドでのPoC（Proof of Concept）にも積極的に取り組んでいます．今後も，こうした実際のユースケースへの適用を通じて，お客さまへの価値提供をめざしていきます．

◆問い合わせ先
NTT西日本
デジタル改革推進本部　技術革新部　R&Dセンタ　開発推進担当
TEL　06-6450-6451
E-mail　ks-jimu-rdc@west.ntt.co.jp
※電話番号をお確かめのうえ，お間違いのないようお願いいたします．

アジリティ高い組織経営を実現するための6つの奥義（Key Success Factor）

日々変化する顧客ニーズや新型コロナウイルス感染症等の不測の事態に対して，迅速に対応するためにアジリティの高い組織運営がますます求められています．一方，大企業の組織構造は「階層型」が一般的であり，階層型の組織の意思決定は遅く，「横」のつながりも希薄であり，価値の提供スピードという観点で課題があります．ここでは，大規模な組織でも変化に迅速に対応できるアジリティの高い組織運営を実現するための6つの奥義（Key Success Factor）を紹介します．

組織変革ニーズの高まり

「VUCA」の時代，つまり「未来が予測不可能な時代」に突入したことで，企業にとって「変化にどれだけ俊敏に対応できるか」ということが，非常に重要になってきました．企業は顧客・社会の課題を解決するための仮説となるプロダクトやサービスを繰り返し市場に提示し，データに基づいて顧客・社会の反応を把握しながら，迅速にプロダクトやサービス，あるいはその提供体制にフィードバックし続ける必要があります．従来の組織・体制，やり方では限界を感じている企業も多く，さまざまな企業で変化に適応する能力，組織運営のアジリティ向上のための組織変革が求められています．そこで，活用されているのがアジャイルの考え方です．従来は開発のプロセスを指すことが多かったキーワードでしたが，考え方を企業の営みや経営まで対象としてアジリティを向上させていくことが強くなってきています．アジャイル開発からアジャイル経営へ，といわれることも多くなっており，McKinsey & Companyが実施した『McKinsey Global Survey（ビジネスリーダー2,500人への調査）[1]』によると，回答者の75%の優先事項のトップ3に「組織のアジャイル化」が入っていることが報告されています．

顧客の抱えている課題・ニーズ

デジタルトランスフォーメーション*1（DX）推進の波が加速していく中で，顧客の抱えている課題・ニーズは多岐にわたります．“2025年の崖”[2]*2に代表される既存システムの課題や新規ビジネス・サービスの創出，組織のアジリティ向上に向けた仕組みづくり等の課題があり，各企業でDXがなかなか進まないという状況は経済産業省が2020年12月に公表した『DXレポート2』でも報告されています[3]．各企業の動向や案件状況を分析した結果，DX推進に向けた顧客の抱えている課題・ニーズは，**図1**のとおり7つのシナリオに大別されると考えています．

図1の7つのシナリオに対して，顧客の経営課題全体をとらえて，優先度が高いものから一気通貫で総体的に支援し，顧客と一緒にビジネスをつくり上げていくことが求められています．また，これからのデジタル時代を生き抜くためには，プロダクト・サービスを提供する「スピード」が最重要であり，この「スピード」を最大化できるような組織・チーム構造を築くことが求められています．

アジリティ高い組織経営を実現するための6つの奥義

本記事では，主に「DXに資する組織変革」というシナリオにフォーカスして，アジリティ高い組織経営を実現するための6つの奥義を紹介します．

① マインド：「アジャイルマインド」を持った組織にすることで，チームごとに素早く，かつ効率的に戦略・人材・プロセス・技術を形成できるため，市場の変化に迅速に対応できるだけでなく，全員の向かう方向性や目的が非常に明確となり，組織の安定性を保つことが可能となります．そのため，上位層から現場社員まで以下に示す「アジャイルマインド」を十分に浸透する必要があります．

・「現状維持」のマインドセットから「成長」へのマインドセットへと転換

・リーダーはリーンな思考方法*3を習得し自ら実践，チー

*1 デジタルトランスフォーメーション：企業がデータとデジタル技術を活用してビジネスモデルやプロセス，組織，企業文化等を変革し，競争上の優位性を確立すること．

*2 2025年の崖：経済産業省が公表した『DXレポート』で記載されている既存システムの老朽化や肥大化・複雑化，ブラックボックス化等の問題．

*3 リーンな思考方法：スモールスタートで価値ある最小のプロダクトを素早く提供しフィードバックをもらい改善していくこと（Fail First）．

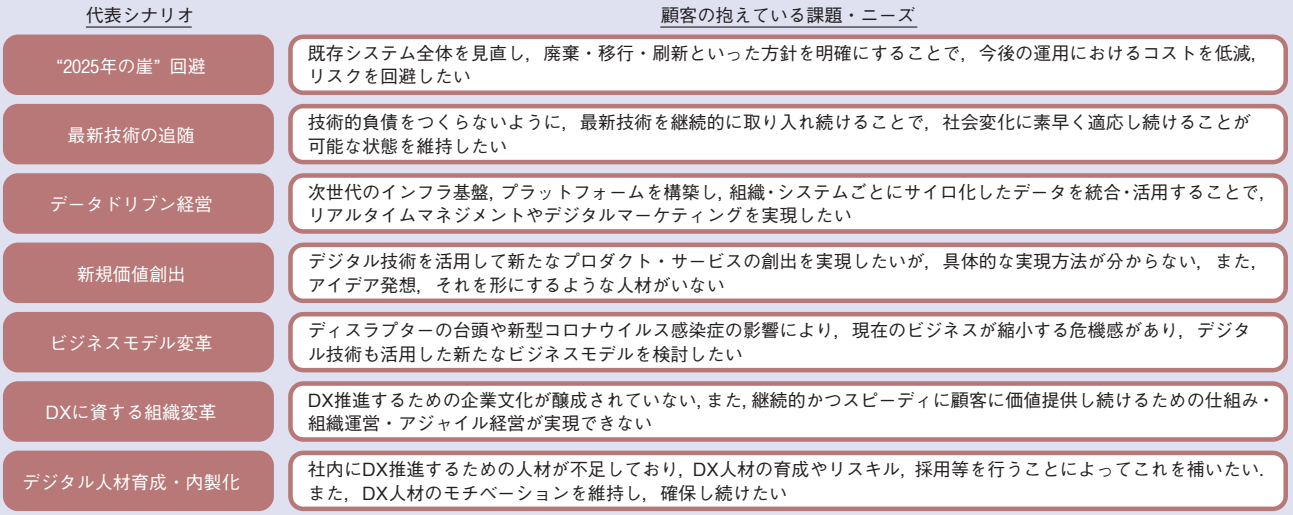


図1　DX推進に向けた7つの代表シナリオ

ムメンバーの手本に
・リーダーは変革の指導者として，変革ビジョンの提示，肯定的な動機付け，必要な組織内の連携と権限移譲，心理的安全性の担保を推進
・リーダーはチームの自己組織化のため，指示型ではなく支援型マネジメント
・チームメンバーは常に複数選択肢を持ち，さまざまな変化に柔軟な対応が必要

② プロセス：顧客ニーズの変化が激しいビジネス環境に適したプロセスとして当社が注目しているのがScrum*4およびScaled Agile Framework®(4)*5（SAFe®）です．SAFe®はScaled Agile Inc.が提供しており，NTTデータはGlobalパートナーを締結しています．まずはScrumを実行できるチームを構築し，実際のプロジェクトを通して小さな成功を積み重ね，アジリティを損なわずチーム数をスケールさせ，経営活動としっかりと同期を取りつつ価値をつくり上げていきます．

③ ツール：継続的に価値検証していくためには，コミュニケーションツールを含むDevOps*6環境と，エンドユーザからのフィードバックを基に，早いサイクルで改善し続けるためのデジタルプラットフォーム（クラウド・ファースト*7，マイクロサービス*8，完全自動化等）が必要となります．当社は，これらを実現するためのツール・プラットフォームを用意しており，最新の技術を積極的に取り込み，さまざまな外部サービスとの連携も可能とした基盤技術を利用し，短期間で安心・安全に価値検証・サービス提供を実現することができます．

④ ルール：DXを推進していく中での足かせや，社員のやる気の阻害要素となっている既存ルールを速やかに改定し，ガイドラインを提示，社内規定変更への働きかけを実施し，組織全体に浸透させていく必要があります．プロダクト・サービスの開発速度を高めるためには，意思決定の速度も最大化する必要があり，エスカレーションによる遅延を避けて，その場で判断を下せるように，意思決定・権限移譲のルールを整備する必要があります．

⑤ ロール：従来のシステム開発で定義されているロールとは別に，デジタル時代に必要とされるロール・人材像を定義し，研修等を通してその人材を育成し，体制を整備する必要があります．組織全体での大規模な変革には，高度な技術者が必要となるため，高度な技術者を社内外から集約させてモチベーション向上を図り，戦略的な調達と組織化を行う必要があります．また，チームをスケールする際は，縦ではなく横にスケー

*4 Scrum：アジャイル開発手法の1つでITシステムを反復的に開発するフレームワーク．
*5 Scaled Agile Framework：大規模なアジャイル開発手法の1つでSAFeと略され，システム開発だけではなく，経営・ビジネス領域を含みます．
*6 DevOps：開発（Development）と運用（Operations）を融合し，リリース頻度を向上させるためのソフトウェア開発手法の1つ．
*7 クラウド・ファースト：システム構築時にはさまざまなメリットを得られるクラウド利用を優先すべきという考え方．
*8 マイクロサービス：複数の小さなサービスをAPIによって連携させるアーキテクチャのこと．

ルさせ，全体統制を取るチームを横串で配置するような組織のデザインが重要となります．

⑥　ガバナンス：①～⑤の変革を着実に行うためには，ガバナンスが効いた体制・仕組みが必要であり，それにより組織運営の健全性や透明性，業務執行の効率性を確保できます．その実現方法の１つとして特区化があります．デジタル領域を特区化することで予算配分や関係組織のリソース配置（階層型とネットワーク型組織の融合）等を全体的に見直します．また，チャレンジできる場として新たなオフィスの開設や組織運営・チームパフォーマンスの可視化，人事評価の見直し等によりガバナンス強化につながります（**図２**）．

DXに資する組織変革の事例

■事例１（社内企画型案件）

⑴　課題・ニーズ

高コスト構造，システム数の増加，複雑化となってしまっている既存システムを刷新するとともに，新規サービスを迅速に提供できるようにシステムの構造の見直しに加えて，組織運営の変革も行い，組織のアジリティ向上を実現したいという課題・ニーズがあり．

⑵　実施内容

①　マインド：変革リーダーの下，研修等を通して「アジャイルマインド」の定着化を図り，全体戦略・方向性を社員全員に浸透させ，チャレンジ精神や成長へのマインドセットを醸成．

②　プロセス：１-２チームでのScrumから開始し，既存組織と切り離して大規模アジャイルのPoC（Proof of Concept）を実施．Scrumチームを拡大した後SAFeを導入し，経営・ビジネス領域まで拡大．

③　ツール：パブリック・プライベートクラウドをハイブリッドに活用し，最新技術を取り入れ，高セキュリティでアジリティの高い環境を導入し，業務のデジタル化，作業効率化を促進．

④　ルール：SAFeに合わせて社内ルールを見直し，意思決定スピードの向上を実現．組織運営情報可視化基盤を構築し，戦略変更とリソース同期の速度向上を実現．

⑤　ロール：SAFeで定義されているロールやGoogleが提唱している専門職であるSRE/CRE（Site Reliability Engineering/Customer Reliability Engineering）の人材像を定義し，それに適した人材育成を実施，チームパフォーマンスの可視化により改善活動を促進．

⑥　ガバナンス：既存とデジタルを切り離して特区化．働く環境についてもデジタルテクノロジを駆使し革新的な環境を提供する“場”を構築．

⑶　効果

デジタル人材，プロセス，ルール等をSAFeに合わせてサービス志向型組織に変革し，300名を超える体制で組織一体となったアジリティ高い組織経営を実現しました．また，事業運営にかかわる業務のデジタル化や最新技術の活用により，作業の効率化と組織のアジリティ向上に寄与するとともに，社員のエンゲージメント向上にも貢献しました（**図３**）．

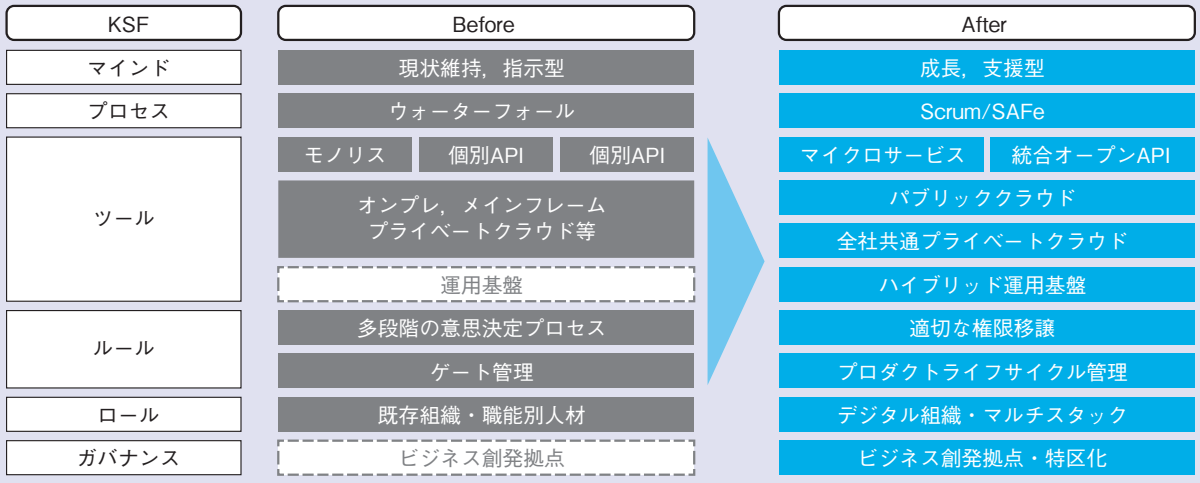


図２　アジリティの高いデジタル化組織へ

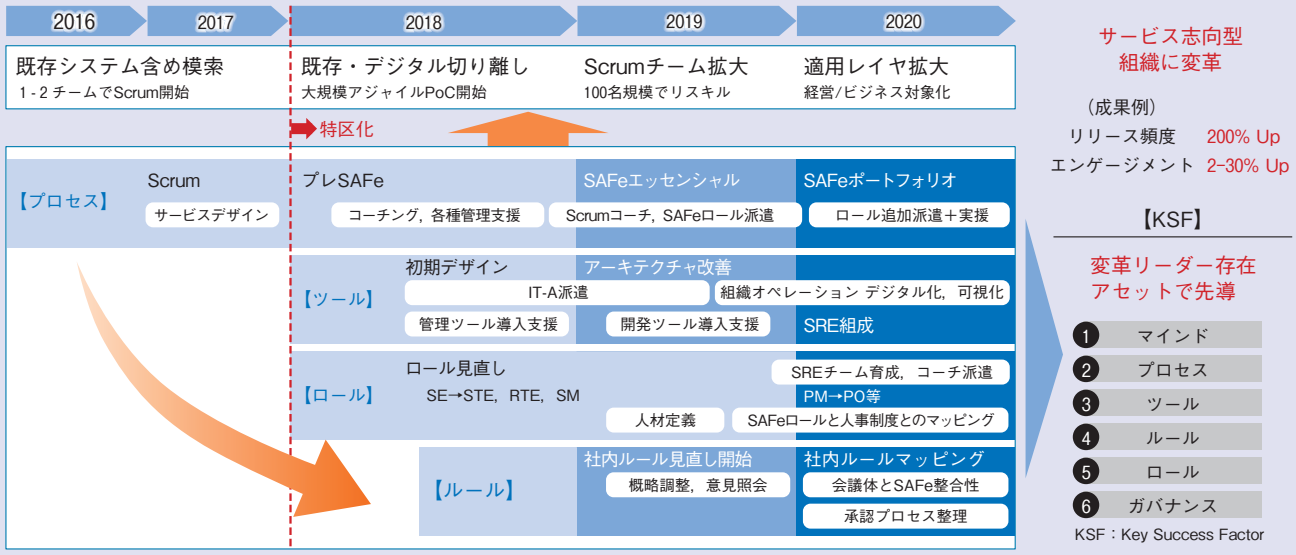


図 3　組織変革アプローチ

■事例 2（社外受託型案件）

⑴　課題・ニーズ

競合他社が次々とデジタルプロダクト・サービスを提供している中で，自社でも早く魅力的なサービスを創出したいが，VUCAな状況の中で，従来型の予測・計画・遂行の進め方に限界が来ているというボードメンバ含めた共通の課題認識があり．

⑵　取り組み内容

①　マインド：幹部向けの勉強会やトップ対談，変革エージェントへの教育を実施することにより，上位層の理解・承認を得るとともに，社員のアジャイルマインドへの意識改革を実施．

②　プロセス：開発の方法論のみではなく，意思決定方法等の社内ルール・組織面も含めたビジネスプロセスの変革検討およびその実践．

③　ツール：高速な価値開発を支えるプラットフォームの構築，既存資産にとらわれず，ゼロベースであるべきシステムアーキテクチャ・組織をデザイン．

④　ルール：社内ルールの抜本的な見直しを行い，費用とリソースの優先順位や配分の管理・意思決定スピードを向上．

⑤　ロール：人材育成指針の策定やSAFeロールも意識した人材像の定義，育成施策，評価制度等のタレントマネジメントの仕組みづくりを実施．

⑥　ガバナンス：既存組織とは切り離した出島戦略（特区化）をとり，横断的で一体的な体制を構築し，組織全体でのビジネスプロセスの高速化・柔軟性向上を実現．

⑶　効果

新ビジネスプロセスによるフロー改善（開発着手まで39%削減，9カ月→5.5カ月），DX人材制度試行適用（人材定義・採用・育成）．小さな成功の達成（1部門の特区化適用→拡大本格化）を実現しました．また，クラウドの徹底活用による開発アジリティ向上（1年の開発期間を3カ月短縮），スモールスタートで実績を積み重ねることで，成果を基にToBe像実現に向けたスケールアウトを現在も継続的に実施し，社員エンゲージメントも向上しています（**図 4**）．

今後の展望

顧客ニーズの多様化や不確実性の高いビジネス環境において，それらの変化に迅速に対応するための組織変革・アジリティ高い組織経営の実現に向けたアプローチについて解説しました．

NTTデータではDXに資する組織変革のニーズに対応するために，6つの奥義（Key Success Factor）の具体的な進め方やアウトプットをAltemista®＊9としてアセット化し，広く展開できるように整備を進めています．また，

＊9　Altemista®はNTTデータの登録商標，NTTデータのデジタル技術のケイパビリティを示すテクノロジブランド．

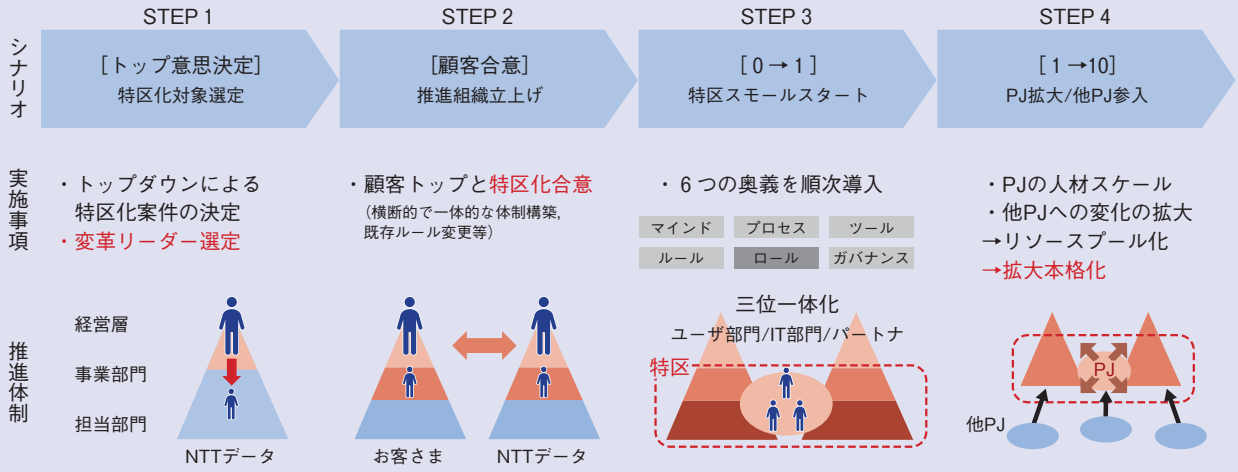


図4　特区化から拡大本格化

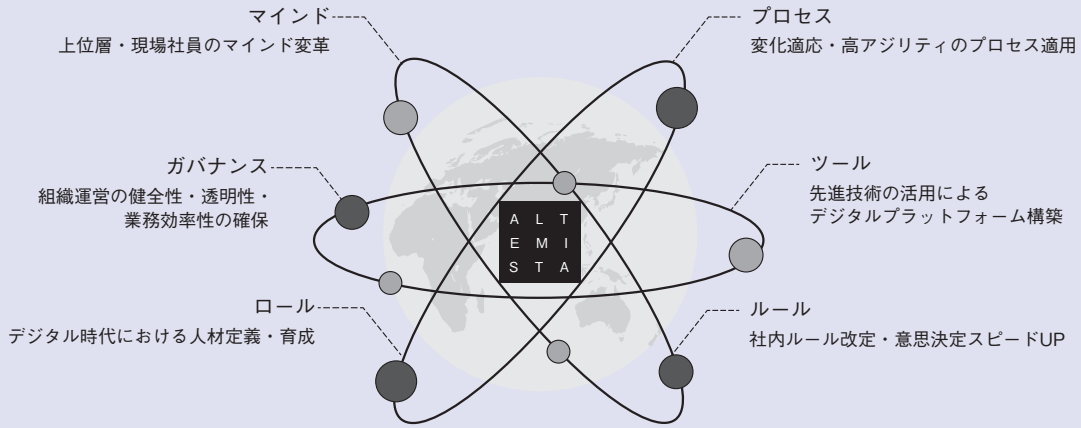


図5　アジリティ高い組織経営を実現するための6つの奥義（powered by Altemista®）

「顧客の抱えている課題・ニーズ」に記載しました7つの代表シナリオに対して，一気通貫でのトータルソリューションを整備し，信頼パートナーとして顧客と一緒に経営課題を解決し，ビジネスをつくり上げていく役割を担えるように，これからもNTTデータ自らが変革していきます（**図5**）．

■参考文献

⑴ https://www.mckinsey.com/~/media/McKinsey/Business%20Functions/Organization/Our%20Insights/Harnessing%20agile%20compendium/Harnessing-Agile-compendium-October-2018.ashx
⑵ https://www.meti.go.jp/press/2018/09/20180907010/20180907010.html
⑶ https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201228004/20201228004.html
⑷ https://www.scaledagileframework.com/

◆問い合わせ先

NTTデータ
技術革新統括本部 システム技術本部 デジタル技術部
TEL　050-5546-8809
FAX　03-3532-7730
E-mail　apcj@kits.nttdata.co.jp

Technical Solution
テクニカル ソリューション

最新の故障事例の紹介 ——設備の材料劣化に関するトラブル

通信設備は，安心・安全で安定した通信サービスを提供するために日々点検，保守・運用されています．NTT東日本 技術協力センタでは，このような通信設備に対し，経年劣化による故障や経年劣化だけでは説明できない特異故障について，材料的な観点から原因の究明と防止対策の提案を行っています．ここでは，最近発生した鋼管柱の特異的な腐食事例やNTTビルの搬入口の手摺り扉の腐食による故障事例について紹介します．

はじめに

NTTの通信ケーブルは，NTTビルからマンホールなどの地下設備を介して，電柱などの架空設備へ架設されユーザ宅へ敷設されます（**図1**）．NTTビル内の設備（NTT設備）や電柱等は，膨大な数量が日本全国に設置されており，腐食に起因する故障事例が発生しています．NTT東日本 技術協力センタ 材料技術担当では，腐食による特異故障の原因究明と再発防止策などの現場への提案を行っています．ここでは，近年のNTT設備における鋼管柱の特異的な腐食の事例やNTTビルの搬入口の手摺扉が腐食により破断した事例に関して，当センタの原因究明に向けた取り組みを紹介します．

鋼管柱の特異的な腐食事例

■設備の状況

今回紹介する特異的な腐食が確認された鋼管柱の現場の状況を**図2**に示します．鋼管柱の設置環境は，沿岸部から約10 kmで塩害の影響が小さいと考えられるエリアです．鋼管柱の外観は，鋼管柱の片面に地際部から全長にわたる表面錆（赤錆）が発生していました．さらに，赤錆は鋼管柱の南向きの風上側に発生しており，風下側には発生していませんでした．また，鋼管柱の頭部キャップには土砂が付着していました．

■腐食原因の調査

金属の腐食は，海塩粒子などの塩分が付着することで促進されます．そこで，鋼管柱表面を不織布（小津産業

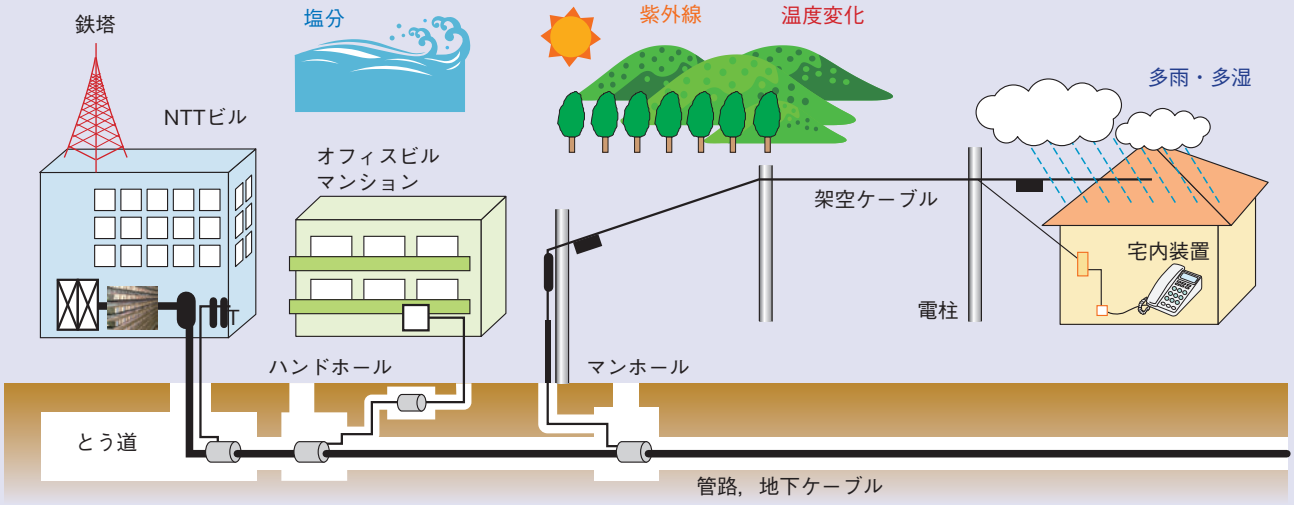


図1　NTTの通信設備と腐食劣化要因



全体（風上側）



風上側



風下側

図２　鋼管柱の腐食状況



図３　拭き取り試験の様子

社製ベンコット）で拭き取り，採取した表面付着物の種類や量を分析する「拭き取り試験」を実施しました（**図３**）．さらに付近の畑の土砂を回収することで，鋼管柱の付着物との比較を行いました．

イオンクロマトグラフにより，拭き取り試験で得られたサンプルと，回収した付近の畑の土壌のイオン種や付着量の分析をしました．その結果，表面付着物として金属腐食を促進させるイオン種である塩化物イオン，硫酸イオンや硝酸イオンを検出しました（**表１**）．また，これらのイオン種は，腐食面および非腐食面の両面で付着量に顕著な差異はなく，濃度も比較的低い数値を示しました．さらに，鋼管柱周囲の畑の２地点から採取した土

表１　鋼管柱の付着成分の分析結果

拭き取り部位	検出量（mg/m^2）*		
	塩化物イオン（Cl^-）	硫酸イオン（SO_4^{2-}）	硝酸イオン（NO_3^-）
風上・腐食面	26.7	23.3	6.12
風下・非腐食面	35.0	26.0	5.81
頭部キャップ	30.4	15.9	6.69

＊鋼管柱の単位表面積当りのイオンの検出量

表２　土壌の成分分析結果

分析個所	検出量（μg/g）*		
	塩化物イオン（Cl^-）	硫酸イオン（SO_4^{2-}）	硝酸イオン（NO_3^-）
土砂A	33.3	114	213
土砂B	未検出	39.4	43.3

＊鋼管柱周囲の畑から採取した土砂の単位重量当りのイオンの検出量

砂A，土砂Bからもほぼ同種のイオン成分を検出しました（**表２**）．なお，土砂Bにおいて塩化物イオンが未検出なのは，土砂Aの畑とは異なる作物の畑であったことから，異なる肥料や土質であったことが考えられます．表面付着物および土砂の分析結果から，鋼管柱表面や頭部キャップに畑の土砂が付着していることが推察されます．

次に，鋼管柱が設置されているエリアの気象条件を調べると，南からの風が年間平均風速約3.0m/sを超える強風エリアであり，沿岸部から約10 kmで塩害の影響が小さいと考えられます．設置されている鋼管柱は南からの強風にさらされており，今回腐食している面と一致することから，風によるなんらかの影響を受けているのではないかと考えられます．

■特異的な腐食事例の原因と今後の対策

鋼管柱の腐食を促進させる成分が，腐食面およびその裏面の非腐食面の両面で同程度の付着量であったことから，片面でのみ赤錆が発生する今回の事例の主要因ではないと考えられます．一方で，鋼管柱表面の腐食状況が部位によって異なることから，表面付着物以外の作用によって腐食が促進されたと推察されます．なお，表１に示す鋼管柱および頭部キャップの付着成分は，表２に示す周囲の畑の土砂と同種の成分が検出されたことから，鋼管柱には畑の土砂が付着していると考えられます．

以上より，腐食のメカニズムは鋼管柱の設置環境が南風を中心とした強風エリアであり，強風に巻き上げられ

た土や砂の粒子が風上側の鋼管柱表面に衝突することにより亜鉛めっきが摩耗して消失したため，風上側の鋼材表面のみで腐食が進行し，赤錆が発生したと推察されます（**図 4**）．今回の鋼管柱は，流体中に含まれる固体粒子などにより材料が摩耗・損傷される現象である「サンドエロージョン現象」により腐食が発生したことが示唆されます．

今回，調査を実施した鋼管柱の地際の防食塗装（タールエポキシ樹脂塗装）は，軽度の損耗程度であるため，現状では安全性にかかわる強度低下はないと考えられます．一方で，鋼管柱の片側全面にわたる表面錆の発生により，めっき部が消失していることから，将来的には腐食の進行が早まることが予想されるため，計画的な更改が必要となります．

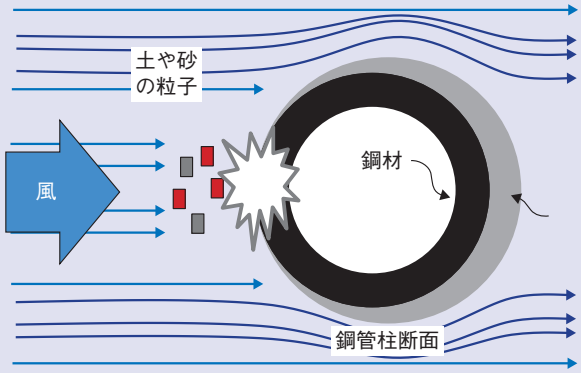


図 4　腐食のメカニズム

NTTビルの搬入口の手摺り扉の腐食破断事例

■設備の状況

NTTビルには，上層階に通信装置を搬入するために，搬入口が設置され，転落防止等のための手摺り扉が設置されています．今回，あるNTTビルへの機器搬入時に手摺り扉を開けようとした際に，手摺り扉の蝶番部分が破断して，手摺り扉が外れる事例がありました．

■破断面分析および破断再現試験

手摺り扉の構造と破損した蝶番の写真を**図 5** に示します．蝶番の上部側（写真A，B）の心棒の破断面は発錆しており，破断後一定の時間が経過していたと考えられます．一方，蝶番の下部側（写真C，D）の心棒の破断面は金属光沢が残っていたため，今回，手摺り扉を開けたときにねじ切れたものと考えられます．

現場より撤去した蝶番の破断面の観察を走査型電子顕微鏡（SEM）により実施しました．破断面A，Bは発錆が進行しており，破断面表面を観察することができませんでしたが，破断面CのSEM像では，金属に過負荷がかかり破断した際にみられる特徴的な断面形状である伸長ディンプルが観察されました（**図 6**）．また，下部側の蝶番を分解すると，蝶番と心棒との間に発錆がみられました．

心棒の破断原因を追究するために，現場より撤去した蝶番の心棒の直径（10 mm）と同様の軟鋼製のボルト

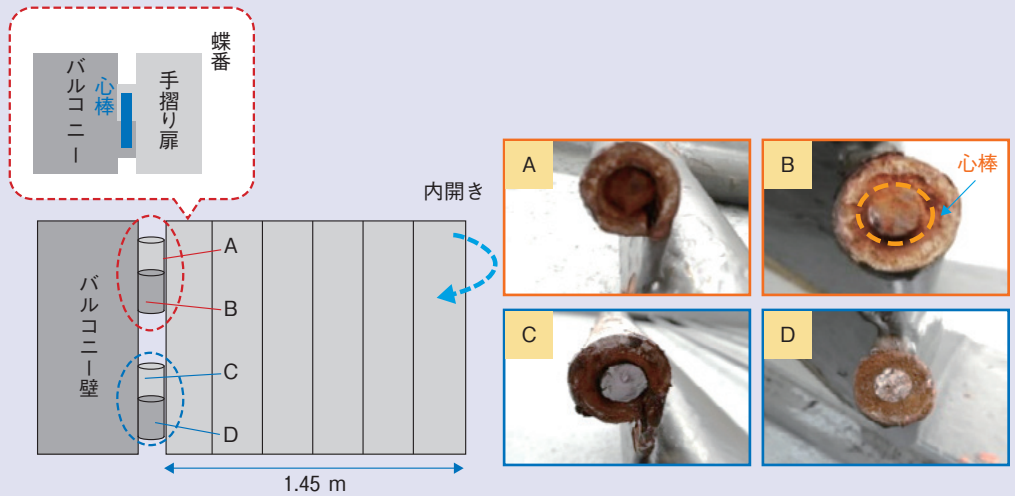


図 5　手摺り扉の構造（ビル側から見た場合）と破損した蝶番の破断面

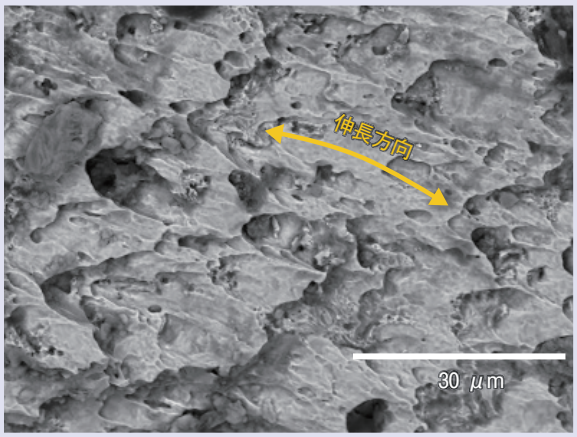


図 6　破断面CのSEM像

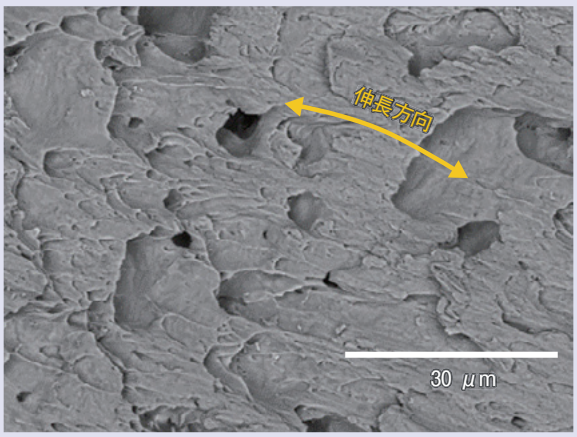


図 7　ねじ切り後の破断面のSEM像

をねじ切る破断再現試験を行い，その際に心棒にかかるトルクの計測および破断面の観察を行いました．その結果，約100 N·mのトルクで心棒が破断しました．また，ねじ切り後の心棒の破断面をSEM観察した結果，破断面Cと類似した伸長ディンプルが確認されました（**図 7**）．

■破断の原因の推定

上記の破断面の観察や破断再現試験の結果より，手摺り扉の破損原因は以下のステップで進行したと推定しました．

① 当該ビルは海岸からも離れており塩害による腐食の影響が小さいと考えられる地域ではあるが，上部の蝶番と心棒はすき間に滞留した水分の影響で，経年によって腐食が進行し，固着した状況で利用されていたと考えられる．また破断面から扉上部の心棒（A，B）は，事例発生当日よりも以前に破断していたものと考えられる．

② 時間経過とともに下側の扉の蝶番と心棒も腐食で固着したため，事例発生当日には，扉がスムーズに開閉できなかった．

③ 開閉しづらくなった扉を作業者が強い力で開けようとして，破断トルクを上回ったため下部側心棒（C，D）がねじ切れた．

手摺り扉など使用頻度が少なく蝶番のような目視で確認できない構造を有する設備においては，気付かないうちに腐食が進行していることが考えられます．その場合，無理に扉の開閉を実施すると，蝶番のような可動部位が破断し，上層階から扉が落下するなどの２次災害等が起こる可能性があります．そのため，使用頻度が少なく，腐食が予想される設備については，使用する際に点検を実施し，扉が開きにくいなどの不具合があった場合は，慎重に開閉するとともに，交換などの適切な措置が必要になります．

今後の展望

今回紹介したように，通信設備はさまざまな環境に設置されることや，長年にわたり利用することなどから，金属，プラスチックなどの材料が劣化し，想定していなかった故障が発生することがあります．そのため，長く安全に設備を利用するためには，日々の点検や利用前の点検をしっかりと行うことが必要です．技術協力センタ材料技術担当では，設備の長寿命化や事故防止のために，材料の劣化原因の究明や対策方法を立案し，現場にフィードバックしています．これまで56年以上にわたり行ってきた技術協力活動で蓄積された知識と経験を基に，通信設備の信頼性向上や故障の早期解決だけでなく，新たな技術への対応や保守コスト低減に向けた取り組みを進めていきます．

◆問い合わせ先
NTT東日本
ネットワーク事業推進本部　サービス運営部
技術協力センタ　材料技術担当
TEL　03-5480-3703
E-mail　zairyo-ml @ east.ntt.co.jp

ISSN 0915-2318 平成2年3月5日第三種郵便物認可
令和3年4月1日発行　毎月1回1日発行　第33巻第4号（通巻385号）

NTT 技術ジャーナル

4 APRIL 2021
Vol.33 No.4

特集

超レジリエントスマートシティの実現に向けたNTT宇宙環境エネルギー研究所の挑戦

人と社会を支えるヘルスケアデバイス・インフラメンテナンス技術

安心・安全な社会実現に貢献するための暗号・セキュリティ技術に関する研究開発

トップインタビュー

藤原 遠　NTTデータ 代表取締役副社長執行役員

from NTT西日本

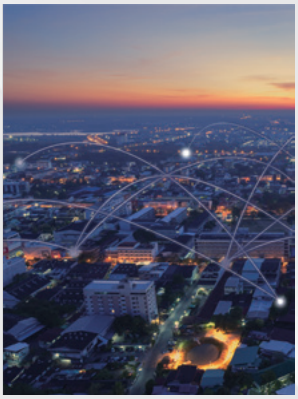
IOWN時代を見据えたNTT西日本の研究開発の取り組み

from NTTデータ

アジリティ高い組織経営を実現するための6つの奥義（Key Success Factor）

特別連載

ムーンショット・エフェクト――NTT研究所の技術レガシー



NTT
技術ジャーナル

4 APRIL 2021
Vol.33 No.4

CONTENTS

4 トップインタビュー
Re-Design by Digital —— デジタルによる社会の再構築　多様性時代における価値観とフィロソフィの共有
藤原 遠　NTTデータ 代表取締役副社長執行役員



10 特集
超レジリエントスマートシティの実現に向けたNTT宇宙環境エネルギー研究所の挑戦

12 宇宙視点から地球環境の未来を革新させる技術の研究開発

16 環境負荷ゼロに貢献する次世代エネルギー活用技術とCO_2変換技術

21 環境負荷ゼロの実現に向けた，エネルギー流通基盤技術

26 持続可能かつ包摂的な社会の実現をめざしたESG経営科学技術

31 安心・安全に暮らすためのプロアクティブ環境適応技術

35 主役登場　花岡 直樹
(NTT宇宙環境エネルギー研究所)



40 特集
人と社会を支えるヘルスケアデバイス・インフラメンテナンス技術

42 持続可能な社会に向けたデバイス技術が切り拓く未来

47 より安心して働ける作業現場の実現に向けた体調管理技術

51 光音響計測技術を活用した非侵襲生体情報センシング

56 ハイパワーレーザデバイスを用いた錆取り技術の実現に向けて

59 コンクリート電柱内鉄筋の水素脆化予測技術

63 主役登場　高河原 和彦
(NTTデバイスイノベーションセンタ)





64 特集

安心・安全な社会実現に貢献するための暗号・セキュリティ技術に関する研究開発

66 安心・安全を実現するテクノロジの創出に向けたセキュリティR&Dの取り組み

70 安心・安全な価値創造プロセスを実現するデータ流通・利活用技術

75 増え続けるオペレーションコストの問題を解決し，被害を極小化する技術の確立と展開

79 量子情報処理によるセキュリティと量子情報のデータ保護

84 主役登場　岩村 誠（NTTセキュアプラットフォーム研究所）

85 特別連載　ムーンショット・エフェクト——NTT研究所の技術レガシー

第8回　シャツが生体情報計測のIoTセンサに

89 from★NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル

1Gから5Gに至るモバイルコミュニケーションの進化を支えた研究開発用「電測車」

99 挑戦する研究者たち

永田 昌明
NTTコミュニケーション科学基礎研究所
上席特別研究員
DIFFERENTはほめ言葉である．
未来を論理的に語る訓練を心掛けよう



36 明日のトップランナー

秋山 一也
NTT宇宙環境エネルギー研究所 グループリーダ
「核融合炉の最適オペレーション技術」
「宇宙太陽光発電」



105 from NTT西日本

IOWN時代を見据えたNTT西日本の研究開発の取り組み

109 from NTTデータ

アジリティ高い組織経営を実現するための6つの奥義（Key Success Factor）

114 テクニカルソリューション

最新の故障事例の紹介
——設備の材料劣化に関するトラブル

読者の声 ……118

5月号予定

編集後記

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

本誌掲載内容についての
ご意見，ご要望，お問い合わせ先

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

本誌ご購読のお申し込み，
お問い合わせ先

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

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

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

©日本電信電話株式会社2021
●本誌掲載記事の無断転載を禁じます●
※本誌に掲載されている社名，製品およびソフトウェアなどの名称は，各社の商標または登録商標です．

／ト／ッ／プ／イ／ン／タ／ビ／ュ／ー／

View from the Top



NTTデータ
代表取締役副社長執行役員

藤原（ふじわら）　遠（とおし）

PROFILE：
1985年日本電信電話入社．1988年NTTデータ通信，2014年NTTデータ執行役員 第四金融事業本部長，2017年取締役常務執行役員，2018年代表取締役副社長 金融分野・欧米分野・グローバルマーケティング担当を経て，2020年6月より現職．

Re-Design by Digital
——デジタルによる社会の再構築
多様性時代における
価値観とフィロソフィの共有

新型コロナウイルスの感染拡大は社会に大きな変革をもたらしました．リモート生活が常態化した今，不確実な状況に適応するサプライチェーン，安心・安全なデータ連携，ビジネス環境を支えるITインフラやセキュリティに期待が高まります．より豊かで調和のとれた社会の実現に貢献することを企業理念に掲げるNTTデータ．中期経営計画とトップの心構えを藤原遠NTTデータ代表取締役副社長執行役員に伺いました．

質を伴った成長を重要視すべき

今年度は中期経営計画の締めくくりの年ですね．概観をお聞かせいただけますか．

NTTデータは15年ほど前からグローバル展開を強化してきました．欧米を手始めに徐々に経験値を積んで大型M&Aを実現し，53の国・地域で事業を運営しています．連結売上高は2019年度で約2兆2700億円，13万人の社員のうち，約3分の2が外国籍で，その中で一番多いのがインド国籍です．

こうした環境の中，2019年からの中期経営計画は，2025年ごろのGlobal 3rd Stage達成に向けて極めて重要な3年間と位置付けています．「変わらぬ信念，変える勇気によってグローバルで質の伴った成長」をめざして，Growth，Earnings，Transformation，Synergyの4つの観点に取り組んでいます(1)．グローバル化をさらに進め，社会のデジタル化は加速するという見通しの下，資源を集中して新しい技術分野での強みづくりを進めています．

キーワードは「質を伴った成長」です．言い換えれば，利益の「額」だけではなく，「率」を重要視しています．ビジネスのボリュームが増えれば売上「額」は増えます．一方で利益「率」増は，お客さまからの評価の高さであると考えています．お客さまに，NTTデータが提供するサービスにはそれだけの価値があると認めていただいたからこそといえるからです．お客さまの評価は私たちの



モチベーション向上にもつながりますから，デジタルを通じた顧客価値の高度化を今後も追求していきたいと考えます．

さて，2021年度は中期経営計画，３年間の締めくくりの年です．１年目の2019年度は計画を順調に遂行してきましたが，ご存じのとおり２年目の2020年度は新型コロナウイルスの感染拡大が社会に大きな影響を与えました．NTTデータでも各グローバル拠点のトップたちと相当な時間をかけて実情の把握と対策の検討を重ねてきました．日本以上に海外は大打撃を受け，欧米では今も約95%の社員が在宅勤務を余儀なくされる等の厳しい状況にあります．

例年５月ごろに前年度の実績と今年度の計画についてご報告しておりますが，昨年５月の期末決算発表当時は緊急事態宣言中でもあり，計画や見通しを報告することは非常に難しい状況にありました．結果的に８月に延期して報告させていただいた通期業績目標は，第３四半期の決算発表時点では達成できる見通しです．これは，なによりも現場の頑張りのおかげですが，新型コロナウイルスによる世の中の変化を，ある意味追い風ととらえて取り組んできた結果，達成できたのではないかとも考えています．

新型コロナウイルスの世界規模の感染拡大は従来のビジネスを大きく変えましたね．

私たちが提供するサービスが停止してしまえば，お客さまのみならず社会に影響を与えます．最初の緊急事態宣言のときは「この状況で本当にサービス継続できるのか」と懸念しましたが，とにかくできることをやり続けました．

パンデミック当初は，アウトソーシングを手掛ける海外の社員が出社できなくても，あるいは，お客さまのもとへお伺いできない状況下でも，サービスを提供し続けられるよう必死で対応しました．中には，国としての環境が満足に整わない中でも，苦労して環境を整えて在宅勤務をしているところもあります．今だから落ち着いて話せますが，当時は世界中の全社員が懸命に環境を整備し，ビジネスを継続するための体制を整えてくれたのです．

大きな支障もなく事業を継続することができたのは，日本を含む世界各国のお客さまのご理解と，現場の社員１人ひとりの努力の結果だと思っています．お客さまにも社員にも心から感謝しています．

前述のとおり，新型コロナウイルスの感染拡大は，社会全体のあり方まで変え，その結果経済的な向かい風ともいえる部分がクローズアップされがちですが，デジタル化にとっては追い風でもありました．新型コロナウイルスの感染拡大によって，強制的にリモート環境整備が加速し，ニーズや課題も明らかになりました．私たちがこれまで積み上げてきたノウハウや，NTTグループ全体のケイパビリティである技術が貢献できる領域が広がってきたのではないかと考えます．

特に１年前と比べて，デジタル化はそのニーズが一気に高まっており，さらに強化していく必要があります．デジタル庁が設立されることとなり，官公庁のデジタル化，そして日本社会のデジタル化に臨む国家的な取り組みは加速すると思われます．これまで官公庁，金融機関などのデジタル化，決済システムなどのインフラ整備を数多く担当させていただいた私たちの強みを活かして，デジタル技術を駆使した社会全体をつなぐ仕掛けづくりに，積極的に取り組んでいきたいと考えています．

価値観やフィロソフィは共振するまで伝え続け，「着眼大局，着手小局」で進める

世界各国で多くの社員が団結して未曾有の事態に臨まれたのですね．

53の国と地域，13万人の社員の心を１つにしてビジネスを展開するために，私は常に利益目標だけではなく，多様性を重要視しつつ，価値観やフィロソフィを共有することが大切であると，一貫して伝え続けています．特にお客さまとの間に「Long-Term Relationships（長期にわたる揺るぎない関係性）」を築くことを大切にしています．一般的に，急成長するIT業界に世の中が抱く印象は「短い期間で技術を売るだけ」というのが多いかもしれませんが，私たちは違います．お客さまと長くお付き合いする，しっかりとした関係性を築くことを重要視しているのです．お付き合いの過程には，お客さまが苦しいときも私たちが辛いときもありますが，互いに理解し合えれば苦難も乗り越えられると信じています．これらは，会社創立30周年を機に掲げたNTTデータのグループビジョン「Trusted Global Innovator」を裏打ちする姿勢です．特にTrusted，つまりお客さまとの信頼関係を築くためにはLong-Term Relationshipsは欠かせません．M&A等により外国籍企業に私たちの傘下に入っていただく際にはこうしたフィロソフィや価値観を共有できるかを確認しています．



グループビジョンの達成にあたって，グループ全社員で共有し，社員が日々実践している価値観は次の３つです．１番目はClients First．私たちが手掛けるシステムインテグレーションはお客さまの考え方や真の目的を咀嚼して，中長期的な視野からお客さまにとっての最善策を提案することです．例えお客さまからの要望であったとしても，将来的にお客さまのプラスにならないと判断したことは，はっきりとそれを伝え，代替策を示します．２番目はForesight，技術や社会の将来を見据え，必要な技術やサービスを社会やお客さまに提案することです．一例として毎年，NTT DATA Technology Foresightとして，先進技術や社会動向の調査分析によるトレンド予測を公開しています．お客さまからも進むべく道の提案を期待され続けるような存在でありたいと考えています．３番目はTeamworkです．私たちだけでできることには限界があり，特に規模の大きな事業は社内だけではなく，お客さまと一体となって築いていかなければ成し遂げられません．難局をともに乗り越えていくことで強固な関係性も築き上げられ，ともに戦いに挑んだ同志という認識も生まれます．私がまだ課長だったころのお客さまとは今でも強い絆で結ばれており，お互いの立場は変わっても20数年来のお付き合いが続いています．こうしたかかわりは個人としての資産だけではなく企業としての資産でもあります．

理念を現実のものとするために，大切にしていることがあれば教えてください．

私は，トップには明確なビジョンを持ち，それを共有するために情報を発信し，周囲を巻き込んでいくことや，社員にビジョンを理解してもらうだけではなく，共振するまで伝え続けてベクトルを合わせることが求められていると思います．社員が自然にそれを語れるようになるまでです．

また，理念は素晴らしくても現実は思いどおりに進まないことはあります．国内外の社員には次の３つを大切にしてほしいと話しています．１番目は「Interactive Communication：双方向コミュニケーション」です．コミュニケーションは相互に行われているかに留意することです．時折「それは伝えましたよね？」といった受け手の理解を意識しない，あるいは耳の痛い話は聞かないワンウェイなコミュニケーションをしてしまうことがありますが，相互にコミュニケーションを図ることを大切にしたいと考えます．２番目は「Mutual Respects：相互の尊重」です．発注者と受注者という立場には，本来，上下関係はないはずですが，時に誤解してしまうことがあります．「互いにプロとしてリスペクトし合いましょう」と，私たちが率先して示すことで相手が言いづらい話も聞かせ



てくれることがあります．3番目は「Passion and Perseverance：やりぬく姿勢」です．リーダーが覚悟をメンバーに示すことは，彼らの安心感ややる気を担保することにつながるため非常に重要だと考えています．正直なところ，意思表明はドキドキしますが，プロジェクトを終えたときに「やはりこれで良かったのだ」と実感しますし，「あの意思表明に心を打たれました」とメッセージが届いた際は，メンバーと共感できたと嬉しく思いました．

そして，私は「着眼大局，着手小局」をモットーに掲げています．常に社会の動向を広い視野を持って眺め，社会やお客さまがNTTデータに期待されていることを，できる限り模索しています．私は経営戦略，人事戦略と同時に技術戦略の責任者でもありますから，技術の発展を通じた社会貢献を追究しながら，大局観を持って技術を活かし，NTTデータを強い会社に成長させることを意識しています．さらにNTTデータらしいグローバルマネジメントを常に念頭に置いています．技術開発力，お客さまとの接点の各レイヤにおいて，NTTデータグループの共通財産を活かして事業を進めていきたいと考えています．

「三方痛し」で信頼関係を確固たるものにする

ところで，藤原副社長はNTT民営化1年目に入社され，NTTデータの発展とともに歩んでこられたのですね．

1985年の入社式はダイナミックループのお披露目を兼ねて行われ，大型ディスプレイに映るループを眺めたことを今でも覚えています．

1988年にはMBA（経営学修士号）取得のために米国留学をさせていただきました．当時米国では技術を十分に理解した経営の重要性が議論されており，私が留学したコーネル大学でもエンジニアリングと経営学のジョイントプログラムを検討していました．MOT（技術経営修士）の原点となる考え方でしょうね．私を含め，各国から技術の専門性をバックグラウンドとする留学生が選抜され，MBAとME（工学修士号）のダブルディグリー（2つの学位）を2年間で修了するというハードな時間を過ごしました．

入社以来，35年の間には何度も苦しい時期がありました．私は日本の金融機関向けシステム開発に多く携わってきましたが，障害が発生すると業務の遂行に致命的な悪影響が出るほど重要（ミッションクリティカル）なシステムを担当させていただいたときのことです．ミッションクリティカルなシステムを構築するときは手堅い手段をとるのが王道なのですが，お客さまも私たちも20年，30年先を見据えたシステムを構築することで合意し，先進的な技術を積極的に取り入れようとかなり大胆な決断をしました．

各レイヤに最先端の技術を駆使したシステムとしただけに，技術的な課題が山積みの状況が続きました．先の見えない状況が続く中，迫りくる期限に向けて社員は外資系ベンダとの丁々発止で疲弊していきます．私は最後までやり抜くと宣言し，ステークホルダと調整を図ろうと必死で「痛み分け」のできる可能性を探りました．時には膝を突き合わせて議論し，硬軟織り交ぜて何とか信頼関係を築き，お互いの譲れるところ，譲れないところを確認しつつ，プロジェクト全体のベクトルをそろえることができたのです．こうした経験もあって私は「三方痛し」，互いが少しずつ我慢をしながらでも前に進んでいける関係性を大切にしています．そして最後までやり抜く姿勢を見せることの重要性も実感しました．

技術分野における今後の展開と技術者の皆さんに向けて一言お願いします．

技術のレイヤでは，AI（人工知能）やBlockchain，そしてSoftware Engineering等の技術を結集して私たちの強みをつくっていきたいのです．これに関しては中期経営計画として，「グローバルデジタルオファリングの拡充」の施策の1つとして，技術集約拠点（CoE：Center of Excellence）の拡充を掲げています．これは，NTTデータグループの世界中に広がるネットワークを活かし，グローバル横断で知識の集約，トレーニング，技術支援，アセット提供等を展開し，お客さまのデジタルトランスフォーメーションに貢献していく取り組みです．これまでBlockchain，Digital Design，Agile/DevOps，AIの4つの領域において活動を進めてきましたが，さらにIoT，Intelligent Automation，Software Engineering Automationを追加し，デジタル化に必要不可欠で当社が差別化すべき先進技術分野のCoEを設立しました．これも着眼大局，着手小局の視点で，すべての課題に同時に取り組むのは難しいですから，着手すべきことを絞り込み，徹底して取り組んでいきます．

そして，技術者の皆さん．技術は世界の共通言語であると同時にご自身の強みです．どんどん出てくる新しい技術に関心を持つことも重要ですが，ご自身の核となる専門性を持ち，それを物差しに活躍できるといいですね．あるとき，電気工学の専門家の方が，揉め事を「ここには抵抗回路があるんだね」等と表現するのを聞いて，思わず感心してしまいました．皆さんきっとご自身の得意な技術はお持ちでしょうから，それを磨き上げ，新しい何かを上乗せしたり幅出ししたりする努力を最大限していただきたいと思います．私自身も新しい積み上げのために，分からないことは，恥ずかしがらずに若手社員に教えてもらったりしています．若手社員のレクチャーは刺激的で楽しいです．技術者としての研鑽は，コツコツ積み上げていかなければならず時間もかかりますが，しっかりと重ねていきたいですね．

（インタビュー：外川智恵/撮影：大野真也）

■参考文献

(1) https://www.nttdata.com/jp/ja/ir/management/plan/

※インタビューは距離を取りながら，アクリル板越しに行いました．

インタビューを終えて

分刻みのスケジュールで働くトップにお話を伺うときは1秒でもその時間を無駄にしないようにスタッフ一同，万全の体制でお迎えします．ところが藤原副社長はお約束の時間前にインタビュー会場に到着され，まだ準備の最中にもかかわらず，時間を共有してくださいました．技術者であったお父さまのお話やバックパック1つで欧州を旅行中に寝台列車で財布泥棒の難を逃れた笑い話，そして留学時代のお話まで，書ききれなかったたくさんのエピソードを朗らかに語られ，私たちをリラックスさせてくれました．

また，副社長のご著書『サステナベーション』はコロナ禍にあった2020年6月に上梓されました．持続可能な社会は常に変化し続けることで永続性を確保できると結ばれた著書には，インタビューで伺った副社長のお考えが事例とともに凝縮されており，まさに羅針盤となる一冊です．藤原副社長のご発言を支える綿密な調査分析力に圧倒されます．

こうした明るく朗らかな語らいの時間や精緻な分析を基に執筆されたご著書を手にして，改めて副社長が多くの方を魅了してこられたことが分かりました．物事をなすとき，遠回りをしても正しい道を歩んでほしいという願いが込められた「遠」という副社長のお名前に，名は体を表すということわざを実感したひと時でした．



特集

超レジリエントスマートシティの実現に向けたNTT宇宙環境エネルギー研究所の挑戦

NTT Space Environment and Energy Laboratories

本特集では,地球環境の再生と持続可能かつ包摂的な社会の実現に向けた革新的技術の創出を目的に，2020年7月に誕生したNTT宇宙環境エネルギー研究所のさまざまな取り組みについて紹介する.



宇宙視点から地球環境の未来を革新させる技術の研究開発 12

NTT宇宙環境エネルギー研究所で取り組んでいる「環境負荷ゼロ研究プロジェクト」「レジリエント環境適応研究プロジェクト」について概説する.

環境負荷ゼロに貢献する次世代エネルギー活用技術とCO_2変換技術 16

環境負荷ゼロの実現に向けた，次世代エネルギー活用技術と，CO_2を効果的に固定し，事業活動トータルでの排出量をゼロ以下にするためのCO_2変換技術について紹介する.

環境負荷ゼロの実現に向けた，エネルギー流通基盤技術 21

再生可能エネルギーを余すことなく活用する仮想エネルギー需給制御技術と，商用電力からの供給が途絶えても安定した電力を地域に供給する直流グリッドをベースとした次世代エネルギー供給技術について紹介する.

持続可能かつ包摂的な社会の実現をめざしたESG経営科学技術 26

妨害感の低減と確実な閲覧を両立する情報表示方法として，情報の閲覧を強制されつつも，自ら選んで閲覧したと感じさせるインタフェースについて紹介する.

安心・安全に暮らすためのプロアクティブ環境適応技術 31

さまざまな影響を予測し，プロアクティブに対応し，人類が適応・受容することでレジリエントな社会を実現するための環境適応技術について紹介する.

主役登場 35

花岡 直樹（NTT宇宙環境エネルギー研究所）
環境負荷ゼロのエネルギーネットワークをめざして

宇宙視点から地球環境の未来を革新させる技術の研究開発

NTT宇宙環境エネルギー研究所は，地球環境の再生と持続可能かつ包摂的な社会の実現に向けた革新的技術の創出を目的に，2020年7月に誕生した新しい研究所です．NTTの研究所で初めて「宇宙」という名前が付いた研究所ですが，宇宙そのものの研究ではなく，太陽を含めた「宇宙環境」から地球を見つめ直し，ダイナミックな視点から地球環境の未来を変えるさまざまな研究に挑戦する研究所です．

前田（まえだ）　裕二（ゆうじ）

NTT宇宙環境エネルギー研究所　所長

はじめに

2018年11月発表の，NTTグループ中期経営戦略『Your Value Partner 2025』に基づき，新たにスマートエネルギー事業の取り組みが始まるとともに，SDGs（持続可能な開発目標）やESG経営への対応が企業の持続的成長に大きく影響するようになってきました．一方，技術面においては，核融合など次世代エネルギー技術実現の可能性が現実味を帯びてきたことに加え，IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想に代表される既存技術の限界を打破し地球環境の再生に貢献できる新技術の可能性も出てきました．このような状況の中，2020年5月にNTTグループの環境エネルギービジョン「環境負荷ゼロ」が発表され，このビジョンの実現に向け，スマートエネルギー分野に革新をもたらす技術と，地球環境の未来を革新させる技術の創出を目的として新研究所が2020年7月に設立されました．

NTT宇宙環境エネルギー研究所は，従来の環境エネルギーの枠にとらわれることなく，宇宙というもっと高い視点，広い視野から我々の住む地球や社会環境を見つめ直し，地球環境の再生と革新に貢献することをめざしています．

研究所のビジョン

NTT宇宙環境エネルギー研究所のビジョンは，次のとおりです．

「地球環境の再生と持続可能かつ包摂的な社会の実現に向け，

・核融合や宇宙発電など次世代エネルギー技術

・レジリエントな環境適応を可能にする技術

の創出をめざすとともに，環境負荷ゼロに貢献する」．

このビジョンを通して実現したい具体的な社会像は，**図1**に示すような超レジリエントスマートシティです．これは，我々の住む社会が地球環境に与える影響を±ゼロにするだけでなく，地球環境の変化による影響を社会が受容できるようにし，クリーンエネルギーの地産地消や自立分散協調型のエネル



図1　実現したい社会像のイメージ

ギーネットワークにより停電ゼロの実現，自然災害による被害もなくすだけでなく台風からエネルギーを取り出す（災害グリーンエネルギー）ことを実現するような社会です（**図2**）．このような超レジリエントスマートシティの実現に向け，次世代の圧倒的にクリーンなエネルギーの実現と活用，CO_2変換を含むサステナブル技術，プロアクティブなESG経営・環境適応といった革新的な技術の研究開発に取り組んでいきます．

取り組んでいる研究テーマ

研究テーマの一覧を**図3**に示します．現在，研究所には2つのプロジェクトがあり，1つは「環境負荷ゼロ研究プロジェクト」，もう1つは「レジリエント環境適応研究プロジェクト」です．詳細はこの後の各プロジェクトの紹介記事に記載されていますので，ここでは概略のみを説明します．

環境負荷ゼロ研究プロジェクト

環境負荷ゼロ研究プロジェクトでは，図3に記載のように3つの研究テーマに取り組んでおり，圧倒的にクリーンな次世代のエネルギーをつくる技術，エネルギーを効率良く流通させるエネルギーネットワーク技術，そして空気中や水中のCO_2を削減するサステナブルシステム技術の研究を行っています．

次世代エネルギー技術については，フュージョンエナジーと宇宙太陽光発電について取り組んでいます．フュージョンエナジーとは核融合を用いた発電技術であり，国際核融合研究機構（ITER）と包括連携を2020年5月に，ITER国内機関である国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（量研）と連携協力協定を2020年11月に結び，ITERの核融合炉の成功をIOWNでサポートしたいと考えています．ITERのトカマク型の実験炉は2025年に運転開始の予定で，炉の中のプラズマの温度が1億5000万℃となるミニ太陽を実現しようとしています．この実験炉から出てくる莫大なセンサデータをIOWNの超低遅延な高速大容量ネットワークでオペレーションセンタまで伝送し，それを活用してデジタルツインコンピューティングで未来予測を行い，オペレーションの最適運用に貢献したいと考えています．

宇宙太陽光発電は，3万6000 km上空の静止軌道衛星で太陽光から得たエネルギーを24時間365日絶え間なく地上に無線で送るという壮大な研究です．無線送電の仕組みにはいくつかの方法がありますが，私たちは特にレーザ光で無線送電する技術にチャレンジしています．これまでNTT研究所では，通信分野での光技術や光電変換技術を培ってきていますので，さらに研究を重ねて高効率で超長距離無線送電可能な技術を早期に実現したいと思っています．

エネルギーネットワーク技術では，NTTグループが得意とする屋内での直流給電技術を屋外に発展させ，NTTビルと周辺地域の需要家を直流でつなぎ，効率良く電力を融通するとともに災害時においても電力を安定的に供給する高レジリエントな自律分散協調型のエネルギーネットワークの実現をめざしています．また，サイバー空間上でエネルギーの需要と発電・蓄電情報を統合的にシミュレートし，最適解を実フィールドに戻して制御することで需給調和を実現する技術や，複数地域間で通信トラフィックや計算処理などの情報処理を空間的・時間的に再配置することで，気象で発電量が左右される再生可能エネルギーを効率的に需要する技術の実現をめざして研究を進めています．

サステナブルシステム技術では，半導体技術と触媒技術を活用した人工光合成（電気化学的アプローチ）と，植物や藻類の能力を最大限に活用する技術（生物学的アプローチ）を対象に，大気や水中のCO_2を削減する技術の実

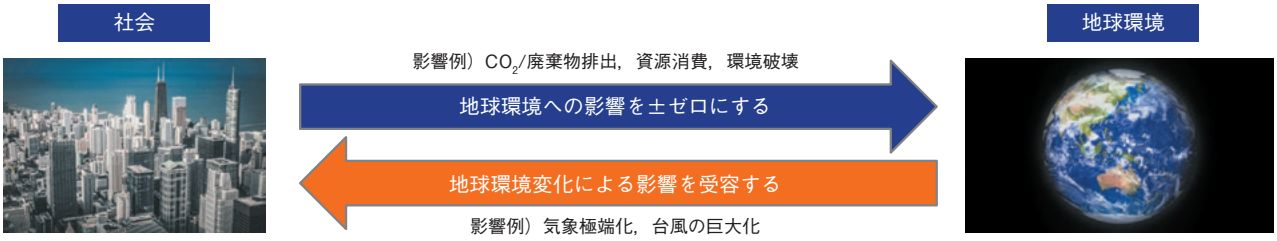


図2　社会と地球環境の関係の将来像



図3　研究テーマ一覧

用化開発に取り組んでいます．電気化学的アプローチでは，マテリアルズ・インフォマティクス*1を活用して，従来の経験則や既存概念では発見できなかったような材料の組み合わせについて検討しており，生物学的アプローチでは，サイバー空間上で多様な育成環境を再現し，ゲノム編集や環境制御の効果を検証したうえでリアル空間に戻して実証するようなデジタルツインを駆使した研究を進めています．

レジリエント環境適応研究プロジェクト

レジリエント環境適応研究プロジェクトでは，ESG経営科学技術とプロアクティブ環境適応技術という2つの研究テーマに取り組んでいます．

ESG経営に関しては，昨今，投資判断基準として重要視されるようになったこともあり，多くの企業が取り組んでいます．しかし，ほとんどの企業では，EnvironmentとSocialとGovernanceをうまく連携できていないというのが実情です．そこで私たちは未来予測・未来変革をキーワードにESG経営のリスクマネジメントに関するESG経営科学技術に取り組んでいます．具体的には，さまざまな環境・社会に関するデータを分析し，デジタルツインコンピューティングを駆使し科学的根拠に基づいて地球環境や社会環境の未来予測を行い，先回りしたプロアクティブなアクションにより，地球環境と人間社会の未来を変革することをめざしています．例えば，未来予測結果から企業価値や企業のWell-beingの評価を行うことで，企業価値の向上に資するアクションにつなげる予報や，その先の未来シナリオ提示などについて研究しています．

プロアクティブ環境適応技術では，極端化する気象や環境に対し積極的に物理的に適応するため，4つの研究テーマに取り組んでいます．環境適応実現のためには，気象・被災予測の高度化がもっとも重要になります．現在でも，気象庁の予測をベースに通信設備被害予測などが行われていますが，これをもっと高度化するため，地球情報分析基盤技術に取り組んでいます．この技術のベースとなるのは，約500 km上空の周回軌道衛星で地上に設置されたさまざまなIoT（Internet of Things）センサ（920 MHz帯）の情

＊1　マテリアルズ・インフォマティクス：材料開発を高効率化する手法であり，AI（人工知能）を含む情報処理技術を活用し，膨大な化合物データ，実験結果，シミュレーション結果等から所望の特性を持つ化合物の候補を探索する手法．

報を一斉に集取し，情報を束ねて地上に落として分析するという衛星を使った全く新たなセンシング手法です[1]．これを活用し，現状ほとんど観測されていない海上，海中あるいは山中におけるセンサ情報を，リアルタイムに収集・分析し，気象予測や被災予測を高精度化していきます．

高精度な気象予測を活用し，先回りして気象を制御する技術の研究にも取り組んでいます．例えば，台風や線状降水帯などの極端気象のエネルギー源である日本近海の海水温を水塊交替*2などにより下げることで勢力を弱めたり，台風のパワーをエネルギーに変換したりする災害グリーンエネルギーについて研究しています．一方，このような気象制御を実際に行った場合の影響ついても検討する必要があります．このため，ESG経営科学技術でも紹介した社会・経済システムを含む地球環境そのものをサイバー空間で再現したデジタルツインコンピューティングを駆使し，気象制御のさまざまな影響評価のシミュレーション・未来予測をサイバー空間上で行い，最適解を導出したうえで現実世界において実行したいと考えています．

気象制御の１つの対象として，雷についての研究も実施しています．私たちは元々通信設備の雷被害対策に関する高度な技術を保有しており，この技術をさらに発展させた雷制御・雷充電技術についても研究しています．具体的には，落雷エリアを高精度に予測し，ドローンを活用してドローンに落雷させる雷制御技術と，雷エネルギーを蓄える雷充電技術について研究しており，将来的には雷エネルギーを含む自然エネルギーのみで自律動作し，雷が落ちる前にエネルギーを吸収する浮遊型雷エネルギー吸収システムの実現をめざしています．

さらに，宇宙の気象問題とも考えられる宇宙線対策についても取り組んでいます．太陽や銀河系由来の宇宙線によって半導体が誤動作する事象をソフトエラーといいますが，従来から保有するソフトエラーの評価技術を拡大させ，地上でのソフトエラー対策だけでなく，宇宙線や電磁パルスの影響を機器・人体がダイレクトに受ける宇宙空間において，これらの影響を予測するとともにプロアクティブに防護する電磁バリア技術について研究しています．現在，宇宙空間では熱処理問題と宇宙線の影響により高性能電子機器の利用や人類の長期宇宙滞在が困難な状況ですが，本技術とIOWNの発展により，例えば宇宙データセンタなどの実現が可能になります．

おわりに

本稿で紹介した研究内容は，まだまだ序章に過ぎません．現在の少ないリソースで取り組み始めた研究内容を紹介しましたが，私たちの夢はもっと壮大です．今後は継続的にリソースを増強し，現在取り組めていない新しいテーマにどんどんチャレンジし，地球環境再生と未来革新に貢献したいと考えています．

コロナ後の経済活動の再開は，気候変動や海洋汚染問題などを解決するレジリエントな社会の実現に向かうべきであり，世界各国の政府，産業界においてこの動きは加速しており，ますますこの分野の研究が重要となってきています．このため，さらにリソースを増強し，さまざまな分野の方々と連携しながら研究を加速させたいと考えています．宇宙視点で環境エネルギー分野の革新的技術創出に挑戦する研究所の成長に，ぜひ期待してください．

■参考文献

(1) https://www.ntt.co.jp/news2020/2005/200529a.html



前田　裕二

研究者の公募を行っています．興味のある方はぜひお問い合わせ願います．一緒に地球の未来を変革しましょう．

◆問い合わせ先
NTT宇宙環境エネルギー研究所
企画担当
TEL　0422-59-7203
E-mail　se-kensui-pb＠hco.ntt.co.jp

＊2　水塊交替：温かい表層の海水と低温な深海の海水を入れ替えて，冷房したり発電したりする技術．温かい海域では，30 ℃以上の温度差がある場合もあります．

環境負荷ゼロに貢献する次世代エネルギー活用技術とCO_2変換技術

本稿では，環境負荷ゼロの実現に向けて，実用化がみえてきた圧倒的にクリーンかつ無尽蔵なエネルギー源を利用可能なものとする次世代エネルギー活用技術と，環境負荷の1つである二酸化炭素（CO_2）を効果的に固定し，事業活動トータルでの排出量をゼロ以下にするためのCO_2変換技術について概説します．

秋山　一也（あきやま　かずや）　高谷　和宏（たかや　かずひろ）
NTT宇宙環境エネルギー研究所

次世代エネルギーの活用に向けた取り組み

NTT宇宙環境エネルギー研究所次世代エネルギー技術グループでは，持続可能な社会の実現に向けて，圧倒的にクリーンかつ無尽蔵なエネルギー源であるフュージョンエナジーに関する技術と宇宙太陽光発電技術という2つのテーマに取り組んでいます．

■核融合炉の最適オペレーション技術

フュージョンエナジーに関する技術は，IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）技術の活用によって核融合炉オペレーションの最適化をめざすもので，2020年5月にITER国際核融合エネルギー機構と包括連携協定を締結しました(1)．また11月には，世界に先駆けた革新的な環境エネルギー技術の創出をめざし，国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構と連携協定を締結しました(2)．フュージョンエナジーとは，太陽をはじめとする宇宙の星々が生み出すエネルギーであり，軽い原子核どうしが融合してより重たい原子核になる核反応を指します．例えば，水素の同位体である重水素（D）と三重水素（T）の原子核が融合するDT核融合反応*1ではヘリウムと中性子ができますが，たった1gの重水素と三重水素の核融合反応から発生するエネルギーは，石油約8t（タンクローリー1台分）を燃やしたときと同じだけの熱に相当します．核融合炉は，まさに太陽で起きている現象を地上で再現するものであり，フュージョンエナジーを発電等に使用することをめざして進められているのがITER計画と呼ばれる超大型国際プロジェクトです（**図1**）．日本・欧州・米国・ロシア・韓国・中国・インドの7極により進められており，2025年の運転開始をめざして，南フランスのサン・ポール・レ・デュランスにて準備が進められています．フュー

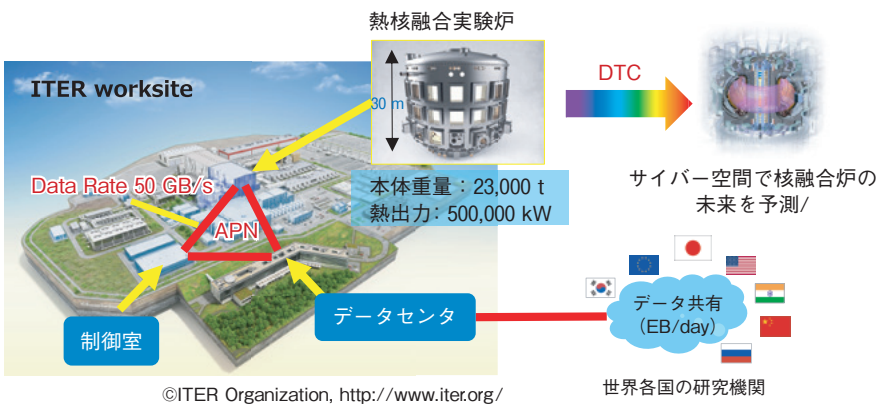


図1　ITERの全体図と核融合炉の最適オペレーション技術

*1　DT核融合反応：D＋T＝He（3.52 MeV）＋n（14.06 MeV）．電荷の反発力に打ち勝ってDとTを衝突させるためには，1000 km/秒以上の速さが必要であり，加熱温度は1億度以上に相当します．

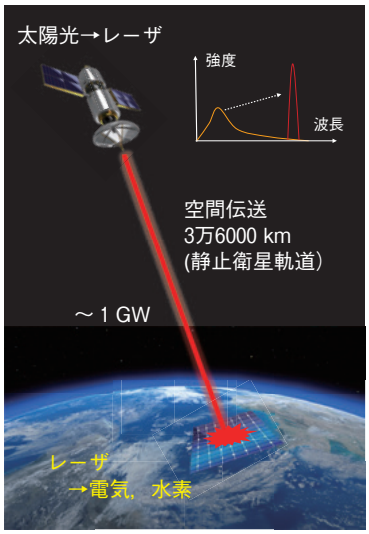


図 2　宇宙太陽光発電技術

ジョンエナジーが実現すれば，太陽光や風力などのより分散型の再生可能エネルギーと相まって，何百万年にもわたって安全かつ確実に世界にエネルギーを供給できるようになると期待されています．

核融合実験炉ITERでは，ドーナツ状の磁場の中に燃料となる重水素と三重水素を閉じ込め，加熱し，プラズマ状態にし，さらに1億5000 万度まで加熱することで核融合反応を発生させます．この核融合炉からエネルギーを取り出すには，プラズマを長時間安定的に発生させることが重要です．そのためには，核融合炉から得られる最大で50 GB/sという膨大なセンサデータをコントロールセンタに転送し，そこで最適な数値を計算し，瞬時にフィードバックしプラズマの形状を制御する必要があり，制御ネットワークの高速化・低遅延化が不可欠です．そこで，IOWNの要素技術の1つであり，高品質・大容量，低遅延が特徴のオールフォトニクス・ネットワークに加え，データ処理の高速・高効率化を実現する新しいコンピューティングアーキテクチャであるディスアグリゲーテッドコンピューティングの活用により，実現をめざしています．加えて，核融合炉が本格的に稼動を開始すると，1日当りEB（exabyte）レベルのデータが生み出されます．このデータを世界各国のデータセンタに蓄積し，かつデータセンタ間で高速にレプリケーションを行うためにも，IOWNの技術が貢献できると考えています．また，将来的にはデジタルツインコンピューティング（DTC）の活用によって，サイバー空間上に核融合炉をリアルに再現し，非常に高度なシミュレーションや核融合炉の未来性能予測を行うことによって，さらなる制御技術の向上に寄与することをめざしています．

■宇宙太陽光発電技術

宇宙太陽光発電技術は，上空3万6000 kmの静止衛星軌道上で太陽光発電を行い，そのエネルギーを地上にレーザやマイクロ波で送り届け，再度地上で電力などのエネルギーに変換するという技術です（**図2**）．静止衛星軌道上では，ほぼ24時間365日太陽からのエネルギーを受けることが可能なうえに，地球の大気によるエネルギーの吸収や散乱の影響を受けないことから，地上と比較し単位面積当りで約10倍のエネルギーを安定して受けることができます．2030年以降の実用化をめざして，宇宙航空研究開発機構などを中心に研究開発が進められており，実現すればクリーンで無尽蔵のエネルギーを利用することが可能となります．私たちはマイクロ波よりも波長が3～4桁ほど短いため，ビームの広がり角が小さく長距離を伝送させやすいという観点を重視し，レーザによるアプローチを試みています．

宇宙太陽光発電を実現するためには，大きく3つの技術領域があります．1番目は，静止衛星軌道上で太陽光をレーザに高効率で変換する技術です．私たちは，太陽電池によって発電された電力を用いてレーザ発振を行う従来の方法とは異なり，太陽光を特殊な結晶に直接照射しレーザを励起させることで，高効率でレーザ発振を行うシステムの研究を行っています．2番目は，レーザを地上のターゲットに正確に照射する技術です．レーザは長距

離を伝送させやすいことが特徴ですが，3万6000 km離れた静止衛星軌道上からレーザを±10 mの精度で照射するためには，0.3 μrad（2×10^{-6}度）の方向制御精度が必要となります．加えて，通過する大気の揺らぎに影響も取り除かなくてはなりません．そこで，ベッセルビーム*2等の焦点深度の深い光学系や，天文分野で大気を伝搬する光の揺らぎを取り除くために用いられている補償光学*3を活用したビーム伝送方式について研究を行っています．3番目はレーザをエネルギーに高効率で変換する技術です．レーザ光は，さまざまな波長の光が混ざり合った太陽光とは異なり単一の波長であることから，特定の波長で高い変換効率を持つ太陽電池の研究を行っています．また，太陽電池を用いてレーザを電力に変換する場合，約半分のエネルギーが熱となってしまうという問題があります．そこで，レーザを直接電気に変換するのではなく，熱化学反応を用いていったん水素やアンモニアといった違う形態にエネルギーを蓄える方法についても検討を行っています．私たちは，本技術が水素社会を実現するためのキー技術になり得ると考えています．

二酸化炭素（CO_2）排出量ゼロ以下に向けた取り組み

サステナブルシステムグループでは，地球環境の再生と持続可能な社会の実現に貢献するため，あらゆる環境負荷をゼロ以下にするサステナブルなシステムの研究開発とその社会実装に取り組んでいます．ゼロ以下にするとは，排出を減らすだけではなく，すでに存在しているものを減らすことを意味します．環境負荷といってもさまざまな要因が存在しますが，この1つにCO_2があり，パリ協定等において，CO_2排出量を削減することが求められています．そのため，当グループでは，CO_2削減のための研究開発を2つのアプローチにより進めています（**図3**）．

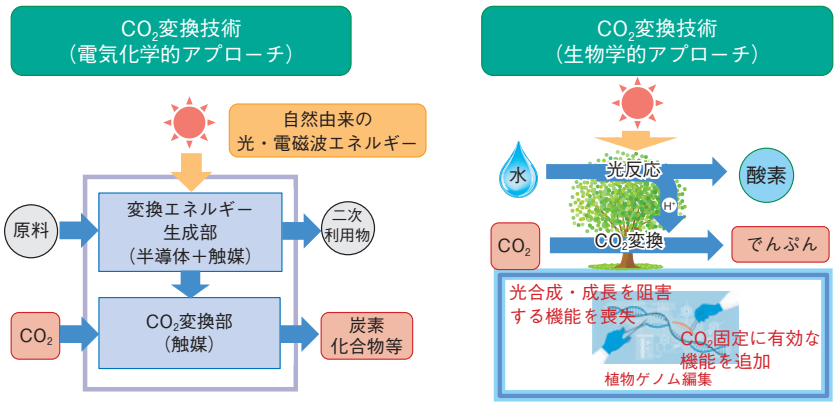


図3　CO_2変換技術の確立に向けた2つのアプローチ

■CO_2変換技術（電気化学的アプローチ）

アプローチの1つは，通信用デバイスに用いられる半導体技術や燃料電池などに用いられる触媒技術を応用した電気化学的アプローチであり，太陽光などの光・電磁エネルギーを活用して，水（H_2O）とCO_2からメタン（CH_4）などの炭化燃料や貯蔵可能な水素キャリアであるギ酸（HCOOH）などを生成するとともに，大気中のCO_2を削減することが可能なCO_2変換技術の研究開発です．この太陽光などの光エネルギーを利用して，H_2OとCO_2から炭水化物を合成する植物の光合成を模していることから「人工光合成*4」とも呼ばれています．電気化学的アプローチの利点は，太陽光などの自然由来のエネルギーを用いて，貯蔵可能な燃料（エネルギー源）を生成できることであり，生成された燃料はさまざまな用途に活用できるほか，カーボンニュートラルなエネルギー源としても期待されています．

その一方で，実用化のためにはいくつかの課題が残されています．例えば，太陽光のエネルギーを利用して，水素イオン（H^+）と電子（e^-）を生

*2　ベッセルビーム：回折現象によりビームが広がらない非回折ビームの一種．

*3　補償光学：Adaptive Optics（AO）．大気等によって生じた画像の揺らぎを波面センサで計測し，それを動的に補正することで画質を改善させる技術．

*4　人工光合成：植物が太陽エネルギーを使ってCO_2と水からでんぷんと酸素を生み出す働きを模したもので，太陽エネルギーを活用した化学反応により，CO_2と水を原材料に有機物を生成する技術．

成する半導体デバイス（材料）は，電極として水中に設置されることにより，その表面がイオン化（腐食）し，性能が劣化してしまうため，長時間安定して反応し続けるように長寿命化する技術が必要となります．このとき，エネルギーとして利用できる光の波長は半導体デバイスの物性に依存して限定的であるため，さまざまな波長のエネルギーを吸収できる広帯域化が求められています．同様に，CO_2を還元するための触媒も，化学反応を繰り返すことによる性能劣化を低減する長寿命化技術の確立が求められています．そのため，当グループでは，半導体デバイスや触媒に関する経験とスキルを有するNTT先端集積デバイス研究所とのコラボレーションにより，長寿命化と高効率化の実現に取り組んでいます．

また，電気化学的アプローチによるCO_2変換技術の実用化に向けては運用・安全面の課題も存在します．例えば，世の中で開発中の人工光合成システムの多くは，実験室などの比較的制御が容易な環境でその性能が評価されていますが，実環境ではいくつかの制約条件が加わります．具体的な例としては，実験室では純度の高い高濃度のCO_2をガスボンベから加えている場合が多いと考えられますが，実際は，大気中の約0.04%の濃度のCO_2に対して高効率に作用する必要があります．そのため，大気中から低濃度のCO_2を直接回収する「Direct Air Capture（DAC）」と呼ばれる技術の研究開発も進められています．ただし，DACとの組合せが必須となると，さらに高コストとなり，どちらかがボトルネックとならないような最適設計が必要となります．さらに，電気化学反応の原料となるガスや生成ガスには，水素（H_2）や一酸化炭素（CO）も含まれており，これらが有事の際にも大気中に放出されることを防ぐ強固な安全設計も必要となります．このように，電気化学的アプローチによるCO_2変換技術の実用化に向けては，単に効率を追い求めるだけでは不十分であるため，運用・安全面の課題を同時に解決する最適解を探索することが不可欠と考えています．

■CO_2変換技術（生物学的アプローチ）

CO_2変換技術のもう1つのアプローチは，ゲノム編集*5や育種・生育環境の最適制御により，植物や藻類の持つ光合成機能を最大化させる生物学的アプローチです．この30年で，地球上の森林面積は増加傾向にありますが，温暖化や人為的な伐採により，その多様性や健全性は低下しているという報告があります．これは，その森林を形成する植生とそこに住む生物・微生物の共生や，共存に必要な自然界本来の役割分担が円滑でないことを示唆しているのかもしれません．そのため，生物学的アプローチによるCO_2変換技術では，ゲノム編集技術や生育環境制御技術をフルに活用し，植物が光合成機能を活発化する時期を早くすること（早期成長）や，その時期を長く維持させること（長期健全化）によって，植物1個体当りの光合成能力を最大化することをめざした研究開発を進めています．樹木1個体当りの光合成能力を高めた森林の面積を増加させることができれば，結果として，植物による長期炭素固定が実現できることになります．また，食料や工業用資源となる野菜や樹木などに特化すれば，高品質を維持しながら，早期成長を促すことで，生育期にはCO_2をより多く吸収し，収穫や伐採後は，他のカーボンサイクルで活用することが可能となります．藻類についても同様に，ゲノム編集技術や生育環境制御技術を活用し，短期間で増殖させることで，水中に溶け込んでいるCO_2の効率的な吸収が可能となり，湿地・海草藻場の環境改善に貢献することが可能と考えています．

一方，生物学的アプローチによるCO_2変換技術の課題を挙げます．例えば，炭素を長期固定することが可能で，光合成能力の高い樹木は，遺伝子数が多く，ゲノム解析や早期成長・長期健全化に作用するゲノムの特定に多大な時間を要することが知られています．また，ゲノム編集を施せたとしても，樹木の成長には長い年月を要するため，その効果を確認することも容易ではありません．藻類については，遺伝数の少なさからゲノム解析やゲノム編集が比較的容易な反面，増殖後，付加価値を高めるための資源化（加工）や有効利用できない部分の廃棄に必要

*5　ゲノム編集：生物が持つゲノムの中の特定の塩基配列（DNA配列）を編集することで，その生物の特性を変化させる技術．

なエネルギー量が課題となっています．

そこで，樹木に対するゲノム編集の効果を検証する時間短縮手段の１つとして，IOWNの要素技術の１つであるDTCの活用を検討しています．仮想空間上に植物と生育環境の解析モデルを構築し，仮想的な生育シミュレーションを行うことができれば，栽培などのリアルな検証を実施しなくても，短期間でその効果を予測することが期待できます．さらに，種や苗の段階で病害リスクの少ない遺伝特性を選定することが可能となれば，優良育種選定にも応用できます．藻類の廃棄の課題については，エサや資源として他の生物や他のカーボンサイクルに提供するなど，いくつものカーボンサイクルを効率的に連携させることが重要であると考えています．

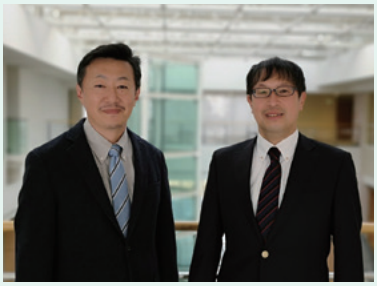
今後の展開

本稿では，次世代エネルギー技術とCO_2変換技術について取り組み内容を概説しました．核融合炉オペレーションの最適化で培われた技術は，リアルタイム制御によるサイバーフィジカルシステム連携のユースケースとして，今後他産業へ展開していく予定です．宇宙太陽光発電技術については，その確立過程において，地上におけるドローンなどのモビリティへの給電による長時間運転の実現や，避難所や離島への非常用給電技術として順次切り出して，実用化していく方針です．

また，２つのCO_2変換技術については，実用化や社会実装に向けて解決すべき課題がいくつかありますが，その課題を解決した際の地球環境への貢献度は非常に大きいと考えられます．そのため，本稿で述べた課題をより早い時期に解決できるように，電気化学材料の物性探索，植物・藻類の有用ゲノム特定，仮想生育シミュレーションなど，ICTの効果が期待できる側面に重きを置いて研究開発を推進していきます．

■参考文献

(1) https://www.ntt.co.jp/news2020/2005/200515c.html
(2) https://www.ntt.co.jp/news2020/2011/201106a.html



（左から）秋山　一也／ 高谷　和宏

地球環境の再生と持続可能かつ包摂的な社会の実現に向けて，次世代エネルギー技術とサステナブルシステム技術の創出をめざすとともに，「環境負荷ゼロ」に貢献します．

◆問い合わせ先
NTT宇宙環境エネルギー研究所
企画担当
TEL　0422-59-7203
E-mail　se-kensui-pb @ hco.ntt.co.jp

環境負荷ゼロの実現に向けた，エネルギー流通基盤技術

田中 徹　南 裕也
田中 憲光　中村 尚倫
林 俊宏　香西 将樹
樋口 裕二　花岡 直樹
岩本 美帆

NTT宇宙環境エネルギー研究所

近年，再生可能エネルギーの普及が拡大していますが，さらなる導入に向けては，エネルギーの効果的な流通やレジリエンスが求められます．エネルギーネットワーク技術グループでは，再生可能エネルギーを余すことなく活用する仮想エネルギー需給制御と，商用電力からの供給が途絶えても安定した電力を地域に供給する直流グリッドをベースとした次世代エネルギー供給に関する研究開発を進めています．本稿では，これらの技術について紹介します．

再生可能エネルギーの導入と災害時の対応

資源の枯渇や地球温暖化に対する危機感の高まりから，再生可能エネルギーの導入が進められている中，ESG投資*1や主力電源化といった観点も加わり，エネルギーを取り巻く状況が大きく変化しています．かつて，再生可能エネルギーは高コストなため普及が困難でしたが，各国による固定価格買取制度（FIT）等の施策により，メガソーラーや大型風力発電など大規模な再生可能エネルギーの導入が進んだことでコストが飛躍的に低減され，価格面での障壁が下がってきています．最近では，ESG投資やTCFD*2など環境に対する投資や経営を進めていくことが，企業活動にも欠かせない要素となってきており，国レベルでも再生可能エネルギーの主力電源化など，再生可能エネルギーの普及に対する取り組みは，もはや当たり前の流れになっています．

しかし，再生可能エネルギーの発電量は天候によって大きく変動するため，普及が進むほど消費電力とのバランスを取ることが難しくなります．これまでさまざまな需要制御の取り組みが行われてきましたが，大規模かつ高速な変動吸収がますます求められてきています．

一方，2019年9月に千葉で台風直撃により起きた大規模停電に続いて2021年2月の福島県沖地震でも首都圏で大規模な停電が発生し，電力供給の重要性が改めて認識され，各避難所へのバックアップシステムの構築などの強靭化対策が国を中心に進められています．

しかし，商用電力が使用不能となった場合には，再生可能エネルギーの電力が送れないこともあり，設置されたバックアップ設備の継続的な維持が困難になるといった懸念があります．さらに，今後の電子機器の普及に伴い，これまで経験した災害に加え，電磁パルスや宇宙線等新たなリスクにも対処していく必要があります．

本稿では，これらの問題を解決する仮想エネルギー需給制御技術と次世代エネルギー供給技術について紹介します．

仮想エネルギー需給制御技術

再生可能エネルギーの発電量が天候により大きく変動する問題に対しては，これまでにも，その発電量の予測，商用電力の火力発電や揚水発電等での発電量の調整，需要家側の空調や照明等の消費電力量の制御，蓄電池等への

＊1　ESG投資：環境・社会・企業統治に配慮している企業を重視・選別して行う投資．
＊2　TCFD：G20の要請を受け，金融安定理事会により設置された，Task Force on Climate-related Financial Disclosures（気候関連財務情報開示タスクフォース）の略称．気候変動に対する企業の取り組みにかかわる情報開示を促すフレームワーク．

余剰電力の貯蓄など，発電量の変動を吸収するさまざまな対策が講じられています．さらに最近では，新たな需給制御システムとして，多数の小規模な発電設備や，複数の需要家設備を１つの発電所のようにまとめて制御する仮想発電所（VPP）や，電気自動車（EV）用の蓄電池も活用するシステムの開発や導入が進んでいます．

しかし，それでも再生可能エネルギーが特定の地域で大量に導入されると電力が余剰もしくは不足したときに当該地域での電力変動制御が量的および時間的に困難になる可能性があります．したがって各地域の電力系統でどの瞬間にも電力が余剰となったり不足したりしないよう，消費電力量を大規模かつ高速に制御することが求められます．NTTグループでは，日本の消費電力の約１％を消費しており，また各地に通信ビルやデータセンタが点在していることから，地域間で消費電力を変化させるポテンシャルを有しています．この消費電力の変化を通信トラフィック量や計算データの情報処理量を制御することで実現していきます．例えば，降雨により太陽光発電（PV）の発電量が低下して電力が不足しそうな地域の通信ビルから，晴天で電力が余剰となりそうな地域の通信ビルへ，情報処理を移行させることで，降雨の地域では消費電力を下げ需給逼迫を回避し，晴天の地域では消費電力を上げPVの発電量を余すことなく使い切ることができます．このような地域をまたいだ情報処理量の移行を実現するために，再生可能エネルギーの発電量に応じて情報処理量を追従し，情報処理量とICT装置の消費電力量の追従性を高めることや，各地域の需給バランスに応じて情報処理を移行する量とタイミングを最適化することに取り組んでいます．この最適化の実現にあたり，通信サービスの品質や設備の安定性に悪影響を及ぼさないよう制御する研究開発も進めています（**図１**）．さらにNTTビルには大量の蓄電池が通信サービスのバックアップ電源として設置さ

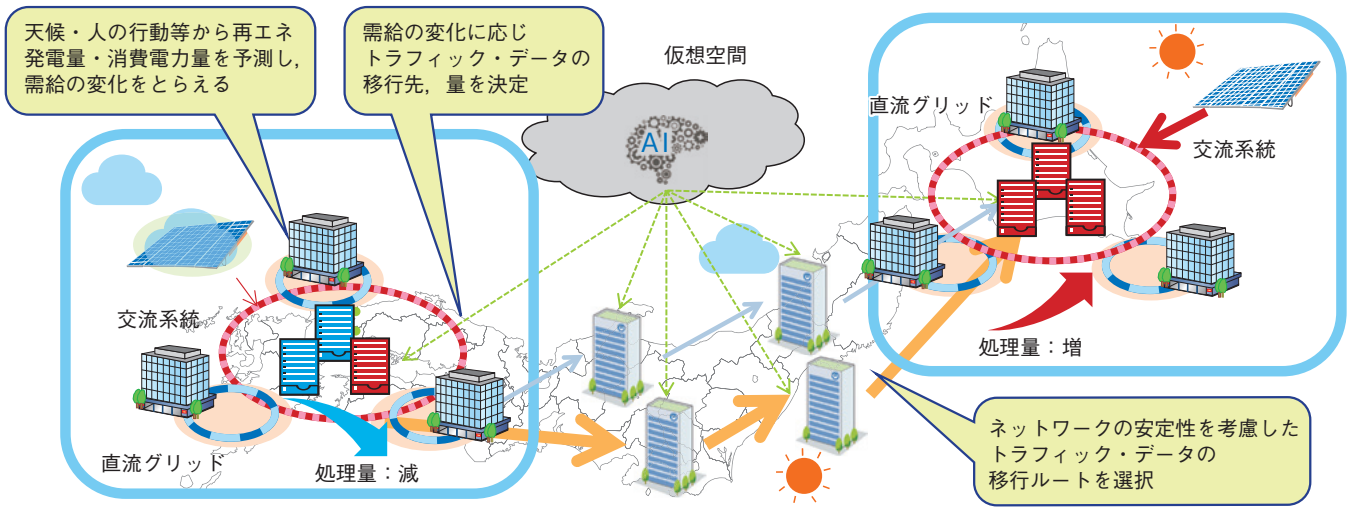


図１　仮想エネルギー需給制御技術

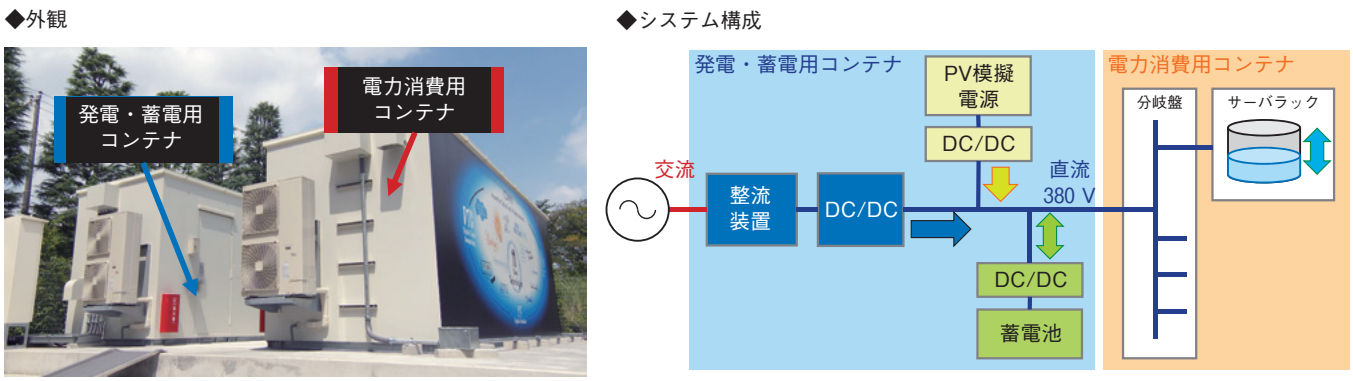


図２　コンテナ型実証サイト

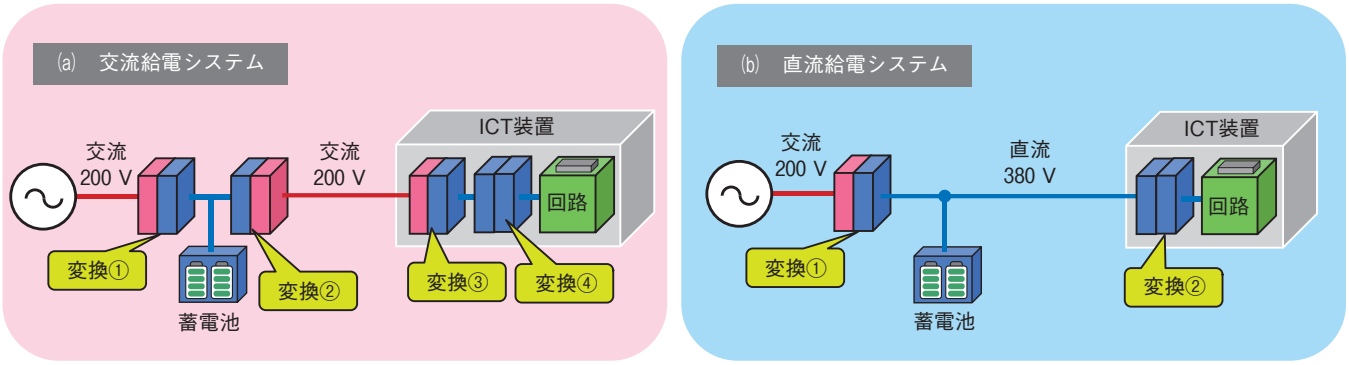


図3　交流給電システムと直流給電システム

れており，この蓄電池に加えてEVの蓄電池も活用し運行情報と連携してダイナミックに運用することで，より大きな電力の充放電が可能となります．

前述の技術を確立するため，最初のステップとしてNTT武蔵野研究開発センタにコンテナ型のテストベッドを構築し，整流装置，PV模擬電源，蓄電池，情報処理を行うサーバ等を設置し，エネルギー需給制御の検証を開始しました（**図2**）．このテストベッドを活用し，遠方の通信ビルやデータセンタとの需給制御の実証を計画しています．

次世代エネルギー供給技術

近年，大規模地震等の災害による電力供給途絶を低減する強靭化対策が各地で進められており，NTTにおいてもビルの耐震強化や水防，バックアップシステムの強化等の取り組みを進めています．しかし，極端気象以外にも，例えば，高高度核爆発攻撃による電磁パルス照射や，太陽フレアによって放出される宇宙線によって，電子機器および電力供給機器の破損や停止，誤動作等のリスクが想定されます．これらの事象は稀であるともとらえられていますが，今後の半導体デバイスの微細化・高集積化とともに，電子機器のさらなる普及をかんがみると，電力供給にかかわるシステムの障害が社会に及ぼす影響は深刻です．この問題を解決するため，当グループでは，さまざまな事象に対しても安定した電力供給が可能なエネルギー供給システムの開発に着手しました．

これまで，NTTの通信ビルにおける給電システムは直流-48 Vによる直流給電システムを採用しており，最近ではICT装置の消費電力増加に伴い，電圧を直流380 Vに上げた高電圧直流（HVDC）給電システムを導入しています．このHVDC給電システムは，**図3**に示すように，直流で動作するICT装置に直接直流の電力を供給することから，交流給電システムに比べて変換段数が少なく変換ロスが低減できるため高効率なシステムであり，またバックアップ用としての蓄電池は直流バスに直結していることから極めて高信頼なシステムです．この高効率・高信頼なシステムをベースに，**図4**に示すように，NTTの通信ビルと周辺地域の需要家を直流380 Vでネットワーク化する直流グリッドを構築することで，効率の良い電力融通と停電しない供給システムの実現が期待できます．通常時においては，周辺地域での再生可能エネルギーで発電した電力が余剰となった場合には，通信ビルの蓄電池に効率良く蓄え，災害時等においては電力会社からの電力供給が途絶えた場合でも定置や車載の蓄電池と，再生可能エネルギーとを組み合わせることで電力を融通することができます．この直流グリッドは複数の発電装置と複数の需要家を結ぶ構成であり，短絡・地絡や雷等の事象が発生すると影響範囲が大きくなるため，これら事象に対しても安定した電力供給が必要となります．

当グループでは，**図5**に示すように，3つのステップで検討を進めており，ステップ1では供給側と需要側を1対1で接続した形態，ステップ2では複数機器を接続し双方向で電力融通する形態，そしてステップ3では電力をネットワーク化した直流グリッドへと拡張した形態における電力供給の安定化について研究開発を進めていきます．現在進めているステップ1では，通信ビルと災害時に避難所となる小中学校を1対1（給電距離：～400 m）で接続可能とする技術を検討しています．特に，**図6**に示すように，直流380 Vの電力を屋外に延長することから，システムの火災や作業者の感電による重大事故を防止するため，電気的な安全性にかかわる電力品質技術の確

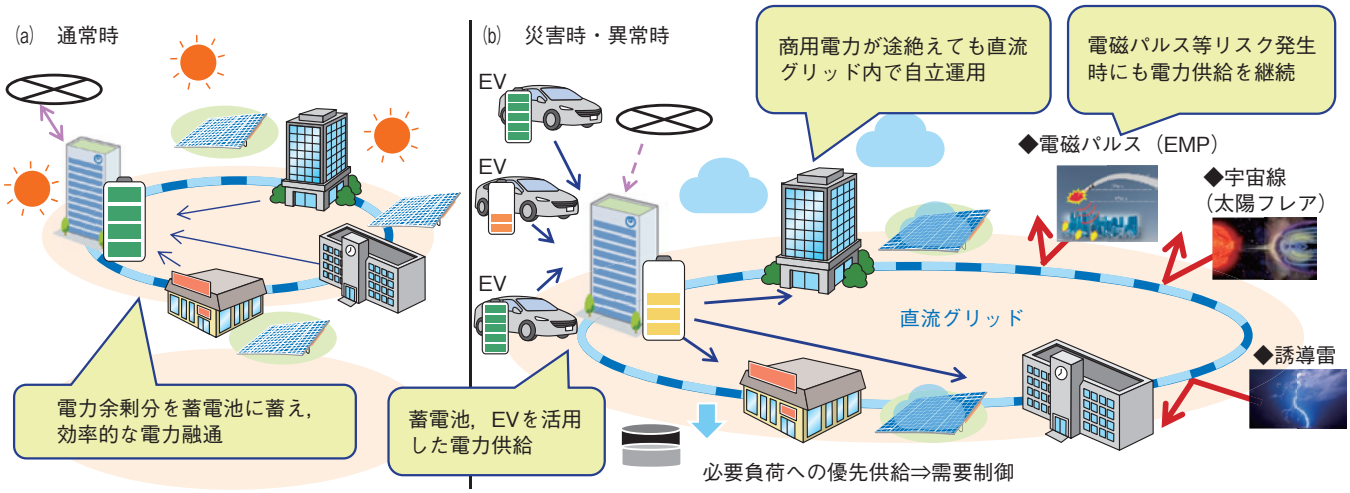


図 4　次世代エネルギー供給技術

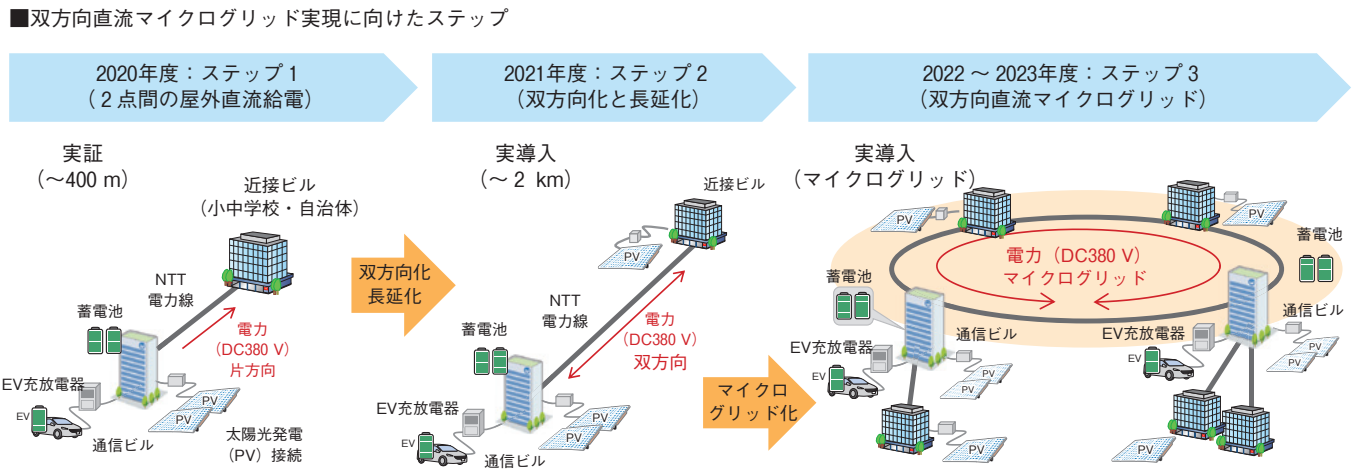


図 5　直流グリッドに向けた実証ステップ

立を最優先で取り組んでいます．屋外への給電距離が長くなると，短絡が生じた際に，短絡電流が小さくなり，かつ直流のため，通信ビル側で事故の検出が困難となり，安全に遮断できない恐れがあります．これを，従来のヒューズに加え，直流給電装置内部の過電流保護機能（ゲートブロック）と組み合わせて，短絡時に高精度に検出・遮断する仕組みを確立しました．また，通信ビルは高い信頼性が特に必要であり，PV等で発電された電力を通信ビルに引き込むと，雷サージの侵入リスクが高まるため，電圧を抑制する技術が必要となります．これに対しては，避雷器（SPD）および接地線の配線条件の最適化により，雷サージの電圧を大幅に低減する手法を確立しました．ここで確立した技術はエネルギー事業を柱とするNTTアノードエナジー[1]を中心に提供し，千葉市におけるバックアップ電源事業の実証に展開しています[2]．

これらの技術をベースとして，電磁パルスや宇宙線等のさらなるリスクにも対応していきます．交流システムの場合，これらの事象が発生すると同期制御*3する制御系のソフトエラーにより，同期が外れ電力供給が途絶えるリスクがありますが，直流システムでは直流バスに蓄電池が直結されているため，リスクが低減されます．この直流システムのメリットを最大限活用して，さまざまなリスク事象に対しても電力供給が途絶えないシステムを確立

*3　同期制御：交流システムの電圧は周期的にプラスとマイナスを繰り返しており，この繰り返しのタイミングをシステム間で一致するように制御すること．

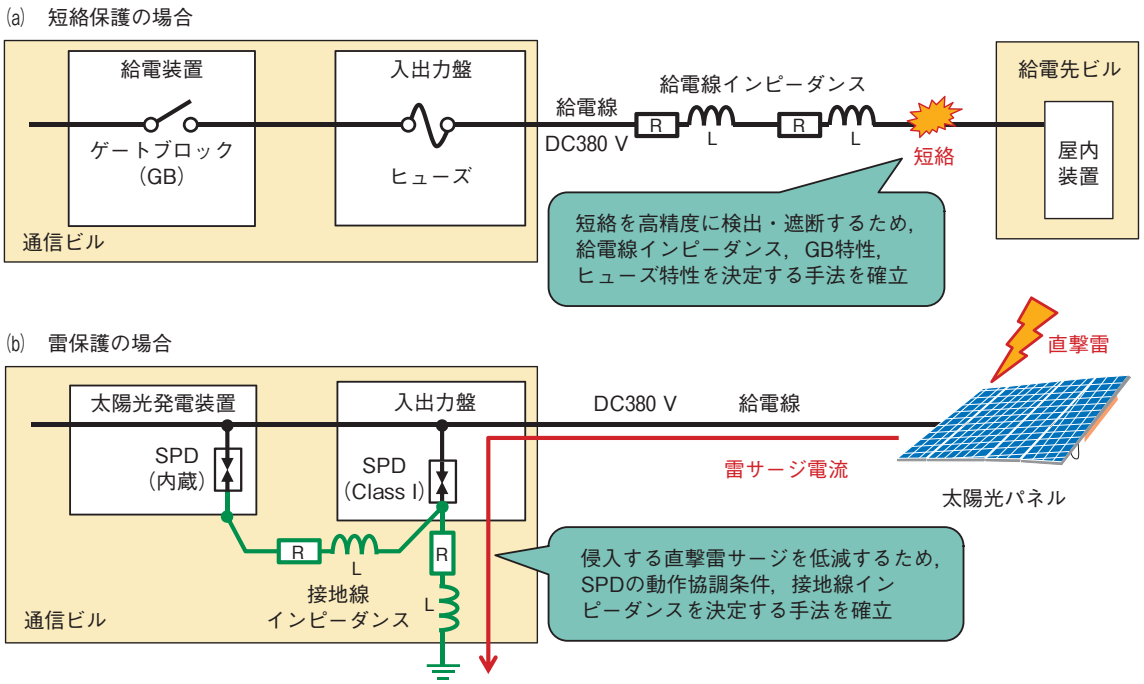


図 6　短絡保護，雷保護のイメージ

していきます．

今後の展開

本稿で紹介した 2 つの技術をさらに発展させていき，NTT が掲げる IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想における，オールフォトニクス・ネットワークや用途に応じて多様なコンピューティングデバイスを地理的に分散協調させることで高速・高効率なデータ処理をねらうディスアグリゲーテッドコンピューティングと連携し，光活用型の高速遮断による，直流グリッドの電力ネットワーク品質の向上や，再生可能エネルギーとコンピューティングデバイスを一体化することで，情報ネットワークとエネルギーネットワークを融合した新たなネットワークシステムの研究開発に挑戦していきます．

これまでの集中管理型のエネルギーネットワークシステムから自律分散型の協調制御した新たなエネルギーネットワークシステムに移行することで，再生可能エネルギーを余すところなく効率的に活用した地産地消と，さまざまな事象が生じても電力供給が途絶しない超レジリエントなスマートシティの実現に貢献していきます．

■参考文献

⑴ https://www.ntt-ae.co.jp/
⑵ http://tncross.co.jp/information/detail20200423.html



（後列左から）花岡 直樹／田中 憲光／香西 将樹／林 俊宏／樋口 裕二
（前列左から）岩本 美帆／南 裕也／田中 徹／中村 尚倫

若いメンバを中心に，コロナ禍に負けず議論，実験を精力的に進めています．エネルギー流通のファンタジスタとなって，環境負荷ゼロに資する新たなエネルギーネットワークの実現をめざしていきます．

◆問い合わせ先
NTT宇宙環境エネルギー研究所
企画担当
TEL　0422-59-7203
E-mail　se-kensui-pb＠hco.ntt.co.jp

持続可能かつ包摂的な社会の実現をめざしたESG経営科学技術

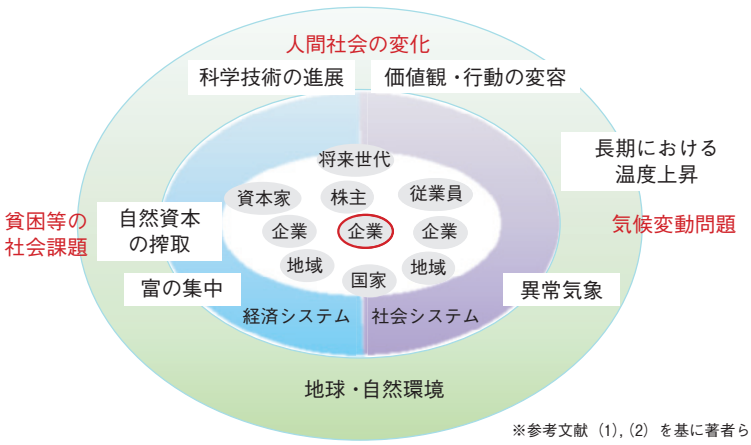
本稿では，昨今の気候変動や人権に関する問題等を念頭に，持続可能かつ包摂的な社会の実現をめざし，地球環境と社会・経済システムの関係について分析し未来を予測，さらに企業における長期的リスクマネジメントや新たな収益創出の機会を導出し，企業価値向上に資するESG経営科学技術について紹介します．

田中（たなか） 百合子（ゆりこ）　張（ちょう） 暁曦（ぎょうぎ）
篠塚（しのづか） 真智子（まちこ）
NTT宇宙環境エネルギー研究所

ESG経営科学技術のあらまし

近年，国連で採択されたSDGs（持続可能な開発目標）をはじめ，気候変動等の自然環境の変化に伴う問題や，貧困等の社会問題への対応が注目されています．そして現在，世界的なパンデミックの下，社会や経済のあり方の見直しがより問われる状況となっています．このような問題の解決には，環境的，社会的，経済的側面を統合し，それらの相関や因果を認識する必要があります(1)．**図1**に示すように，グローバルでとらえた地球と人間の関係では，気候変動問題や，資本主義社会を中心とした富の集中や自然資本*1の搾取による貧困等の社会問題が，それぞれ複雑に密接につながり，5～10年もしくはそれ以上の年月を経て大きな危機となって表出することも考えられます(2)．また，人口動態や経済成長の変化に加え，科学技術による社会の変革，人々の価値観・行動の変容等により，未来は現在の延長線上にあるとは限りません．そして，企業活動も環境や社会へ影響を与える一要素であり，持続のためには長期的な視点での経営戦略やアクションが重要となります．そのため，企業においては財務情報だけではなく，環境（Environment），社会（Social），ガバナンス（Governance）等の非財務情報がより重視されるようになっていますが，これらに配慮した戦略やアクションの与える影響の評価・検証には至っていません．

ESG経営科学技術の概要を**図2**に示します．環境・社会に関する情報をインプットデータとして，未来予測シミュレーションを行います．これらのデータは，企業を取り巻く各ステークホルダーの価値観，状況等を含み，ESG戦略を策定するうえで重要な要素となります．そして，未来予測シミュレーションでは，地球規模のデジタルツインコンピューティング（DTC）(3)の一環として，環境・社会



※参考文献（1），（2）を基に著者らが作成

図1　地球環境，人間の社会・経済システムにおける課題や変化

＊1　自然資本：森林，土壌，水，大気，自然資源等，自然によって形成される資本．

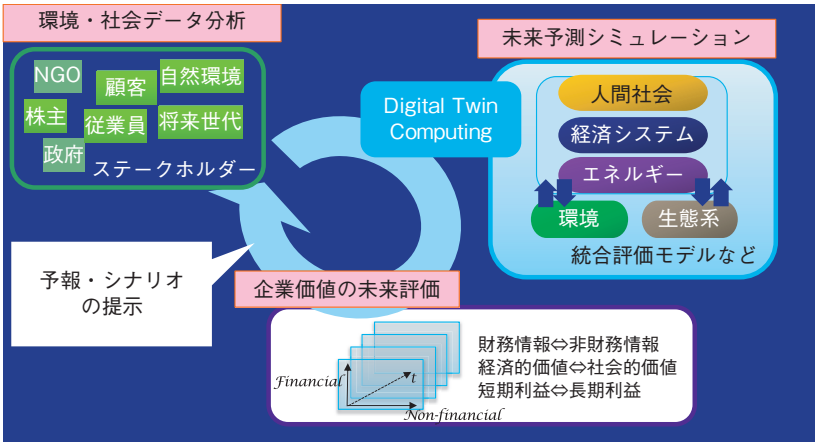


図 2　ESG経営科学技術の概要

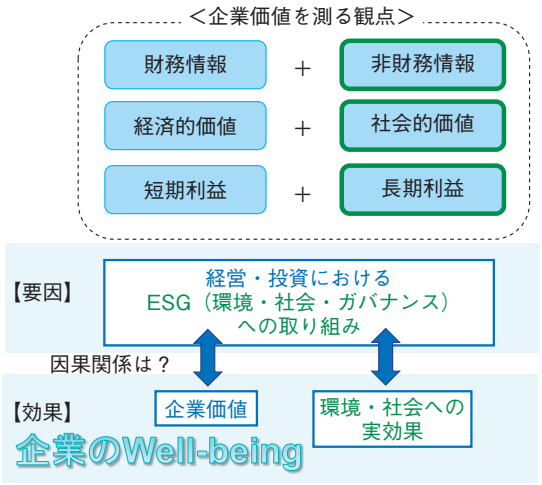


図 3　企業価値とESG

の各事象（例えば，米大統領選や脱炭素政策，災害，企業業績等）の因果関係等をモデル化しシミュレーションを行い，既存の統合評価モデルや新規モデル等を組合せ連成させることで，未来を予測します．その予測結果をさらにDTC上で評価し，さらなる予測，そして未来変革につなげます．いくつもの未来を見通したうえで，企業のESG戦略につながる予報や未来シナリオを提示することをめざし，企業価値向上に資する未来評価手法について研究開発します．これまでの企業価値の考え方に，非財務情報や社会的価値，長期利益の観点をより強化し，企業アクションにおける「要因」と環境・社会への「効果」をつなぐ因果関係を明確化することで，企業のWell-being*2の評価を試みたいと考えています（**図 3**）．

次に，未来予測シミュレーションを実現するための，ESGに着目した「未来予測技術」について，具体的に紹介します．

ESGに着目した未来予測技術

未来予測を実現するための１つのアプローチとして，国レベルにおける社会変化を予測し，それを踏まえて企業経営に影響する企業レベルの変化をさらに予測する方法が考えられます．国レベルの社会変化を予測するために，ESG経営科学技術グループは，2020年度から国立環境研究所等の研究組織と連携*3し，気候変動や日本が直面する少子高齢化等の社会課題を背景に，日本社会のさまざまな側面を考慮したいくつかの未来像を設定し，社会経済・環境側面の変化を定量的に予測する技術を開発しています．例えば，Society 5.0[4]にも掲げられている「サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させた，経済発展と社会課題の解決を両立する社会」のような未来像は，重要な１つであると考えています．今後，経済・環境および人々の生活の変化を先んじて把握することにより，社会や地球環境にポジティブな効果を最大限に発揮させ，ネガティブな影響をできるだけ回避することをNTTのESG経営を通じて実現することをめざします．同時に，予測したマクロレ

*2　Well-being：身体的，心理的，社会的に良好な状態，または，人間の心の豊かさや満足に関する概念．

*3　本研究は（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費JPMEERF20201002により実施．

表1　評価対象とするICTと直接的な導入効果

導入するICT	BAU	ケース1	ケース2	ケース3	直接的な導入効果
農業用ロボット/自動トラクター	—	○	◎	●	労働代替 生産性向上
植物工場/センサ	—	—	◎	●	安定生産
食品流通プラットフォーム	—	—	—	●	輸送距離削減（地産地消） 食品ロス削減

※ ○，◎，●が普及度合いの小，中，大を表す．

ベルの社会と経済・環境の変化をNTTの経営戦略にフィードバックし，よりプロアクティブな戦略立案を検討することができると考えています．

将来のIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）*4をはじめとする情報通信技術（ICT）により，どのような未来となるかを予測することをめざし，生産側面と消費側面に着目した予測技術について紹介します．

社会全体の環境経済へのインパクト予測技術

まず，生産側面に着目した「社会全体の環境経済へのインパクト予測技術」を説明します．ICTは，生産効率の向上や労働力の代替等により，経済を押し上げる効果はいうまでもないのですが，環境側面においては，ICT機器の利用による環境負荷（電力消費による温室効果ガスの排出）が発生する影響を持っています．一方で，生産・消費効率の向上による原材料投入の減少や脱物質化等を通じ，環境負荷の削減への効果があります．そこで，本技術では日本の産業連関表[5]をベースに，応用一般均衡モデル[6]を用いて，ベースとなる未来社会におけるマクロ経済の状況（生産や消費等）およびエネルギー消費量・温室効果ガス排出量をシミュレーションします．それを踏まえて，さまざまなICTが各産業に普及する際に，普及による直接的な導入効果（原材料投入の削減，移動削減や生産効率向上等）をモデルに入力し，その際の社会のマクロ経済の状況，さらにエネルギー消費と温室効果ガス排出量をシミュレーションします．

例として，2050年までに農業におけるいくつかのICTを導入する際の効果を示します．**表1**では，今回対象とした技術とその技術の普及度合い，直接的な導入効果を示します．今回は4つのケースで試算しており，ベースとなるケース（BAU）では，ICT普及が現状のままと設定しています．また，ICTの導入効果を評価するために，ケース1～3では，農業用ロボット・自動トラクターや，植物工場，食品流通プラットフォームのそれぞれの技術の普及度合いが小，中，大の3つのレベルに分けて導入されることを想定します．**図4，5**では，これらのICTの導入効果（農業の生産量と温室効果ガス排出量の変化）をモデルでシミュレーションした結果を示します．ICT普及度合いが小さいケース1では，農業の生産額を保ちつつ，温室効果ガス排出量が少し減少する結果が示されました．ICT普及度合いが大きいケース2と3では，農業の生産を向上する効果があり，食料自給率を高める一方で，環境負荷も高くなる可能性が示唆されました．

今後は，このような分析・予測を各産業分野で横断的に行うとともに，温室効果ガスやGDPの評価にとどまらず，資源，土地利用や水利用等を含む統合的で地球規模での評価について，DTCによる実現をめざします．

人々のライフスタイル変化を通じた環境影響予測技術

次に，消費側面に着目した「人々のライフスタイル変化を通じた環境影響予測技術」について説明します．ICTは，人々のライフスタイルを変化させ，産業の生産活動，さらには地球環境にも影響をもたらします．例えばテレワークシステムを利用し，通勤せずに在宅勤務をする人が増えると，自家用車や公共交通機関の利用の減少による環境負荷の低減が期待できます．しかし，自宅の照明や家事・家電製品の利用に伴う電力消費の増加を通じた環境負荷の発生が見込まれます．また，通勤時間が節約されることで趣味等の新たな活動時間も増加します．このよう

＊4　IOWN：NTTが2030年ごろの実用化に向けて推進している次世代コミュニケーション基盤の構想．

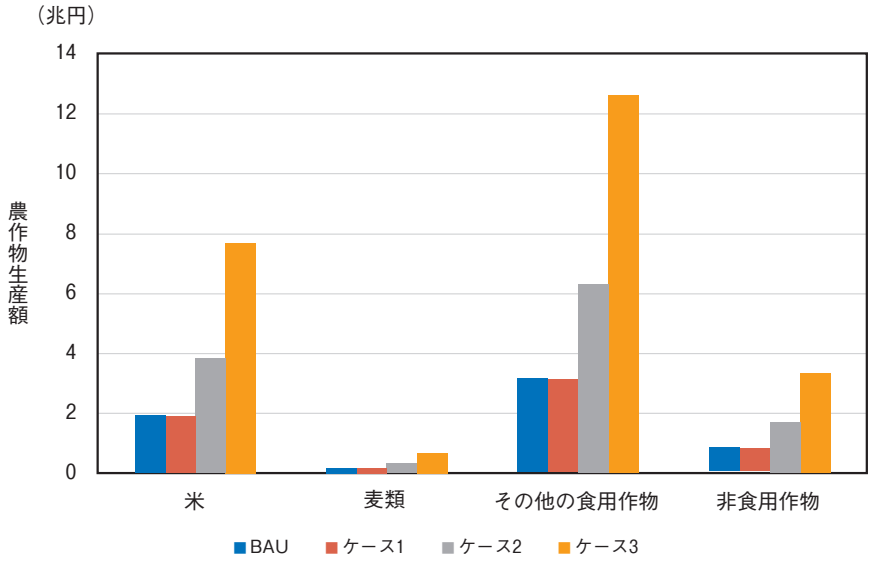


図4　各ケースにおける農作物生産額（2050年）

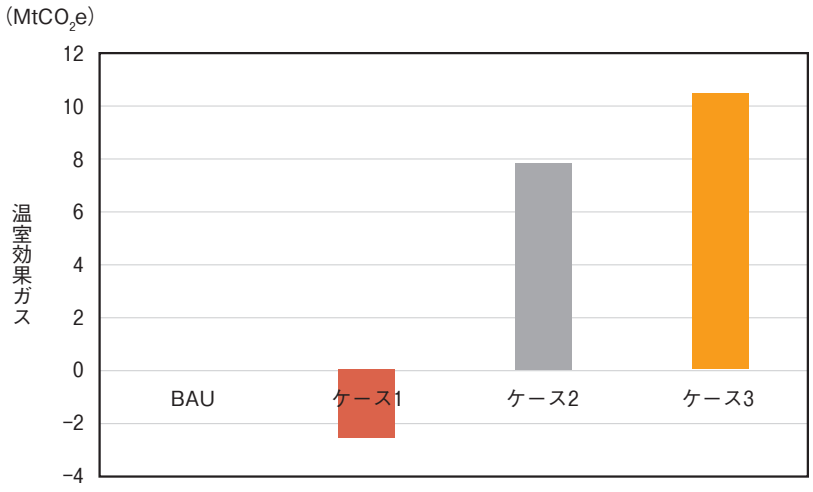


図5　各ケースとBAUの温室効果ガス（GHG）排出量の差分（2050年）

に，ICT利用を通じて移動等による環境負荷が低減される一方で，居場所の変更や時間節約に伴う活動変化により，環境負荷が増大することがままあります．

ライフスタイルの観点で社会の変化を予測するための一検討として，テレワークやオンラインショッピング，オンライン授業といったICTサービスが消費者の生活に広く浸透（ICT化）する際の環境影響の分析例を紹介します．人々の24時間の生活行動に着目し，統計データや調査資料を基にICT化による時間の使い方の変化を想定します．通勤し出社する業務から在宅勤務に切り替わり移動時間が減少すると，個々人での食事準備や余暇活動に割く時間が増加します．さらに，活動場所の変化や，読書や学習等の手段がICT化することを踏まえ，**表2**のように各行動について，ICT化による，活動時間や単位時間当りの温室効果ガス排出量の変化を整理します．各行動の内容や活動時間から必要なエネルギーやモノの消費を考慮し，Life-Cycle Assessment手法[7]により，環境負荷を温室効果ガス排出量として算定します．ICT化する前後で温室効果ガス排出量の変化の要因を分析し，減少をより促進するとともに増大を抑えるために重要な要素を特定します．生活行動に伴う環境負荷は，住まい方や電源構成といった社会状況にも影響を受けるため，そのような社会状況とICTの効果の関係性を反映することも必要になります．また，在宅疲れのようなICT化による負の影響にも着目し，社会課題を積極的に解決する企業のアクションにつなげる選択肢を創造できるようにし，より良い社会の実現に貢献したいと考えています．

DTCの取り組みの一環として，未来社会の姿を探索する技術，地球と社会・経済システムの包摂的な平衡解を導出する技術等により，個人の多様性や機会・可能性の拡大，社会構造の複雑化，地球規模の不確実性が増す未来において，Well-beingと表現されるような個人の生きがいや心の豊かさを増進しながら，地球・社会・個人の間で調和的な関係が築かれる未来の実現

表 2　ICT化による影響の構成要素例

行動	ICT化の前後での変化	
	活動時間	単位時間当り温室効果ガス排出（原単位）
通勤	在宅勤務に伴い減少	通勤手段自体は変わらず，原単位の変化なし
買い物	移動時間の減少	電子機器の電力消費に伴い増加
趣味	通勤の減少に伴い増加	趣味内容自体は変わらず，原単位の変化なし
・ ・ ・		

をめざしています[3]．

おわりに

今後，これらの技術をベースに未来予測技術を確立するとともに，企業価値や企業のWell-beingの評価手法を構築します．社会構造の複雑化，地球規模の不確実性が増していく未来社会を予測し，気候変動問題等に対するICTのさまざまな影響・効果を先んじて把握し，それらを企業のESG戦略に反映，プロアクティブに対応することにより，地球環境と人間社会の持続可能性かつ包摂性の実現とともに，企業価値の向上をめざします．

■参考文献

(1) https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h29/pdf.html
(2) 斎藤：“人新世の「資本論」,” 集英社, 2020.
(3) https://www.ntt.co.jp/news2020/2011/201113c.html
(4) https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/
(5) https://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/ichiran.htm
(6) http://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/74/column4.html
(7) https://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/3r_policy/policy/pdf/text_2_3_a.pdf



（左から）篠塚　真智子/ 田中　百合子/ 張　　暁曦

新しい研究テーマとして立ち上がったばかりです．今後，さまざまな社内外の連携を通じて，壮大なテーマにチャレンジしていきます．

◆問い合わせ先
NTT宇宙環境エネルギー研究所
企画担当
TEL　0422-59-7203
E-mail　se-kensui-pb @ hco.ntt.co.jp

安心・安全に暮らすための プロアクティブ環境適応技術

地球における環境の変化は，私たちの社会生活に大きな影響を及ぼすことが想定されます．本稿では，さまざまな影響を予測し，プロアクティブに対応し，人類が適応・受容することでレジリエントな社会を実現するための環境適応技術（地球情報分析基盤技術，気象予測・制御，雷制御・充電，電磁バリアなど）について紹介します．

加藤（かとう）　潤（じゅん）

NTT宇宙環境エネルギー研究所

はじめに

近年，国内外で極端気象*1の発生頻度が高くなっています(1)．特に日本において，豪雨や台風が極端気象の特徴事象となっていますが，豪雨や台風は観測・予測が難しく，予期しない災害をもたらします．このため高精度な気象予測が重要となっており，予測技術はかつての予報技術者の経験や主観などに基づいた技術から，気象レーダー等の観測技術，スーパーコンピュータによる数値解析技術などにより著しく進歩しました．しかし，台風の予測，特に勢力予測では現在でも衛星写真による予測が行われています．

気象観測は，地球規模での陸域と海域，そして宇宙からの観測データを基礎とする観測・予報システムのもとで定常的に行われていますが，局地的大雨などの激しい気象現象は発生から成熟期までわずか15分程度かつ数km単位(2)の空間内での急激な変動となるため，人工衛星やアメダス（自動気象データ収集システム）などの観測では，時間的，空間的に対応できない場合があります．

また，温暖化に伴う海面水温の上昇による台風への水蒸気供給量の増大や中緯度偏西風の蛇行など，全球的な気候変動による影響が指摘されています(3)．気候変動は，長期的な地球の自然気候変動があるものの，人間活動による影響もあるという指摘がなされています(4)．地球の気候の状態を調べ，理解し，診断することが長期的な気候変動の予測および人為起源の影響を抑制する政策を実施するうえで極めて重要です．地球の気候の状態を評価するためには広域な観測を実施する必要があります．人工衛星によってその観測を実施することができますが，観測精度（大気の鉛直成分や海水面下の観測など）に課題があると考えます．

そこで私たちは，極端気象や気候変動などの地球環境変化について高精細に予測し，事前に対策を実施することで影響を受容可能とすることを目的とし，後述する技術開発に取り組んでいます．

地球情報分析基盤技術

今までほとんど観測されていない海上，海中および山中の情報を幅広く活用し，気象予測や被災予測をリアルタイムかつ高精度に行うための検討を進めています．現在，国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）によって，2020年5月に革新的衛星技術実証テーマとして採択された「衛星MIMO技術を活用した920 MHz帯衛星IoTプラットフォームの軌道上実証」(5)をベースとし，地上通信インフラでは情報を収集できないエリアをカバーすることを検討しています．このシステムは，500 km上空の衛星で地上のさまざまなIoT（Internet of Things）センサの情報を一斉に取得し，地上に束ねて情報を送信し，地上で分析する新たなセンサネットワークシステムです．

本ネットワークを用い，IoTセンサを所望の位置に設置することできめ細

*1　極端気象：極端な高温・低温や強い雨など，特定の指標を超える現象のことを指します．

かい気象観測を実施し，変化の激しい局所豪雨や台風などの極端気象の予測に資するデータ取得・データ同化*2が可能となります（図１）．

気象予測・制御技術

地球情報分析基盤技術を活用して気象情報を収集し，そのデータよって地球全体の気象現象のデジタルツイン*3を構築し，デジタルツイン上での気象予測と気象制御のシミュレーションの実現をめざします．

気象予測では高精細な気象観測に取り組みます．特に極端気象である台風に関する気象データを海洋や空中から観測するシステムの設計と実測を行っています．また台風の気象モデルについても大学等と連携して検討を進めます．

気象制御の例として，台風と雷について説明します．台風の制御については，深海と浅海の水を入れ替える水塊交替によって近海の温度を下げて台風の勢力を弱くする技術や，台風のエネルギーを電力に変える技術などについて検討しています（**図２**）．

次に，雷制御については**図３**に示すように飛行体を利用して落雷を安全な場所に導く技術の開発をめざし，ドローンなどの飛行体に雷撃を受けても飛行を維持するための装備や機能を検討しています．**図４**にドローンに格子状のファラデーケージ*4（Faraday cage）を取り付けたものに雷撃を当てた瞬間の写真を示します．同型のドローンは雷撃後にコントロールを失い墜落しましたが，ファラデーケージを取り付けたものは雷撃を受けた後も飛

*2　データ同化：主に地球科学の分野において数値モデルの再現性を高めるために行われる作業です．簡単にいえば，モデルに実際の観測値を入力してより現実に近い結果が出るようにすることを指します．

*3　デジタルツイン：現実の世界から収集したさまざまなデータを，まるで双子であるかのように，コンピュータ上で再現する技術．コンピュータ上では，収集した膨大なデータを基に，限りなく現実に近い物理的なシミュレーションが可能となり，自社製品の製造工程やサービスのあり方をより改善するうえで有効な手段となります．

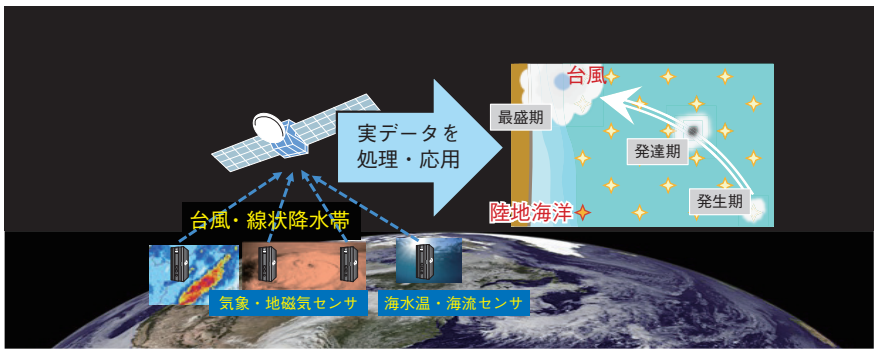


図１　衛星IoTプラットフォームを活用した地球情報分析の実現イメージ



現状：センシングが十分できていないため気象，被害予測の精度が向上されていない．
課題：新しいセンシング手法の確立．
台風のリアルタイム観測，社会インフラなどの脆弱性センシングを手法の実現．

現状：高精度のシミュレーションがないために気象制御の実施，エネルギー変換の効率化ができていない．
課題：気象＋インフラ，人，モノなどの複雑な要素を取り入れるため，DTC技術を用いたモデリング手法を確立する必要がある．

現状：極端気象に対して社会が適応できていないため被害が大きくなる．
課題：電磁波・レーザによる台風等極端気象のリスクを制御，およびエネルギーに変換することで環境適応可能な社会を実現する必要がある．

図２　気象予測・制御技術の概要

行を継続し，耐雷撃性能が高いことが確認されました．

さらに雷のエネルギーを取得・利用する手法についても検討し，雷のエネルギーのみで自律運行する落雷制御システムを構築し，安心・安全な社会を実現します．

また当グループでは，宇宙視点で人類の社会，環境の未来を革新させる技術の創出をめざした研究開発にも取り組んでいます．

電磁バリア技術

将来，人類が宇宙に進出し，居住空間を形成し長期間居住するためには，太陽や銀河から到来する強力な宇宙線*5による人体と精密機器への影響を低減させることが大きな課題となることから，宇宙線の評価および宇宙線を防ぐバリア技術の確立に取り組んでいます．

地上での宇宙線の影響は主に中性子由来ですが，宇宙空間では陽子が主となります．陽子は電荷を持つため強力な磁界や電界，遮蔽シールドによって宇宙線を遮断・屈折させる電磁バリア（**図5**）を形成できます．

この技術を検討するために宇宙空間での検証が必要となりますが，宇宙へ実験資材を搬送することは容易ではありません．そこで，宇宙船や宇宙ステーション，月面基地をサイバー空間上にデジタルツイン化し，仮想空間で電磁バリアを設計可能とする技術の確立をめざしています．

本検討では，私たちが有する地上での中性子線による影響評価技術[6]をベースに陽子による影響評価技術を確立するため，宇宙空間での事象を再現可能な陽子加速器での試験や簡易なシミュレーションを行います．

本研究が進めば長期間宇宙で生活できるようになるばかりか，有人惑星探査や月面基地も夢ではなくなります．また宇宙空間に超高セキュリティ，高信頼なデータセンタを構築することもできます．

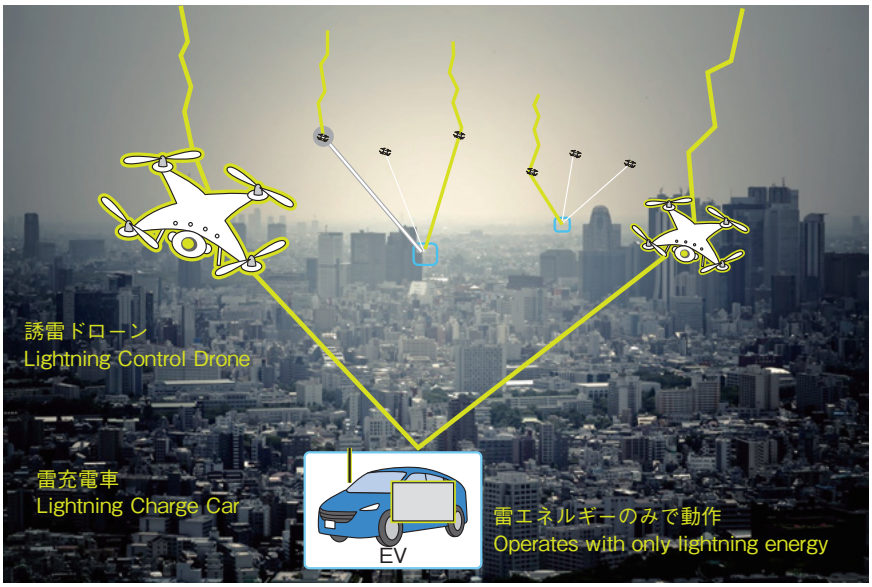
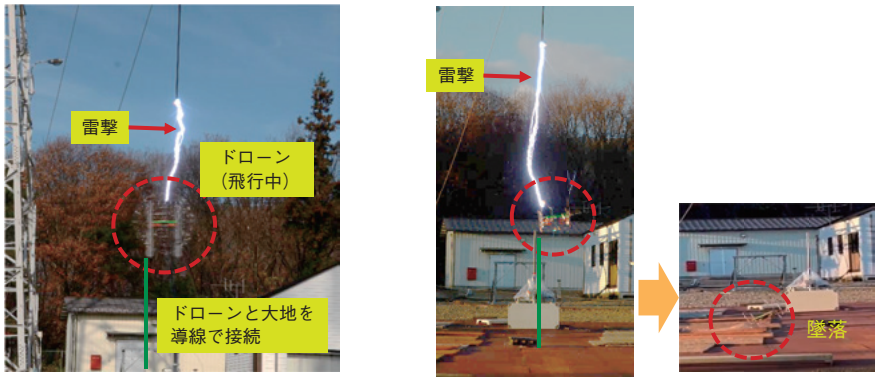


図3　ドローンを用いた雷制御・雷充電システムのイメージ



ケージあり【この後も飛行継続】　ケージなし【雷撃後に墜落】

図4　ドローンの耐雷撃性能試験模様（ファラデーケージによる効果）

まとめ

私たちは，今後より影響が大きくな

*4　ファラデーケージ：導体に囲まれた空間，またはそのような空間をつくり出すために用いられる導体製の籠や器そのもの．導体に囲まれた内部には電気力線が侵入できないため，外部の電場が遮られ，内部の電位はすべて等しくなる．ファラデーシールドとも呼ばれます．

*5　宇宙線：宇宙空間を飛び交う高エネルギーの放射線のことです．主な成分は陽子であり，太陽および銀河を起源としています．長期間の宇宙線被ばくにより電子機器や生体への影響が懸念されます．

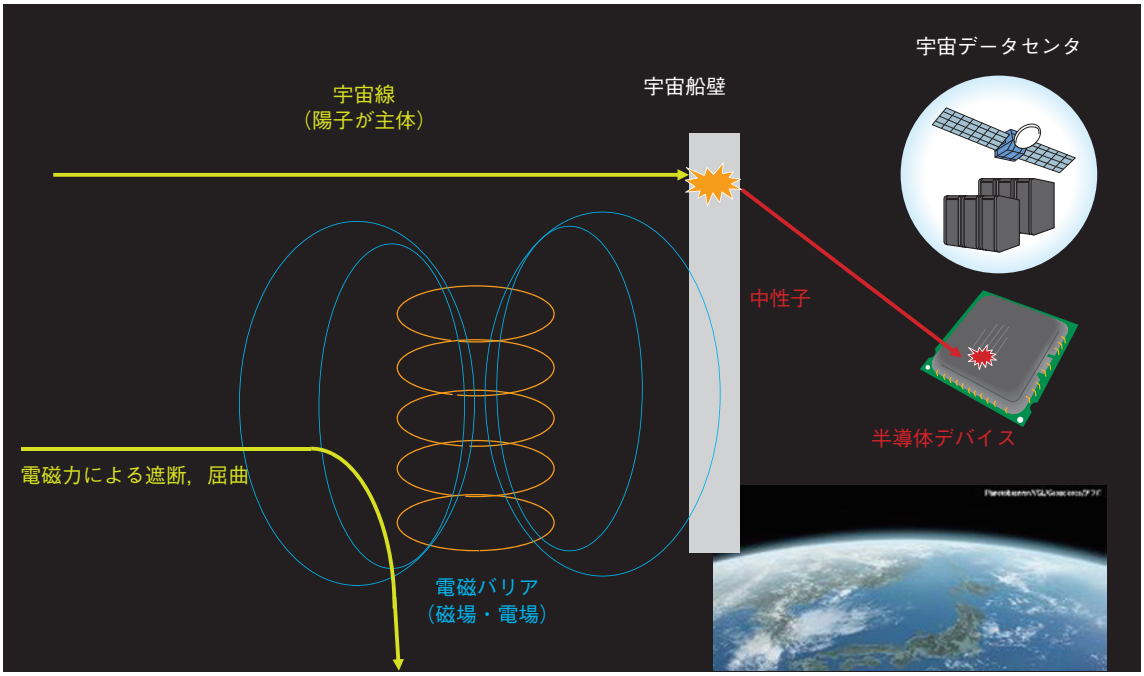


図 5　宇宙空間における電磁バリアシステムのイメージ

ると予想される極端気象や気候変動に対し，高精細に予測し，事前に対策を実施するため，新しいネットワークプラットフォームを用い，現在よりきめ細かい気象観測を実施しつつ，デジタルツインによる解析を活用した気象予測技術を確立し，影響を受容可能とすることを目標に取り組みます．また宇宙線を遮断・屈折させる電磁バリアの検討を進め，人類の社会，環境の未来を革新させる技術の創出をめざします．

■参考文献

⑴ 豊田：“極端気象と観測・予測技術，”極端気象の予測と防災：科学技術に関する調査プロジェクト，2019.
⑵ 中北・佐藤・山口：“ゲリラ豪雨予測の高精度化に向けた積乱雲の鉛直渦管生成メカニズムに関する研究，”京都大学防災研究所年報，第60号 B，pp. 539-558，2017.
⑶ S. C. Herring, N. Christidis, A. Hoell, J. P. Kossin, C. J. Schreck III, and P. A. Stott：“Explaining Extreme Events of 2016 from a Climate Perspective，”Special Supplement to the Bulletin of the American Meteorological Society，Vol. 99，No. 1，pp. S1–S157，Jan. 2018.
⑷ IPCC：“Climate Change 2007: The Physical Science Basis，”Working Group I contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change，Cambridge University Press，2007.
⑸ https://www.ntt.co.jp/news2020/2005/200529a.html
⑹ https://www.ntt.co.jp/news2020/2011/201125a.html



加藤　潤

極端気象や気候変動の予測の実現に必要な研究要素を引き上げるだけでなく，世のため人のためにどのように新たな価値を提供できるのかも併せて考え続けていきたいと思っています．

◆問い合わせ先

NTT宇宙環境エネルギー研究所
企画担当
TEL　0422-59-7203
E-mail　se-kensui-pb＠hco.ntt.co.jp

主役登場

環境負荷ゼロのエネルギーネットワークをめざして



花岡　直樹
NTT 宇宙環境エネルギー研究所
研究主任

近年，自然災害が激甚化・頻発化しており，被災地域を中心に自然災害への対応力の向上（レジリエンス）が重要となっています．また，地球環境への配慮やエネルギー自給率の向上を目的として太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー（再エネ）の導入拡大が求められています．NTTグループでは，2020年5月に環境エネルギービジョン「環境負荷ゼロ」を策定し，NTTグループ全体で再エネ利用の割合を2030年度までに30%以上に引き上げることを掲げ，さらには地球環境の再生と持続可能かつ包摂的な社会の実現に向け，革新的な技術を創出することをめざしています．

このビジョンを実現するため，NTT宇宙環境エネルギー研究所の環境負荷ゼロ研究プロジェクトでは，「エネルギーネットワーク技術」「次世代エネルギー技術」「サステナブル技術」を3本柱として研究しています．この中で私たちは，「エネルギーネットワーク技術」における，双方向直流マイクログリッドの実現に向けた研究を進めています．私たちの考える双方向直流マイクログリッドとは，NTTの通信ビルで培った通信機械室向けの直流給電技術を強みに，再エネによる発電システムと蓄電池を備えた通信ビルと避難所双方の電気設備を通信・電力線で接続した直流給電システムのことです．実現すれば，平時は再エネによる電力の地産地消が可能となり，大規模災害時に停電が長期化したときは通信ビルから避難所に電力を供給することが可能となります．

双方向直流マイクログリッドを実現するために，中でも重要な課題は，自然災害や人災による，火災や感電の重大事故の発生を未然に防ぐための安全なシステムを構築することです．重大事故を引き起こす主な要因には，「屋外直流配線における短絡（ショート）・地絡」および「屋外直流電気設備への直撃雷・誘導雷」があります．

私は特に「屋外直流配線における短絡・地絡」について，事故時に流れる大電流を安全に遮断する技術開発に取り組んでいます．屋外直流配線の長さは屋内と異なり，時には数kmに及びます．配線自身のインピーダンスの変化に応じて，事故点に流れ込む電流も大きく変化するため，屋内の電流遮断技術をそのまま適用することができません．さらに，電気通信事業に求められる高い信頼性と電気事業に求められる高い安全性を両立することが必要です．そのため，NTTグループ会社をはじめ業種の異なるさまざまな企業，大学，自治体と意見交換をしながら，新しいエネルギー供給のあり方について検討を重ねています．

私は，これらの研究を積み重ね，将来的に高い信頼性と安全性を兼ね備えた双方向直流マイクログリッドを社会実装につなげたいと考えています．そのために環境や経済の側面を含む多面的な観点から技術の開発を継続していきます．NTTグループのスマートエネルギー事業を支えることを通して，環境負荷ゼロの安定したエネルギーネットワークを実現し，1人ひとりが自然とともに安心・安全に暮らせる社会づくりに貢献していきたいと考えています．

明日のトップランナー

NTT宇宙環境エネルギー研究所

秋山一也 グループリーダ

「核融合炉の最適オペレーション技術」
「宇宙太陽光発電」



2020年７月に発足したNTT宇宙環境エネルギー研究所．地球環境の再生と持続可能かつ包摂的な社会の実現に向け，次世代エネルギーを含めたスマートエネルギー分野に革新をもたらす技術と，地球環境の未来を革新させる技術の創出とを目的とした新たな研究所です．今回は環境負荷ゼロ研究プロジェクトの研究のひとつ，次世代エネルギー技術グループを率いる秋山一也グループリーダにお話を伺いました．

◆PROFILE：1997年NTTに入社，環境エネルギー分野の研究に従事（うち2009年～2013年はNTT西日本技術革新部に出向）．2015年株式会社エネット・経営企画部長に就任．2017年NTT技術企画部門にて，合弁会社立ち上げなどに携わる．2018年NTTファシリティーズにて，ソリューション開発や販売などに携わる．2020年７月宇宙環境エネルギー研究所 環境負荷ゼロ研究プロジェクト 次世代エネルギー技術グループ グループリーダに就任）．

宇宙環境エネルギー研究所とは

◆宇宙環境エネルギー研究所について教えてください．

もともとNTTには「環境エネルギー研究所」という研究所があり，NTTの通信ビルの省電力化，電柱や電線といった通信設備の長寿命化などに取り組んできました．その後，事業会社と一体になってR&Dに取り組もうということで環境エネルギー研究所は2015年春に廃止となりました．それから５年を経て，NTTグループという狭い視野ではなく，地球全体の未来を変えようという壮大な目的で，まったく新規で次世代エネルギーを含めたスマートエネルギー分野に革新をもたらす技術の創出と，地球環境の未来を革新させる技術の創出をめざした宇宙環境エネルギー研究所が2020年７月に発足しました．

研究所内には「環境負荷ゼロ研究プロジェクト」および「レジリエント環境適応研究プロジェクト」の２つのプロジェクトがあります（**図１**）．

「環境負荷ゼロ研究プロジェクト」は，これまでのNTTグループの研究所ではあまり扱わなかったテーマを扱おうというプロジェクトで，次世代エネルギーの活用技術を研究する「次世代エネルギー技術グループ」，仮想エネルギー流通基盤技術を研究する「エネルギーネットワーク技術グループ」，CO_2変換技術や環境負荷低減技術を研究する「サステナブルシステムグループ」の３グループで構成されています．

一方，「レジリエント環境適応研究プロジェクト」は，少し毛色の違ったプロジェクトで，ESG経営リスクマネジメント技術を研究する「ESG経営科学技術グループ」，環境適応リスクマネジメント技術を研究する「プロアクティブ環境適応技術グループ」の２グループで構成されています．

私が属する「次世代エネルギー技術グループ」は，圧倒的にクリーンかつ無尽蔵なエネルギー源の創出テーマとし，「核融合炉の最適オペレーション技術」と「宇宙太陽光発電」の２つの研究テーマに取り組んでいます．

◆「核融合炉の最適オペレーション技術」について教えてください．

核融合というと「原子力発電所とどう違うのですか」と良く聞かれます．原子力発電所で使われている技術は核分裂で，ウランのような重い原子が分裂するときに放出されるエネルギーを取り出すものです．

一方，水素のような軽い原子どうしが融合するときに放出されるエネルギーを取り出すものが核融合です．核分裂が放っておくと連鎖反応により際限なく続くのに対し，核融合では原子を非常に正確にコントロールしないとすぐに止まってしまいます．

現在，平和目的の核融合エネルギーが利用可能であることを実証するため，人類初の核融合実験炉を建設運転しようとする超大型国際プロジェクト（ITER計画）が日本・欧州連合（EU）・米国・ロシア・韓国・中国・インドの７極により進められています（**図２**）．

核融合実験炉ITERで核融合を起こすには，まずドーナツ状の磁場の中に燃料となる重水素，三重水素を閉じ込めてプラズマ状態にし，１億5000万度まで加熱します．ここからエネルギーを取り出すにはプラズマを長時間安定的に発生させる必要がありますが，そのためには核融合炉から得られる膨大なデータをコント



図１　宇宙環境エネルギー研究所

ロールセンターに転送し，そこで最適な数値を計算し瞬時にフィードバックする必要があります．その実現には制御ネットワークのさらなる高度化，低遅延化が不可欠となりますが，そこにNTTが現在研究開発を行っているIOWN構想のオールフォトニクス・ネットワークやディスアグリゲーテッドコンピューティングなどが貢献できるのではないかと考えています．



また，将来的にはデジタルツインコンピューティングを活用し，サイバー空間上に核融合炉をリアルに再現することで，高度なシミュレーションや未来性能予測によりさらなる制御技術の向上にも寄与する計画です．

現在は2025年のファーストプラズマ達成に向けて，IOWNが貢献できないか検討を進めています．

◆「宇宙太陽光発電」について教えてください．

「宇宙太陽光発電」は，地上36000キロ上空の静止衛星軌道上で太陽光発電を行い，そのエネルギーを地上にレーザーやマイクロ波で送りとどけ，再度地上で電力などのエネルギーに変換するという構想です．静止衛星軌道上では，ほぼ24時間365日太陽からのエネルギーを受けることが可能なうえに，地球の大気によるエネルギーの吸収や散乱の影響を受けないことから，地上と比較し単位面積当たりで約10倍のエネルギーを安定して受けることができます．我々はマイクロ波よりも波長が３～４桁ほど短いため，ビームの広がり角が小さく長距離を伝送させやすいという



観点を重視し，レーザーによるアプローチを試みています．

技術要素としては大きく分けると３つあり，１つめは太陽のエネルギーを効率よくレーザーに変換する技術，２つめはレーザーを地上のターゲットに正確に照射する技術，そして３つめは宇宙から届いたレーザーを効率よく電気に変換したり，電気以外の形態に変換して効率よく蓄えたりする技術です．

１つめの技術については，太陽光の各波長成分をシフトさせ，単色，つまり特定の波長のレーザーに変換する「スペクトルシフトレーザー技術」を検討しています．太陽光を直接レーザーに変換できるため，高い変換効率が期待できます．

また，宇宙から地上に送るレーザーは，非常に長い距離を大気の揺らぎなどを取り除いた上で，高いエネルギー密度で伝送させる必要があります．そこで，２つめの技術については焦点深度の深い光学系を活用する方式や，いくつものビームを重ね合わせることによってエネルギー密度を高める方式を検討しています．

３つめの技術については，通常はエネルギーを電力に変換する場合には太陽電池を利用しますが，我々の身近にある一般的な太陽電池の変換効率はおおよそ20%しかありません．残りの80%は表面で反射や透過などによって熱として失われています．そこで単色のレーザー光を効率よく変化する素子の研究に加えて，熱化学反応や触媒を用いていったん水素やアンモニアといった違う形態にエネルギーを蓄える方法についても検討を行っています．この技術は水素社会を実現するためのキーにもなりうるのではないでしょうか．

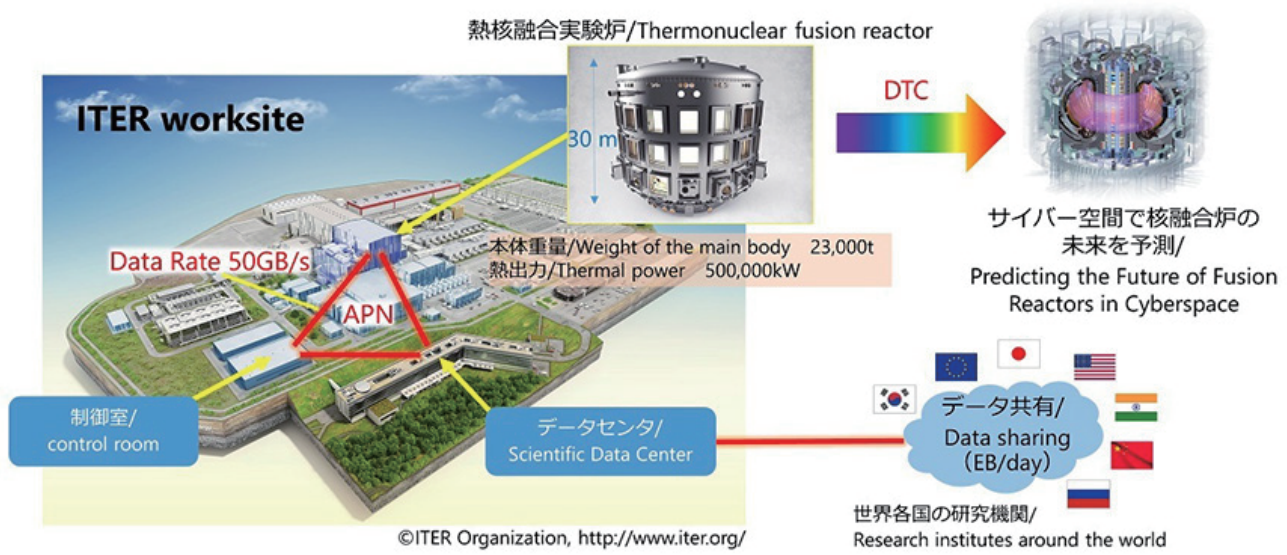


図２　核融合炉の最適オペレーション技術

宇宙環境エネルギー研究所はまだ発足したばかり



◆今後の展開についてお聞かせください.

ITER計画では，ファーストプラズマが2025年，本格的な試験開始が2035年に予定されています．商業的にペイするかどうかの検討はそのタイミングで行われ，実用化されるのは2050年以降になるでしょう.

現在は核融合炉の最適オペレーションの実現に向けて研究開発を行っていますが，最難関のここでしっかりとIOWN技術のユースケースを創っておけば，超高速で低遅延のネットワークを使って機器をリアルタイムで制御する技術や，大容量のデータを高速で処理してデータを伝送する技術は他の産業や分野にも適用可能だと思います.

「宇宙太陽光発電」も同様で，現在は21世紀中頃の実現が目標とされています. こちらも数十年を要する非常に気の長い話です. そのため，研究で得られた成果を早めに切り出し，社会に貢献することを考えています.

例えば最終的には36000キロの伝送を目指しますが，一足飛びにそこを目的とするのではなく，それよりも短い距離で，例えばドローンや自動車などの移動体にレーザーを照射してエネルギーを伝送する技術，また災害時にNTTの通信ビルから被災地の公民館や避難所などに向けてエネルギーを伝送する技術への転用などが考えられるでしょう.

◆NTTの強みはどのような点にあるとお考えでしょうか.

私がNTTグループの研究所について面白いな，と感じる点は，色がついていない，特定の分野に偏っていないということです.

NTTは通信産業を担う会社ですが，研究分野は通信に限られておらず，エネルギーサイエンスやコミュニケーションサイエンスなどさまざまな研究を行っています．そのため，いろいろな分野の専門家が身近にいて議論をすることができます．我々もネットワークに関しては情報ネットワーク総合研究所，情報処理で言えば先端技術総合研究所やサービスイノベーション総合研究所などの各研究所をはじめ研究企画部門などとも連携し，まさに「オールNTT」体制で研究にあたっています.

また，エネルギー分野に革新をもたらす技術の創出，地球環境の未来を革新させる技術の創出という非常に高いビジョンを掲げていることもあり，フラットな立ち位置で研究に臨めるということがNTTの強みではないかと思います.

◆研究者，学生の方へメッセージがあればお願いします.

現在，宇宙環境エネルギー研究所はまだ発足したばかりですし，新しい分野へのチャレンジですので，我々にスキルやノウハウが足りないところも多々あります．通信だけでなく，核融合や宇宙分野を専門とする方などが必要です. そうした点を補うため，NTTグループに留まらず，さまざまな技術をお持ちの研究所，大学，企業の方と今後も積極的に連携していきたいと考えています.

今回のインタビューを通じ，少しでも興味を持たれた方がいらっしゃれば，ぜひ我々にアクセスして欲しいと思います．また，お話しした２つの研究テーマ以外でも，エネルギー分野に革新をもたらす技術についてアイディアがあれば，ぜひ宇宙環境エネルギー研究所の門を叩いてほしいと思いますね．この研究所ではそれをやれるだけのチャンスを得られると思いますよ.

特集

人と社会を支えるヘルスケアデバイス・インフラメンテナンス技術

Healthcare Device and Infrastructure Maintenance Technology

本特集では,人の健康やインフラの老朽化に配慮した持続可能な社会の実現に向け,NTT研究所が取り組んでいるヘルスケアデバイスやインフラメンテナンス技術について解説するとともに,実用化間近の研究成果や最先端技術を紹介する.



持続可能な社会に向けたデバイス技術が切り拓く未来 42

NTT研究所が培ってきたデバイス技術を活用したスマートヘルスケア技術，およびインフラメンテナンス技術の方向性について紹介する．

より安心して働ける作業現場の実現に向けた体調管理技術 47

NTTデバイスイノベーションセンタがこれまで培ってきたウェアラブルデバイス技術，データ解析技術に，温熱生理学・運動生理学の知見を加え開発した，より安心して働ける作業現場の実現に資する体調管理技術を紹介する．

光音響計測技術を活用した非侵襲生体情報センシング 51

NTT先端集積デバイス研究所の，光が持つ特定の成分を選択的に測る特徴と，音(超音波)が持つ生体内をよく伝搬する特徴を組み合わせた光音響計測技術により，生体内部にある情報収集をめざした非侵襲生体情報センシング技術について紹介する．

ハイパワーレーザデバイスを用いた錆取り技術の実現に向けて 56

NTTデバイスイノベーションセンタがこれまで培ってきた回折素子をベースにしたハイパワーレーザデバイスを組み込んだ，小型で軽い錆取り技術の概要について紹介する．

コンクリート電柱内鉄筋の水素脆化予測技術 59

NTT先端集積デバイス研究所で研究開発している，水素脆化加速試験および統計的データ解析を用いたコンクリート電柱内鉄筋の水素脆化予測技術について紹介する．

主役登場 63

高河原 和彦（NTTデバイスイノベーションセンタ）
ウェアラブルセンサによる新たな価値をパートナーと共創

持続可能な社会に向けたデバイス技術が切り拓く未来

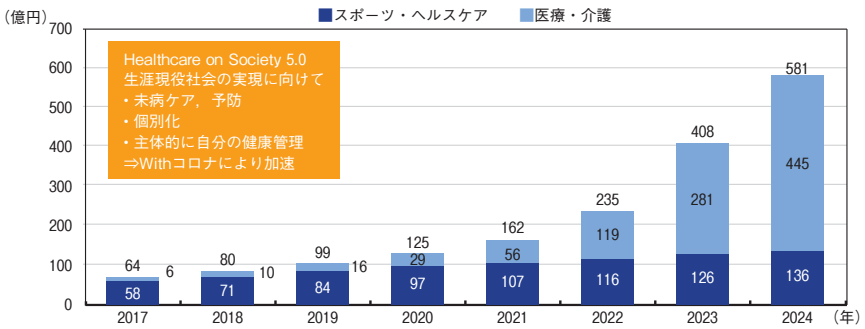
本稿では，人の健康やインフラの老朽化に配慮した持続可能な社会の実現に向けて，NTTが取り組む研究開発について概説します．国内外の社会課題の解決に向けた潮流について簡単に触れ，NTT研究所が培ってきたデバイス技術を活用したスマートヘルスケア技術やインフラメンテナンス技術の方向性について述べます．具体的な研究事例として，人やインフラの状態を把握・推定し，予防・保全に役立てることが可能な実用化間近の研究成果や最先端技術を紹介します．

とみざわ　まさひと
富澤　将人[†1]　　おかだ　あきら
岡田　顕[†2]

NTTデバイスイノベーションセンタ　所長[†1]
NTT先端集積デバイス研究所　所長[†2]

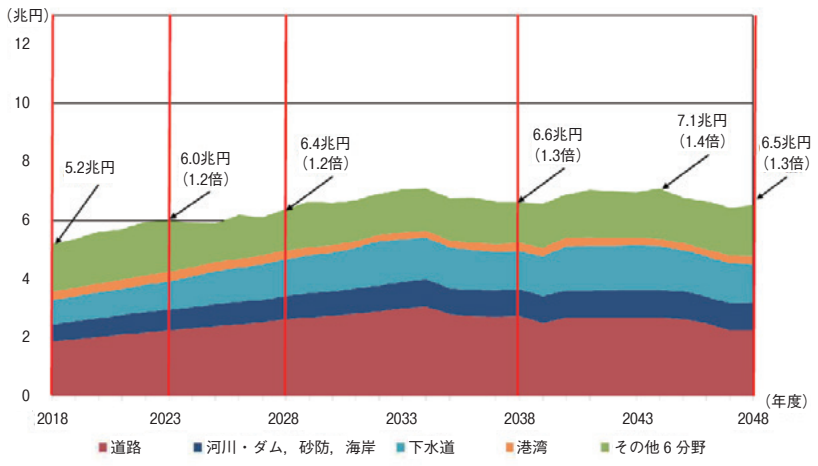
持続可能な社会実現に向けた課題

少子高齢化，地球温暖化，エネルギー問題，食糧危機など世界中でさまざまな問題が顕在化してきており，文明の発展に伴い人類が享受してきた経済成長を今後継続的に発展していくためのターニングポイントが2030年ともいわれています．世界では持続可能な社会の実現に向けてSDGs（持続可能な開発目標）が制定され，日本においてもSociety 5.0に向けた取り組みが重要課題として位置付けられています[(1), (2)]．そのような状況で経済や地政学的な世界秩序の再編時代に入り，情報化社会をどのように見直していくのかが大きな課題となっています．このような課題を解決していくためには，社会システム全体に視野を広げながら世の中のニーズをとらえ，産業として継続的な事業が実現できるような技術開発が必要になってきます．すなわち，社会課題の解決と事業の継続性を両立させることが，真に持続可能な社



出典：野村総合研究所第273回ＮＲＩメディアフォーラム（2018年12月６日発行）
野村総合研究所のデータを基にNTTが作成

図１　Health Techの国内市場規模推移



※推計値は幅を持った値としているため，グラフは最大値を用いて作成．

出典：「国土交通省所管分野における社会資本の将来の維持管理・更新費の推計」（国土交通省）
（https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/_pdf/research01_02_pdf02.pdf）

図２　インフラ維持管理・更新費の推移

会を実現することになります．

このような取り組みに挑戦しようとする場合，人を中心とした取り組みが１つの大きな糸口になると考えます．人を中心ととらえた場合，人そのものの健康やヘルスケアと，人を取り巻く環境という２つの側面があり，人と環境に配慮した技術開発を行うことで事業の継続性を実現しながら社会課題の解決に大きく貢献できると考えます．人の健康に着目した場合，生涯現役社会の実現による経済効果は33兆円，Health Tech市場は500億円以上ともいわれており（**図１**），日常的なモニタリングによる早期介入と個別指導による未病ケア・予防など，主体的に自分の健康を管理していく時代がくると考えられます．このような課題認識は以前から指摘されていましたが，昨今の感染症拡大により健康のDX（デジタルトランスフォーメーション）化の必要性が一気に高まっているといえます．環境に配慮した技術については，情報化社会のもっともベースとなるインフラ設備のメンテナンスをいかに効率良く維持していくかという問題があります．国内のインフラ維持管理・更新の費用は５～７兆円規模が必要と推定され，その費用は莫大です（**図２**）．インフラメンテナンスは，設備がさまざまな環境下で長期間使用されるため，10年単位の物理現象を評価・解明する必要があるなど，極めて難しい技術領域になります．現在は人手による作業が多くなっていますが，技術の力でDX化ならびに点検の自動化を実現することが求められています．

このような背景のもと，持続可能な社会の実現のため，NTTではスマートヘルスケア技術およびインフラメンテナンス技術の研究開発に注力しています（**図３**）．

スマートヘルスケア技術・インフラメンテナンス技術の方向性

■スマートヘルスケア技術

人の健康やヘルスケアを日常的にサポートしていくためには，日々の生活の中で存在を意識せずに必要な情報を取得したり，また状況に相応しい情報を提示したり，自然なかたちで生活に

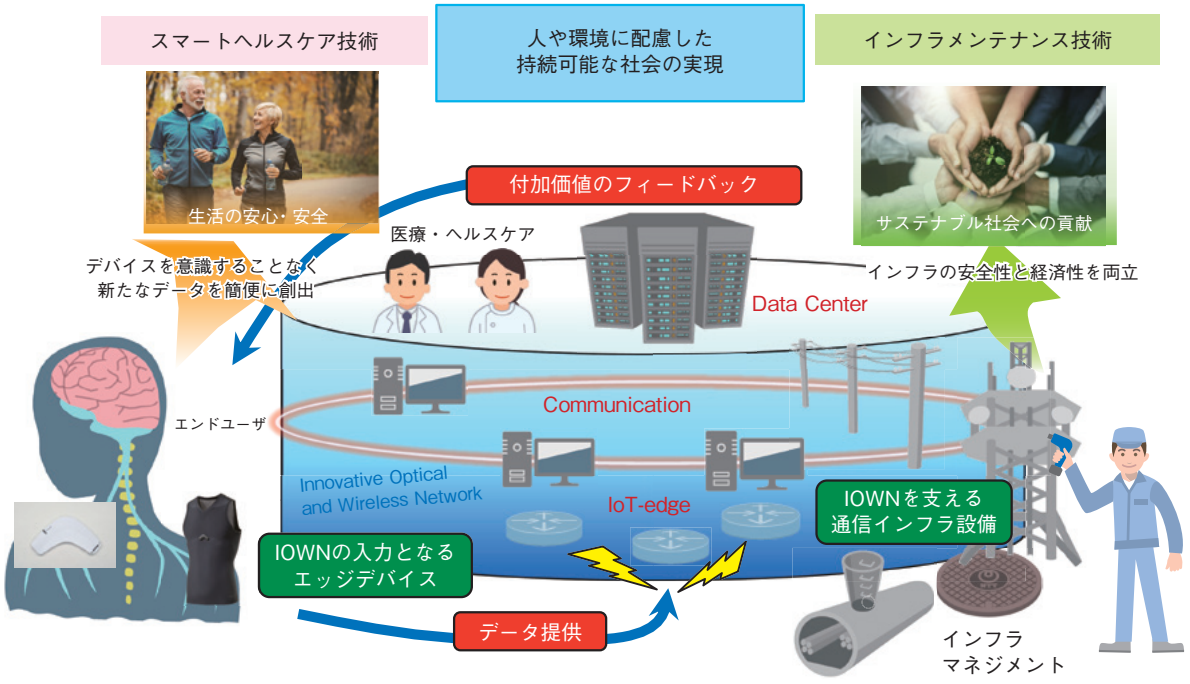


図３　持続可能な社会実現に向けたスマートヘルスケア・インフラメンテナンス技術

溶け込み暮らしを豊かにするデバイス技術の創出が求められます．今までも携帯型の心拍や脈拍を計測するバイタルセンサ端末やスマートウォッチなどが商用化されてきており，さまざまな場面でその有用性が認められ始めていますが，社会課題の解決と市場の立ち上がりという観点ではまさにこれからという状況です．大きなトレンドとしては，今までのフィットネスレベルの活用から医療グレードに踏み込んだメディカル応用ともいうべき真のヘルスケアへと展開していく潮流が始まっています．NTTでは，低電力マルチセンサデータ処理技術や高精度センシング技術を新たに開発し，従来の心電計測や加速度センサだけでなく，ウェアラブルデバイスとしては初めて温湿度センサも内蔵したウェア型の小型低電力トランスミッタを実用化しました[(3)]．本デバイスを活用することで，体内温度の変動や身体負荷の推定が可能となり，今まで分からなかった身体情報がリアルタイムで把握できることにより付加価値の高いサービスが展開できます．その先の技術としては，非侵襲の高選択・高感度モニタリングを可能とする光音響センシング技術や分子標識技術を研究開発しています．患者数が年々増加している生活習慣病・慢性疾患において従来では測れていなかったバイタル情報やバイオマーカを対象として，唾液・血液などの検体採取が不要でより簡便なバイオセンサデバイスの実現をめざしています．

■インフラメンテナンス技術

さまざまな過酷な環境下で数十年という長期間使用されるインフラ設備は，多くの人手と経験に支えられているのが実情で，効率的な作業に寄与する技術開発はまだまだ不十分であり，さらにはインフラ設備を構成する材料等の10年単位での劣化進行度など不明なことも多い状況です．今後は安全性と経済性を両立した持続可能なインフラ保全を実現していくことが極めて重要になります．インフラ保守は主に，①保守計画，②点検，③診断，④補修・補強・改修というステップで構成されます．より効率的で安全なインフラ保守を実現するには，事前の計画をできるだけ正確に立てること，人手で支えられている補修作業等を効率化することがポイントになります．インフラ設備は主に鉄鋼とコンクリートでできており，インフラメンテナンスは鉄鋼とコンクリートの保守といっても過言ではありません．そこで，NTTとしては，インフラ保守を予防保全という観点で，鉄鋼やコンクリート電柱にフォーカスし，既存技術では極めて解決困難な「錆除去作業の効率化」と「劣化推定」に資する技術を研究開発しています．通信鉄塔をはじめとする鉄鋼製のインフラ設備は，錆の発生によって老朽化が進行するため，それを除去することが重要です．NTTで培った光回折素子技術を活用しハイパワーレーザと組み合わせることで市中製品と比較して数倍軽量化が可能になり大幅な作業効率の向上が期待されます．

また，コンクリート電柱については，電柱内鉄筋の劣化現象は水素脆化が起因していることが知られていますが，その詳細は未解明なところが多いです．NTTでは，電気化学，材料などのコア技術を駆使し，水素脆化予測技術を確立すべく研究開発を推進しています．

本特集のトピックスと構成

本特集では，スマートヘルスケア技術とインフラメンテナンス技術において，それぞれ実用化に近いテーマと中長期的テーマについて取り上げ，最新の研究成果として以下の4つの技術を紹介します（**図4**）．

■ウェアラブル生体・環境センサ技術を活用した体調管理技術

NTTでは，機能素材「hitoe®」*を電極として縫製したウェアに装着して，心拍数・心電波形などの生体情報に加えて，ウェア内の温度や湿度といった環境情報を取得・送信するウェアラブル生体・環境センサ技術を実用化しています．この技術は，3つのセンサ（心電，加速度，温度・湿度）のデータを効率良く信号処理が可能な技

＊ hitoe®：東レとNTTが開発した機能素材で，最先端繊維素材であるナノファイバ生地に高導電性樹脂を特殊コーティングすることで，耐久性に優れ，非金属素材でありながら生体信号を高感度に検出できます．体表面にhitoe®を密着させることで，心拍数や心電波形，R波の間隔から推定される睡眠データなどの生体情報が取得できます．また，ナノファイバを使用することで，家庭洗濯への耐久性があり，さらに肌への密着性も上がるため衣服や帽子など人の体に密着したかたちで生体信号が取得でき，より高感度な測定が可能となります．



図 4　NTTが取り組んでいる人や環境に寄り添う技術

術で，低電力小型のウェアラブル端末を実現しています．この技術を活用することで，生活のさまざまなシーンにおいて生体情報と個人の環境情報を快適かつ簡単に取得できるようになり，暑さ対策などのスマートヘルスケア応用が可能になります．本技術をベースに，暑熱環境下の作業者が着るだけで体調管理できる手法を新たに確立しました．これにより今まで分からなかったリアルタイムの身体情報が把握できるようになり，ネットワーク工事の作業現場で検証し，その有効性と実用性を確認しました．

■光音響計測技術を活用した非侵襲生体情報センシング

体内の生体成分に特定の光を照射した際に発生する超音波を計測する光音響法を用いることで，採血等により体を傷つけることなく非侵襲で生体情報をセンシングする技術について紹介します．光音響法は，ＯＣＴ（Optical Coherence Tomography：光干渉断層撮影）や超音波法等の他の手段に比べ，計測深度や空間分解能に優れ，さまざまな生体成分に対応できるポテンシャルを有しているため，生活習慣病等に関連するさまざまな生体成分のモニタリングの実現が期待される技術です．非侵襲化により連続的に生体情報を計測することが可能となるため，医療やヘルスケアでの活用が期待され，日々さまざまに変化する生体情報のモニタリングの実現が期待できます．このような生体情報センシングデバイスの技術確立に向け，皮膚へのプローブの浸透度，生体機序の影響などの生体物理モデルを構築し，皮膚表面から内部にかかわる電気的・光学的パラメータと生体機序との相関から生体成分を計測する研究開発に取り組んでいます．

■光回折素子を活用した小型・軽量ハイパワーレーザ除錆技術

通信鉄塔をはじめとする鉄鋼製のインフラ設備は，錆の発生によって老朽化が進行します．鉄塔の維持管理をするうえでは，まずは錆を除去し，その後に塗装することで表面を保護していきます．塗装の性能を発揮・維持し，鉄塔の耐久性を高めるためには，下地である鉄鋼の表面状態が重要であり，いかにきれいに錆を除去するかがポイントになります．ハイパワーレーザを鉄鋼表面に照射することで錆を除去しますが，NTTの光デバイス技術である小型軽量な光回折素子を組み合わせることで，レーザのプロファイルを制御することが可能になり，効率的に錆の除去を行うことができるようになります．この結果として，市中製品と比較して数倍軽量という特長を達成することができます．現状の作業現場で

は，狭隘部など入り組んだ個所の錆取りに金属ブラシを用いていますが，本技術を活用することで作業負担の軽減と時間短縮を図ることが期待されます．

■コンクリート電柱内鉄筋の水素脆化予測技術

通信サービスを支えるインフラ設備の１つであるコンクリート電柱のより安全かつ経済的な維持管理を可能とする，コンクリート電柱内鉄筋の劣化現象である水素脆化を予測する技術を紹介します．コンクリートは圧縮には強いのですが引張に弱いため，コンクリートに圧縮応力がかかるよう内部鉄筋に引張応力を付加した状態で製造されます．コンクリート電柱は内部鉄筋により強度を担保していますが，張力が印加された状態の鉄筋では水素脆化と呼ばれる劣化が進行することが知られており，水素脆化の進展により折損事故につながる危険もあります．しかし，内部の鉄筋は目視で確認できないため，コンクリート電柱の劣化状況を把握することが難しく，保守上での課題となっています．予防保全という観点に立ち，水素脆化加速試験，水素量評価方法などの評価手法を構築し，統計学的データ解析などの分析手法を活用し，水素脆化メカニズムを解明してモデルを構築することで「水素脆化推定式」の定式化に取り組んでいます．

今後の展開

今回紹介したようなスマートヘルスケア技術やインフラメンテナンス技術について，できるだけ早く皆様のお手元に届くように実用化開発を加速しつつ中長期視点で挑戦的テーマの研究開発も推進していきます．それにより，人と環境に配慮した持続可能な社会の実現に貢献し，人々が豊かで幸せを享受できるような未来を切り拓いていきたいと考えています．

■参考文献

(1) https://www.env.go.jp/earth/sdgs/index.html
(2) https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html
(3) https://www.ntt.co.jp/news2019/1911/191108a.html



（左から）富澤 将人／ 岡田 顕

NTT研究所が培ってきたデバイス技術を活用し，人やインフラの状態を把握・推定し，予防・保全に役立てる「スマートヘルスケア技術やインフラメンテナンス技術」の研究開発を推進することで，持続可能な社会の実現に貢献していきます．

◆問い合わせ先
NTTデバイスイノベーションセンタ
NTT先端集積デバイス研究所
企画担当
TEL　046-240-2403/2022
FAX　046-240-2222/4328
E-mail　dic-kensui-p @ hco.ntt.co.jp
sende-kensui-p @ hco.ntt.co.jp

より安心して働ける作業現場の実現に向けた体調管理技術

高河原 和彦[†1]　橋本 優生[†1]
松永 賢一[†1]　樋口 雄一[†1※]
松浦 伸昭[†1]　桑原 啓[†1]
都甲 浩芳[†1]　川原 貴[†1]
平田 晃正[†2]　田中 英登[†3]
宮澤 太機[†4]

NTTデバイスイノベーションセンタ[†1]
名古屋工業大学[†2]
横浜国立大学[†3]
至学館大学[†4]

酷暑による熱中症の防止など，作業現場の安全性を高めるため体調管理の重要性が高まっています．NTTデバイスイノベーションセンタでは，これまで培ってきたウェアラブルデバイス技術，データ解析技術に，専門家との協業による温熱生理学・運動生理学の知見を加え，より安心して働ける作業現場の実現に資する体調管理技術を構築しました．本稿では，体調管理における課題と，それらを解決する要素技術の概要，および本体調管理技術を実際の作業現場で検証した結果の概要について紹介します．

技術開発の背景

近年，夏季の酷暑化の影響等もあって熱中症による救急搬送者数や死亡者数が増加しており，社会全体で大きな課題になっています．総務省消防庁の調査では，2020年６月１日から10月４日にかけ熱中症により救急搬送された人員数は６万4770人，厚生労働省の公表では，2019年における職場での熱中症による死傷者（死亡・休業４日以上）は829人，うち死亡者は25人となっており，厚生労働省等により，職場における熱中症予防対策の指針やマニュアルが公開されています(1)．このような社会課題を解決し，より安心して働くことができる現場の実現に向けて，NTTではウェアラブル生体・環境センサを活用した体調管理技術の研究開発に取り組んできました．

課　題

本体調管理技術は，「暑熱による体調不良リスクのリアルタイムな回避」と「短・中期的な稼働マネジメントによる事故リスク低減」という２つの側面からより安心して働くことができる作業現場の実現をめざしています．

暑熱環境下での活動による体調不良の発生メカニズムの概略を**図１**に示し

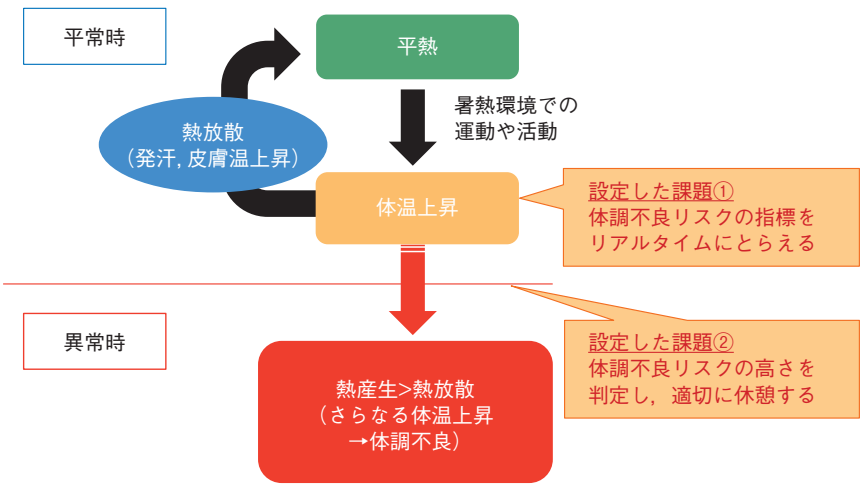


図１　暑熱下での体調不良メカニズム

※　現，NTTテクノクロス



図 2　ウェアラブル生体・環境センサ

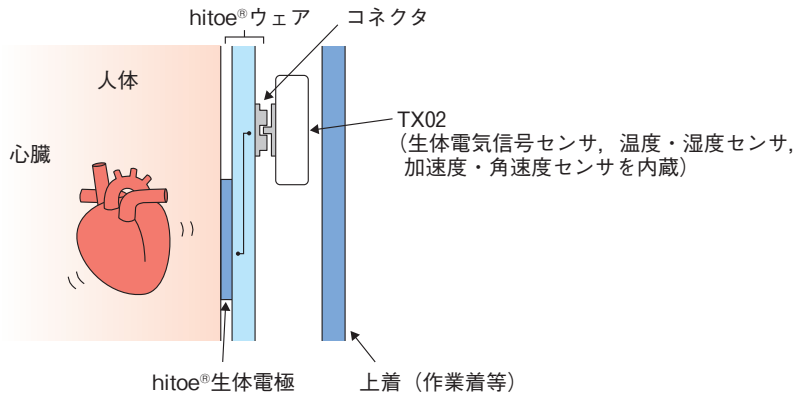


図 3　データ取得の概略図

ます[2]．人間の身体は，平常時には運動などによって体温が上がっても，発汗や皮膚温度の上昇によって熱が外気に放散され，体温調節が行われます．しかし，外気温が高いと熱が外気に逃げにくくなります．また，発汗により失われた水分や塩分の補給が不十分だと，血液の流れが悪くなり，体内に熱がこもりやすくなります．このようにして熱の産生と放散のバランスが崩れ，体温の上昇に歯止めがかからなくなると，体調不良を引き起こすことになります．

このメカニズムにおいて，解決すべき課題は２つ考えられます．１つは，作業現場における外気温や湿度などの環境や，作業・運動の強さは１人ひとり異なり，また時々刻々変化するため，個人ごとの体調不良リスクを示す指標をリアルタイムに把握する必要があるという点です．もう１つは，体調不良を引き起こす前に適切に休憩や水分取得を促すために，得られた指標から体調不良リスクの高さを判定する必要があるという点です．

また，「短・中期的な稼働マネジメントによる事故リスク低減」は，スポーツ選手の傷害・体調不良のリスクを低減する練習プランニングに有効であると着目されているAcute: Chronic Workload Ratio（ACWR，急性：慢性身体負荷率）[3]の考え方を作業者にも適用したものです．これは，１カ月程度の長期的な身体負荷に対する１週間程度の短期的な身体負荷の比率（AC比）が高すぎても低すぎてもケガ等のリスクが上がるため，AC比がリスクの低い領域になるように日々の稼働をマネジメントするという考え方です．解決すべき課題として，日々の作業による身体負荷の定量化が挙げられます．

私たちはこれらの課題を解決するため，生体・環境情報を取得するためのウェアラブルセンサを開発し，温熱生理学・運動生理学に基づくセンサデータの解析技術を確立しました．

要素技術

■ウェアラブル生体・環境センサ

個人ごとの体調不良リスクを示す指標をリアルタイムに把握するには，作業を妨げることなくさまざまな生体・環境情報を取得する必要があり，そのためのデバイスとして私たちはウェアラブルセンサが有効であると考えています．

本技術で用いるウェアラブル生体・環境センサを**図 2**に示します．NTTデバイスイノベーションセンタで研究開発したウェアラブル生体・環境センサ技術[4]をベースにして，NTTテクノクロスが商用化したトランスミッタ（TX02），東レ株式会社のhitoe®＊1作業者みまもり用シャツ・hitoe®使用ベルト，もしくは株式会社ゴールドウインのC3fit IN-pulseから構成されます．データ取得の概略図を**図 3**に示します．ユーザは，hitoe®生体電極が肌に直接接触するようにウェアを下着として着用し，TX02をコネクタを介してウェアに装着します．心臓が拍動する際に発生する微弱な生体電気信号がhitoe®生体電極によって取得され，コネクタを介してTX02に入力され，生体電気信号センサにより心電位データとして記録されます．TX02には，生体電気信号センサのほか，温度・湿度センサ，加速度・角速度センサを内蔵しています．このようにして，心

＊1　hitoe®：東レ株式会社とNTTが開発した，体から発している微弱な電気信号である生体信号を，無意識に近い状態で収集するための機能素材です．機能素材hitoe®は両社の商標登録です．

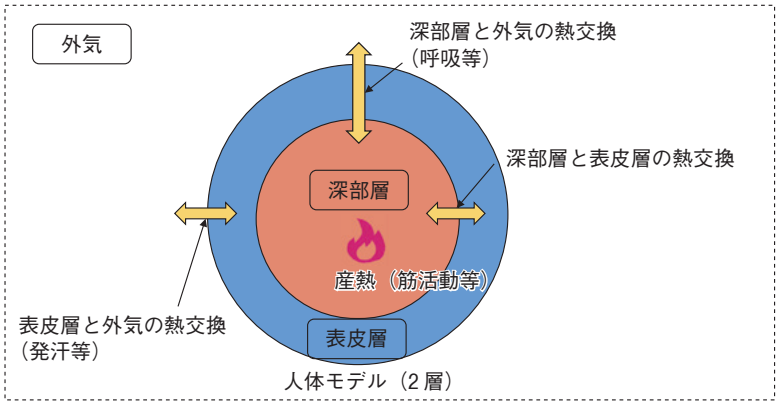


図4　体内温度変動の計算モデル

電位，衣服内の温度や湿度，上半身の加速度や角速度のデータを計測することができます．また，計測したデータを基に心拍数，心拍間隔，歩数，上半身の傾き等のさまざまな特徴量を解析します．

■体内温度変動推定技術

個人ごとの暑熱による体調不良リスクを示す指標として，体内温度*2，心拍数，めまいや吐き気の自覚症状が挙げられています(5)．体内温度は，従来食道や直腸に温度計を挿入して計測するため，専門的な技術が必要であり，作業や運動などの活動中にリアルタイムで計測することは困難でした．

そこで，私たちは国立大学法人名古屋工業大学（名工大）との共同研究により，体内温度変動を活動中にリアルタイムに推定するための新たな手法を確立しました．本手法は，ウェアラブルセンサ等からの取得情報を新たに構築した計算モデルに入力して体内温度変動を推定します．計算モデルの概要を**図4**に示します．本モデルでは，人体を深部層と表皮層に分割し，各層間および外気との熱のやり取りを，人の活動による産熱，発汗等による体温調節機能，服装といった要素を考慮した名工大独自のアルゴリズムを応用し定式化しています．このモデルに対してウェアラブル生体・環境センサでリアルタイムに取得した心拍数，衣服内温度・湿度の情報，別途アプリで取得する本人情報（年齢，身長，体重，性別，服装等）を入力し，体内温度（深部層温度）の変動を計算しています．本モデルを用いることによりスマートフォンの処理能力でもリアルタイムに体内温度変動を計算できるようになりました．

また，本推定技術の有用性を確認するため，NTTと国立大学法人横浜国立大学（横国大）と至学館大学（至学館大），名工大で共同実験を行いました．本モデルによる体内温度変動推定と直腸温度計による直接計測を同時に行う臨床実験*3を至学館大の人工気象室内で実施し，体調不良リスクを把握するために十分な推定精度であることを確認しました．

■体調不良リスク判定技術

個人ごとにリアルタイムの体調不良リスクを示す指標を把握した後には，得られた指標から体調不良リスクの高さを判定するための基準と判定アルゴリズムが必要となります．私たちは，横国大と至学館大，名工大との共同実験の知見から，温熱生理学をベースとし，心拍数，推定体内温度変動，主観情報の3つの指標に対して年齢や運動負荷を考慮した基準を設定し，3つの指標の状態から総合的な体調不良リスクを判定し高リスクの場合にはアラートを発出するアルゴリズムを構築しました．

■身体負荷推定技術

日々の作業による身体負荷を定量化するには，従来は作業終了後，なるべく記憶があるうちに作業の負荷の強さをどの程度であると自覚しているか（主観的運動強度）をアンケートで取得する必要がありました．私たちは，運動生理学に基づく心拍数解析によってアンケートによらず身体負荷を推定する技術を構築し，早稲田大学ラグビー蹴球部の協力を得て有効性を確認しました(6)．

作業現場での有用性の検証

本体調管理技術の作業現場での有用性を検証するため，NTT東日本の協力を得て，2020年8～9月に東京，神奈川，北海道エリアの工事作業者を対象とした検証を行いました*4．

本検証の概要図を**図5**に示します．体内温度変動推定技術，体調不良リスク判定技術，身体負荷推定技術をアプリケーションとして実装し，ウェアラブル生体・環境センサを着用した工事作業者の体調状態をクラウド経由で遠隔モニタリングするとともに，高リスクと判定された場合は作業者本人へアラートが通知されるデモシステムを構築しました（本デモシステムは医療機器ではありません）．

体内温度変動推定技術や身体負荷推定技術の作業現場での有用性を確認するため，本検証では作業者から温冷感

*2　体内温度：頭や体幹の内部の温度．医学用語では核心温，深部温度といいます．本技術は医療機器・医療用プログラムではないため，本稿では「体内温度」という独自用語を用います．
*3　至学館大学研究倫理審査委員会　受付番号124.
*4　日本生活支援工学会倫理審査委員会　倫審第286号.

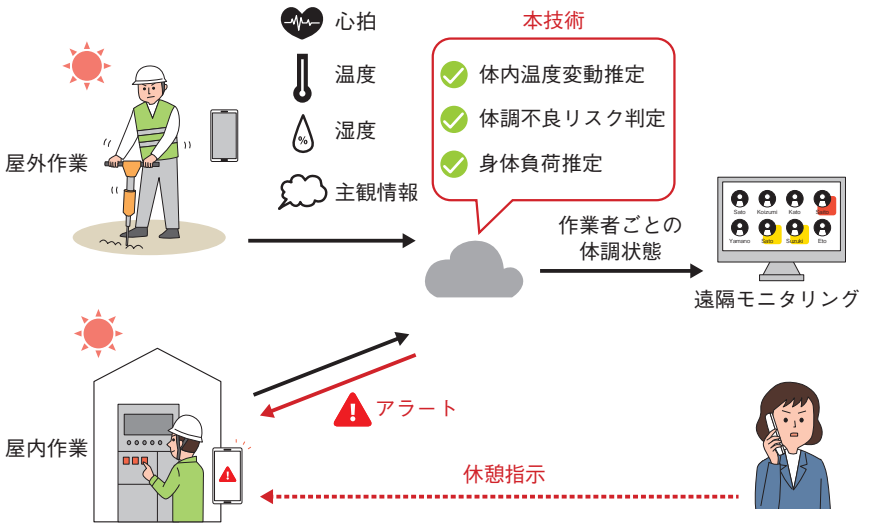


図 5　作業現場での検証概要

や主観的運動強度等の主観情報を取得し，推定結果との関連を評価しました．その結果，推定した体内温度変動と温冷感とに相関があること，推定した身体負荷と主観的運動強度とに相関があることを確認しました．これらの結果は，作業者の主観をアンケートによらず可視化できる可能性を示しており，ウェアラブル生体・環境センサデータに基づく体内温度変動推定および身体負荷推定の有用性を示していると考えます．

また，検証期間において，本体調不良リスク判定技術で設定した心拍数，体内温度変動，主観情報の 3 つの指標が補完し合うことで幅広くリスクケースを検出し，遠隔でモニタリングしている管理者および作業者本人にアラートが通知されました．本検証において熱中症等の重大な体調不良事例は発生しなかったことから，本体調不良リスク判定技術は有用であると考えています．

これらの結果から，本体調管理技術は作業現場の安全性の向上に対して有用であると考えています．

今後に向けて

作業者がより安心して働くことができる作業現場の実現をめざし，ウェアラブルセンサを活用した体調管理技術について，要素技術の構築から作業現場での検証までを完了しました．今後は，より多くの作業現場での導入によって知見を深め，さらなる改善を進めていきます．

■参考文献

(1) https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000164083.html
(2) https://www.wbgt.env.go.jp/heatillness_manual.php
(3) T. J. Gabbett: “The training-injury paradox: should athletes be training smarter and harder?,” Br. J. Sports Med., Vol. 50, No. 5, pp. 273-280, 2016.
(4) 桑原：“スマートヘルスケアに向けた心電，加速度，温度・湿度の計測を可能にする低電力・小型ウェアラブルセンサを開発，” NTT技術ジャーナル，Vol. 32, No. 3, pp. 57-58, 2020.
(5) ACGIH: “Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices,” 2019.
(6) 樋口・赤堀：“科学的なトレーニング支援技術を開発しラグビー選手を対象に有効性を実証，” NTT技術ジャーナル，Vol. 32, No. 7, pp. 60-62, 2020.



（上段左から）高河原　和彦/
橋本　優生/ 松永　賢一
（中上段左から）樋口　雄一/ 松浦　伸昭/
桑原　　啓
（中下段左から）都甲　浩芳/ 川原　　貴/
平田　晃正
（下段左から）田中　英登/ 宮澤　太機

NTTデバイスイノベーションセンタでは，人間に寄り添うウェアラブルデバイスの研究開発をミッションとしています．今後も，実際にプロダクトを使うユーザの声に真摯に耳を傾けながら，健康で豊かな暮らしの実現に向け，研究を進めていきます．

◆問い合わせ先
NTTデバイスイノベーションセンタ
ライフアシストプロジェクト
TEL　046-240-2296
FAX　046-270-2323
E-mail　kazuhiko.takagahara.ka @ hco.ntt.co.jp

光音響計測技術を活用した非侵襲生体情報センシング

近年，採血なしで簡便に血液成分を測定する生体情報センシング技術に注目が集まっています．NTTは，光が持つ特定の成分を選択的に測る特徴と，音(超音波)が持つ生体内をよく伝搬する特徴を組み合わせた光音響計測技術を用いた生体情報センシングの研究開発を行っています．本稿では，光音響計測技術により，生体内部にあるさまざまな情報の収集をめざした非侵襲生体情報センシング技術を紹介します．

田中（たなか） 雄次郎（ゆうじろう）　田島（たじま） 卓郎（たくろう）
瀬山（せやま） 倫子（みちこ）
NTT先端集積デバイス研究所

非侵襲測定技術による生体情報センシングの高度化

近年，情報通信技術（ICT）の進展と健康管理に対する意識向上により，ウェアラブルデバイスで取得した生体情報を利用してパーソナライズされたヘルスケアサービスがさかんになってきています．個人の日常生活でモニタされた情報は行動変容を促すシステムや医療ビッグデータへの適用が期待されています．一方で，現在，ウェアラブルデバイスで計測される生体情報は，活動量，心拍，呼吸，体温，血圧といった，主に物理センサで計測される情報です．例えば，体調が悪いと感じるときに，現在のウェアラブルデバイスの取得する生体情報では，客観的に状態を提示できても，原因や対処法の示唆にはつながりません．そこで，さらに，血液の成分情報といった生化学的な生体情報をウェアラブルデバイスで取ることが望まれています．現在，血液の成分情報は，病院などで採血した血液サンプルに対して項目ごとにさまざまな検査装置で分析します．これに対し，ウェアラブルデバイスにて血液の成分情報を取得するためには，身体を傷つけることなく“非侵襲的に”連続的なデータをより簡便に取得する技術の確立が必要です．非侵襲的な生体センシング手法として，近年，光音響効果を利用した生体イメージング技術が世界的に研究開発されています．光音響効果を利用した生体センシング手法は，生体成分を選択的に測る光の特徴と生体内をよく伝搬する音の特徴を合わせ持つため，生体内部を知るための有力な手法となります．言い換えれば，光が透過しにくい生体でも深くまで測定できるのが光音響測定のメリットになります．医療現場では生体内部を見たいというニーズが高く，X線CT，MRI，PETなどの画像診断装置が現在は使われています．これらの画像診断技術に対し，光源とマイクで構成される光音響装置は，可搬性や簡便でユーザの負担が少ないというメリットがあります．いつでもどこでも測れる技術確立の観点からこの光音響測定を生化学情報測定に適用する研究開発を行っています（**図1**）．本稿では，まず光音響効果の原理について簡単に述べ，NTTにおける研究の進展状況について紹介します．

光音響効果を利用した測定

光音響効果は，1880年に電話の発明で知られるA.G.Bellによって，物質に光を断続的に照射したときに音が発生するという現象として発見されました．これが1965年にM.L.Vengerovによって，ppmレベル（1万分の1%）の濃度のガス分析への適用が提案され，以来，分子レベルの化学構造が分析できる手法として確立されてきました．

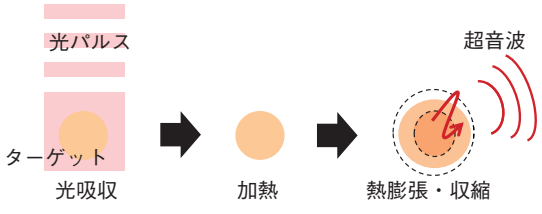
光音響効果を簡単に説明します．**図2**(a)に示すように，物質が光を吸収すると，その光エネルギーは熱に変換され，この熱エネルギーが物質の熱膨張を引き起こし，断続的な光照射で繰り返し熱膨張により弾性波，つまり音（超音波）が発生します．これを光音響波と呼びます．

そして，近年のICTの進展に伴い，

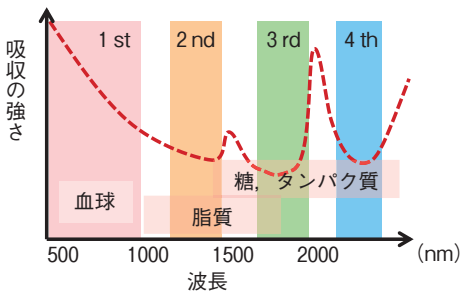


図 1　生体センシング情報と応用

時間制御性の高い光パルスを発生できる光源や切り替え可能な光スイッチ，音を高感度に検出する音響技術や多様な信号処理を行うエレクトロニクス技術の目覚ましい進歩の恩恵を受け，現在では材料分析，ガス分析，イメージングと幅広く応用されるようになってきました．音響効果を利用した生体測定では，生体内のターゲット物質によって吸収された光の量を，体の中をよく伝搬する超音波に変換し，光音響波として検出することで物質の濃度を推定します．物質は各々の特性に応じて吸収しやすい光の色（波長）があります．この特性を利用して生体内の成



(a)　光音響効果の概要



(b)　生体成分と光吸収スペクトルの模式図

図 2　光と物質の関係

分情報やその分布を知ることができます．例えば，図2(b)に示すように血球などは500 nm周辺（可視光）を，脂肪は1000 nm周辺（近赤外光），ブドウ糖やタンパク質は1500 nm周辺（近赤外光）によく吸収する波長領域があります．この性質を利用すれば生体にさまざまな色の光を当て，その光が吸収される量を測ることで成分情報が分かります．また，生体はその半分以上が水によって構成されていることがよく知られていますが，水にも光を吸収する性質があります．そのため，一般に光を用いて測定する場合は水の吸収が小さい波長の光を選択することが求められます．水の吸収がなければ光があまり減衰せずに入っていきやすいためです．このような光の波長は“生体の窓”と呼ばれています．一方で，光で測れる生体の深さには限界があり，さまざまな成分によって複雑に構成された私たちの体の中を通った光がどの経路でどのように吸収されたか知ることは非常に難しい問題です．このような問題に対して，光音響測定では，光が吸収された量を，体の中をよく伝搬する超音波に変換し検出するため，体の中での反射の影響を抑えることができます．また，ターゲット物質による光吸収からの光音響波の強さ（音圧）だけでなく，伝搬時間，周波数特性を測ることでも生体内を非侵襲的に調べることができます．

光音響効果による非侵襲生体成分測定方法

光音響効果を利用して非侵襲的に生体成分を測定する方法には，大きく分けて2つのアプローチがあります．1つは，生体に非常に短い時間のパルス光（パルス幅：数ns）を照射し，ターゲットとする物質で吸収され，そこで発生した光音響波が返ってくるまでの時間とその音圧から光を吸収する成分の位置を測定する方法です．**図3**(a)に示すような光音響波が得られ，音が体内を伝搬する時間と速度からどの程度の深さにターゲット物質があるかが分かります．図3(b)に生体を模擬した材料の中に“N”のアルファベットを埋め込んだものを3Dでイメージングしたデモンストレーションを示しています．もう1つは，図3(c)に示すように，生体に周期的にON/OFFした光を照射して，ターゲット物質から生じる光音響波を何度も反射させて定在波を発生させ，その音圧からターゲットの濃度を測定する方法です．

前者は成分とその位置情報が分かるため，例えば，栄養をたくさん必要とするがん細胞がその近傍で細かい血管がたくさん形成される様子をイメージングし，がん診断への応用研究が数多くなされています．しかし，一般に装置が大型で高価になります．また，生体成分情報を含む信号が弱く雑音の影響を受けやすいという課題もあります．

一方で，後者はターゲット物質の位置情報が得られない代わりに小さな光強度の低廉な光源と1つのマイクロフォンでも比較的大きな信号対雑音比を得ることができるため，成分濃度の測定や装置の小型化に有利になります．ただし，成分測定ではイメージングの際の血管のような明確な輪郭がありません．照射された光は，その成分濃度に応じてグラデーションを持って吸収されるため光音響波の伝搬波形が崩れてしまうという問題があります．そこでNTTでは，光音響波を何度も反射させるための工夫として，音波の閉じ込めが可能なセンサ構造を提案しました．例として耳たぶをクリップで挟み，一方の面から光を照射して，対向する面にマイクが組み込んであります．光の照射面と音の受音面の間で光音響波を何度も反射させることで定在波を発生させ，大きな信号を得る手法を図3(d)に示しています．光音響波の周波数は照射する光を当てる周波数で決まりますが，その周波数の選択がポイントになります．なぜなら，低い周波数では人間の声や生活音（～数10 kHz）の影響を受けやすく，高い周波数（～数MHz）では体の中での減衰が大きくなるからです．そこで，

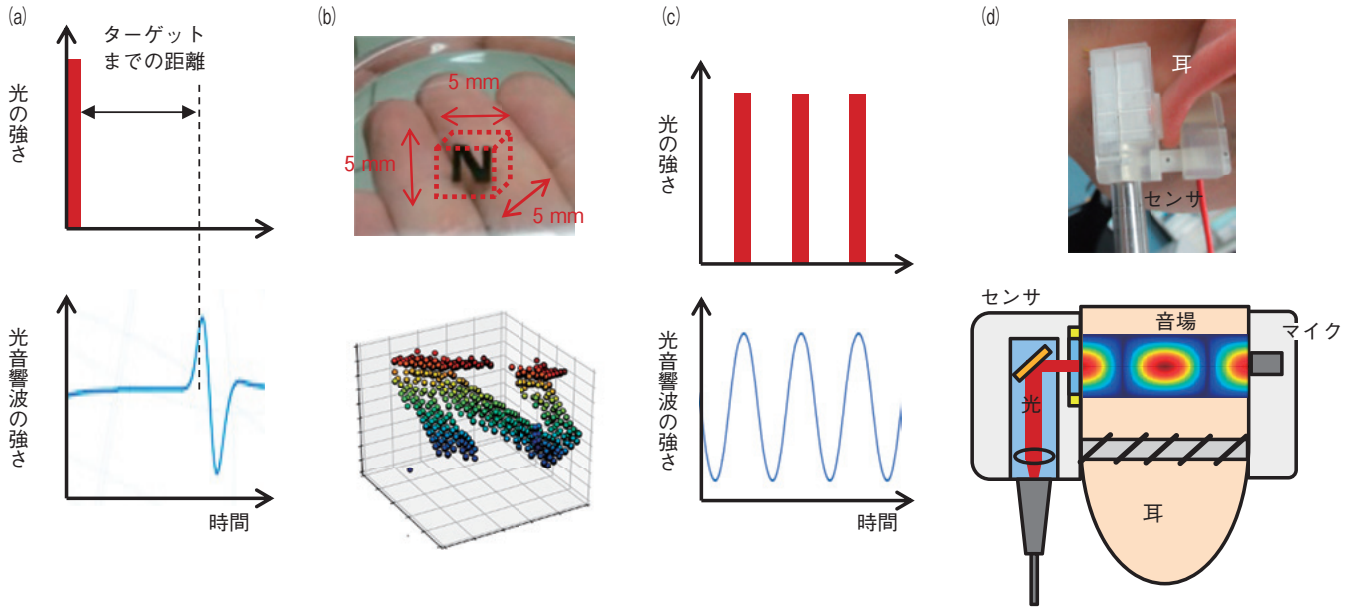


図 3　光音響効果を利用した生体測定

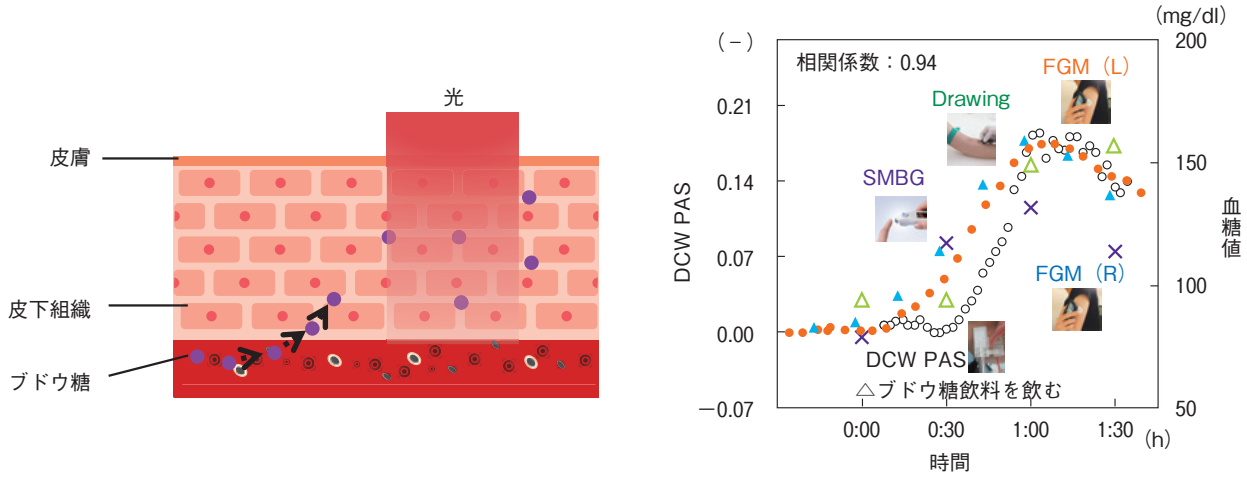
NTTではこの間の周波数（数100 kHz）帯の光音響波を利用して測定を行っています．

生体測定への適用例

最後に光音響効果を生体成分測定に適用した例を紹介します．センサは前述した耳たぶをクリップのように挟むセンサを用いました．ここでは健常者にブドウ糖を多く含む飲料を飲んでもらい，その後の間質液中のブドウ糖濃度変化の様子を測定しました[2]．間質液中のブドウ糖濃度とは，血液中のブドウ糖濃度（いわゆる血糖値）と異なり，**図 4** (a)に示すように血管からしみ出して細胞に供給された間質液の中のブドウ糖濃度を指します．間質液中のブドウ糖の濃度は血糖値とほぼ同じように変化していることが知られています．図 4 (b)は，光音響計測技術による測定値とさまざまな侵襲型の血糖値センサと比較です．青のプロットが光音響計測技術（図中DCW PAS），その他のプロットは採血や体に刺して留置して測る，いわゆる“侵襲的”な方法によって測定したものです．侵襲的な方法によれば，血糖値はブドウ糖飲料を飲んだ後15～30分程度で60 mg/dl程度増加し，1時間後には徐々に減少を始めます．光音響技術でも，この60 mg/dlの変化によく追従して測定できることが確認できました．この技術は，光の波長をターゲット物質に合わせることで，よく注目される生体成分である，コレステロールや中性脂肪といった脂質など，さまざまな成分への応用が可能な技術であると考えています．

今後の展望

本稿では光音響効果による生体情報センシングの可能性と生体内の成分を



(a)　間質液と血糖値　　(b)　光音響技術と侵襲的な技術の比較

図 4　血糖値測定への応用例

測定する技術への適用について紹介しました．従来では日常生活の常時モニタリングの対象ではなかった生化学的な情報のセンシングが可能になれば，例えばコロナ禍で普及の進んだオンライン診断に役立つ技術としてなど，さまざまな応用への展開が期待されます．日常生活でのモニタリングに向けては，非侵襲性だけでなくデバイスのサイズやユーザビリティも重要になってきます．気体，液体，固体問わず高い精度で分析できるポテンシャルを有する光音響計測技術を活用し，生体成分，呼気の成分などの生化学的な情報を日常で常時モニタリングできる技術をめざして研究開発に取り組んでいきます．

■参考文献

(1) Y. Tanaka, T. Tajima, M. Seyama, and K. Waki: "Differential Continuous Wave Photoacoustic Spectroscopy for Non-Invasive Glucose Monitoring," IEEE Sensors Journal, Vol. 20, No. 8, pp. 4453-4458, 2019.

(2) Y. Tanaka, T. Tajima, and M. Seyama: "Acoustic modal analysis of resonant photoacoustic spectroscopy with dual-wavelength differential detection for noninvasive glucose monitoring," IEEE Sensors Letters, Vol. 1, No. 3, pp. 1-4, 2017.



(左から) 田中　雄次郎 / 田島　卓郎 / 瀬山　倫子

今回紹介した光音響効果だけでなくさまざまな物理現象や生理現象に注目して，新たな生体センサの研究開発を進めています．また，こうしたセンサを活用して疾病の予防や早期発見へとつながる高付加価値な情報創出をめざしていきます．

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所
ソーシャルデバイス基盤研究部
TEL　046-240-2774
FAX　046-240-4728
E-mail　yujiro.tanaka.cw@hco.ntt.co.jp

ハイパワーレーザデバイスを用いた錆取り技術の実現に向けて

通信サービスを支えている鉄塔など通信インフラ設備の長寿命化に欠かせない錆取り作業において，人の手や電動工具では届きにくい，狭い場所の錆取りが課題となっています．私たちはこれまで培ってきたハイパワーレーザデバイスを用いて錆取り作業を効率化する技術を開発しています．本稿では，回折素子と呼ばれるハイパワーレーザデバイスを組み込んだ，小型で軽い錆取り技術の概要を紹介します．

川村 宗範（かわむら そうはん）
坂本 尊（さかもと たかし）
赤毛 勇一（あかげ ゆういち）
上野 雅浩（うえの まさひろ）
岡 宗一（おか そういち）

NTTデバイスイノベーションセンタ

通信インフラ設備における錆取り技術の課題

現代の生活に欠かせない通信サービスを安心・安全に提供するためには，鉄塔をはじめとするさまざまな通信インフラ設備が必要です．これらの設備は日光や風雨にさらされることで劣化することにより強度が低下しますが，建て替えが困難であることから，長期にわたって利用する必要があり，定期的な点検と補修を実施してきました．ところで，NTTグループが保有する鉄塔は小型のものも含めると国内に約２万基あり，これらの多くは高度経済成長期に建設されたものであることから老朽化が進んでおり，点検・補修に必要なコストや人的リソースは年々増加しています．このコストや人的リソースの削減が，今後の点検・補修を持続可能とするうえで重要となります．現在，NTTでは錆の発生を抑制する塗料や，塗料の劣化試験技術，鋼材の腐食予測技術，錆を除去する技術を開発しています．

鉄塔の長寿命化には，錆の発生を抑制する技術とともに除去する技術が重要です．錆の除去には電動工具や金属ブラシを使っていますが，狭い場所やボルト周りの錆が除去しにくいという問題があります．狭い部分の錆を除去する技術として，砂を高速に打ち込むサンドブラスト法が挙げられますが，砂を回収する手間がかかるため利用が困難です．そこで近年，高出力レーザ光を用いた錆取り工具（除錆レーザ）が注目されていますが，市販されている除錆レーザは，手で保持するレーザ光出射ヘッドが大きいうえに重いため，作業員が登って錆取り作業を行う鉄塔では使いにくいという課題があります．

私たちは現場で使いやすい小型で軽い除錆レーザを開発するために，後述する回折素子と呼ばれるデバイスを使用する方法を考案しました．

ハイパワーレーザ用回折素子技術

回折素子は基板上の微細構造で入射光の位相を変調するホログラム技術を応用したデバイスであり，**図１**に示したとおり，入射するレーザ光の形状を所望の形状に変換できます．この特長を活かして，金属や樹脂の加工に使用されています．

図２は，私たちが開発したハイパワーレーザ加工用回折素子の概略図です．レーザ光の吸収による温度上昇と，それに起因する破損を防ぐため，熱伝導率が大きなシリコンカーバイド基板を用い，冷却が容易な反射型にすることで，10 kWのレーザ加工を可能にしました[1]．回折素子の重量は数gと軽いうえに，装置の構成をシンプルにできる特長があります．

私たちは，この回折素子技術を使い，後述する除錆レーザの小型軽量化技術を考案しました．

NTTがめざす除錆レーザ

図３に示したように，現在市販されている除錆レーザは，作業者が手を動かさずに一定の面積の錆を除去できるよう，レーザ光をミラーとモータで１次元または２次元に走査しています．

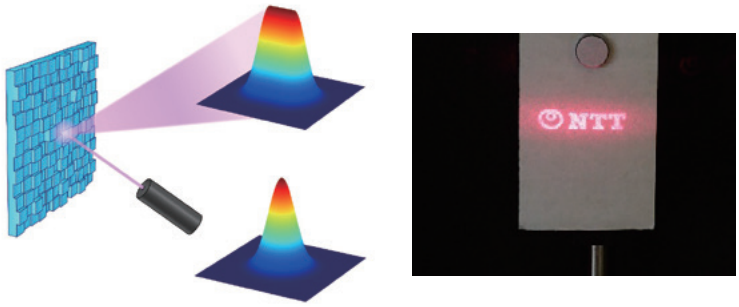


図1　回折素子を用いたレーザ光成形の例

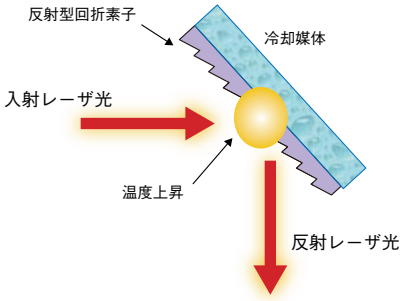


図2　10 kW加工用反射型回折素子の概略図

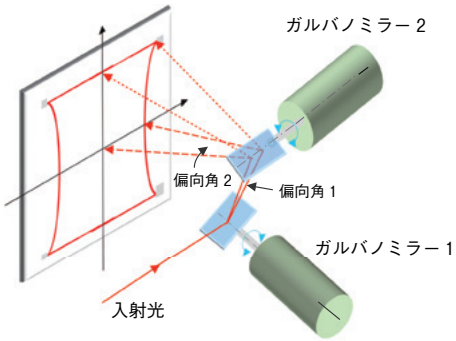


図3　ガルバノミラーを用いたビーム走査方法の例

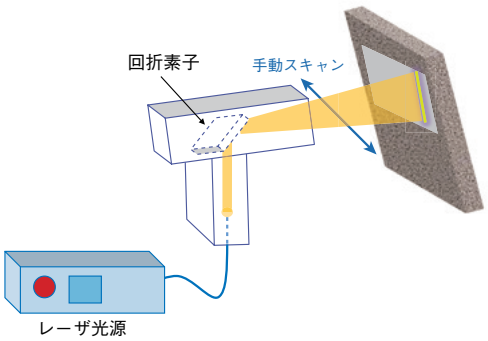


図4　回折素子を用いた除錆レーザのイメージ図

この方式では，作業者が手で保持するレーザ光出射ヘッドが大型かつ数kgと重いため，作業者の負担が大きくなり，鉄塔での利用は容易ではないと考えられます．これに対し，私たちは**図4**に示すアイデアを考案しました．これにより，数gの回折素子で細長い直線のレーザ光を形成し，作業者が手で走査することにより，モータが不要となるため，小型軽量でありながら従来技術と同等の作業効率を実現できます．

回折素子を低価格に

前述したように，これまで私たちは，ハイパワーレーザの回折素子にシリコンカーバイドを使用していましたが，これは高価な材料です．錆取り作業では回折素子に汚れや破損が生じる可能性が高いことから，安価に回折素子を交換できることが望まれます．そこで私たちは，回折素子を用いた除錆レーザを普及させるために，より安価な材料に置き換えることを考えました．

ご存じのようにシリコンは，半導体産業において微細加工技術が確立されている材料であり，比較的安価であるうえに，手に入りやすいという特長を併せ持つため，回折素子の低価格化に適しています．一方で，錆取りに使用する波長1.06 μmの光を吸収するため，温度が上昇して破損するおそれがあります．金属膜を付けることによって反射率を高くし，光吸収を抑制できますが，膜が厚くなるとDOE（回折光学素子）表面の微細構造の角が丸くなるため，レーザ光の形状に誤差が生じます．つまり，十分な反射率とレーザ光形状の誤差の低減を両立する金属と，その膜厚が重要なポイントです．

私たちは，高い反射率と高い熱伝導率を示す金（Au）について，膜厚と反射率を計算し，実測しました．**図5**に示すように，反射率は厚さ50 nm以上で最高となり，その範囲内で，レーザ光の形状の誤差が十分小さい膜厚を検討した結果，錆取りに必要なパワーをはるかに超える10 kWのレーザ加工を可能にしました．これにより，回折素子にシリコンを使用することで，低価格化できることを実証しました[2]．

コンパクトで使いやすい除錆レーザの実現

図6は，つくばフォーラム2020で展示した除錆レーザのレーザ光出射ヘッドの試作機です．回折素子を使うことにより，市販されている装置では困難な500 gのレーザ光出射ヘッドの可能性を実証しました．このヘッドは電動工具と同程度に小型であり，かつ，軽量であるため使いやすく，作業現場での普及が期待できます．**図7**は電動工具が届きにくい，狭い場所の錆を除去した実験結果です．レーザ光を使用するため，電動工具のような振動や対象への押し付けがないので，作業者の負

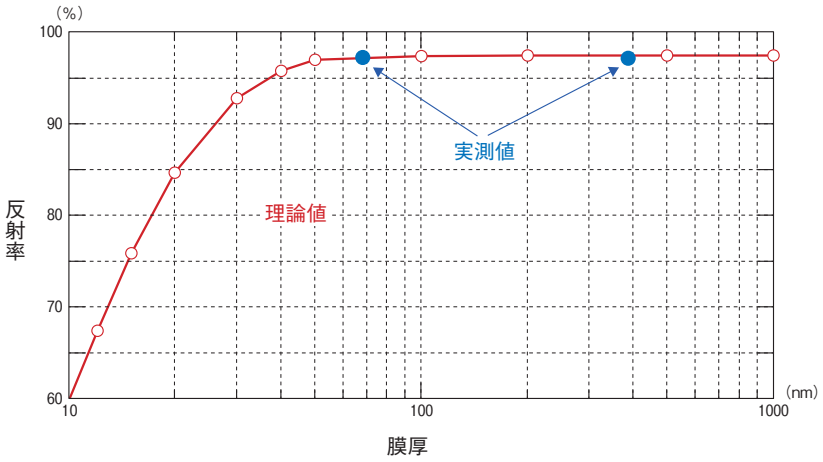


図 5　金（Au）膜厚と反射率の相関

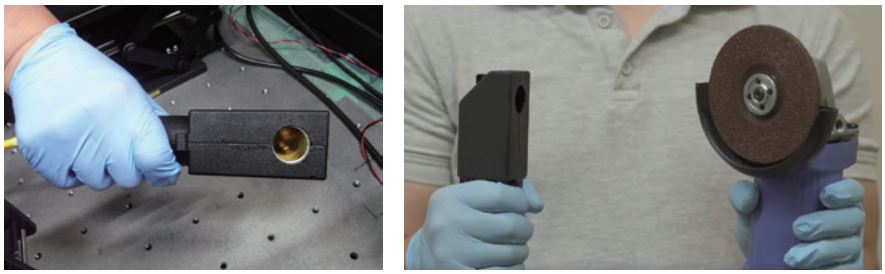


図 6　除錆レーザの試作機と電動工具

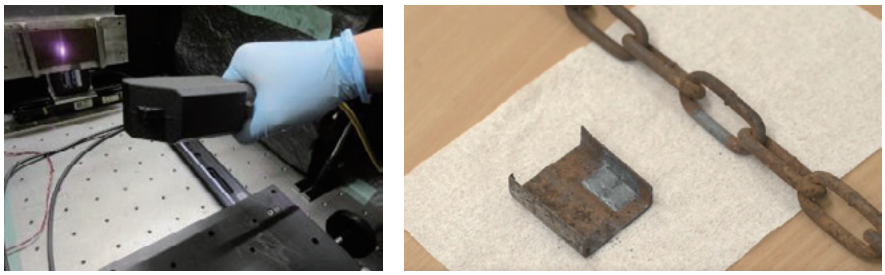


図 7　試作機を使った除錆実験の例

担を小さくできます．

このように，回折素子を使うことで，市販されている装置のサイズと重量の制約要素であったモータを不要にし，鉄塔でも使いやすい，小型で軽い除錆レーザが実現可能性であることを実証しました．

今後の展望

冒頭で触れたように，鉄塔をはじめとする通信インフラ設備の長寿命化には，錆を除去する技術と併せて，塗料が剥がれにくい表面状態にする技術が重要です．

レーザ光を照射する条件は表面状態に影響を与え，塗料の付着力の強弱につながります．レーザ光で錆を除去した後の表面状態と塗装付着力の研究は通信インフラの長寿命化に欠かせない取り組みです．私たちはこれを進め，現場で使いやすく，塗料が剥がれにくい，新たな価値を創出する除錆レーザを実現します．

ま と め

持続可能な社会に貢献するために，私たちが開発している除錆レーザ技術を紹介しました．NTTが培ってきた回折素子の材料をシリコンに置き換え，低価格化を実現しました．加えて，市販されている装置の大きさと重さの課題を解決し，低価格で小型で軽くて使いやすい除錆レーザの可能性を実証しました．今後は，塗料が剥がれにくい表面状態を研究し，インフラメンテナンスにおける新たな価値の創出をめざします．

■参考文献

⑴ 赤毛・今井・川村・岡・藤谷・奥田：“10 kW級レーザ過去加工用ビーム成形デバイスの開発，”第94回レーザ加工学会，2020.
⑵ S. Kawamura, S. Toyota, and S. Oka：“Reflection-type diffractive optical element employing SiC and Si for application to high power laser material processing,” Proc. of SPIE, Vol. 11273, San Francisco, U.S.A., 2020.



（上段左から）川村　宗範／坂本　尊／赤毛　勇一
（下段左から）上野　雅浩／岡　宗一

通信に欠かせないインフラ設備のメンテナンス技術開発を進め，快適な通信サービスの提供に貢献します．

◆問い合わせ先
NTTデバイスイノベーションセンタ
企画担当
TEL　046-240-2403
E-mail　dic-kensui-p@hco.ntt.co.jp

コンクリート電柱内鉄筋の水素脆化予測技術

通信サービスを支える重要なインフラ設備の1つであるコンクリート電柱は，安全を確保するため多大な維持管理コストが払われています．コンクリート電柱内鉄筋の劣化現象である水素脆化を正確に予測することができれば，コンクリート電柱をより安全かつ経済的に維持管理することができるようになると期待されます．本稿では，水素脆化加速試験および統計的データ解析を用いたコンクリート電柱内鉄筋の水素脆化予測技術について紹介します．

上庄 拓哉　石井 龍太
津田 昌幸
NTT先端集積デバイス研究所

コンクリート電柱の維持管理

コンクリート電柱は日本の通信サービスを支える重要なインフラ設備であり，私たちの生活圏内に数多く設置されている大変身近な存在です．もしコンクリート電柱が折損してしまった場合，物損事故や人身事故につながるおそれがあることから，すべてのコンクリート電柱に対して劣化による折損が起こらないよう計画的に維持管理がなされています．このコンクリート電柱の維持管理には多大なコストが払われており，安全は担保しつつ，かつ経済的な維持管理技術が求められています．

コンクリート電柱には，コンクリートのひび割れを抑制するため，内部の鉄筋にあらかじめ引張応力を付与することでコンクリートに圧縮応力を作用させているプレストレストコンクリートが用いられています．プレストレストコンクリートに用いられている鉄筋は，通常の使用条件では問題はありませんが，さまざまな悪条件が重なった場合に水素脆化と呼ばれる劣化現象が進行するおそれがあることが指摘されています[(1)〜(3)]．コンクリート電柱は内部の鉄筋により強度が担保されていることから，鉄筋が劣化してしまうと電柱の折損につながるおそれがあります．コンクリート電柱内鉄筋の水素脆化を正確に予測することができれば，劣化リスクに基づいた点検や更改が実現でき，コンクリート電柱をより安全かつ経済的に維持管理することができるようになると期待されます．そこで私たちは，コンクリート電柱内鉄筋の水素脆化を予測する技術の確立に向けた研究開発を行っています．

水素脆化予測技術

水素脆化とは，金属材料中に侵入した原子状水素が引張応力下で金属材料の強度を低下させ，割れや破断をもたらす現象です．定荷重下の金属材料中への水素侵入の後，ある時間経過後に破断が発生することから「遅れ破壊」と呼ばれる場合もあります．プレストレストコンクリートに用いられる鉄筋は常に引張応力が作用しているため，水素の侵入による水素脆化のリスクがあります．通常，コンクリート内はアルカリ性環境であるため鉄筋の腐食はほとんど起こりませんが，コンクリートにひび割れが発生すると空気中の二酸化炭素によりひび割れ部が中性化し，ひび割れ部からコンクリート内に侵入した雨水などにより鉄筋が腐食する場合があります．鉄筋が腐食すると水素が発生することから，鉄筋中に水素が侵入し水素脆化が発生するおそれが生じます．このように，プレストレストコンクリートに用いられる鉄筋で水素脆化が発生する環境要因は解明が進んでいます．

一方，水素脆化そのもののメカニズムは学術的にも未解明な部分が多く残されています．そのため，現状では水素脆化メカニズムに基づいた演繹的な手法による水素脆化の予測は困難と考えられます．そこで私たちは，中性化したコンクリート環境中での水素脆化を再現する試験を行って水素脆化の挙動を調べることで，データ解析に基づいた帰納的な手法による水素脆化の予

測を試みています．将来的には帰納的な手法の結果により水素脆化メカニズムの理解を深めることで演繹的な手法による予測を可能とし，演繹的な手法の結果を活用することで帰納的な手法による予測精度がさらに高まるといった好循環をめざしています．

水素脆化を再現する際，実際の環境中で水素脆化が発生するには長時間を要すると予想されることから，鉄筋中の水素濃度を増加させて短時間で水素脆化破断を発生させる加速試験を用いて検討を行っています．水素脆化加速試験の外観写真および概略図を**図 1** に示します．水素脆化加速試験では，中性化したコンクリート環境での水素脆化を模擬するために，試験セル内部で鉄筋を弱アルカリ性の試験溶液に浸漬させ（中性化したコンクリート環境の再現），引張試験機を用いて鉄筋に所定の引張応力を付与し（鉄筋にかかるプレストレスの再現），鉄筋に電流を流すことで水の電気分解により水素を発生（腐食による水素発生の再現）させています．発生させる水素量は電流の大きさにより制御できることから，実際の環境に比べて十分多くの水素を発生させることで鉄筋中の水素濃度を増加させ，水素脆化を加速させています．水素脆化加速試験を用いて水素濃度と破断時間や破断確率の関係を求め，この関係を実際の環境中での水素濃度に外挿することで，実際の環境中での水素脆化の予測を試みています．

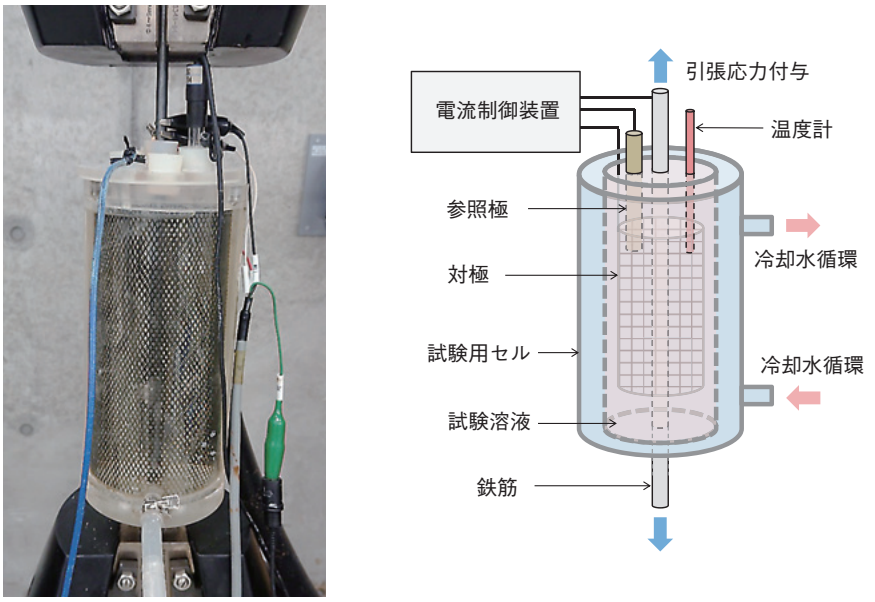


図 1　水素脆化加速試験の外観写真および概略図

水素脆化加速試験による破断時間および破断確率の推定

鉄筋の水素脆化は，同一の環境条件であっても破断時間が大きくばらつくという特徴があります．一般的な回帰分析では破断時間の平均値を予測することしかできず，平均値のみの予測では確率的に発生する短時間の破断に対処することができません．一方，破断時間の確率分布を予測することができれば，平均値よりも短時間の破断に対してもリスクに応じた対処が可能になります（**図 2**）．そこで私たちは，水

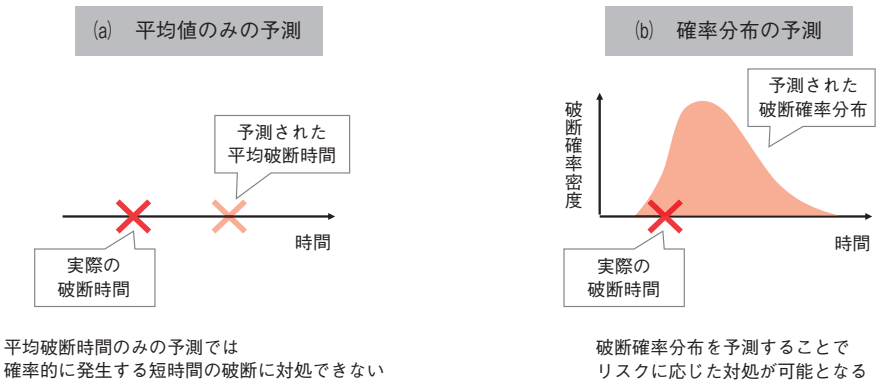


図 2　確率分布を含めた破断時間の予測の効果

素脆化加速試験によって取得した大量の破断時間データに対し，統計モデリングを用いることで確率分布を含めた破断時間の予測を試みています．

水素脆化加速試験の結果から，鉄筋表面の水素濃度と破断時間の平均値の関係は指数関数で近似でき，同一水素濃度での破断時間のばらつきはワイブル分布に従うことが分かっています．これらの結果から統計モデルを作成し，破断時間データに対し最尤法を用いることで，水素濃度と破断時間の確率分布の関係を推定することができます．最尤法とは，取得したデータが得られる確率がもっとも高くなるよう確率分布のパラメータを推定する方法で，ワイブル分布など正規分布以外の確率分布のパラメータ推定に用いることができます．最尤法では，取得したデータの確率密度の総乗（尤度）が最大になるようパラメータの値を探索することによって，取得したデータからパラメータを推定します．**図 3** は水素脆化加速試験による破断時間データと，回帰分析による平均値のみの推定結果および統計モデリングを用いた確率分布を含めた推定結果の一例を示しています．このように，統計モデリングを用いることによって平均値だけでなく破断時間の確率分布の推定が可能となります．

鉄筋の水素脆化では，ある環境条件に曝された際に，ある時間で破断する鉄筋と，いくら時間が経過しても破断しない鉄筋が出てくることが知られており，将来的な破断の有無は破断確率として表すことができます．鉄筋に加わる引張応力や鉄筋表面の水素濃度が大きくなると破断確率は大きくなり，引張応力や水素濃度が十分低くなると破断確率はほとんどゼロとなります．コンクリート電柱の維持管理を考えるうえでは，水素脆化による鉄筋の破断確率が重要な要素となります．

水素脆化加速試験の結果から，鉄筋表面の水素濃度と破断確率の関係はシグモイド曲線で近似できることが分かっています．そのため，ロジスティッ

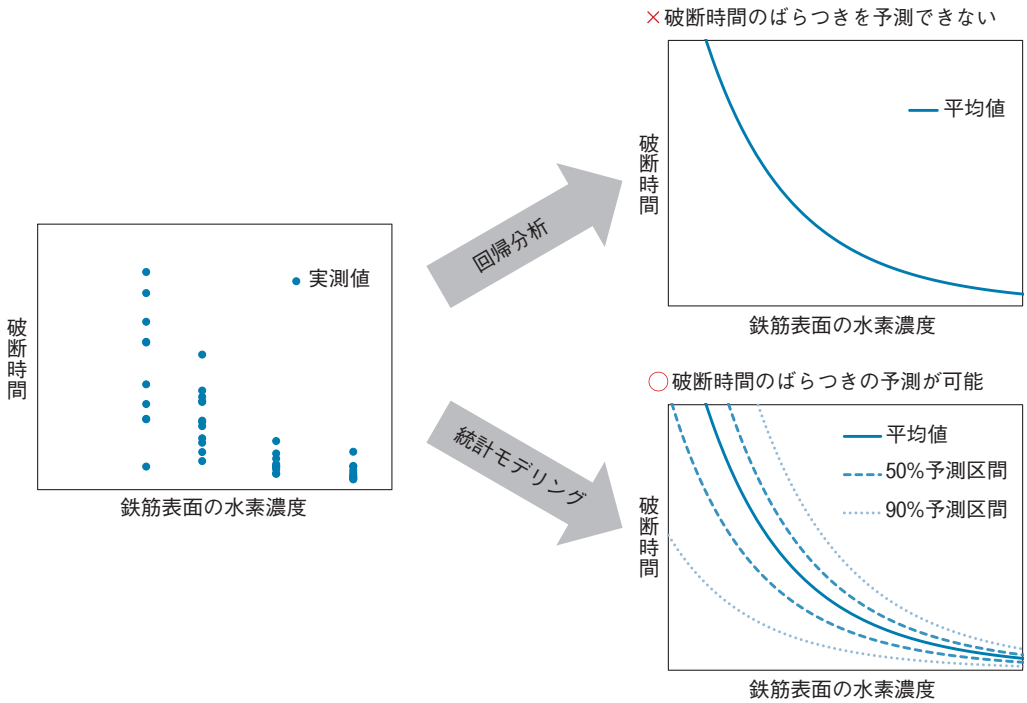


図 3　統計モデリングを用いた破断時間の確率分布の推定

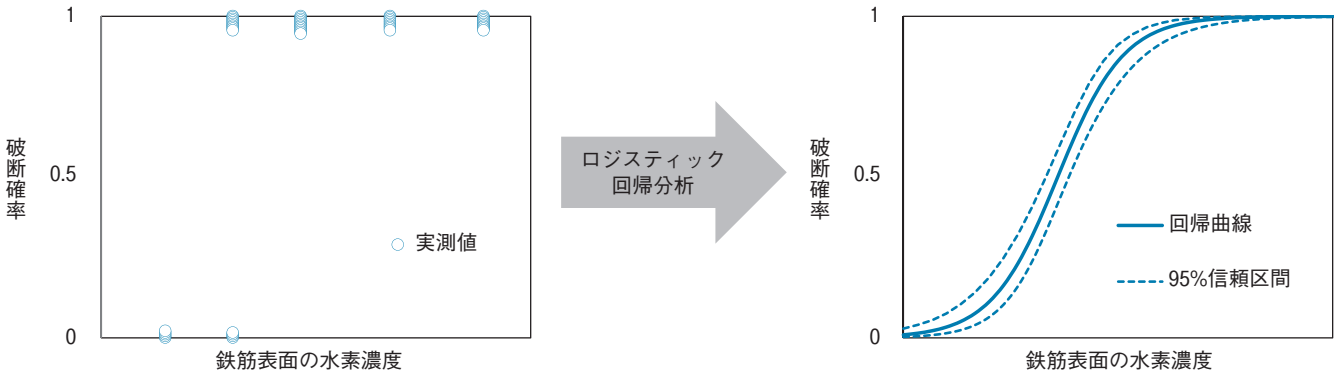


図 4　水素脆化加速試験による破断有無の実測値および推定された破断確率

ク回帰分析などを用いることで水素濃度と破断確率の関係を推定することができます．ロジスティック回帰分析は，ある事象が発生するか否かといった 2 値変数を目的変数にとる場合の事象の発生確率を推定することができる方法です．ロジスティック回帰分析では回帰モデルにロジスティック関数を用い，最尤法によりロジスティック関数のパラメータを推定します．**図 4** は，引張応力，鉄筋表面の水素濃度，温度を変えて水素脆化加速試験を行い，取得した破断有無データから破断確率を推定し，引張応力と温度をある値に固定したときの鉄筋表面の水素濃度と破断確率の関係を示しています．解析では水素脆化加速試験で鉄筋が破断した場合を 1，破断しなかった場合を 0 と定義し，ロジスティック回帰分析で破断確率の回帰曲線と95%信頼区間を推定しています．このように，水素脆化加速試験により取得した破断有無のデータから，鉄筋表面の水素濃度と将来的な破断確率の関係を推定することができます．

今後の展望

今後は，水素脆化加速試験により求めた水素濃度と破断時間および破断確率の関係を実際の環境での水素濃度に外挿することで，コンクリート電柱内鉄筋の破断時間と破断確率の予測を行います．外挿には標準的な実環境中での鉄筋の表面水素濃度の推定値を用いることとし，鉄筋中に侵入した水素を検出する新たな測定系を構築することで推定に必要な鉄筋の表面水素濃度データを取得していく予定です．また，予測結果を検証するため，大学と連携して材料科学的観点から水素脆化機構のモデル化に向けた研究も進めていく予定です．

■参考文献

⑴ 松山：“遅れ破壊，”日刊工業新聞社，pp.45-48，1989.
⑵ 白神：“土木建築用素材としてのPC鋼棒の現状，”ふぇらむ，Vol. 13，No. 9，pp. 611-615，2008.
⑶ M. Elices, A. Valiente, L. Caballero, M. Iordachescu, J. Fullea, J. Sanchez-Montero, and V. Lopez-Serrano：“Failure analysis of prestressed anchor bars,” Engineering Failure Analysis, Vol. 24, pp. 57-66, 2012.



（左から）上庄　拓哉／石井　龍太／
津田　昌幸

インフラ設備の維持管理はNTTのみならず日本の社会的課題となっています．安全で経済的なインフラ設備の維持管理の実現をめざして，今後も研究開発に取り組みます．

◆問い合わせ先
NTT先端集積デバイス研究所
ソーシャルデバイス基盤研究部
インフラ見える化基盤技術研究グループ
TEL　046-240-2236
FAX　046-240-4047
E-mail　takuya.kamisho.aw@hco.ntt.co.jp

主役登場

ウェアラブルセンサによる新たな価値をパートナーと共創



高河原　和彦
NTTデバイスイノベーションセンタ
主任研究員

NTTは，東レ株式会社との共同開発によって電気を通す繊維「hitoe®」を創出し，2014年には着るだけで心電位・心拍数等の生体情報を計測可能な着衣型ウェアラブルセンサを提案，他社に先駆けて実用化を行いました．以降，NTTデバイスイノベーションセンタでは，健康で豊かな暮らしの実現に向け，人間に寄り添うウェアラブルデバイス技術の研究開発をミッションの１つとしてきました．

2014年に実用化したウェアラブルセンサでは，マラソンなどにおいて心拍数をモニタリングしながらトレーニングを行うといったスポーツ用途をターゲットとしていましたが，作業者の見守り，安全管理といった用途でも引き合いをいただき，何度かトライアルを実施させていただきました．その結果，激しい動きでも心拍数を正確に計測できるようにチューニングしたスポーツ用ウェアでは，電極を肌に密着させるための圧力が大きく，人によってはきついと感じるため作業者用にチューニングしたウェアが必要であること，心拍数の可視化だけではなく作業者の安全管理に有用な価値を提供する必要があるという課題を見出しました．

特集記事で紹介したウェアラブル生体・環境センサを用いた体調管理技術は，このような経緯から取り組んだテーマです．暑熱対策や身体負荷のマネジメントといった作業者の安全管理にとって大きな課題にターゲットを絞り，それらに対して大きな価値を提供できるよう，温熱生理学や運動生理学を専門とする大学の先生方と共同し，体調不良を防ぐためのウェアラブルセンサの活用方法を検討してきました．その中で，私たちの研究グループの強みであるデバイス技術やデータ解析技術をより深化させて体調管理に必要な生体・環境情報を取得するための新しいセンサ端末を開発しました．並行して，作業者の方にとって着心地の良いウェアを，素材や縫製を得意とする東レ株式会社やゴールドウイン株式会社と共同で開発しました．また，これらの要素技術を統合したシステムを開発し，グループ会社の協力を得て実際の作業現場で本技術を検証しました．このように，本成果は私たちの研究グループだけではなく，専門的な知見・技術を持つパートナーとそれぞれの強みを活かしながら共同することで，初めて創出することができました．本技術を少しでも多くの方に活用いただき，安心して働ける現場の実現に貢献することを願っています．

今後，NTTではIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）の構成要素の１つであるデジタルツインコンピューティングの一形態として，サイバー空間における人それぞれの身体および心理の精緻な写像（バイオデジタルツイン）を実現し，心身の状態の未来を予測することで，人間が健康で将来に希望を持ち続けられる未来への貢献をめざしています．そのためには，さまざまな要因によって日々刻々と変化している個人の生体データおよび環境データの継続的な取得とデータの活用法の開発が不可欠です．本成果をその端緒として，今後も私たちの強みを磨きつつ，パートナーとの協力関係を築きながら研究開発を進めていきます．

特集

安心・安全な社会実現に貢献するための暗号・セキュリティ技術に関する研究開発

Cryptography and Security Technology

NTTグループの取り組みを安心・安全に実現するテクノロジを創出するために,将来に向けた先端技術やIOWN(Innovative Optical and Wireless Network)の特徴を活かした技術を含め,中長期的なテーマの目的である「データ流通・利活用」と「被害を極小化」の実現に向けた研究開発を進めている.本特集では,NTTのセキュリティR&Dの取り組みについて紹介する.



安心・安全を実現するテクノロジの創出に向けたセキュリティR&Dの取り組み 66

将来にわたって安心・安全な社会にしていくために，社会環境の変化やICTを取り巻く技術の発展による未来像（10年後のSmart World）について紹介する．

安心・安全な価値創造プロセスを実現するデータ流通・利活用技術 70

NTTのセキュリティR&Dの取り組みとして，「データ処理権の管理・制御」というデータ流通の新しいパラダイムと，これを実現するためのプラットフォームや要素技術について紹介する．

増え続けるオペレーションコストの問題を解決し，被害を極小化する技術の確立と展開 75

サイバー攻撃等の新たなサイバーセキュリティの脅威に対応しつつ，そのオペレーションを自律化・自動化する技術について紹介する．

量子情報処理によるセキュリティと量子情報のデータ保護 79

量子誤り訂正と量子誤り抑制，新たな応用の可能性としての偽造防止，および量子ネットワークをめざすための基盤技術となる量子中継の研究について紹介する．

主役登場 84

岩村 誠（NTTセキュアプラットフォーム研究所）
未知なるリスクを排除せよ

安心・安全を実現するテクノロジの創出に向けたセキュリティR&Dの取り組み

さまざまな状勢により世の中が大きく変革していく中，NTTが取り組んでいるセキュリティR&Dの将来像を語るには，目の前で起きている問題だけでなく，来る社会のあり方とセキュリティについて考えることが重要です．本稿では，その先の未来を見据えたセキュリティR&Dの取り組みについて紹介します．

平田（ひらた）　真一（しんいち）

NTTセキュアプラットフォーム研究所　所長

はじめに

新型コロナウイルス感染症によって私たちの社会，生活にさまざまな影響が及ぼされました．オリンピック・パラリンピックをはじめとするさまざまなイベントが開催の延期を余儀なくされ，ソーシャルディスタンスの確保を前提とした社会活動，生活様式へ移行せざるを得なくなったことから，オンライン化が急速に進んだことによる働き方の変革や，社会の分断化・非接触化がさまざまな面で生じています．

コロナウイルスによる影響の全世界的な拡大や事態の長期化が予測されていることから，世の中の変革（アフターコロナの新しい生活様式，社会秩序の再構築）が加速され，それに伴ってデジタル化・オンライン化に向けたさまざまな取り組みが急速に進んでいます．また，従来の社会活動を前提としていたサプライチェーンが機能不全となり，個人だけでなく社会の枠組みのレベルでもさまざまな場面で大きな変化が起こっています．

その一方でセキュリティやプライバシに関する懸念や被害も広がっており，在宅勤務などの普及に伴って急増するテレワークをねらったサイバー攻撃や，人の不安に乗じた攻撃による被害はますます深刻になっています．また，感染拡大防止に向けた感染者やその疑いのある人を割り出すための監視や行動追跡などはプライバシへの十分な配慮も求められます．

サプライチェーンにおいても，急速なデジタル化・オンライン化をねらった広域的な攻撃も激化しており，安全なサプライチェーンの再構築が求められています．

NTTでは，安心・安全な社会の実現に貢献するためのセキュリティに関する研究開発を進めています．

世の中が大きく変革していく中，目の前で起きている問題だけでなく，その先の未来を見据えたセキュリティR&Dに取り組んでいくために，来る社会のあり方とセキュリティについて考えていくことが重要です．

将来にわたって安心・安全な社会にしていくために，社会環境の変化やICTを取り巻く技術の発展による未来像（10年後のSmart World）について考えます．

10年後のSmart Worldとは

AI（人工知能），IoT（Internet of Things），ロボットやビッグデータといった革新技術が浸透した社会は，産業革命による工業化社会への発展，コンピュータ技術の発達による情報化社会への発展に続く，社会発展の歴史における5番目の新しい社会（Society 5.0[(1)]）であり，生活をより豊かにしていく未来のあり方（Smart World）として期待されています．

さまざまな革新技術によってサイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）が高度に融合されたSmart Worldにおいては，フィジカル空間から集積されるセンサ情報などの膨大なデータが，高知能化されたサイバー空間でのデータ分析・予測に活用され，フィジカル空間へ自律的にフィードバックされます．

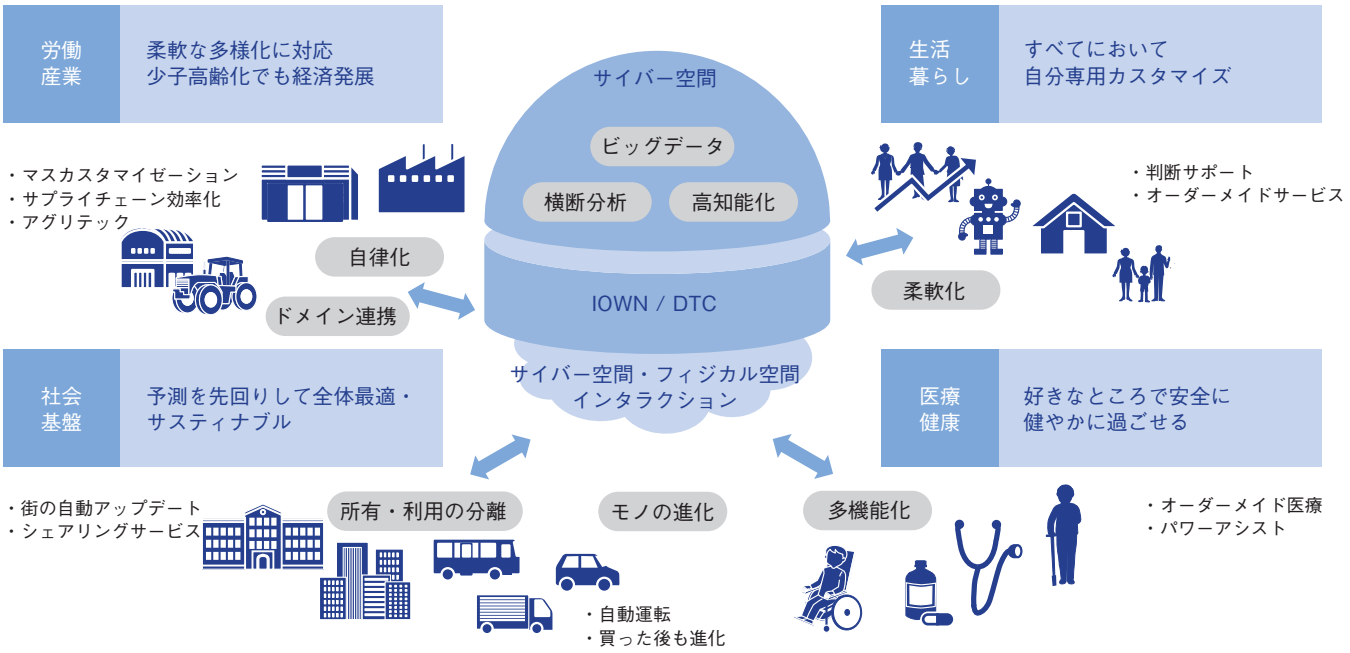


図1　10年後のSmart World

その結果，さまざまなサービスや社会基盤において，利用者個人への最適化と社会全体の最適化の両方が進展し，すべての人が安全に自分らしく暮らせる社会（真のSmart World）が実現されると考えられます．

例えば，個人の暮らしや生活にかかわる面では，個々人の状況に合わせた究極のカスタマイズされたサービスを享受できるようになります．社会インフラにかかわる面では，AI予測によって先回りの対応を行い，社会全体の最適化やサスティナブル（持続可能な）提供が可能になります．経済・産業にかかわる面では，多様化にも柔軟に対応し，少子高齢化が進む社会環境であっても経済を発展させることが可能になります（**図1**）．

一方で，このような理想の世界の実現を支える技術・インフラの高知能化，自律化，柔軟化，ドメイン連携などによって，「脅威にさらされる機会」や「被害の程度・範囲」も一気に拡大してしまうという負の側面も考えられます（**図2**）．

膨大なデータを分析したり利用する際に，プライバシが十分考慮されなかったり，倫理に反するような利用がされるおそれや，意図せぬ情報の漏洩といったことも考えられます．

データ分析アルゴリズムが悪意のある者の手によって改ざんされてしまうという脅威も現実味を帯びてきています．従来はあらかじめ設計されたアルゴリズムに従って作成されたプログラムに直接手を入れたり，プログラムをすげ替えたりしなければ改ざんも難しかったものが，AIが普及した状況では，AIの学習やAIによる判断に対して誤作動を引き起こさせるといった直接的な改ざんを伴わない攻撃が行われるおそれがあります．具体的には，AIに学習させるデータに不正な値を混入させて攻撃者が意図するような判断をさせる，AIに認識させるデータを細工することによって判断を誤らせるといった攻撃や，AIの動作から学習したデータを推測することによってプラ

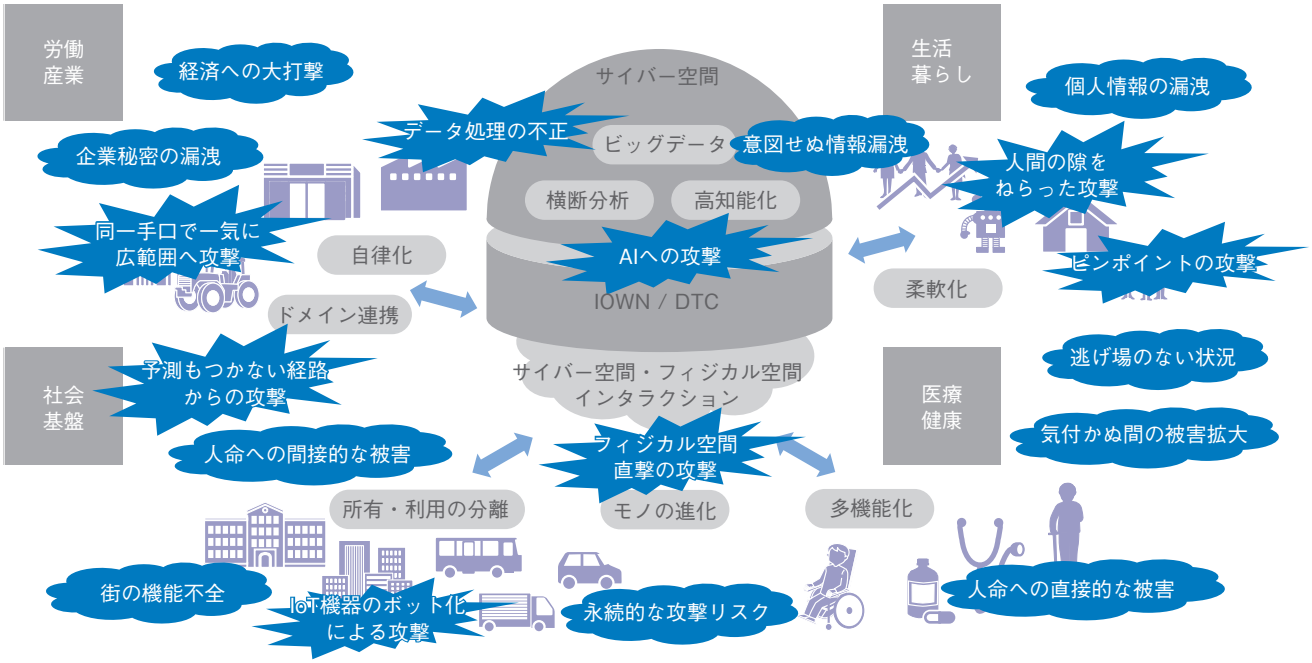


図 2　10年後のSmart Worldに潜むセキュリティ脅威

イバシの侵害に及ぶようなデータを不正に入手されるといった新たな攻撃が考えられます．

アルゴリズムが改ざんされると，データが意図的に漏洩されるだけでなく，分析結果を悪意のあるものに変えられてしまうおそれもあります．悪意のある分析結果がフィジカル空間にフィードバックされてしまうことによって，さまざまなサービスや社会インフラに多大な影響が及んでしまいます．

真のSmart Worldを実現するためには，このようなサイバー空間とフィジカル空間が高度に融合されたことによって新たな脅威となる側面を考慮し，肥大化・巧妙化する攻撃に対抗しつつ，利便性の向上を両立させることのできるセキュリティR&Dをめざしていかなければなりません．

長期的な視点でのセキュリティR&Dの考え方

セキュリティリスクは，攻撃の脅威（人間や社会を含む広い意味での），システムの脆弱性，守らなければならない（情報，金銭面だけでなく人命なども含めた）資産の大きさに依存します．サイバー攻撃が肥大化・巧妙化し，サイバー空間とフィジカル空間の高度な融合によって従来よりもさまざまな脅威にさらされてしまう状況においては，セキュリティリスクは飛躍的に増加してしまいます．

一方でセキュリティ対策を強化することになると相応のコストがかかってしまうため，企業がセキュリティ対策にかけられるコストにも限界があります．今後のサイバー攻撃の拡大に対抗するためには，既存のセキュリティ対策の延長や単なる増強だけではすべての脅威への対策技術を実現することは困難なため，サイバー攻撃に対する防御，対策能力の抜本的な向上が必要です．

そのため，長期的な視点に立ったセキュリティR&Dとしては，①Smart Worldにおける価値の創造をサポートするために新たな脅威へ対応し，創造

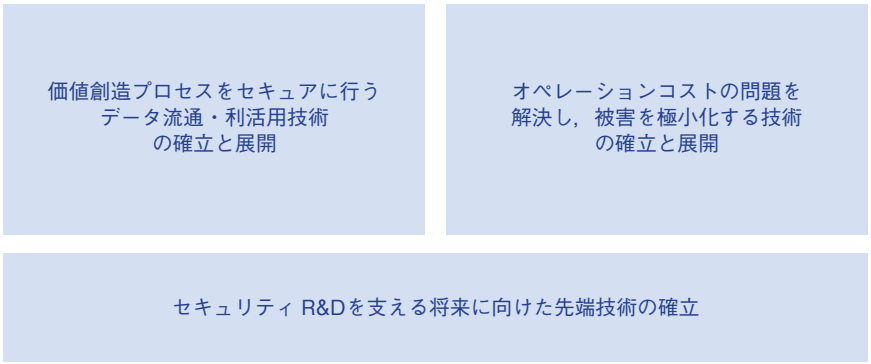


図3　セキュリティR&Dに必要な観点

するための環境を守る技術に注力することと，②脆弱性のリスクをゼロにする技術や，攻撃を予測し事前対処を行う技術など，攻撃者優位の状況を変える技術を創出していくこと，をめざして取り組んでいくことが求められます．

また，NTTグループが今後取り組んでいくビッグイベントへの対応体制の強化，中期経営戦略に基づいた新たな分野（街づくり，エネルギー，ヘルスケア）への展開には安全なデータ利活用の実現，ゲームチェンジをめざすIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想の実現に必要なセキュリティが求められることから，今後取り組んでいくべきセキュリティの研究開発としては以下の観点が重要なポイントになります（**図3**）．

⑴　価値創造プロセスをセキュアに行うデータ流通・利活用技術の確立と展開

データの囲込みやプライバシ侵害，不正利用の問題を解決し，分野横断的にデータを利活用できる柔軟で安全なデータの共有・分析の仕組みの実現．

⑵　オペレーションコストの問題を解決し，被害を極小化する技術の確立と展開

新たな脅威への対応をしつつ，サイバー攻撃対応のオペレーションを自律化・自動化する技術の確立によって，人は対処の確認および創造性が必要となる新しい脅威の対応に注力できるようにすることにより，総合的な対応力を強化．

⑶　セキュリティR&Dを支える将来に向けた先端技術の確立

セキュリティCoE（Center of Excellence）として，暗号・情報理論，量子情報セキュリティ技術など，将来に向けた基礎技術の確立．

NTTグループに求められる「安全・安心のコミュニケーション」を将来にわたって持続していくために，私たちは将来に向けた先端技術やIOWNの特徴を活かした技術を含め，中長期的なテーマの目的である「データ流通・利活用」と「被害を極小化」の実現に向けた研究開発に取り組んでいきます．

■参考文献

⑴　https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/



平田　真一

いろいろなことが絡み合いながら変化していく昨今，自らの意識の変革も含めて，既存の枠・価値観にとらわれず進めていけることが大事であると考えています．世の中のこれからの動きを見つつ，私たちの技術により世の中を変えていけるような大きな成果にご期待ください．

◆問い合わせ先

NTTセキュアプラットフォーム研究所
企画担当
E-mail　scpflab＠hco.ntt.co.jp

安心・安全な価値創造プロセスを実現するデータ流通・利活用技術

Society 5.0の実現には組織や業種・業界を超えたデータの利活用が必須ですが，期待されるほどには行われていません．本稿では，その障壁となっているデータ授受に伴うリスクとその原因について概説します．そして，この問題の解決に向けたNTTのセキュリティR&Dの取り組みとして，「データ処理の管理・制御」というデータ流通の新しいパラダイムと，これを実現するために研究開発中のプラットフォームや要素技術を紹介します．

鷲尾 知暁（わしお ともあき）
折目 吉範（おりめ よしのり）
森田 哲之（もりた てつし）
千田 浩司（ちだ こうじ）
森村 一雄（もりむら かずお）
大嶋 嘉人（おおしま よしひと）
NTTセキュアプラットフォーム研究所

Society 5.0とクロスドメインデータ流通

経済発展と社会的課題の解決を両立した将来の社会像として，サイバー空間とフィジカル空間とを高度に融合させたシステム「Society 5.0」が提唱され[(1)]，その実現に向けた取り組みが盛んに行われています．Society 5.0では，さまざまなデータを駆使することで現状認識や課題発見，未来予測や最適解導出などが可能となり，それらが経済の発展と社会的課題の解決をもたらすとされています．言い換えると，組織や業種・業界を超えたデータの利活用（これをクロスドメインデータ流通と呼ぶことにします）が活発に行われることがSociety 5.0の生命線であるといえます．

クロスドメインデータ流通を阻む障壁とその原因

しかし，クロスドメインデータ流通，特に，機密性や希少性の高いデータの流通は，思うほどには進んでいません．その最大の障壁は，データ提供者とデータ利用者の双方に存在するリスクです．

データ提供者は，提供したデータが漏洩してしまったり，予期せぬ方法で利用されて自らや第三者に損害を与えたりするリスクを負います．一方のデータ利用者は，提供されたデータの守秘管理に伴うリスクや，提供されたデータの適法性に関するリスクを負います．

別の観点では，データ利用者は提供されたデータが従前期待していたような結果や価値を生み出さなかったり，データの提供に伴い課せられた条件（例えば，支払う対価）に見合わなかったりするリスクを負います．一方のデータ提供者は，提供したデータが想定以上の価値を生み出す（受領する対価が過小である）リスクを負いますし，逆に想定した価値を生み出さないことでデータ提供の目的（例えば，得られた結果の共有や社会への還元など）が果たされない場合があります．

上記のリスクが生じる根本的な原因は，従来のデータ流通の方法がデータそのものを渡してしまう・受け取ってしまうものであったことにあります．データは使い方次第でさまざまな価値や問題を生み出す可能性があり，それらすべてをあらかじめ見定めることは困難です．このような不透明性や不確実性が存在していては，クロスドメインデータ流通が活発に行われるはずがありません．

データ処理の管理・制御という新たなパラダイムへ

この問題を解決するには，データそのものを授受してしまう「データ参照の管理・制御」という従来のパラダイムから，「データ処理の管理・制御」という新たなパラダイムにシフトすることが必要です．この新たなパラダイムでは，データ最小化の原則に則り，データそのものではなくデータに対して合意した（データ利用者が望み，データ提供者が認めた）処理を行った結果のみをデータ利用者に渡します．こうすることで，そのデータ利用で生じ得

る価値も問題も限定的で予見しやすくなり，前述したリスクも大きく低減されるのです（**図1**）．

クロスドメインデータ流通プラットフォームの概観

私たちは，上記の新パラダイムに基づいた，信頼できる*1クロスドメインデータ流通のプラットフォームを実現し，そこに参画するあらゆるデータ提供者・利用者があらゆるデータを安心して共有し利活用できるようにすることをめざしています．同プラットフォームの主要な要件には，①データを保護しつつ必要な処理を加えられること，②データの提供者と利用者の合意内容や法に従ってデータ処理を制御できること，③扱うデータやその処理について透明性を確保すること，の3点があります（**表**）．

このプラットフォームは以下の3つの機構から構成されます（**図2**）．

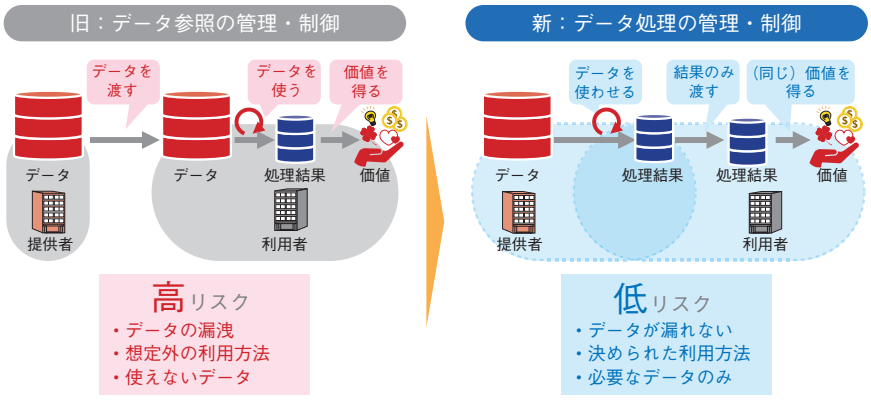


図1　データ流通方法のパラダイムシフト

表　クロスドメインデータ流通プラットフォームの主要要件

区分	主な要件
データの保管と処理の保護	データについて，その機密性や完全性を高度に保ちながら，利用者が望むさまざまな分析・加工等の処理を実行できること
	データ処理の結果（派生データ）についても，上記のように扱えること
	プラットフォームの運用者であってもデータや派生データを参照したり書き換えたりできないこと
データ処理権の管理と制御	提供者と利用者が合意したデータ処理のみを実行すること
	対象のデータや派生データに応じて必要な法（個人情報保護法など）に適合した処理のみを実行すること
	処理にかかわるデータ提供者や利用者，対象データなどについて正確かつ詳細に把握したうえで実行の可否を判断すること
データやデータ処理の透明性確保	データや派生データの特徴や出自について，データ利用者が確認できるようにすること
	データや派生データに対して実行された処理の事実や履歴について，データ提供者やデータ利用者が確認できるようにすること
	データの保管や処理にかかわるプラットフォームの動作について，データ提供者や利用者が確認できるようにすること

(1)　データ保護・活用機構

・　データ（派生データ*2を含みます．以下同様）を秘匿したまま，データ利用者が必要とするさまざまな分析・加工等の処理を実行します．

・　認可機構が許可した処理のみが許可したとおりに実行されることを保証し，また，処理の事実や履歴，派生データの出自を証明します．

(2)　データ処理認可機構

・　データ保護・活用機構へのデータ処理の要求について，データ提供者が定めたデータ利用ポリシー*3やデータの提供者と利用者とが合意した内容に従い，また，適法性も加味し，その実行の可否を判断します．

・　データの提供者や利用者，あるいは，対象データについて，トラストデータ管理機構からの情報を基に正確かつ詳細に確認したうえで可否を判断します．

(3)　トラストデータ管理機構

・　データの提供者や利用者，あるいは，対象データに関する属性（トラストデータ）を管理し，認可機

＊1　信頼できる（プラットフォーム）：データの提供者や利用者が期待するとおりに動作し，その役割を的確に果たしていることをプラットフォーム自らが示し，データの提供者や利用者からの信頼を獲得できるものであることを指します．

＊2　派生データ：データ提供者からプラットフォームに託されたデータを処理した結果を指します．派生データを処理した結果も含みます．

＊3　データ利用ポリシー：どのようなデータ利用を許すか・許さないかをあらかじめ規定したもの．対象のデータ，利用を要求する主体，利用の内容（データ処理の方法）などを用いて認可対象を指定し，それに対して許可・不許可や，許可時に満たすべき条件などを定めます．



※データの検索やマッチング，課金や決済などの機能は省略しています．

図２　クロスドメインデータ流通プラットフォームのアーキテクチャ

構や必要とする者に提供します．

・　データ保護・活用機構によるデータ処理の事実や履歴，派生データの出自を証明する情報もトラストデータとして管理し，必要とする者に提供します．

クロスドメインデータ流通の要素技術

前述の各機構を実現する要素技術のうち主要なものについて，その概要を以下に示します．

■秘密計算技術

秘密計算技術は，データを暗号化したまま一切復号することなく計算できる技術です．これにより，プライバシにかかわる情報や企業の機密情報など機微なデータの安全な利活用が可能となります．また，他組織に開示することが難しいデータを持ち寄った分析が可能となり，分析対象データの種類や量の増加による新たな価値の引き出しが可能になると期待されます．秘密計算技術では安全性はもちろん，処理の性能と多様性が重要です．NTTセキュアプラットフォーム研究所はこれまで，世界最高速レベルでの統計処理が可能な秘密計算システムを実用化しました[(2)]．現在はディープラーニングの学習や予測を暗号化したまま行える秘密計算AI（人工知能）技術の開発を進めており[(3)]，画像データなど大規模データを扱うためのさらなる高速化，必要とされるAIアルゴリズムの拡充などに取り組んでいます．

■データ処理機密性・真正性保証技術

クロスドメインデータ流通ではさまざまなステークホルダの計算環境でデータが処理されるため，データのアクセス制御（機密性を保証すること）やデータ処理結果の真正性を保証することは容易ではありません．しかし前述のとおり，クロスドメインデータ流通プラットフォームが信頼され，広く利用されるにはこれらの要件を満たすことが必要です．具体的には，①提供データが許可された範囲でのみ利用されているかをデータ提供者が確認可能であること，②データ処理結果が要求どおりの正しい結果であるかをデータ利用者が確認可能であること，の２つの要件が特に重要と考えています．私たちはこれら要件を実現するため，TEE（Trusted Execution Environment）と呼ばれるセキュアな実行環境[(4)]を援用した安全な処理手続き（プロトコル）の確立に取り組んでいます．

■属性ベース認可技術

プラットフォームには大量のデータが次々と登録されますし，登録されたデータを誰が利用しようとするのか事前には分かりません．そのため，データ利用ポリシーを「どのような属性を持つデータをどのような属性を持つ主体が利用できるか」というかたちで規定しておき，認可判断の際にはそこに対象データやデータ利用者の属性値を当てはめて評価する，属性ベースの認可が有効です．例えば，データ利用者が有する資格（例：ISMS認証，Pマーク認証）を必要な属性としてデータ利用ポリシーで指定するといったことです．

属性ベースの認可自体は新しい考え方ではありませんが，後述するように適法性を考慮した認可判断を行うには，データ利用ポリシーにかかわらず，データの特性に応じて所定の属性の有無や値を確認して判断することなどが必要です．また，誤った認可判断を回避するために，データ利用ポリシーで指定された属性の有無およびその真正性（第三者機関による証明有無など）を厳格に判断することが必要です．さらに，データ利用の認可判断においては，許可・不許可の二値だけではなく条件付きで許可するなどの柔軟性も必要と考えています．例えば，要求され

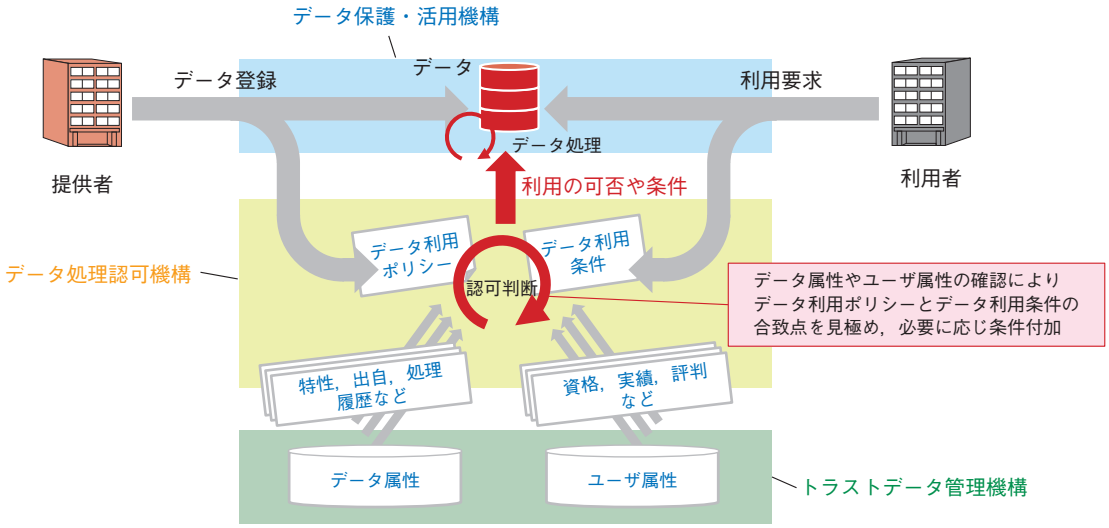


図 3　属性ベースの認可判断

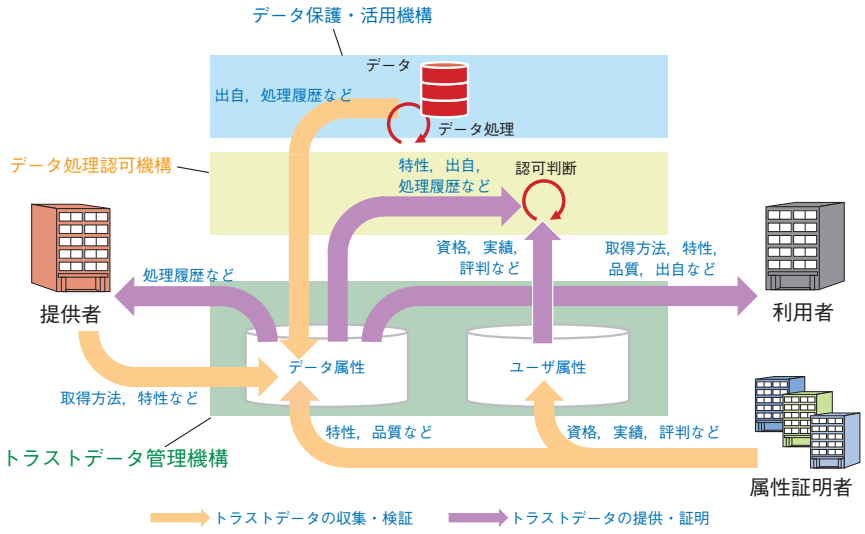


図 4　トラストデータの流れ

たデータそのものの利用は認められないが，匿名加工したものであれば許可するなどです．データの提供者と利用者の双方の要求を調整しながら柔軟な認可判断を行うことで，データの流通機会の拡大に資すると考えています（**図 3**）．

■トラストデータ管理技術

トラストデータ管理機構は，データの提供者や利用者などプラットフォームのユーザの属性（資格や実績，評判など）や，プラットフォームで扱われるデータの属性（種別，項目，収集方法などのデータ特性や，出自，処理履歴など）を収集，管理し，ユーザやデータがどのようなものであるかを確認する際の信頼の拠り所となる情報「トラストデータ」としてデータ処理認可機構やデータ提供者・利用者などに提供します（**図 4**）．

トラストデータは信頼の拠り所となるため，その確からしさを保証できる多様な主体により証明されていることや，その内容の正しさを検証できるようにする必要があります．一方で，トラストデータ自体が機密性を持つ場合もあり，いつ・誰に・どの部分までを開示して良いかを適切に判断する必要があります．さらに，必要とするときにいつでも利用できる可用性も求められます．これらさまざまな要求にこたえるトラストデータ管理技術とその仕組みを実現していきます．

■トラストデータと認可判断における法的要求事項の実装

データの提供者や利用者は，授受するデータに関する適法性についても配慮しなくてはなりません．データがどのように取得されたかをデータ利用者が把握することは難しく，違法に取得されたデータが紛れていても気付けない可能性があります．また，個人情報

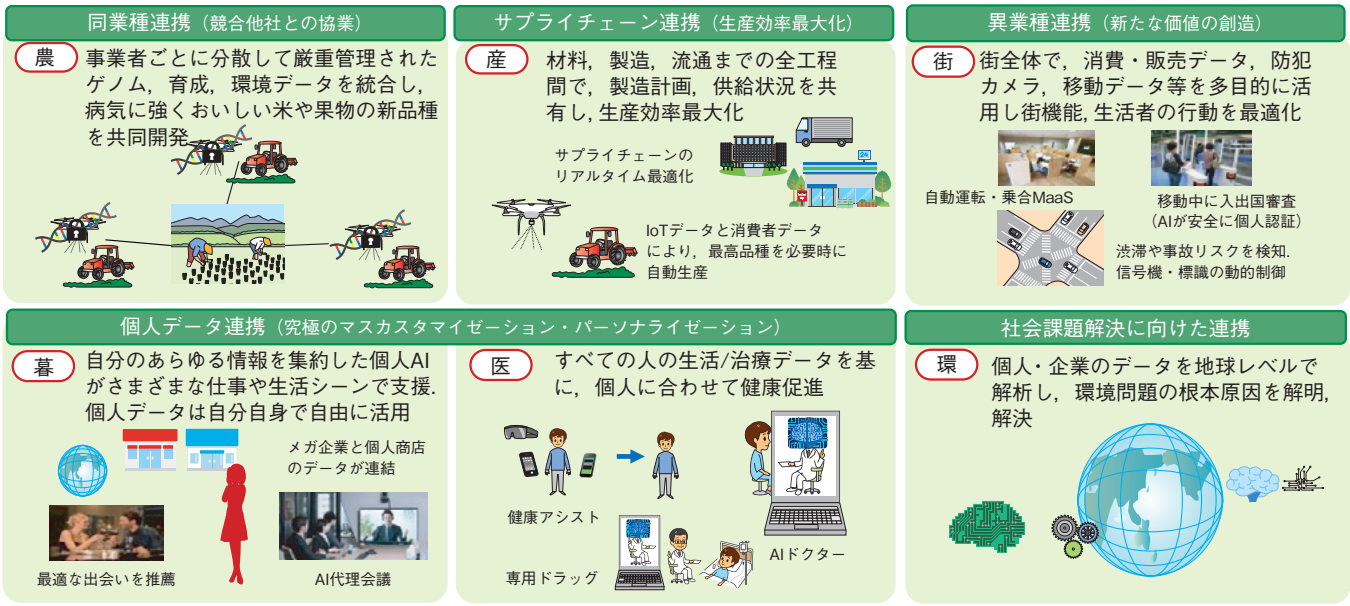


図 5　クロスドメインデータ流通が実現する世界

にあたるデータについては，取得時に本人に示した利用目的の範囲外で使用することや，本人の同意を得ずに第三者へ提供することなどが個人情報保護法で禁じられており，これを守るためにデータの提供者も利用者も多くの注意を払う必要があります．

このような適法性への配慮の負担を軽減するため，データと合わせて法的要求事項を実装した属性データを付与し，トラストデータとして管理し認可判断の際に確認する方法についても検討しています．

今後に向けて

信頼できるクロスドメインデータ流通プラットフォームにより，これまで困難だった同業種・異業種間での協業や連携が加速され，新たな価値の創造や大きな社会課題の解決が可能になると考えています（**図 5**）．

その実現に向け，私たちは，要素技術の研究開発だけではなく，クロスドメインデータ流通を志向するパートナーと連携した仮説検証や，国際標準化活動，社会受容性の確保に向けた活動などを加速していきます．

■参考文献

(1) https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/
(2) https://www.ntt.co.jp/news2018/1808/180808a.html
(3) https://www.ntt.co.jp/news2019/1909/190902a.html
(4) https://globalplatform.org/specs-library/?filter-committee=tee



（上段左から）鷲尾 知暁／ 折目 吉範／ 森田 哲之
（下段左から）千田 浩司／ 森村 一雄／ 大嶋 嘉人

私たちは，本稿で紹介したクロスドメインデータ流通プラットフォームの研究開発を通じてIOWN上に新たな価値創造のプロセスを構築し，Society 5.0/Smart Worldの実現に貢献していきます．

◆問い合わせ先
NTTセキュアプラットフォーム研究所
企画担当
E-mail　scpflab＠hco.ntt.co.jp

増え続けるオペレーションコストの問題を解決し，被害を極小化する技術の確立と展開

古賀 祐匠　中嶋 良彰
千葉 直子　三好 潤
小山 高明　司東 秀浩
宮島 麻美
NTTセキュアプラットフォーム研究所

サイバー攻撃等の新たなサイバーセキュリティの脅威に対応しつつ，そのオペレーションを自律化・自動化する技術の確立によって抜本的に効率化します．オペレータが機械的には対応できない高度な脅威に関する対策により専念できるようにし，総合的なセキュリティ対応力の強化を図ります．

背　景

サイバー攻撃は年々増加しており，加えてその手法は複雑化・巧妙化しています．特に「人」をねらうサイバー攻撃の増加が著しく，それに伴って企業のセキュリティ対策費は増大を余儀なくされています．

ユーザの価値観が多様化し，ロングテールへの対応が必要な将来，さまざまな通信機器や端末・デバイスが接続された超高速光通信ネットワーク上では，サーバやソフトウェアが連携して多種多様なアプリケーションが提供されることが想定されます．そのような環境では，サイバー攻撃が発生する都度行うかたちの対策ではコスト効率があまりにも悪く，企業のデジタルトランスフォーメーションやビジネス価値創出を妨げる要因にもなり得ます．

本研究開発の目標

本研究開発では，サイバー攻撃やそのターゲットとなるさまざまな脆弱性に対して，常に先回りして自動的にセキュリティ対策を実施可能にすることをめざしています．

サイバー攻撃による被害発生を回避し，企業の経営を圧迫するセキュリティオペレーションの人的リソース不足の問題を解消するとともに，ユーザが安心して価値を享受できるICT環境を提供します．このような環境が，企業をセキュリティ脆弱性等の都度対応（もぐらたたき），インシデント発生時の後追い対応（いたちごっこ），そして被害によって生じるビジネス損失から解放します．

セキュリティオペレーションにかかるトータルコストの軽減によって，企業がサービスの「開発」や「運用」に集中できる状況をつくり出し，Smart Worldにおいてビジネス価値を短いサイクルで繰り返し創出し続けられるようにサポートします．

本研究開発が実現する基盤のイメージ

セキュリティオペレーションの現場では，「監視」「分析」「対処」の多くのセキュリティ対策を人手によって実施しているため，その対応力は人的リソースに深く依存しています．

本研究開発では，インフラやサービスを構成する機器やアプリケーションの状態を常に監視し，脆弱な状況を見つけ次第，先回りしてサービスやインフラを構成するシステムにセキュリティ対策を自動実行する基盤を実現することによって，効果的かつ効率的なセキュリティ対応を安定実施可能にします（**図1**）．

基盤の実現に向けた課題

常に先回りしてセキュリティ対策を自動実行するために，以下の3つの技術の確立をめざす研究開発に取り組むとともに，これらの研究開発を通じて**図2**に示すインテリジェンスを創出していきます．

(1)　脆弱性の積極的な可視化・最小化と自動修正サイクルを実現する技術

脆弱性の積極的な可視化・最小化と自動修正サイクルの実現により，セ

キュリティ対策のシフトレフトを可能にして強固なセキュリティを提供します．

⑵　環境変化に追随するインテリジェンスを創出・活用する技術

通信キャリアならではのインテリジェンスを自動生成するとともに，インテリジェンスを意識する必要のない自動活用技術によって，多種多様なICT環境に継続的・自律的にセキュリティ対策を実施します．

⑶　ヒトに起因するリスクを対策する技術

ヒトに起因するリスクに対応可能なセキュリティ技術を確立し，セキュリティ被害につながるヒューマンエラー，ヒトをねらう詐欺攻撃，および従業員等による内部不正行為等に関するリス

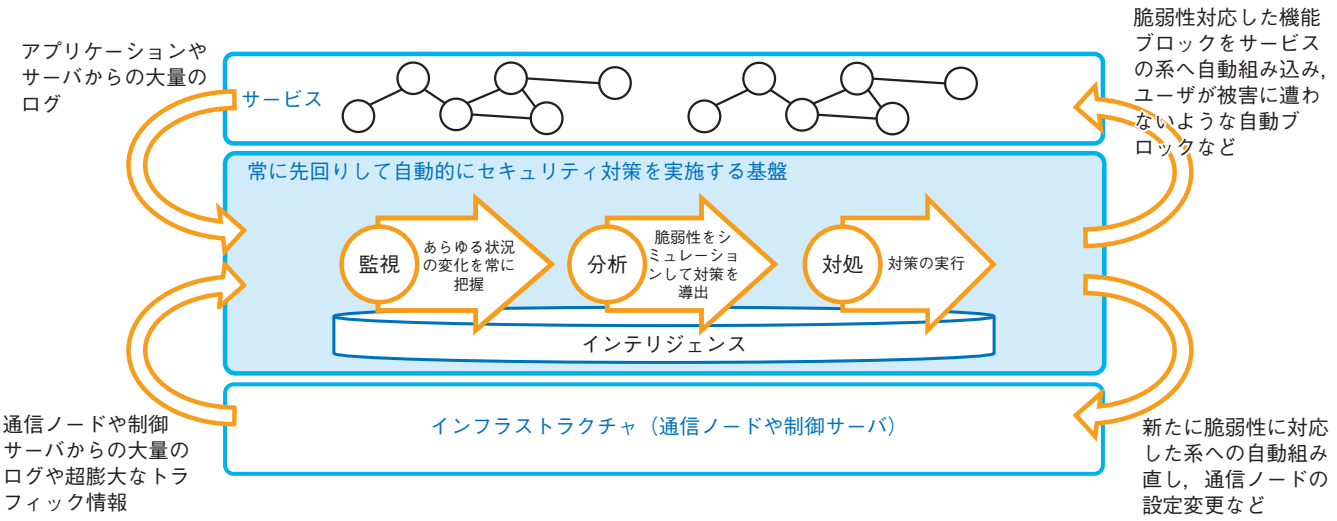


図１　本研究開発で取り組む基盤のイメージ

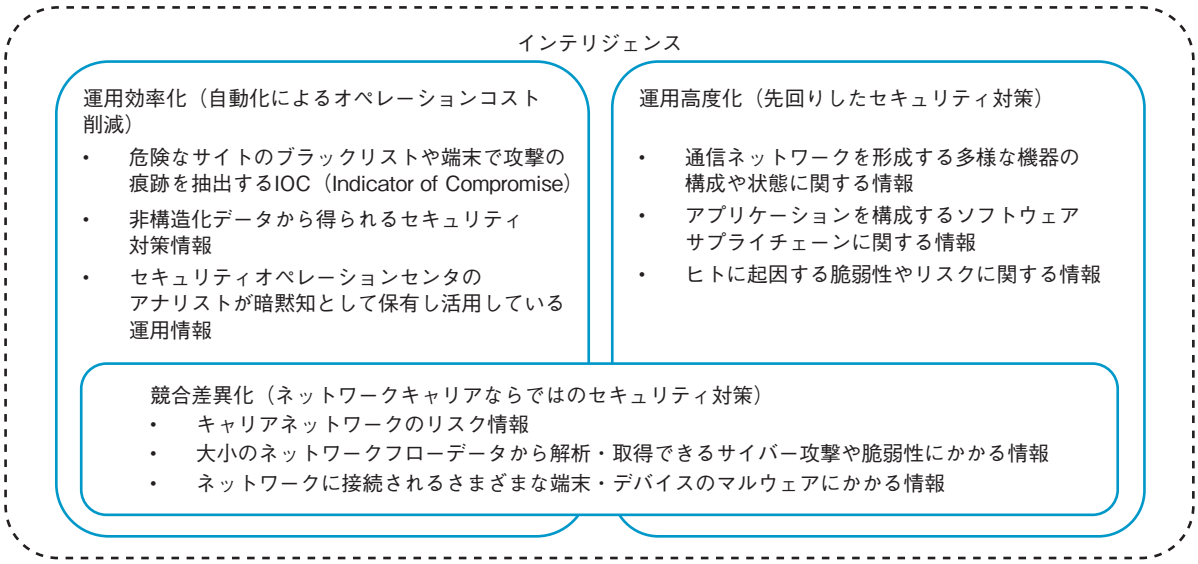


図２　本研究開発で創出するインテリジェンス

クを抜本的に低減します．

以降では，上記の研究開発に関して，現在の代表的な取り組みを紹介します．

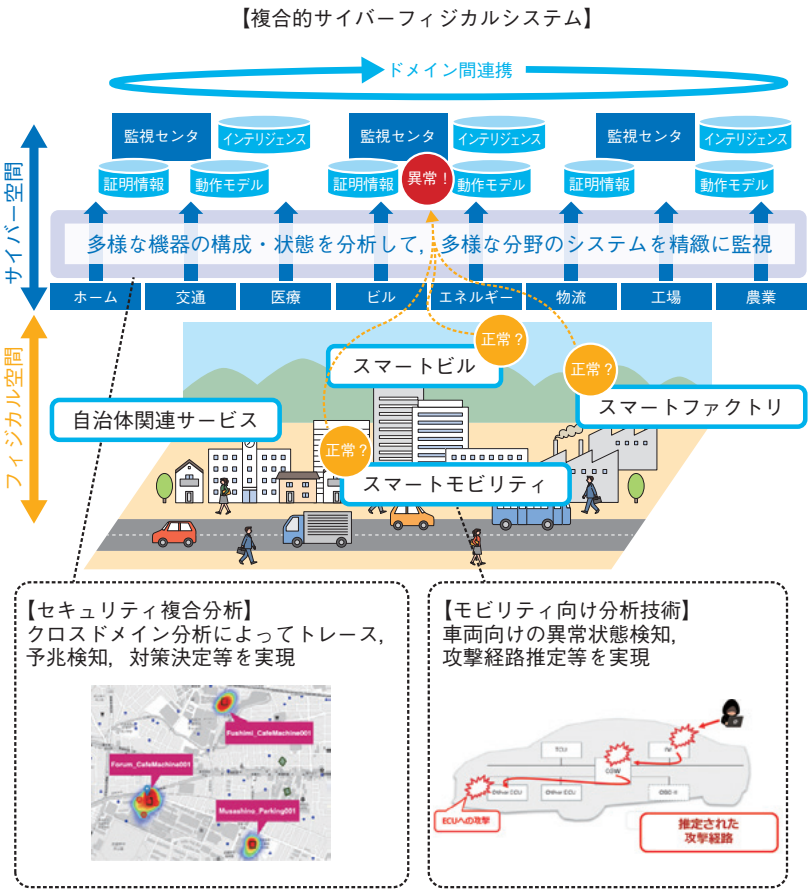


図 3　構成・状態分析技術

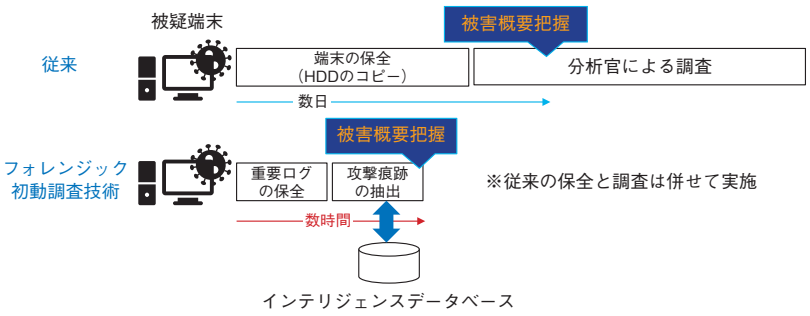


図 4　フォレンジック初動調査技術

現在の取り組み

⑴　構成・状態分析技術

スマートシティのような多様な要素によって構成される複合的サイバーフィジカルシステムを守るセキュリティ対策技術として，現在，ヒトやモノの構成・状態を分析するエージェントと通信解析エンジンの研究開発を行っています．今後は，構成・状態に加えてシステムやサービスをまたいだ要素間の関係性もとらえ，従来は困難であったセキュリティ異常の予兆検知，原因推定を行うクロスドメイン分析技術の研究開発を行っていきます（**図 3**）．

⑵　フォレンジック初動調査技術

一般的にフォレンジック調査では，被疑端末を保全し，分析官が攻撃の痕跡を抽出します．この調査は詳細な分析が可能な一方，分析官の経験に依存しており，期間は数日にわたることから，いち早く被害概要を把握する初動調査のフェーズで正確性・迅速性に課題が残ります．そこで，重要なログのみを保全し，攻撃の痕跡を自動的に抽出できる技術の開発に取り組んでいます．この技術は，攻撃者がよく使う攻撃の流れをインテリジェンスとしてデータベース化し機械的な処理を通して，分析官の習熟度によらず，数時間で初動調査ができることをめざしています（**図 4**）．

⑶　ヒトの心理や弱みをねらったソーシャルエンジニアリング攻撃検出技術

世界的なスポーツイベントの開催や

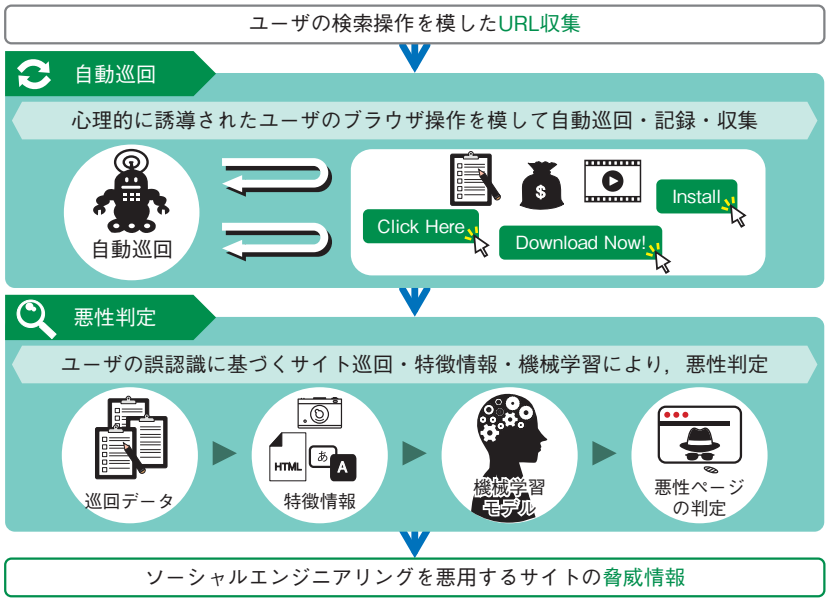


図5　ヒトの心理や弱みをねらったソーシャルエンジニアリング攻撃検出技術

新型コロナウイルス感染症の流行に伴い，人々の好奇心・恐怖心等を悪用したサイバー攻撃の被害が非常に増えています．攻撃者は，人の興味関心をひくコンテンツや偽の警告画面などにより，利用者を悪性サイトへ巧みに誘導し，マルウェア感染や金銭・個人情報の窃取を引き起こします．この取り組みでは，そのような人をねらった詐欺被害等を低減させることを目的に，騙される人のブラウザ操作をエミュレートして，Webページを自動で巡回・収集し，画像や言語，到達経路の特徴量から悪性サイトを高精度かつ迅速に検出する技術を研究開発しています（**図5**）．

今後に向けて

サイバーセキュリティリスクは，今や国家を脅かし得るものとなり，人類にとって極めて深刻な社会問題の1つといえます．攻撃側優位な状況が依然として続く中，私たちは本研究開発の推進によって，このサイバーセキュリティの厳しい現状を根本から打開し得る新たなセキュリティ技術を創出し，社会の発展に貢献していきます．



（上段左から）古賀　祐匠／中嶋　良彰／千葉　直子／三好　潤
（下段左から）小山　高明／司東　秀浩／宮島　麻美

私たちはサイバーセキュリティ対策やその運用にかかわるコストが企業のデジタルトランスフォーメーションを進めるうえでの妨げにならないような技術を創出することが，豊かな社会を創ることに資すると考え，この研究開発を推進しています．

◆問い合わせ先
NTTセキュアプラットフォーム研究所
企画担当
E-mail　scpflab＠hco.ntt.co.jp

量子情報処理によるセキュリティと量子情報のデータ保護

量子情報処理を用いると高速計算以外にもセキュリティに対して原理的な安全性，コピー防止など独特の応用が期待されています．その実用に向けてはノイズに弱い量子情報を保護する誤り耐性処理が必須となり，ネットワーク化のためには量子中継をベースとした量子通信の誤り耐性処理が鍵となります．これらに対するNTTセキュアプラットフォーム研究所の取り組みを紹介します．

徳永 裕己（とくなが ゆうき）
鈴木 泰成（すずき やすなり）
遠藤 傑（えんどう すぐる）
西巻 陵（にしまき りょう）
北川 冬航（きたがわ ふゆき）
為近 彩智（ためちか さち）

NTTセキュアプラットフォーム研究所

はじめに

近年，量子情報処理による新たな高速計算の可能性が注目されていますが，量子情報処理を用いた新たなセキュリティおよび量子情報のデータ保護も重要な研究テーマです．まず，量子情報は非常にノイズに弱いことが知られていて，正しく情報処理を行うためには，量子情報をノイズやエラーから守ってあげる必要があります．このような情報処理の「可用性」を守ることも，セキュリティの3要素*の1つであり，セキュリティの重要な役割の1つとなっています．これができない限り，いくら計算が速くても，新たなセキュリティ応用があったとしても，正しく情報処理がこなせないことになります．この量子データをノイズから保護する機能は量子情報処理の最重要課題であり，量子情報処理の屋台骨を支える量子情報処理自体のセキュリティであるといえます．また量子情報処理を用いた新たなセキュリティの可能性としては，ある意味このノイズに対する弱さを逆手にとったものともいえますが，盗聴や偽造を行おうとして量子状態に触れるとどうしてもノイズとしての痕跡が残ってしまうという量子状態の性質があります．これを大いに活かして，盗聴者の検出を行い原理的な安全性を保てるのが量子暗号の仕組みです（量子暗号は通常，秘密鍵の配送に用いるため量子鍵配送とも呼ばれます）．さらにそれを偽造防止という方向に用いることも可能であり，コピーによる偽造は原理的に不可能となる量子マネーや量子著作権保護といった応用の可能性があります．またこのような機能は量子的なネットワークが充実してきてより利用価値が高まるものであり，そのためには量子中継を実現して規模の大きな量子ネットワークの構築をめざす必要があります．量子通信も損失やノイズに弱いため，量子通信のデータをノイズから保護する機能は，量子通信を保護する量子通信自体のセキュリティともいえます．

本稿では，まず量子情報のデータを保護するための2種類の重要な技術である量子誤り訂正と量子誤り抑制の紹介をし，次に新たな応用の可能性としての偽造防止について，そして量子ネットワークをめざすための基盤技術となる量子中継の研究を紹介し，最後に展望を述べます．

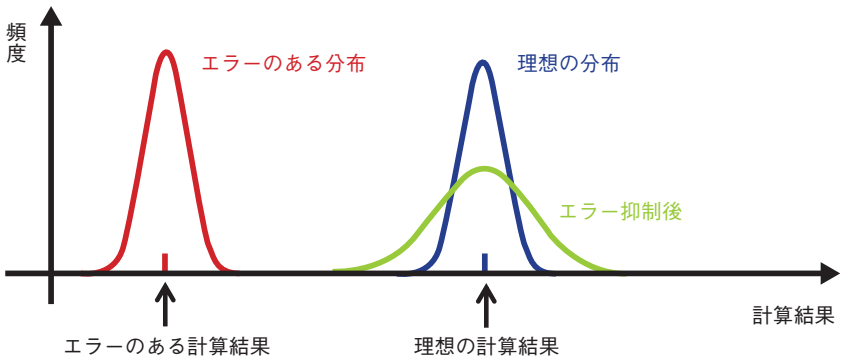
量子情報のデータを守る誤り耐性技術

量子情報処理の多くの応用において，計算中に誤りが生じる確率は十分小さい必要があります．量子誤り訂正は，複数の量子ビットを用いて量子ビットの情報を符号化し，これを逐次的に誤りを検出，訂正することで，実効的な誤り率を大幅に低減することができる技術です．量子誤り訂正を用いながら量子計算を行う誤り耐性量子計算[(1)]は，スケーラブルに誤り率を低減できる手法であり，将来，規模の大きな量子情報処理の実現するうえで必須になると予想されます．しかし一方

＊情報セキュリティの3要素：「機密性（Confidentiality）」「完全性（Integrity）」「可用性（Availability）」．

で，量子誤り訂正は多くの量子ビットやフィードバックなどの複雑な処理を必要とするため，実用的な性能の誤り耐性量子計算機を構築することは容易なことではありません．したがって，実用的な誤り耐性量子計算機を構築するには，多くのトレードオフやボトルネックの問題に立ち向かうことで，ソフトウェアからハードウェアまで一貫して効率的なアーキテクチャを研究開発することが求められます．私たちのグループは，実用的な誤り耐性量子計算機の実現をめざして，特にソフトウェア基盤の研究開発に取り組んでいます．具体的には，分散型処理を意識した誤り耐性量子計算手法[2]，小規模な符号の復号回路を機械学習で最適化する手法[3]，復号アルゴリズムを中心とした低レイテンシな制御を行う周辺装置の設計[4]，集積化された量子ビットを精度良く制御するための校正手法[5]，高速に実験を実施するフレームワークの構築，そしてこれらを包括的に評価し精度を高めるための一連の基盤ソフトウェアの開発を行っています．

また，近年near-term量子計算という研究が非常に注目を集めています．なぜなら，2019年10月に，非常に特定の，実用的ではない問題ですが，既存のコンピュータでは解くのに非常に長時間かかるといわれた問題を53量子ビットの小規模な実際に作製された量子コンピュータを用いて高速に解くことができたとGoogleが発表し，脚光を浴びたからです．現在，このような量子デバイスをどのように実用上役立てれば良いかと世界中の研究者が検討しており，例えば機械学習や化学計算などへの応用が注目を集めています．ただし，このような小規模な量子コンピュータの計算能力を引き出すには計算エラーを抑える必要があります．計算エラーを取り除くために長年研究されてきた分野として量子誤り訂正がありますが，この手法は量子ビットをエラー抑制のためのリソースとして用いるため，量子ビット数が限られる現在，および近い将来に実現し得る規模の小さな量子デバイスとは相性が良くありません．そこでその代わりに，量子誤り抑制（または量子ノイズ補償）という量子ビット数を（大幅に）増やさずにエラーを抑制する手法が提案され，最近多くの論文が発表されています．量子誤り抑制は量子アルゴリズムにエラーを抑えるための操作を加え，さらに読み出される測定結果に対して既存の古典情報処理をすることによって計算エラーを実効的に抑制する手法です（**図1**）．その際，量子誤り抑制に必要なリソースはより多くの測定回数（計算回数）です．多くの測定から得られる情報を基にエラーを抑えるので，オーバーヘッドがかかり，この手法はスケーラブルな手法ではないですが，計算エラーの頻度が量子アルゴリズム中で少数回であれば，効果的にエラーを抑えることができると示されています[6]．また最近，私たちのグループは誤り耐性量子計算に対しても量子誤り抑制手法を組み合わせて用いることで，実行的に誤り耐性量子計算に必



near-term の量子アルゴリズムでは測定結果の平均値を計算結果として得る．量子誤り抑制をしたあとは，確率分布は正しい平均値（計算結果）のまわりに分布するが分散が増加するため，より多くの測定回数が必要となる．

図1　量子誤り抑制の機能についての概念図

要な量子ビット数の削減が可能であることを示し，量子誤り抑制が広い用途を持つ技術であることを示しました[7]．

暗号と量子情報技術の融合による安全なコピー防止技術

一口に量子情報処理と暗号といってもその内容は一意に定まりません．この2つが関連する技術は大きく分けて①量子コンピュータに対しても安全な暗号技術（耐量子暗号技術），②暗号通信を行うために量子情報処理を利用する量子暗号，③量子情報処理を使って初めて実現される新しい暗号技術，の3つに分類できます．本稿では③が主題ですが，まず①と②について簡単に説明します．①は暗号技術そのものには量子情報処理や量子コンピュータの力は必要ありませんが，攻撃者は量子コンピュータを使用して攻撃するという前提で安全性が考えられた暗号のことです．②は暗号技術にも量子情報処理あるいは量子コンピュータが用いられますが，達成される暗号機能そのものは基本的に既存の技術と変わらない暗号のことです．例えば秘匿通信自体は量子の力がなくとも実現できますが，量子の力を使うことでより安全性を高めることができます．それに対して主題の③は量子の力なくしては絶対に達成できない機能を持つ暗号技術です．具体的な例がデータあるいはソフトウェアのコピー防止です．

デジタルデータはいくらでも複製可能であるので，データやソフトウェアのコピーを防ぐことは原理的に不可能です．しかしそれは量子情報技術を考慮しない場合の話です．量子情報理論には「未知の量子状態はコピーできない」という複製不可能定理[8],[9]が存在するので，これを暗号技術に応用することでコピー不可能なデータやソフトウェアを実現できる可能性があります．特にコピーを防止したいデータとして通貨が考えられ，絶対にコピー不可能な量子マネーが提案されています[10]（**図2**）．

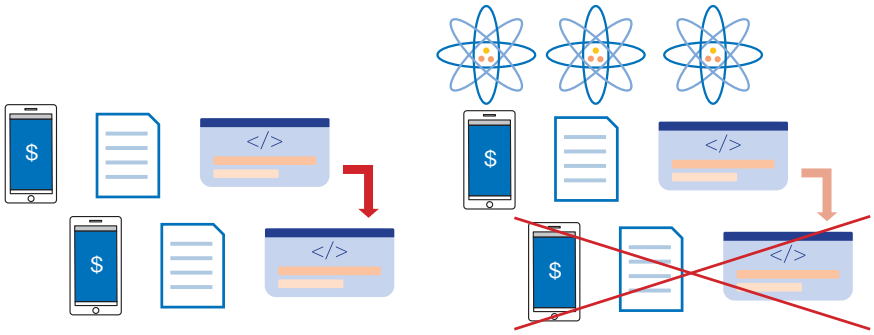


図2　量子技術によるコピー不可能性のイメージ図

現在のソフトウェアはデジタルデータであるため海賊版の作成を防ぐことが原理的に難しく，安全性を保証できるコピー防止策はこれまで存在しませんでした．安全性が証明可能なソフトウェアコピー防止は暗号と量子技術を用いてソフトウェアのコピー作成を完全に不可能にする技術です．当グループではこの実現を目標の1つとしています．コピー防止技術は量子マネー，ソフトウェアコピー防止以外にも応用が多く，例えばクラウドに預けていた（暗号化）データを手元に戻したときにクラウドにはコピーが残らないようにすることが可能であり，忘れられる権利（General Data Protection Regulation 第17条）の実現につながります．またソフトウェアを期間限定で貸し出し，返却後の使用を完璧に防ぐといったことが可能となります[11]．当グループでは以上のような量子情報の力を利用して初めて達成可能な新しい暗号技術を実現するために研究開発を行っています[12]．

量子ネットワークに向けた量子中継技術

現在のコンピュータを用いた計算や通信の技術はすべて古典物理のルールに基づいたものであり，古典物理が許す範囲の計算や通信しか行うことができません．これはセキュリティについても同様です．現在は古典物理が許す

限られた範囲のセキュリティしか提供することができませんが，量子力学を用いることで私たちが提供するセキュリティの可能性を広げることができます．例えば共通鍵配送において盗聴者の検知が可能になり[13]，秘密計算においては1台のサーバで情報理論的に安全かつ簡潔なプロトコルが行えるようになります[14]．

このような量子力学の効果を出すための通信としてのリソースはエンタングルメント（量子もつれ）と呼ばれる量子力学特有の相関であることが分かっています．量子力学に基づいたセキュリティのアプリケーションを地球規模で利用可能にするためには，量子力学特有の相関であるエンタングルメントを作成し，そのエンタングルメントを長距離かつ複数個所に共有できる量子ネットワークを構築する必要があります（**図3**）．

エンタングルメントを長距離間で共有したい場合，量子状態はコピーできないという性質から単純な増幅ができないため，従来の通信で用いている中継手法を使うことはできません．損失によりエンタングルメントの片側を直接伝送できる確率は指数関数的に小さくなるため，何らかの方法での中継が必要となります．ここでは要点だけを以下にかいつまんで述べます．まず損失が多大にならない程度の距離に中継器を置くことで直接伝送の距離を短くし損失を減らします．しかし，ある程度の損失やエラーは避けられないので，中継地点ごとに冗長に複数の通信を重ねて行い，それらに対して量子誤り訂正に相当する処理を行うことで損失やエラーを抑えた伝送を可能にします．これはエンタングルメント通信の誤り耐性処理といえ，複数の不完全なエンタングルメントから完全に近いエンタングルメントを取り出す作業となるので，エンタングルメント蒸留（純粋化）とも呼ばれています．

私たちのグループでは超低損失ナノ光ファイバ共振器[15]を用いた量子中継器の構築をめざしています．超低損失ナノ光ファイバ共振器とは超低損失テーパーファイバと超低損失ファイバブラッググレーティングの2つの要素を組み合わせたものです．これを量子メモリ部分に用いることで以下のように性能を上げる手法を検討しています．通常のファイバより格段に細いテーパーファイバ近傍に量子メモリとなる原子を捕獲することで，テーパーファイバを通る光子と原子の作用を可能にします．このように中継の系全体をファイバ内にすることで，従来いったん光子を自由空間に出して原子と作用していた損失の多い過程をなくし，光損失を減らすことが可能となります．また，ファイバブラッググレーティングによる共振器構造を用いて量子メモリから放射される光がファイバに結合する確率を上げることができます．これらは結果として量子メモリへの書

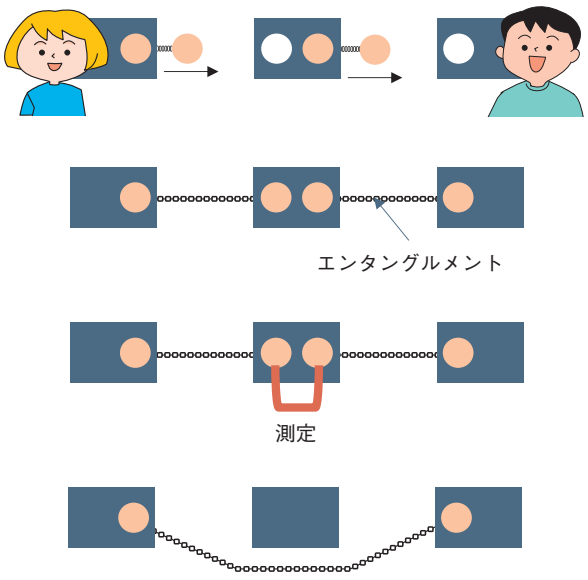


図3　量子中継器を用いたエンタングルメントの共有方法の概略図

き込みや読み出しの操作の成功率を上げることにつながり，全体の中継器としての性能を上げることができます(16)．

また，高性能な量子中継器を用いた量子ネットワークの実現により，さまざまなセキュリティのアプリケーションを提供することができるようになります．特に想定されるターゲットとしては外交や防衛といった安全保障分野や遺伝子情報を扱う医療分野，また金融機関などが挙げられます．

おわりに

量子情報や量子通信自体のデータ保護となる誤り耐性技術，量子中継技術は量子情報処理を正しく安全に実行するために欠かせない重要課題であることを最後にもう一度強調しておきます(17)．量子情報処理の誤り耐性処理のための優れたアーキテクチャは未開拓な部分が多く，今後の研究によるブレークスルーが期待されます．また量子情報処理のセキュリティ応用としては，原理的に安全な秘匿通信やコピー防止以外にも，量子秘密計算や量子を活用した通信計算量の削減など新たなものが期待されます．まだ規模のそれほど大きくないnear-term量子セキュリティというものも今後に期待される研究テーマです．

■参考文献

(1) A. G. Fowler and C. Gidney：“Low overhead quantum computation using lattice surgery,” arXiv:1808.06709 , 2018.
(2) K. Fujii and Y. Tokunaga: “Fault-Tolerant Topological One-Way Quantum Computation with Probabilistic Two-Qubit Gates,” Phys. Rev. Lett., Vol. 105, No. 25, 250503, 2010.
(3) A. Davaasuren, Y. Suzuki, K. Fujii, and M. Koashi: “General framework for constructing fast and near-optimal machine-learning-based decoder of the topological stabilizer codes,” Phys. Rev. Research, Vol. 2, No. 3, 033399, 2020.
(4) Y. Ueno, M. Tanaka, Y. Suzuki, Y. Tabuchi, and M. Kondo: “Quantum Error Correction with a Superconducting Decoder,” QCCC 2020, Dec. 2020.
(5) K. Heya, Y. Suzuki, Y. Nakamura, and K. Fujii: “Variational Quantum Gate Optimization,” arXiv:1810.12745, 2018.
(6) S. Endo, S. C. Benjamin, and Y. Li：“Practical Quantum Error Mitigation for Near-Future Applications,” Phys. Rev. X, Vol. 8, No. 3, 031027, 2018.
(7) Y. Suzuki, S. Endo, K. Fujii, and Y. Tokunaga: “Quantum error mitigation for fault-tolerant quantum computing,” arXiv preprint arXiv:2010.03887, 2020.
(8) W. Wootters and W. Zurek：“A single quantum cannot be cloned,” Nature, Vol. 299, pp. 802-803, 1982.
(9) D. Dieks：“Communication by EPR devices,” Phys. Lett. A, Vol. 92, No. 6, pp. 271-272, 1982.
(10) S. Wiesner：“Conjugate Coding,” SIGACT News, Vol. 15, No. 1, pp. 78-88, 1983.
(11) P. Ananth and R.L. La Placa：“Secure software leasing,” CoRR, abs/2005.05289, 2020.
(12) F. Kitagawa, R. Nishimaki, and T. Yamakawa：“Secure software leasing from standard assumptions,” CoRR, abs/2010.11186, 2020.
(13) https://www.ntt.co.jp/journal/0608/files/jn200608049.pdf.
(14) T. Morimae：“Measurement-only verifiable blind quantum computing with quantum input verification,” Phys. Rev. A, Vol. 94, 042301, Oct. 2016.
(15) S. Ruddell, K. E. Webb, M. Takahata, S. Kato, and T. Aoki：“Ultra-low-loss nanofiber Fabry–Perot cavities optimized for cavity quantum electrodynamics,” Opt. Lett., Vol. 45, No. 17, pp. 4875-4878, 2020.
(16) 為近・鈴木・徳永・青木：“ナノファイバー共振器QED系を用いた量子中継の検討,” 日本物理学会第76回年次大会，2021.
(17) https://journal.ntt.co.jp/wp-content/uploads/2021/03/JN202103043.pdf



（上段左から）徳永　裕己/ 鈴木　泰成/ 遠藤　傑
（下段左から）西巻　陵/ 北川　冬航/ 為近　彩智

量子情報処理をセキュリティに応用するまでにはまだ時間はかかりますが，実りの多い将来が待っていると期待しています．量子情報を守る誤り耐性処理，量子ネットワークに向けた量子中継などの必須の技術を着実に進歩させ，新たな応用を生み出していきます．

◆問い合わせ先
NTTセキュアプラットフォーム研究所
企画担当
E-mail　scpflab＠hco.ntt.co.jp



主役登場

未知なるリスクを排除せよ

岩村　誠
NTTセキュアプラットフォーム研究所
特別研究員

前回，この主役登場へ寄稿させていただいたのは2010年，あれから11年が経ちました．残念ながらサイバー攻撃やマルウェア（悪性ソフトウェア）の高度化はとどまることを知らず，未然に侵入を防ぐことは困難になってきています．こうしたマルウェアの侵入を前提とした状況を踏まえ，私たちはマルウェアの振る舞いやそれらが残す痕跡をIoC（Indicator of Compromise）として抽出，IoCを基にマルウェアの振る舞いを早期に発見する技術の研究開発に取り組んでいます．さらなるサイバー攻撃の激化に対抗するべく，今後もマルウェアの早期発見，対策といった取り組みは継続していくことが肝要です．

ところで，こうしたマルウェアにそもそも感染しないようにするにはどうすれば良いのでしょうか？　マルウェアに感染する大きな原因の１つにソフトウェアの脆弱性があります．これまで脆弱性対策は，利用しているソフトウェアの最新化で対応してきました．しかし脆弱性についても2010年以降，憂慮すべきケースが増えてきています．2010年に出現したStuxnetは，４つの未知の脆弱性を組み合わせて感染を広げました．また2017年に出現したWannaCryは，同年に修正された脆弱性を悪用していましたが，その脆弱性を悪用するモジュールはWnnaCry出現の５年以上前にすでに存在していたとの報告があります．そう，今ではソフトウェアの最新化は脆弱性対策の銀の弾丸ではなくなってしまったのです．最新版のソフトウェアであっても修正されていない脆弱性は，ゼロデイ脆弱性と呼ばれています．未修正である理由はさまざまですが，私が過去に発見したものにも多くのゼロデイ脆弱性があります．一例として，2006年に発見したWinnyというソフトウェアの脆弱性（CVE-2010-2360）をみてみましょう．当時からこのソフトウェアの修正は社会的に困難な状況にあり，今後も修正されることはないでしょう．私たちとしては修正不能な脆弱性は公にできないという立場から公開を控えましたが，2010年に海外のセキュリティ研究者がこの脆弱性を発見，警鐘を鳴らすべく公表したことにより，その存在が明らかにされました．未修正の脆弱性の公開を控えた私たちの判断が正しかったのか，発表に踏み切る行為が正しかったのか，今でも自分の中で答えは出ていません．ただいえるのは，ゼロデイ脆弱性というのは身近に数多く存在し，それらはいつ悪用されてもおかしくない状態にあるということです．今後はソフトウェアの最新化はもちろん，攻撃者に悪用される前に脆弱性を発見し，対処することが重要になっていくでしょう．私たちとしても引き続き，脆弱性発見や脅威実証の取り組みを推し進め，未知のリスクの排除に取り組んでいきます．そして，脆弱性発生や攻撃のメカニズムの体系化を進め，脆弱性が生まれることのないICTシステムの実現に邁進していく所存です．その実現の暁には，サイバーセキュリティの研究者がこの“主役登場”に現れることもなくなっているでしょう．

特別連載

ムーンショット・エフェクト——NTT研究所の技術レガシー

第8回　シャツが生体情報計測のIoTセンサに

ノンフィクション作家の野地秩嘉（のじつねよし）氏より「ムーンショット・エフェクト——NTT研究所の技術レガシー」と題するNTT研究所の技術をテーマとした原稿をいただきました．連載第8回目は「シャツが生体情報計測のIoTセンサに」です．本連載に掲載された記事は，中学生向けに新書として出版予定です（NTT技術ジャーナル事務局）．

■コネクティッドされた身体

IOWN構想の核となるのがオールフォトニクス・ネットワーク（APN）だ．ネットワークに接続するすべてのデバイスを対象にして，情報伝送と演算処理を光技術で行うこと．その実現のために光トランジスタを開発している納富（雅也），光ファイバ通信の実用化技術を進展させた宮本（裕），そして曲げフリー光ファイバを開発した中島（和秀）….

彼らを筆頭にNTT研究所のメンバーたちはAPNの実現に総力を挙げている．

また，IOWN構想にかかわる技術の実用化時期についてNTTは2030年を目標としている．しかし，それでは遅い．

NTT研究所の俊英たちからは「勝手なことを言うな」と叱られるかもしれないが，少なくとも3年は前倒ししてもらわないと，日本と世界が困るのである．

新型コロナ禍による在宅勤務の影響もあって，インターネットのトラフィックやIoTデバイスで扱われる通信量はさらに増加している．また，自宅にこもって孤独を感じる個人はスマホを酷使することもあり，ICT機器の消費電力は増える一方だ．

少しでも早く光電融合型の処理を行うAPNを実現しなくてはならないのだが，当面は増大した消費電力を補うため発電量を増やさざるを得ない．

それを太陽光発電や風力発電等で賄うには限界があるため，今まで以上に化石燃料を使用することにつながり，温室効果ガスの排出量をゼロに近づけるという人類の目標に逆行してしまうのである．だからこその目標前倒しだ．

光電融合型技術がAPNをはじめ，さまざまな電子機器で使われるようになれば，スマホの充電は1年に一度くらいでよくなるだろうし，むろん，多くの電子機器が使われている家庭での消費電力も激減するから全体の発電量を抑制できる．

そうしたAPN社会に向けて活用が期待されている技術のひとつが生体信号計測素材のhitoe®*だ．

■hitoe®に触れる

わたしがhitoe®の実物を見たのは新型コロナ禍のさなか，2020年の初秋だった．秋とはいえ，東京はまだ暑かった．晴海にあるビルのなかでネットワーク設備の工事があり，そこで働くNTT社員が実証実験の一環としてhitoe®を使ったシャツを着用していたのである．空調設備の工事中のためエアコンは切れていた．内部にこもった熱気で室温は40度近かったのである．hitoe®を使って，体温，脈拍や心電図のような生体信号を計測できれば，熱中症の予兆もわかるかもしれない，そう思いを巡らせていたわたしにhitoe®について説明してくれたのはNTTデバイスイノベーションセンタの主幹研究員，都甲浩芳だ．

都甲は「初めまして」と言った途端，薄いジャケットを脱ぎ始めた．

「何をするんだ，いきなり何が始まったんだ」と思っているうちに彼はアンダーシャツ1枚になった．この

＊：機能素材hitoe®は東レ株式会社と日本電信電話株式会社が共同で開発した機能繊維素材であり，両社の登録商標です．

シャツこそがhitoe®で作られたシャツで胸の部分には小型のトランスミッタ（送信機）が付いている．トランスミッタはクレジットカードの3分の1くらいの大きさでハート型をしていた．

「これがhitoe®です．実物を見ていただいた方が理解しやすいと思ったので」．

なるほど，裸になる癖があるわけではないのだなとわかった．

下着の裾を延ばし，彼は説明を始めた．

「hitoe®はからだに接触すると，身体の電気信号を計測できる布状の電極のことです．導電性（電気を通す性質）の素材をナノファイバ繊維に塗布し，固定化することで，金属を使用せず，からだに優しい電極を作製しています[(1)]（**図1**）．

たとえば，心臓は動く時に電気信号を出しています．脳も脳波として電気信号を出します．この電気信号を捕まえて，トランスミッタから外部に信号を送り出します．

これまでにも電気を通す銀や銅が編みこんである繊維や布はあったのですが，金属アレルギーのある方だと皮膚に影響が出てしまうことがありました．その点，hitoe®は生体親和性が高く，皮膚に優しいのです」．

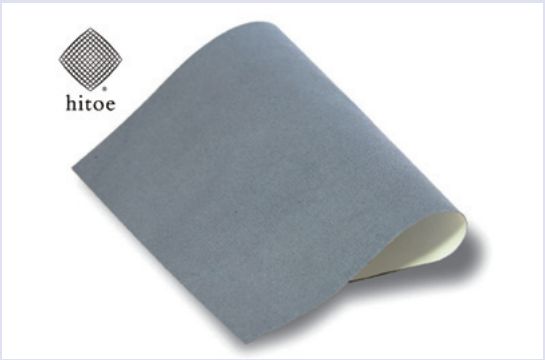


図1　hitoe®の生地

hitoe®のポイントは繊維に塗り込んである導電性高分子のPEDOT-PSSだ．だが，PEDOT-PSSは水に濡れると非常にもろい性質を持っている．水分が多い環境で利用される生体電極には向かなかったのである．

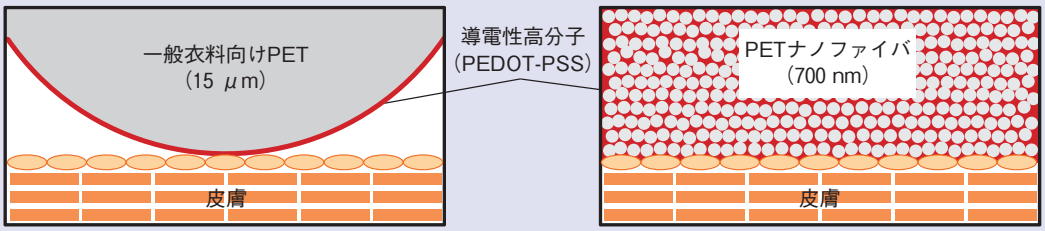
それをhitoe®の開発者であるNTT物性科学基礎研究所 フェローの塚田信吾と主席研究員の中島寛が考えをめぐらせて解決した．元々医師だった塚田が絹の縫合糸（手術後に縫い合わせる糸）にPEDOT-PSSをコーティングし固定化する手法を見出し，水に濡れても使えるようになったのである．

NTT研究所は東レ株式会社と一緒に研究を始め，絹の繊維を繊維径700 nm（ナノメートル）のポリエステルナノファイバに置き換え，hitoe®として実用化したのである．なお，ナノメートルとは10億分の1メートルで，髪の毛の太さの10万分の1くらいだ．人間の目に見える長さではない．これにより肌への密着性が格段に向上してからだを動かしても安定して計測できる[(1)]（**図2**）．

hitoe®は機能素材であるが，それを衣料として織り込んで，計測した信号をデータとして送信し，その結果を心電図のように身体の状態を見守るシステムとして活用する．

「例えば，心電図は病院に行って機器を取り付けたときにしか計測できません．日々の生活の中では，ホルター心電計という小型の計測機器を常に持ち歩いて計測・蓄積し，病院に行って結果を診てもらわなければなりません．ところが，hitoe®のシャツを着ているだけで病院等にデータが送られるのです」（都甲）．

hitoe®で計測されたデータはhitoe®製のシャツやベ



「ナノファイバ間細分化空隙への導電性高分子高含浸」による「高導電性」と「実用耐久性」
「皮膚への密着・変形効果」による生体信号の「高信頼検出」性能を達成

図2　一般的な繊維（左）とナノファイバ（右）の肌との接触イメージ

ルトに付いているトランスミッタからブルートゥースでスマホに飛ぶ. また, スマホからは無線と光ファイバネットワークを通じて，モニタリング・センタに飛ぶ．つまり，光通信技術が進んで，多くの体調情報を送れるようになれば，用途は広がるのである[(2)]（**図 3**）.

■今のところは暑さ対策

熱中症になりそうなくらい暑い日に屋外で働く人間の心拍数と衣服内の温度，湿度を計測し，本人と外部のスマホにアラームで通知する．通知をもらった本人は休むなり病院に行く.

「そんなこと自分で判断できるだろう」.

素人はそう考えるけれど，熱中症はめまい，けいれん，吐き気などの症状が出たり，最悪の場合は死に至る．症状が出る前に発見して，休む，水を飲む，体を冷やすことが重要だ．hitoe®を用いて熱中症が出る前のサインを発見するのである.

hitoe®について説明をしてくれる都甲にわたしはひとつ訊ねた.

「いずれは新型コロナなどの感染症対策に使えるようになるのでしょうか？」.

hitoe®製のウェアを着ているだけで新型コロナを発見するPCR検査の代用になるとは思っていない．しかし，少なくとも自宅で療養する人たちの心拍数をつかむことはできる．あとはまた研究開発を続ければいいのではないか.

都甲の答えは慎重だった.

「これを着れば新型コロナに感染しているかどうかがわかるということを目的にしていません．ですが, 直接，接触しなくても体調の一部データを取ることは可能ですからそれを応用することはできるわけです.

今のところは暑いなかで働く人，真夏の屋外や空調のない屋内で働く人を主な対象に，熱中症の要因がさまざまあるなかで，暑さ対策を意識しています」.

■オリンピックをサポートする人たちが着る

東京オリンピックパラリンピック2020のバドミントン競技の日本代表，桃田賢斗選手はNTT東日本の所属でもある.

オリンピックに出場する選手ではないが，NTT社員はネットワークの設営などの作業で会場予定地へ出向くことになる．真夏の屋外や空調のない屋内での作業だから，当然，熱中症の心配が出てくる．hitoe®は彼らが着用するにも最適だ.



図 3　hitoe®の応用例

「ええ，そうなんです．2019年のことでしたが，テストを兼ねて競技場予定地に行ったことがあります．真夏でしたから手持ちの温度計が40度を超えていました．もう，いるだけで熱中症になりそうでした．

また，熱中症は真夏だけでなく，実は５月，６月も多いんです．暑熱馴化といって，まだ暑さ慣れしてない時期にも気を付ける必要があります．

熱中症の救急搬送データを調べると，山が２回あって，ゴールデンウィークと真夏なんです．ゴールデンウィークは暑さ慣れしてない人たちが，天気が良くなって運動や屋外作業して熱中症になってしまう．

これまでにも暑さ対策の実証実験をやってきたのですが，結果としては熱中症になった方はひとりもいませんでした．hitoe®による暑さ対策のおかげというよりも，これを着けていたことによって，みなさんが気を付けたのかもしれません」．

■hitoe®が取るデータ

hitoe®トランスミッタはウェラブル生体環境センサでもある．つまり，生体情報だけでなく，環境のデータも取っている．では，生体情報のひとつとしては心拍数として，「環境」とは何なのか．

都甲は「環境とは衣服のなかの温度と湿度のことをさしています」と言った．

「心拍数と衣服内の温度，湿度を組み合わせると，体内温度の変動が推測できます．

運動したり体を動かすと，心拍数が上がって，体温も上がる．そうすると，体は一生懸命放熱しようとして汗をかくのですが，衣服内の湿度が高いとそれ以上，汗が蒸発しなくなる．すると，体温が上がって熱中症という症状になりやすい…．

こういった体温調節機能を数式でモデル化してhitoe®で測定した心拍数と衣服内温度・湿度を用いて体内温度の変動を推定することが新しい．数式は名古屋工業大学の平田晃正教授と構築し，モデルの妥当性は横浜国立大学の田中英登教授や至学館大学の宮澤太機准教授と実証してきました．元国立スポーツ科学センター長の川原貴リサーチプロフェッサに監修いただいて技術が完成しています」[3]．

■使用できる期間

hitoe®は繊維に導電性素材を練りこんである．では，耐久性はどうなのだろうか．暑い日に着用するから汗で濡れる．当然，洗濯する．むろん，トランスミッタは付けたまま洗濯できないが，シャツ部分（あるいはベルト部分）は洗濯しているうちに繊維から導電性物質が剥離してしまうのではないか．

「今のところ，電極部分は洗濯に対して100回以上の耐性があります．ウェアは自宅で洗濯し，トランスミッタは洗濯時には取り外して充電することで，繰り返し使用することができます」．

hitoe®の暑さ対策応用についていえば完成している．やるべきことはウェアラブルデバイスにさまざまなデータが取れるような機能を追加することだろうか．そして，繰り返しになるが，APNを進展させる．そうすればリモート医療の検査衣料としての未来が見えてくる．

都甲は「ええ」と言った．

「私たちもこれからのことをいろいろ考えています．暑さ対策だけでなく医療分野でも，お手伝いしていきたいとも思っています」．

hitoe®を使った衣料はさまざまな可能性が考えられるスマート衣料だ．だが，使い方，付属品についてはまだまだ研究開発の余地がある．特に必要なのは発想だろう．

「膨大な量のデータを取って遠隔地にリアルタイムで送る」ことは光通信技術のもっとも得意とする点だ．暑さ対策だけに使うのはもったいない．使い方を広く募集するくらいの度量があっていい．だから，わたしはhitoe®については多くの人に存在を知ってもらいたいと思っている．

■参考文献

⑴ https://www.ntt.co.jp/journal/1402/files/jn201402015.pdf
⑵ https://www.rd.ntt/forum/exhibition.html
⑶ 高河原・橋本・松永・樋口・松浦・桑原・都甲・川原・平田・田中・宮澤：“より安心して働ける作業現場の実現に向けた体調管理技術，”NTT技術ジャーナル，Vol. 33，No. 4, pp. 47-50, 2021.

野地秩嘉（のじつねよし）



1957年東京都生まれ．早稲田大学商学部卒業後，出版社勤務を経てノンフィクション作家に．日本文藝家協会会員．人物ルポルタージュをはじめ，食や美術，海外文化などの分野で活躍中．著書は『高倉健インタヴューズ』『キャンティ物語』『サービスの達人たち』『ニューヨーク美術案内』など多数．『トヨタ物語』『トヨタに学ぶカイゼンのヒント』がベストセラーに．『TOKYOオリンピック物語』でミズノスポーツライター賞優秀賞受賞．近著は『日本人とインド人』（翻訳　プレジデント社）．

挑戦する研究者たち
CHALLENGERS



永田昌明

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
上席特別研究員

DIFFERENTはほめ言葉である．未来を論理的に語る訓練を心掛けよう

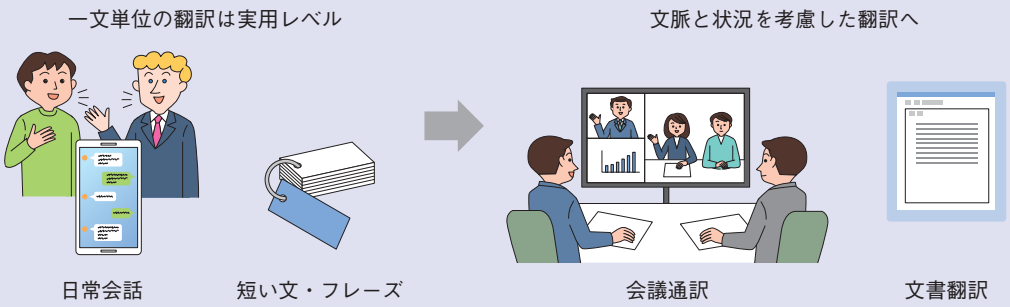
近年，ニューラルネットワークを用いた機械翻訳の研究は急激に進歩し，機械翻訳の精度は大幅に向上しました．Webサイトやスマートフォンのアプリによる翻訳が普及してきている中，その精度にはまだまだ課題が残されています．この精度向上をめざして研究者は文脈や状況，文化等をも反映したさらに高度な対訳技術研究に勤しんでいます．今回は，文脈・状況に基づくニューラル機械翻訳を追究する永田昌明NTTコミュニケーション科学基礎研究所　上席特別研究員に，研究の進捗と研究者としてのあり方について伺いました．

自然言語処理のトップレベルの国際会議で高評価

現在，手掛けている研究内容について教えてください．

前回お話させていただいた2013年から一貫して，ある言語を別の言語に翻訳する技術を追究していますが，対象は単語の対訳と文法をベースとした統計的機械翻訳から文脈・状況に基づくニューラル機械翻訳へと変化しました（**図1**）．2014年ごろからAI（人工知能）技術が急激に進歩し，囲碁の勝負でAIが人間に勝ち，難しいとされていた音声認識が可能となるばかりかその質が劇的に向上する等，AI関連の各研究分野に大きな変化が現れてきました．こうした中，私が手掛けていた機械翻訳の分野においても，2016年ごろに翻訳の精度が急速に向上し，ヒューマンパリティ，つまり人間並みの翻訳ができるようになりました．これまで不可能だと思われていたことが突然できる時代がやってきたのです．このような時代の流れを受けて，今後の研究テーマを模索する中で，前後の文により翻訳文の文意が変わってくるといった課題が山積していることに気付き，この解決をめざして文脈・状況に基づくニューラル機械翻訳というテーマにたどり着きました．

Webサイトやスマートフォンのアプリによる翻訳機能を使うと，その精度は高く高校生の宿題程度の英作文なら機械翻訳のほうが上手ではないかと思えるほどです．私は



ニューラルネット（深層学習）により翻訳精度は大幅に向上し，一文単位の翻訳は実用レベルになった．今後は文脈と状況の考慮が課題．

図１　機械翻訳の現在の到達点と次の目標

貸自転車屋さんで店員と外国人がスマートフォンの翻訳機能を使って交渉している場面に遭遇し，そのやり取りを見ながら「すごいな，翻訳技術もここまで来たか！」と感心しました．一方で，２人の間の会話は円滑とはいえるものではありませんでした．それは，微妙な言い回しや，ニュアンスは翻訳できていないからでした．

これは，ニューラル機械翻訳の少し困った特徴で，文章そのものとしては母語話者並みに流ちょうな訳文を生成する反面，訳文が原文の意味を忠実に再現しないことがあるためです．従来の機械翻訳システムは文を基本的な入力の単位としていたので，たとえ１つずつの文の翻訳精度が人間に匹敵したとしても，文書や会話のような複数の文から構成されるテキストを翻訳すると，文脈や状況を考慮していないために照応関係が一致しない，訳語に一貫性がないという問題が生じてしまうのです．

このような現在の技術をさらに進化させるためにご研究に臨まれているのですね．

これに対応するための課題は３つあります．１番目は日本語の会話では往々にして主語や目的語が省略されますが，その省略された主語や目的語を文脈から判断して翻訳すること．２番目は会話に登場してくる人物が誰かを反映した翻訳にすること．これには例えば「脳外科医」には男女両方いるにもかかわらず，つい男性を連想してしまうようなジェンダーバイアスの問題も含まれます．そして３番目は１つの単語が保有する複数の意味や表現から適切な意味や表現を見つけ出して反映することです．

文脈や状況を考慮した翻訳の例として日本語を英語に翻訳する場合を考えます．日本語の第１文に依存して，日本語の第２文の英語訳が決定される仕組みです（**図２**）．

「申し訳ありませんが，先生は午後，少し遅れているのです．診察するまでに20分ほどかかると思います」という日本語を英訳すると，“I am afraid that the doctor is running a bit late this afternoon. It might be about 20mins before he can see you.”が正答として提示されます．しかし，日本語の第２文において「先生」という主語が省略されているため，“It might be about 20mins before we can see you.”のように，ドクター（三人称単数）に該当するはずの主語が「私たち」になってしまうことがあるのです．さらに，これには，ジェンダーバイアスが存在します．英語では代名詞を選択する際には性別を特定しなければいけません．しかし，機械は「ドクターは男性である」という認識の下，“he”と翻訳してしまうのです．

このように日本語から英語に翻訳する際，日本語において省略されてしまう主語や目的語をうまく解釈しないと，

	原言語	目的言語
先行文	申し訳ありませんが，先生は午後少し遅れているんです．	I’ m afraid that the doctor is running a bit late this afternoon.
入力文	診察するまでに20分ほどかかると思います．	正解: It might be about 20 minutes before he can see you. 誤り: It might be about 20 minutes before we can see you.

	原言語	目的言語
先行文	昨日，渋谷へ行った．	I went to Shibuya yesterday.
入力文	すごい人だった	正解: There were a lot of people. 誤り: He was a great man.

さらに英語の代名詞に性別の区別があるため「先生」や「人」の訳語にジェンダーバイアスの問題が生じる．

図 2　文脈の考慮が必要な翻訳の例

意味が変化してしまうことに加えて，訳語が文脈によって変化してしまうのです．例えば「昨日，渋谷に行った．すごい人だった」という日本語における「すごい」のニュアンスは「渋谷に行った」を受ければ「人出の多さ」だろうと考え，“There was a lot of people.”となるでしょう．しかし，文脈を反映せずに別の意味で解釈されると，“He was a great man.”等と，文としては間違いありませんが前の文に呼応しない翻訳文になってしまうのです．

さらに，どんなに翻訳精度を高めても完璧な翻訳はできませんから，誤訳にどうアラームを鳴らすかも重要です．例えば誤訳が発見されたとき，統計的機械翻訳の場合，翻訳された文章が元の文章のどこにあたるかを調べたいときには，カーソルを文章に当てるとその部分を示すことができました．ところがニューラル機械翻訳は文全体を解釈して意味ベクトルを作成し，そのベクトルに従って翻訳がなされるので対応する部分を具体的に特定できないのです．

こうした状況をかんがみて，単語対応，文対応といわれる，入力した文章と出力した文章の対象を具体的に示すことを目標に研究を進めました．そして，2020年に自然言語処理・計算言語学の分野での世界最大の国際学会の１つであるEMNLP(Empirical Methods in Natural Language Processing)において，文脈を反映してお互いに翻訳になっている部分とそうでない部分を判別できることを発表しました（**図 3**）．この取り組みは先駆的で精度が著しく高く，画期的だと評価されました．

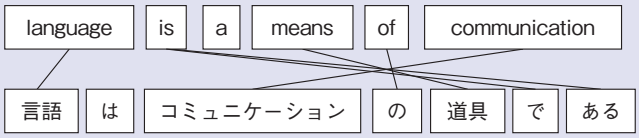


人と違うことをして，できるだけ物議を醸す

素晴らしい研究成果を上げられたのですね．研究活動をするうえでは何を大切にしていらっしゃいますか．

私は人と違うことをすること，できるだけ（いい意味で）物議を醸し出すことをしたいと心掛けています．ニューラル機械翻訳において単語対応ができないのはとても不便であるなどの問題意識を持っており，この問題を解消するため，他の人とは違う方法を試して模索した結果，偶然ではありますが，「言語が違っていても，ニューラルネットに，ある単語と別の単語が意味的に近い存在であるかを学習させるのは，実は簡単で，300文程度の単語対応の正解データがあれば高い精度で単語対応を求められる」ことを発見したのです．

発見に至るプロセスは，まずmultilingual BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers)*で学習した単語の意味ベクトルを眺めて



language is a means of communication
Q. 言語
A. Language
Q. は
A. No_Answer
Q. コミュニケーション
A. communication
…

日本語文の単語（スパン）に対して英語文で対訳となる単語列（スパン）を求める．
双方のスパンの意味ベクトル表現から対応関係を決める．

図 3　言語横断スパン予測に基づく単語対応の例

みたところ，多言語間の対訳文をデータベース化した，いわゆる対訳コーパスを学習に全く使用していないにもかかわらず，でき上がったモデルの中では，実は似たような単語はベクトル空間上の割と近い場所に存在している状態にあることに気付いたことです[1]．

その理由は言語が違っても数字やアルファベット等で表記された部分は共通であることや，日本語と中国語も漢字を使用することで重なるように，近い言語どうしであれば何らかの共通部分があるからです．それを眺めたときに，共通する表記や言葉がピボットとなってそれを中心に各言語が独自の世界を広げるという状況が起きているのかもしれないと考えました．この着想からニューラルネットにある単語と別の単語が意味的に近い存在であるかを学習させるのは実はとても簡単で，300文程度の単語対応の正解データがあれば高い精度で単語対応を求められることを導き出したのです．

試行錯誤を繰り返して「こんなやり方もあるかもしれないな」と何気なく取り組んだことが画期的な発見に結びついて驚きましたが，これも人と違うことをして，物議を醸すことをしようという心掛けによるものです．

こうした考えに至ったのは30代前半に米国で勉強させていただいた経験に由来するのかもしれません．私は２度渡米しています．１度目はCMU（Carnegie Mellon University）での経験です．彼らは誉め言葉として“He is a different.”と表現していたのを聞き，“different”は誉め言葉だと知りました．また，２度目のAT&Tでのスーパーバイザであるケネス・チャーチ博士も，「私は人と違うことをして，物議を醸すものをねらう」と話しており，私は研究者としてその姿勢に深く共感しました．この経験をきっかけに「違う」ことは良いことなのだと価値観が変わりました．

また，２度の渡米を経てサーベイの重要性を学びました．人と違うことをするには人と同じ部分を理解していなくてはなりませんから，自らの研究がどのポジションにあるか，

＊ BERT：Googleによって開発された，Transformerと呼ばれる深層学習法を用いて大量のテキストから事前に学習された言語の意味表現モデル．テキスト分類など目的別の正解データを用いてさらに学習すると高い精度が得られる．Multilingual BERTは104言語のテキストから1つのモデルを学習したもの．

何が分かっていないか等のサーベイには今も真摯に取り組んでいます．

米国での経験は研究者としての歩みに大きく影響したのですね．

CMUでは研究者の心構えも教えていただきました．米国の大学の新学期にあたる夏から秋にかけて，研究についてのガイダンスが開かれていました．そのときに「研究とは人間の知能の最前線にあって未解明の物事に英知を持って臨む」と学びました．研究とは何か，何に貢献すべきか，といった基礎となる概念を明確に教えていただく機会はそれまでの研究者生活においては少なかったので，早い段階でそれ知ることができてラッキーだったと感じています．また，米国では博士課程において，当時から研究の方法や成果，到達度等，博士号への評価指標が具体的に示されていましたから，研究への取り組み方や目標設定をしやすかったのを覚えています．

NTTにも「テーマ企画」と呼ばれる非常に良い伝統があります．これは入社1，2年目の研究者の研究企画発表会です．登壇者は3，4年間の研究計画を理論立てて発表します．これは米国の大学院の“Thesis proposal（論文計画書）”ととても良く似ています．どちらにおいても，自らが研究したこと，いわゆる過去について語ることは，研究者として経験を重ねることでおのずと身についてくることですが，計画を語る，いわゆる未来を論理的に語ろうとすることは訓練が必要です．その機会を若い研究者にシステムとして与えるのは非常に良いことだと思います．こうした活動から自らの立脚点を理解して，使命を明確にすることが人と違う研究につながり，物議を醸す研究成果を上げることにつながると考えます．

こうした考えに基づいて，私は常に自分の研究を客観的に眺め，新しいことに取り組むようにしています．最近は言語の外側にある現実世界の「状況」をニューラル機械翻訳に反映するためにグラフニューラルネットワークの勉強を始めました．グラフニューラルネットワークはさまざまなところで実用化されています．例えば，最近実用化されたのはGoogleマップで到着時間を予測する機能です．道路のすべての交差点と道路のリンクの間，人の移動の計測をして，A地点からB地点へ移動するのにかかる時間を時刻ごとに予想します．また，Uber Eatsのレコメンデーション機能も同様に，注文者と注文した物等を組み合わせて当事者が次回に注文する物を予測しています．このグラフニューラルネットワークのように言語化されない現実世界の「状況」に関する情報を反映することで，翻訳の精度をさらに向上させることができると考えています．



前代未聞の「辞めます」宣言

これまでの研究活動を振り返って印象に残っていること，そして今後はどのようなことに取り組むのかを教えてください．

2016年の夏に口にした「統計的機械翻訳辞めます」宣言が印象に残っています．30年ほど機械翻訳について研究してきましたが，ニューラル機械翻訳の登場による技術変化によって機械翻訳の研究は大きく変化し，過去の研究が帳消しになるほどのインパクトでした．これにより，ニューラル機械翻訳の分野の研究者は一斉にスタートラインに立つことになりました．こうした状況の中，私は研究方針を報告する会議で「統計的機械翻訳はニューラル機械翻訳には勝てません，だから辞めます」と宣言したのです．今から思うと前代未聞だっただろうなと思います．

それまでチームで取り組んでいた統計的機械翻訳の研究において，年長でリーダーだった私は，第一線から退いたような感覚でした．一方で，技術革新に伴ってそれまでのチームから個人で研究できるようになり，1人の研究者として復活することができました．そして，管理職としてチームを率いる立場の年齢になって，再度第一著者(first author)として論文発表することができたことはとても感慨深いものがあります．

今後は研究の土台になるような何かを残したいですね．どんな研究をするうえでも，データは非常に重要な存在です．機械翻訳を研究していくうえでは，土台が対訳コーパ

スや翻訳データベースではないかと思います．多言語間の対訳文をデータベース化したものを対訳コーパスと呼びますが，これを作成するのに必要なのがデータ源なのです．初期には国際機関の文書をデータ源としていたのですが，現在の機械翻訳の典型例といわれる，Google翻訳はWebをデータ源としています．一方で，Googleのような１つの企業が独占的に情報を蓄積するのは良い状況とはいえないという意見もあり，Webをクロールしてデータを一般に提供することを目的とするNPOであるCommon CrawlのWebアーカイブから，大規模に対訳文を抽出して対訳コーパスを作成する試みがいくつか行われています．

このCommon Crawlを利用したヨーロッパ言語―英語間の大規模な対訳コーパスを作成するプロジェクトParaCrawlでは，4000万文を集積した段階で機械翻訳の精度が人間と同等になったといいます．日本語はそこまで蓄積がありませんから，このままだと機械翻訳業界は欧州においていかれてしまいます．このため私はNTTが作成した日英対訳コーパスJParaCrawlを充実させ，日本語の翻訳研究の発展に尽力したいと考えています．

過去に定年退官間近のある大学教授が学生たちを動員して，後にtatoebaと呼ばれる大規模な翻訳データベース製作に臨まれていました[2]．実は当時，「定年間近でこんなことを始める意味は何だろう」と，その先生の熱い思いを理解できなかったのです．しかし，自分自身がその年齢に近づいた今はその気持ちが分かります．多くの人がアクセスできるデータベースを作成する活動には引き続きかかわっていきたいと考えています．

若い研究者へアドバイスをお願いできますでしょうか．

研究者にとっては，自分の興味を持ったテーマを長期にわたって追求するほど有利な状況になります．そのためには，他者に分かりやすく説明できる力を身につけること，そして，定期的に自分の研究と向き合うことの２つを大切にしてほしいと考えています．

定期的に自分の研究と向き合うことは，研究企画書を書くことでもそのスキルを養えます．NTTでは毎年，１年間の研究計画を提出します．その際に１年前の研究計画に目を通すことになるのですが，ベストエフォートの計画とはいえ，いかに自分の予測が当たらないかを目の当たりにすることになるのです．ところが，何度か繰り返すうちに実行できたことや予測どおりになったこと，あるいは反対に実行できないこと，予測に反したことが分かるようになります．経験を重ねることでより現実的な予測に基づいた研究計画を立てられるようになり，第三者にそれを分かりやすく伝えるためのスキルも養えます．

さらに，長期的に取り組むためには興味のあるテーマでなければなりません．私自身，自分の将来の見通しが立っていたかというとそうでもありません．かつては５年，10年を見据えて動いてはいましたが，リアリティがあるのは最初の１，２年かもしれません．しかも，変化の激しい今の時代において５年，10年先の未来を予測することは困難極まります．こうした状況においても，想像できる範囲で，想像した未来において自分はどうありたいかを描いてみることが大切だと思います．

若い研究者の皆さん，研究者ほど現役が長い仕事は他にないかもしれません．自分が長く付き合えるテーマを見つけて研究活動を続けていってください．

■参考文献

⑴ https://www.aclweb.org/anthology/2020.emnlp-main.41.pdf
⑵ https://tatoeba.org/jpn/

IOWN時代を見据えた NTT西日本の研究開発の取り組み

NTT西日本は，社会を取り巻く環境変化がもたらすさまざまな課題に対し，ICT を活用して解決する先駆者「ソーシャルICTパイオニア」として社会の発展に貢献し，地域から愛され，信頼される企業に変革し続けることをめざしています．その中で，2030年のIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想の実現と，2025年大阪・関西万博を見据え，IOWN準備ワーキンググループ（WG）を設立しました．ここでは，IOWN準備WGのめざす未来と研究開発している具体的な事例を紹介します．

IOWN構想実現に向けた NTT西日本での取り組み

NTT西日本では，2020年11月より，IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想の実現による社会課題の解決という中期的な視点のもと，IOWN技術等を活用したユースケースの創出，早期ビジネス化に向けたサービス実現を目的にIOWN準備WGを設立しました．

IOWN準備WGでは，将来，地域で抱える課題等をユースケースとして，IOWN構想の概念や技術とこれまでR&Dセンタ等で培ってきた技術を組み合わせ，NTT西日本の強みを活かした新しいビジネス価値創出をめざしています．また，ベンチャーやスタートアップ企業との共創による新サービス・アイデアの検討を行う予定で，それに向けた市場リサーチと，オープンイノベーションを生むため各企業や大学などと議論を交わす場を積極的に設けています（**図1**）．

IOWN準備WGでは，**図2**に示す方向性で技術開発を進めています．

・光アクセス，Wi-Fi，ローカル5G（第5世代移動通信システム）等，異なる種類のアクセスを統一的なインタフェースで収容するマルチアクセス技術

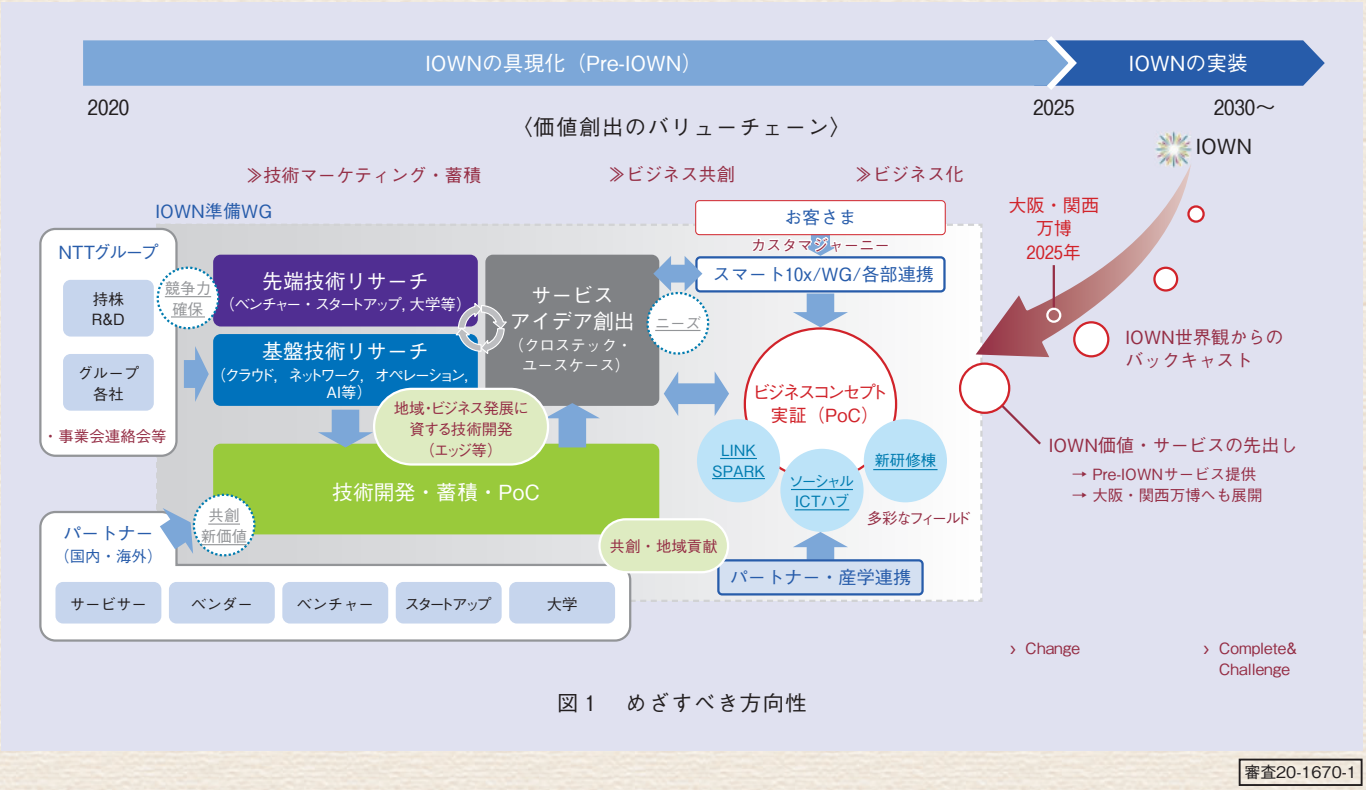


図1　めざすべき方向性

審査20-1670-1

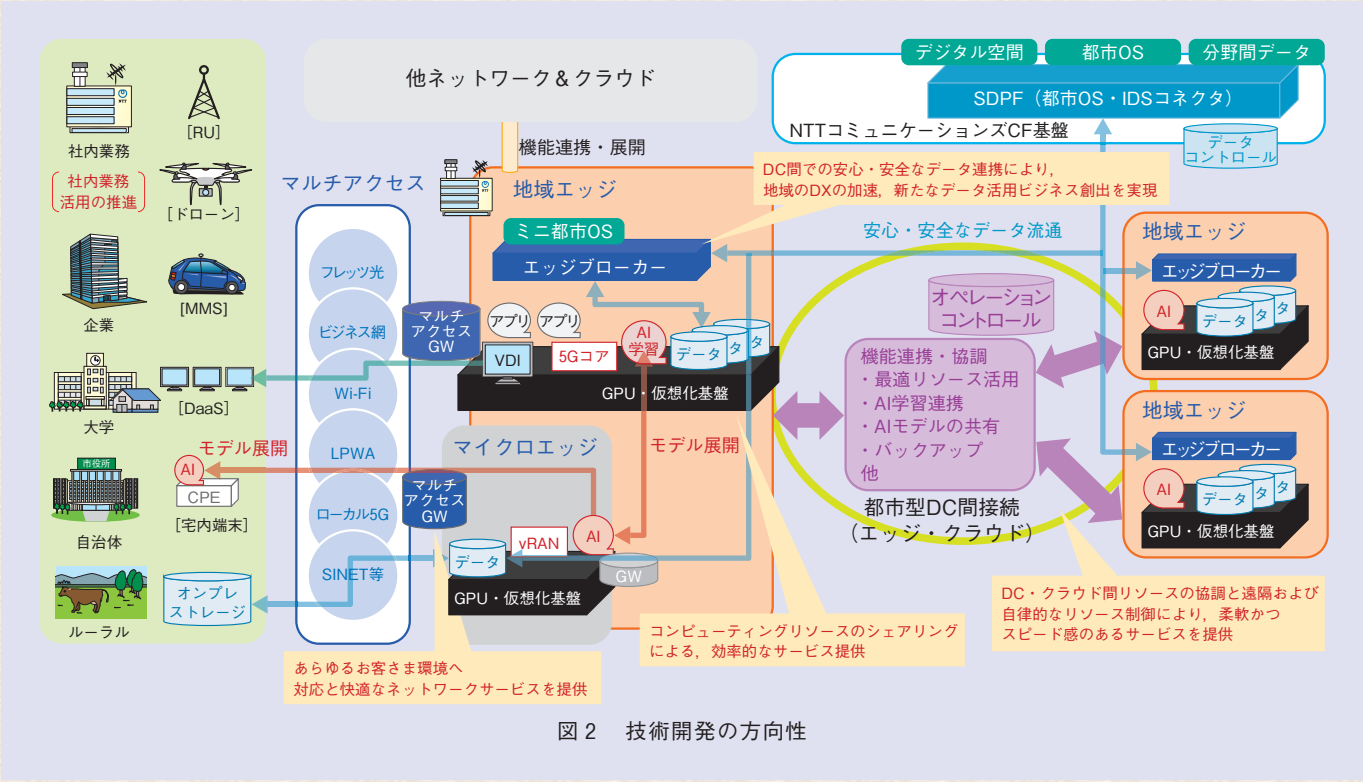


図２　技術開発の方向性

・特定の地域内において，より低遅延でよりセキュアにデータの処理を可能とする地域エッジコンピューティング技術（地域エッジ）．

これらのお客さまとの接点，データの入り口であるアクセスライン・エッジを強みとして快適なIoT（Internet of Things）プラットフォームの提供と新たな技術やリソースの提供による今までにない新たなデータ活用ビジネスの創出による地域社会の活性化をめざしています．

これらの技術開発に向けてはNTT研究所やNTTコミュニケーションズなどから積極的に技術を取り込むことでスピード感のあるサービス展開をめざし，NTT西日本ではこれらの取り組みをPre-IOWNと位置付け，2025年大阪・関西万博への展開をめざします．

お客さまニーズに柔軟に対応できるネットワークの構築

地域エッジを推進するうえで，ユースケースに応じて最適なアクセスラインに接続する必要がありますが，複数のユースケースに対応する中で，さまざまなアクセスライン，端末，アプリケーションが混在している環境の運用が必要になり，その環境下では柔軟にアクセスラインと，端末，アプリケーションを追加することができるマルチアクセスという概念が必要となります．マルチアクセスの実現に向けて，複数のネットワークとの接続を想定したネットワークスライシングと，さまざまなベンダーの端末との接続を想定したProgramming Protocol Independent Packet Processors（P4）の研究開発を進めています．

ネットワークスライシングは広域イーサネット網や地域IP網等，他ネットワークを重畳することをめざすものです．現在はネットワークごとに装置を設置しサービスの提供をしていますが，今後は，4K･8K映像配信，自動運転，遠隔医療，IoT等の発展に伴い，ネットワークの重畳化が求められます．そのためには，多様化する事業者（Middle B）のニーズに柔軟かつ迅速に対応できるアーキテクチャを構築しなければなりません．しかし，現在の方法では新サービスを導入するたびに新装置を導入する必要があり，期間およびコストがかかるという課題があります．こうした課題を解決するために，NTT西日本は，新たな転送技術として複数のネットワークを重畳するネットワークスライシング技術の１つであるセグメントルーティング（SR）の検討を進めてきました．SRの運用により，シンプルなネットワーク設計と柔軟なサービス提供が可能となります（**図３**）．NTT西日本は，すでにネットワークスライシング自体の機能，複数スライス時における影響，異メーカー間の接続等の試験を実施し，基本的な技術確認を完了していま

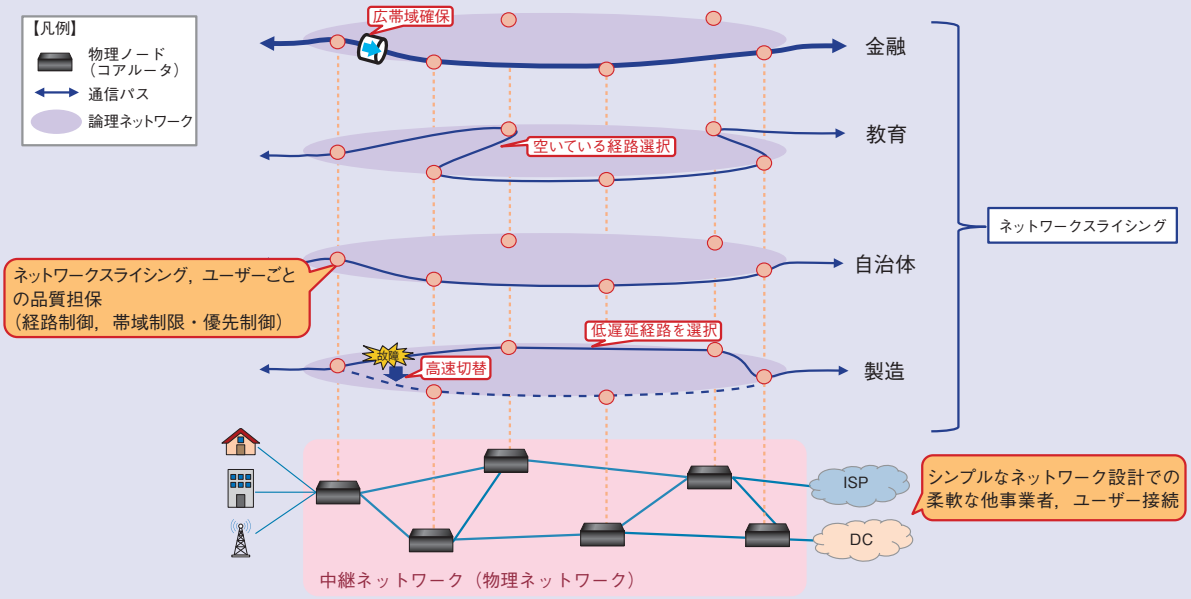


図 3　ネットワークスライシング

す（**図 4**）．今後，SRの他キャリアとの相互接続を含め，運用面での課題抽出・検討を行い，早期の商用導入をめざす予定です．

もう 1 つ技術開発を進めているものはP4です．P4とは，特定のメーカーに依存しない柔軟なネットワーク機能の追加を実現するため，ASIC（Application Specific Integrated Circuit）によるパケット転送処理をプログラム可能とする技術です．さまざまなものをシームレスにつなぎ，ユーザーの要望に応じた適切なネットワーク環境を提供するためには，固定網とは異なるプロトコルのネットワークとの連携，パケット制御が必要になります．しかし，データプレーン処理機能はルーター・スイッチメーカーの実装に依存しているうえ，メーカーの機能追加は大手ユーザーの意向に影響されるため，必要な機能を必要なタイミングで利用することは難しいものです．そこでNTT西日本では，P4を用いたキャリア網でのパケット制御の実現に取り組んでいます．

地域エッジの実現に向けた取り組み

現在，NTT西日本で技術開発を進めている地域エッジとは，特定の地域で生成されたデータを，その地域のデータセンタで集約，加工，解析などを実施することで，より早くより安心してさまざまなデータ活用ビジネスの創出を推進する技術です．例えば，防犯カメラなどの画像解析などには高価なGPUサーバーが必要となりますが，地域エッジにGPUサーバーが搭載されているとお客さま自身が高価なサーバーを準備することなく画像解析サービスを活用することができるようになります．NTT西日本では地域エッジのユースケースを検討しており，その 1 つとしてゲーミングエッジに関する実証実験を行いました．

近年，eスポーツの市場が拡大し，関心が高まっている一方で，快適にプレイできる環境を整備するには，高価なものでは数十万円規模のゲーミングPCを準備する必要がある，また，さまざまな場所で快適にプレイするためには，ゲーミングPCをプレイ場所ごとに用意しなければならないといった課題の解決に向けて，NTT西日本は，ゲーミングエッジ技術の実証実験を行いました．具体的には，熊本県の公立高校 2 校とともに，高速に画像を処理するGPU サーバーをNTT西日本のネットワーク上に設置し，ゲームの高精細な画像処理を行い，手元のPCに処理後の映像を転送しました．実験の結果，安価なPCでもゲーミングエッジ技術により低遅延でe スポーツを実施できることが確認することができました（**図 5**）．

また，地域エッジについては地域創生クラウドでの活用やヘルスケアに関する実証事業に取り組んでおり，GPUサーバー等を活用した地域エッジ技術のユースケースの検討を進めていきます．

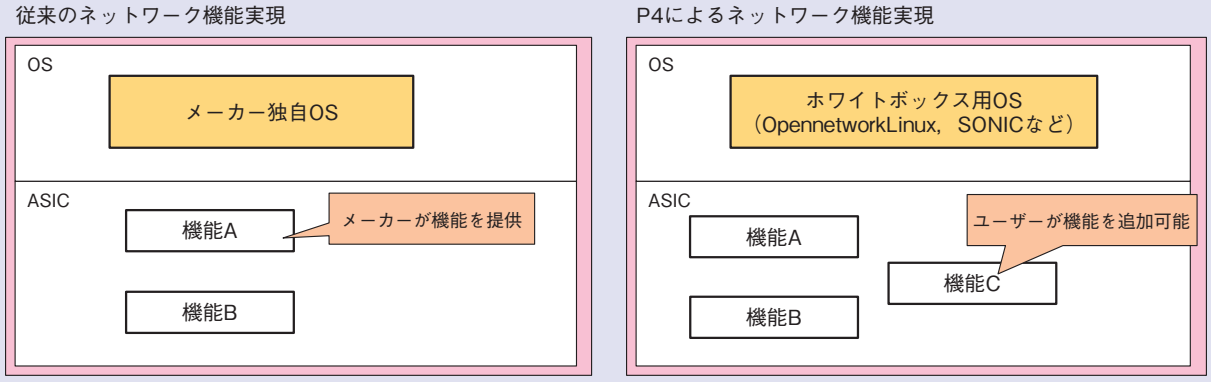


図 4　Programming Protocol-Independent Packet Processors（P4）

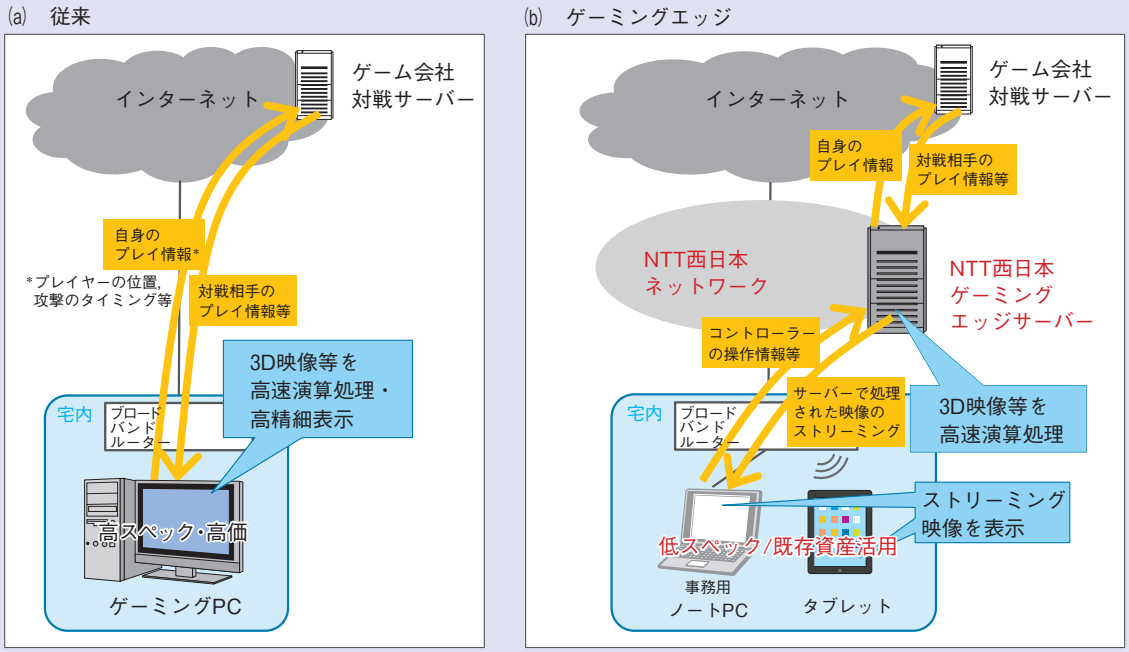


図 5　ゲーミングエッジ

今後の展開

このように，NTT西日本R&Dセンタでは，IOWN構想の実現に向けて，将来的に実用化が期待される新技術の開発や検証による知見の蓄積だけでなく，実際の社会課題やビジネス課題の解決に向けたトライアルや実フィールドでのPoC（Proof of Concept）にも積極的に取り組んでいます．今後も，こうした実際のユースケースへの適用を通じて，お客さまへの価値提供をめざしていきます．

◆問い合わせ先
NTT西日本
デジタル改革推進本部　技術革新部　R&Dセンタ　開発推進担当
TEL　06-6450-6451
E-mail　ks-jimu-rdc@west.ntt.co.jp
※電話番号をお確かめのうえ，お間違いのないようお願いいたします．

アジリティ高い組織経営を実現するための6つの奥義（Key Success Factor）

日々変化する顧客ニーズや新型コロナウイルス感染症等の不測の事態に対して，迅速に対応するためにアジリティの高い組織運営がますます求められています．一方，大企業の組織構造は「階層型」が一般的であり，階層型の組織の意思決定は遅く，「横」のつながりも希薄であり，価値の提供スピードという観点で課題があります．ここでは，大規模な組織でも変化に迅速に対応できるアジリティの高い組織運営を実現するための6つの奥義（Key Success Factor）を紹介します．

組織変革ニーズの高まり

「VUCA」の時代，つまり「未来が予測不可能な時代」に突入したことで，企業にとって「変化にどれだけ俊敏に対応できるか」ということが，非常に重要になってきました．企業は顧客・社会の課題を解決するための仮説となるプロダクトやサービスを繰り返し市場に提示し，データに基づいて顧客・社会の反応を把握しながら，迅速にプロダクトやサービス，あるいはその提供体制にフィードバックし続ける必要があります．従来の組織・体制，やり方では限界を感じている企業も多く，さまざまな企業で変化に適応する能力，組織運営のアジリティ向上のための組織変革が求められています．そこで，活用されているのがアジャイルの考え方です．従来は開発のプロセスを指すことが多かったキーワードでしたが，考え方を企業の営みや経営まで対象としてアジリティを向上させていくことが強くなってきています．アジャイル開発からアジャイル経営へ，といわれることも多くなっており，McKinsey & Companyが実施した『McKinsey Global Survey（ビジネスリーダー2,500人への調査）[1]』によると，回答者の75%の優先事項のトップ3に「組織のアジャイル化」が入っていることが報告されています．

顧客の抱えている課題・ニーズ

デジタルトランスフォーメーション*1（DX）推進の波が加速していく中で，顧客の抱えている課題・ニーズは多岐にわたります．“2025年の崖”[2]*2に代表される既存システムの課題や新規ビジネス・サービスの創出，組織のアジリティ向上に向けた仕組みづくり等の課題があり，各企業でDXがなかなか進まないという状況は経済産業省が2020年12月に公表した『DXレポート2』でも報告されています[3]．各企業の動向や案件状況を分析した結果，DX推進に向けた顧客の抱えている課題・ニーズは，**図1**のとおり7つのシナリオに大別されると考えています．

図1の7つのシナリオに対して，顧客の経営課題全体をとらえて，優先度が高いものから一気通貫で総体的に支援し，顧客と一緒にビジネスをつくり上げていくことが求められています．また，これからのデジタル時代を生き抜くためには，プロダクト・サービスを提供する「スピード」が最重要であり，この「スピード」を最大化できるような組織・チーム構造を築くことが求められています．

アジリティ高い組織経営を実現するための6つの奥義

本記事では，主に「DXに資する組織変革」というシナリオにフォーカスして，アジリティ高い組織経営を実現するための6つの奥義を紹介します．

① マインド：「アジャイルマインド」を持った組織にすることで，チームごとに素早く，かつ効率的に戦略・人材・プロセス・技術を形成できるため，市場の変化に迅速に対応できるだけでなく，全員の向かう方向性や目的が非常に明確となり，組織の安定性を保つことが可能となります．そのため，上位層から現場社員まで以下に示す「アジャイルマインド」を十分に浸透する必要があります．

・「現状維持」のマインドセットから「成長」へのマインドセットへと転換

・リーダーはリーンな思考方法*3を習得し自ら実践，チー

*1 デジタルトランスフォーメーション：企業がデータとデジタル技術を活用してビジネスモデルやプロセス，組織，企業文化等を変革し，競争上の優位性を確立すること．

*2 2025年の崖：経済産業省が公表した『DXレポート』で記載されている既存システムの老朽化や肥大化・複雑化，ブラックボックス化等の問題．

*3 リーンな思考方法：スモールスタートで価値ある最小のプロダクトを素早く提供しフィードバックをもらい改善していくこと（Fail First）．

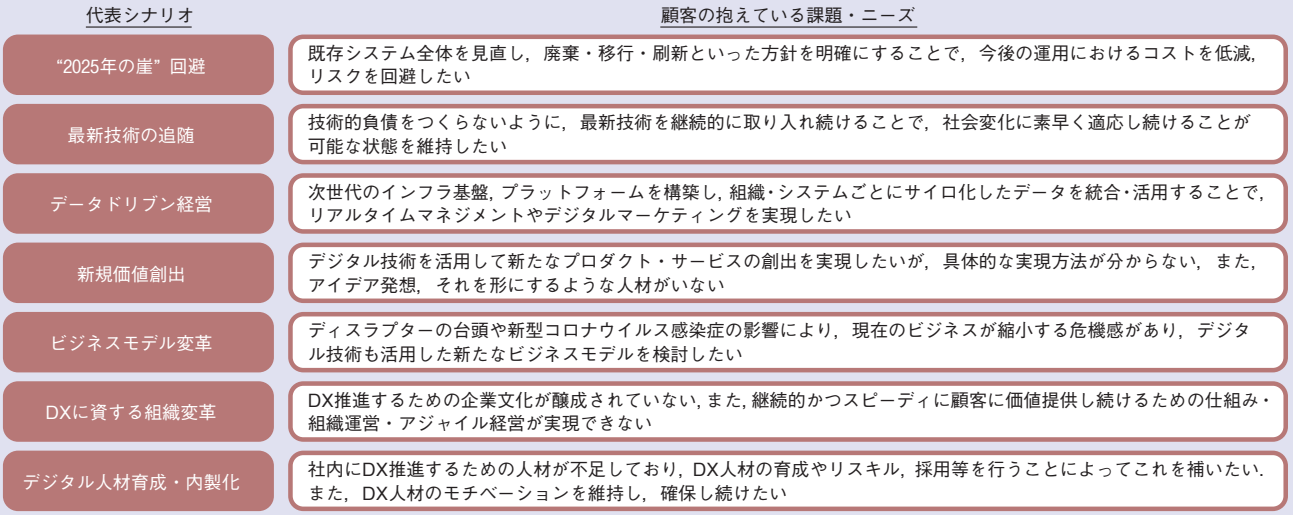


図1　DX推進に向けた7つの代表シナリオ

ムメンバーの手本に
・リーダーは変革の指導者として，変革ビジョンの提示，肯定的な動機付け，必要な組織内の連携と権限移譲，心理的安全性の担保を推進
・リーダーはチームの自己組織化のため，指示型ではなく支援型マネジメント
・チームメンバーは常に複数選択肢を持ち，さまざまな変化に柔軟な対応が必要

② プロセス：顧客ニーズの変化が激しいビジネス環境に適したプロセスとして当社が注目しているのがScrum*4およびScaled Agile Framework®(4)*5（SAFe®）です．SAFe®はScaled Agile Inc.が提供しており，NTTデータはGlobalパートナーを締結しています．まずはScrumを実行できるチームを構築し，実際のプロジェクトを通して小さな成功を積み重ね，アジリティを損なわずチーム数をスケールさせ，経営活動としっかりと同期を取りつつ価値をつくり上げていきます．

③ ツール：継続的に価値検証していくためには，コミュニケーションツールを含むDevOps*6環境と，エンドユーザからのフィードバックを基に，早いサイクルで改善し続けるためのデジタルプラットフォーム（クラウド・ファースト*7，マイクロサービス*8，完全自動化等）が必要となります．当社は，これらを実現するためのツール・プラットフォームを用意しており，最新の技術を積極的に取り込み，さまざまな外部サービスとの連携も可能とした基盤技術を利用し，短期間で安心・安全に価値検証・サービス提供を実現することができます．

④ ルール：DXを推進していく中での足かせや，社員のやる気の阻害要素となっている既存ルールを速やかに改定し，ガイドラインを提示，社内規定変更への働きかけを実施し，組織全体に浸透させていく必要があります．プロダクト・サービスの開発速度を高めるためには，意思決定の速度も最大化する必要があり，エスカレーションによる遅延を避けて，その場で判断を下せるように，意思決定・権限移譲のルールを整備する必要があります．

⑤ ロール：従来のシステム開発で定義されているロールとは別に，デジタル時代に必要とされるロール・人材像を定義し，研修等を通してその人材を育成し，体制を整備する必要があります．組織全体での大規模な変革には，高度な技術者が必要となるため，高度な技術者を社内外から集約させてモチベーション向上を図り，戦略的な調達と組織化を行う必要があります．また，チームをスケールする際は，縦ではなく横にスケー

*4 Scrum：アジャイル開発手法の1つでITシステムを反復的に開発するフレームワーク．
*5 Scaled Agile Framework：大規模なアジャイル開発手法の1つでSAFeと略され，システム開発だけではなく，経営・ビジネス領域を含みます．
*6 DevOps：開発（Development）と運用（Operations）を融合し，リリース頻度を向上させるためのソフトウェア開発手法の1つ．
*7 クラウド・ファースト：システム構築時にはさまざまなメリットを得られるクラウド利用を優先すべきという考え方．
*8 マイクロサービス：複数の小さなサービスをAPIによって連携させるアーキテクチャのこと．

ルさせ，全体統制を取るチームを横串で配置するような組織のデザインが重要となります．

⑥　ガバナンス：①～⑤の変革を着実に行うためには，ガバナンスが効いた体制・仕組みが必要であり，それにより組織運営の健全性や透明性，業務執行の効率性を確保できます．その実現方法の１つとして特区化があります．デジタル領域を特区化することで予算配分や関係組織のリソース配置（階層型とネットワーク型組織の融合）等を全体的に見直します．また，チャレンジできる場として新たなオフィスの開設や組織運営・チームパフォーマンスの可視化，人事評価の見直し等によりガバナンス強化につながります（**図２**）．

DXに資する組織変革の事例

■事例１（社内企画型案件）

⑴　課題・ニーズ

高コスト構造，システム数の増加，複雑化となってしまっている既存システムを刷新するとともに，新規サービスを迅速に提供できるようにシステムの構造の見直しに加えて，組織運営の変革も行い，組織のアジリティ向上を実現したいという課題・ニーズがあり．

⑵　実施内容

①　マインド：変革リーダーの下，研修等を通して「アジャイルマインド」の定着化を図り，全体戦略・方向性を社員全員に浸透させ，チャレンジ精神や成長へのマインドセットを醸成．

②　プロセス：１-２チームでのScrumから開始し，既存組織と切り離して大規模アジャイルのPoC（Proof of Concept）を実施．Scrumチームを拡大した後SAFeを導入し，経営・ビジネス領域まで拡大．

③　ツール：パブリック・プライベートクラウドをハイブリッドに活用し，最新技術を取り入れ，高セキュリティでアジリティの高い環境を導入し，業務のデジタル化，作業効率化を促進．

④　ルール：SAFeに合わせて社内ルールを見直し，意思決定スピードの向上を実現．組織運営情報可視化基盤を構築し，戦略変更とリソース同期の速度向上を実現．

⑤　ロール：SAFeで定義されているロールやGoogleが提唱している専門職であるSRE/CRE（Site Reliability Engineering/Customer Reliability Engineering）の人材像を定義し，それに適した人材育成を実施，チームパフォーマンスの可視化により改善活動を促進．

⑥　ガバナンス：既存とデジタルを切り離して特区化．働く環境についてもデジタルテクノロジを駆使し革新的な環境を提供する“場”を構築．

⑶　効果

デジタル人材，プロセス，ルール等をSAFeに合わせてサービス志向型組織に変革し，300名を超える体制で組織一体となったアジリティ高い組織経営を実現しました．また，事業運営にかかわる業務のデジタル化や最新技術の活用により，作業の効率化と組織のアジリティ向上に寄与するとともに，社員のエンゲージメント向上にも貢献しました（**図３**）．

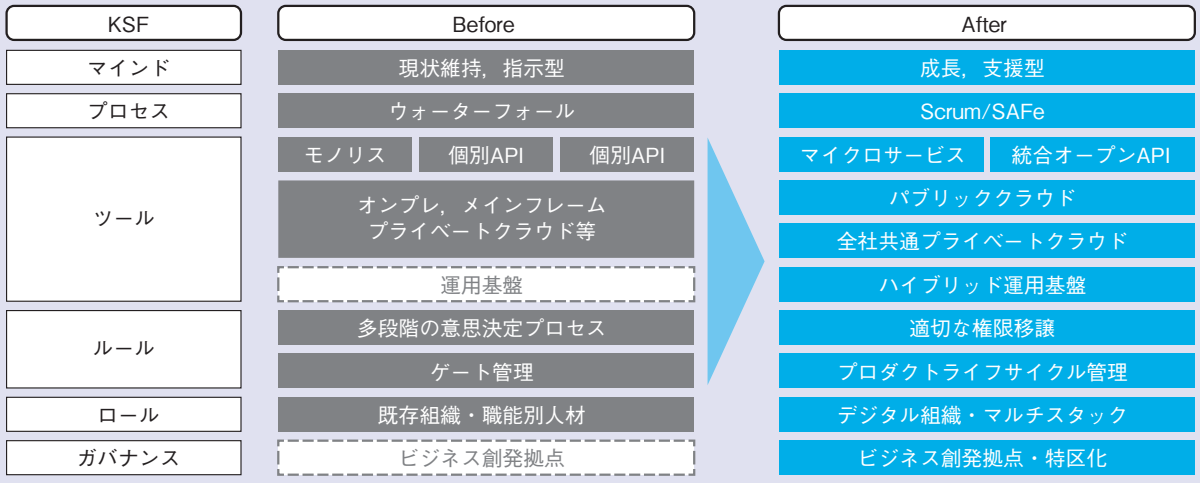


図２　アジリティの高いデジタル化組織へ

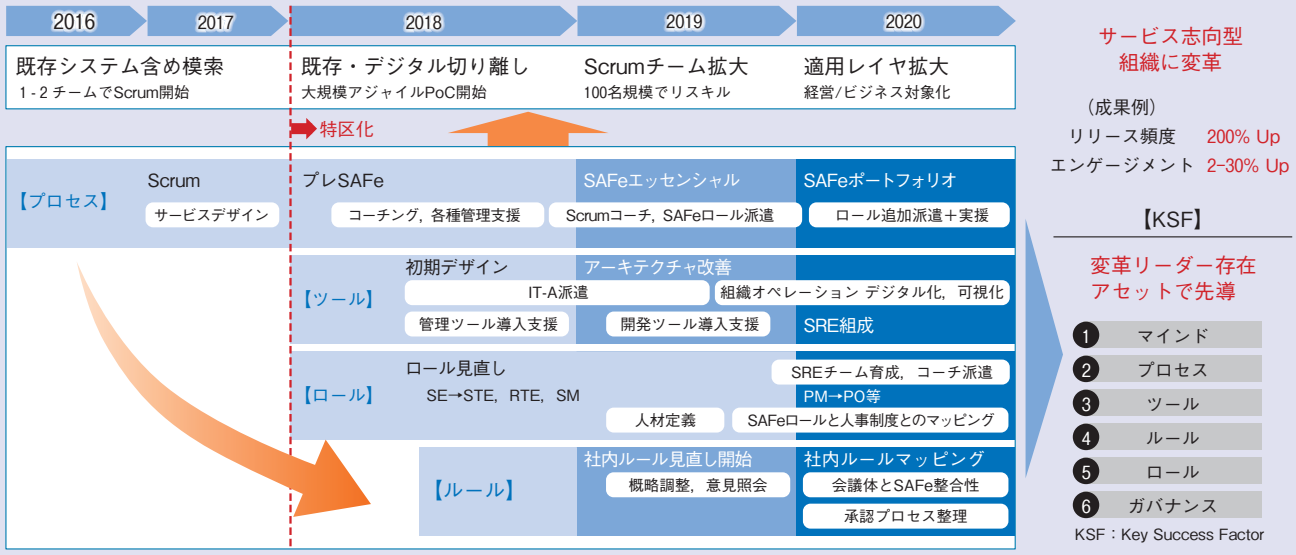


図 3　組織変革アプローチ

■事例 2（社外受託型案件）

⑴　課題・ニーズ

競合他社が次々とデジタルプロダクト・サービスを提供している中で，自社でも早く魅力的なサービスを創出したいが，VUCAな状況の中で，従来型の予測・計画・遂行の進め方に限界が来ているというボードメンバ含めた共通の課題認識があり．

⑵　取り組み内容

①　マインド：幹部向けの勉強会やトップ対談，変革エージェントへの教育を実施することにより，上位層の理解・承認を得るとともに，社員のアジャイルマインドへの意識改革を実施．

②　プロセス：開発の方法論のみではなく，意思決定方法等の社内ルール・組織面も含めたビジネスプロセスの変革検討およびその実践．

③　ツール：高速な価値開発を支えるプラットフォームの構築，既存資産にとらわれず，ゼロベースであるべきシステムアーキテクチャ・組織をデザイン．

④　ルール：社内ルールの抜本的な見直しを行い，費用とリソースの優先順位や配分の管理・意思決定スピードを向上．

⑤　ロール：人材育成指針の策定やSAFeロールも意識した人材像の定義，育成施策，評価制度等のタレントマネジメントの仕組みづくりを実施．

⑥　ガバナンス：既存組織とは切り離した出島戦略（特区化）をとり，横断的で一体的な体制を構築し，組織全体でのビジネスプロセスの高速化・柔軟性向上を実現．

⑶　効果

新ビジネスプロセスによるフロー改善（開発着手まで39%削減，9カ月→5.5カ月），DX人材制度試行適用（人材定義・採用・育成）．小さな成功の達成（1部門の特区化適用→拡大本格化）を実現しました．また，クラウドの徹底活用による開発アジリティ向上（1年の開発期間を3カ月短縮），スモールスタートで実績を積み重ねることで，成果を基にToBe像実現に向けたスケールアウトを現在も継続的に実施し，社員エンゲージメントも向上しています（**図 4**）．

今後の展望

顧客ニーズの多様化や不確実性の高いビジネス環境において，それらの変化に迅速に対応するための組織変革・アジリティ高い組織経営の実現に向けたアプローチについて解説しました．

NTTデータではDXに資する組織変革のニーズに対応するために，6つの奥義（Key Success Factor）の具体的な進め方やアウトプットをAltemista®＊9としてアセット化し，広く展開できるように整備を進めています．また，

＊9　Altemista®はNTTデータの登録商標，NTTデータのデジタル技術のケイパビリティを示すテクノロジブランド．

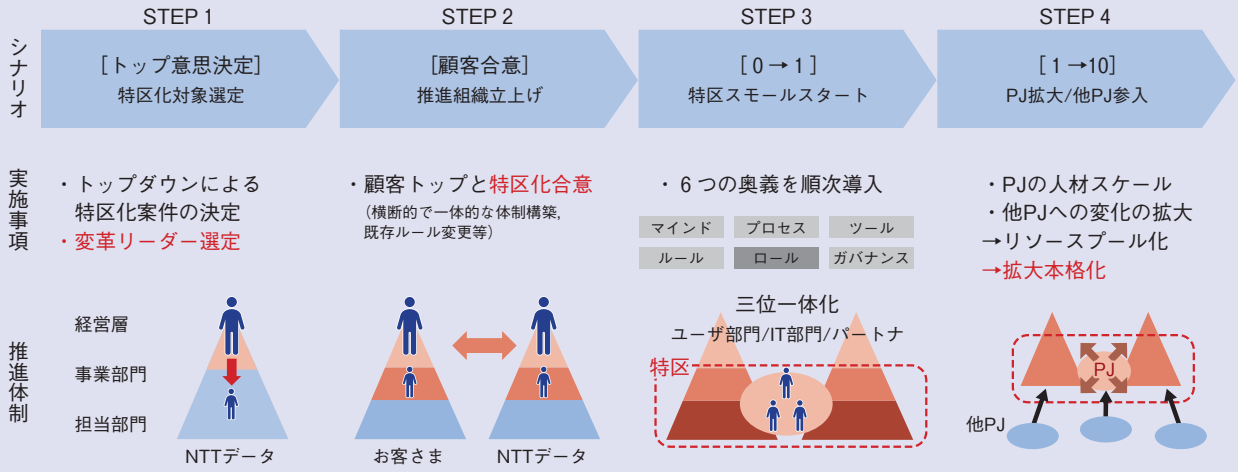


図4　特区化から拡大本格化

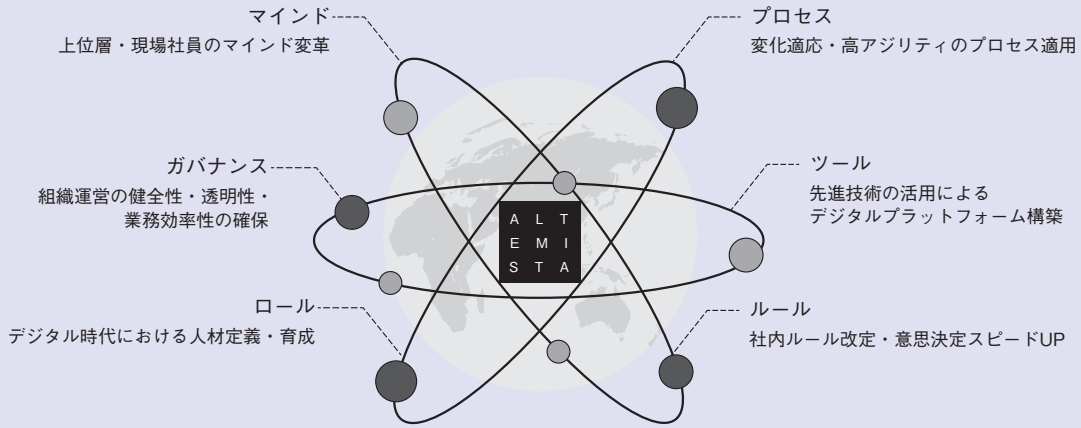


図5　アジリティ高い組織経営を実現するための6つの奥義（powered by Altemista®）

「顧客の抱えている課題・ニーズ」に記載しました7つの代表シナリオに対して，一気通貫でのトータルソリューションを整備し，信頼パートナーとして顧客と一緒に経営課題を解決し，ビジネスをつくり上げていく役割を担えるように，これからもNTTデータ自らが変革していきます（**図5**）．

■参考文献

⑴ https://www.mckinsey.com/~/media/McKinsey/Business%20Functions/Organization/Our%20Insights/Harnessing%20agile%20compendium/Harnessing-Agile-compendium-October-2018.ashx
⑵ https://www.meti.go.jp/press/2018/09/20180907010/20180907010.html
⑶ https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201228004/20201228004.html
⑷ https://www.scaledagileframework.com/

◆問い合わせ先

NTTデータ
技術革新統括本部 システム技術本部 デジタル技術部
TEL　050-5546-8809
FAX　03-3532-7730
E-mail　apcj@kits.nttdata.co.jp

Technical Solution
テクニカル ソリューション

最新の故障事例の紹介 ——設備の材料劣化に関するトラブル

通信設備は，安心・安全で安定した通信サービスを提供するために日々点検，保守・運用されています．NTT東日本 技術協力センタでは，このような通信設備に対し，経年劣化による故障や経年劣化だけでは説明できない特異故障について，材料的な観点から原因の究明と防止対策の提案を行っています．ここでは，最近発生した鋼管柱の特異的な腐食事例やNTTビルの搬入口の手摺り扉の腐食による故障事例について紹介します．

はじめに

NTTの通信ケーブルは，NTTビルからマンホールなどの地下設備を介して，電柱などの架空設備へ架設されユーザ宅へ敷設されます（**図1**）．NTTビル内の設備（NTT設備）や電柱等は，膨大な数量が日本全国に設置されており，腐食に起因する故障事例が発生しています．NTT東日本 技術協力センタ 材料技術担当では，腐食による特異故障の原因究明と再発防止策などの現場への提案を行っています．ここでは，近年のNTT設備における鋼管柱の特異的な腐食の事例やNTTビルの搬入口の手摺扉が腐食により破断した事例に関して，当センタの原因究明に向けた取り組みを紹介します．

鋼管柱の特異的な腐食事例

■設備の状況

今回紹介する特異的な腐食が確認された鋼管柱の現場の状況を**図2**に示します．鋼管柱の設置環境は，沿岸部から約10 kmで塩害の影響が小さいと考えられるエリアです．鋼管柱の外観は，鋼管柱の片面に地際部から全長にわたる表面錆（赤錆）が発生していました．さらに，赤錆は鋼管柱の南向きの風上側に発生しており，風下側には発生していませんでした．また，鋼管柱の頭部キャップには土砂が付着していました．

■腐食原因の調査

金属の腐食は，海塩粒子などの塩分が付着することで促進されます．そこで，鋼管柱表面を不織布（小津産業

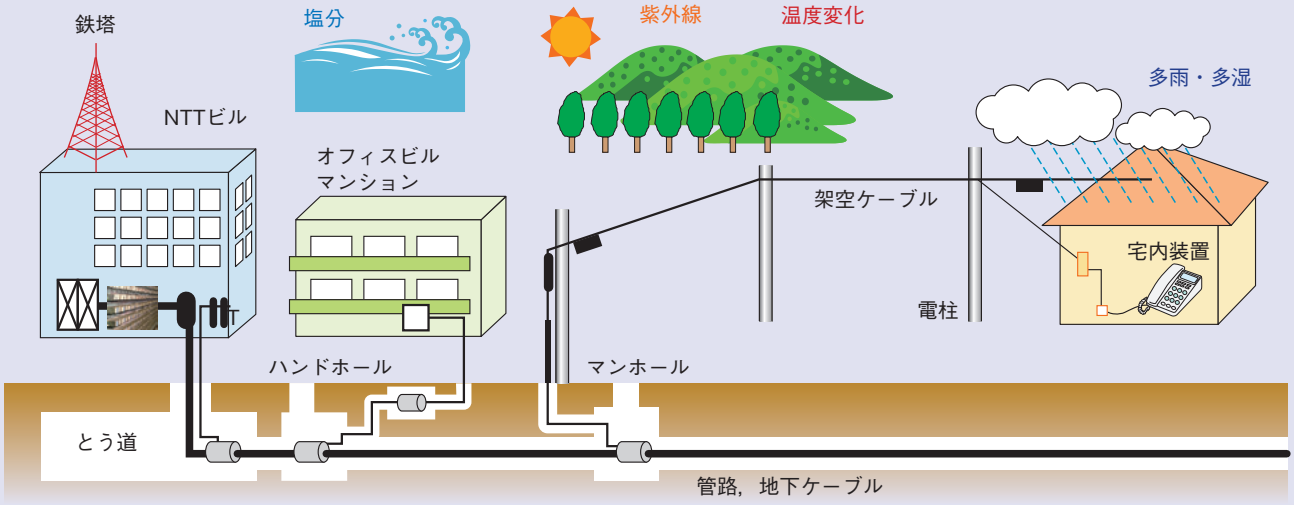


図1　NTTの通信設備と腐食劣化要因



全体（風上側）



風上側



風下側

図２　鋼管柱の腐食状況



図３　拭き取り試験の様子

社製ベンコット）で拭き取り，採取した表面付着物の種類や量を分析する「拭き取り試験」を実施しました（**図３**）．さらに付近の畑の土砂を回収することで，鋼管柱の付着物との比較を行いました．

イオンクロマトグラフにより，拭き取り試験で得られたサンプルと，回収した付近の畑の土壌のイオン種や付着量の分析をしました．その結果，表面付着物として金属腐食を促進させるイオン種である塩化物イオン，硫酸イオンや硝酸イオンを検出しました（**表１**）．また，これらのイオン種は，腐食面および非腐食面の両面で付着量に顕著な差異はなく，濃度も比較的低い数値を示しました．さらに，鋼管柱周囲の畑の２地点から採取した土

表１　鋼管柱の付着成分の分析結果

拭き取り部位	検出量（mg/m^2）*		
	塩化物イオン（Cl^-）	硫酸イオン（SO_4^{2-}）	硝酸イオン（NO_3^-）
風上・腐食面	26.7	23.3	6.12
風下・非腐食面	35.0	26.0	5.81
頭部キャップ	30.4	15.9	6.69

＊鋼管柱の単位表面積当りのイオンの検出量

表２　土壌の成分分析結果

分析個所	検出量（μg/g）*		
	塩化物イオン（Cl^-）	硫酸イオン（SO_4^{2-}）	硝酸イオン（NO_3^-）
土砂A	33.3	114	213
土砂B	未検出	39.4	43.3

＊鋼管柱周囲の畑から採取した土砂の単位重量当りのイオンの検出量

砂A，土砂Bからもほぼ同種のイオン成分を検出しました（**表２**）．なお，土砂Bにおいて塩化物イオンが未検出なのは，土砂Aの畑とは異なる作物の畑であったことから，異なる肥料や土質であったことが考えられます．表面付着物および土砂の分析結果から，鋼管柱表面や頭部キャップに畑の土砂が付着していることが推察されます．

次に，鋼管柱が設置されているエリアの気象条件を調べると，南からの風が年間平均風速約3.0m/sを超える強風エリアであり，沿岸部から約10 kmで塩害の影響が小さいと考えられます．設置されている鋼管柱は南からの強風にさらされており，今回腐食している面と一致することから，風によるなんらかの影響を受けているのではないかと考えられます．

■特異的な腐食事例の原因と今後の対策

鋼管柱の腐食を促進させる成分が，腐食面およびその裏面の非腐食面の両面で同程度の付着量であったことから，片面でのみ赤錆が発生する今回の事例の主要因ではないと考えられます．一方で，鋼管柱表面の腐食状況が部位によって異なることから，表面付着物以外の作用によって腐食が促進されたと推察されます．なお，表１に示す鋼管柱および頭部キャップの付着成分は，表２に示す周囲の畑の土砂と同種の成分が検出されたことから，鋼管柱には畑の土砂が付着していると考えられます．

以上より，腐食のメカニズムは鋼管柱の設置環境が南風を中心とした強風エリアであり，強風に巻き上げられ

た土や砂の粒子が風上側の鋼管柱表面に衝突することにより亜鉛めっきが摩耗して消失したため，風上側の鋼材表面のみで腐食が進行し，赤錆が発生したと推察されます（**図 4**）．今回の鋼管柱は，流体中に含まれる固体粒子などにより材料が摩耗・損傷される現象である「サンドエロージョン現象」により腐食が発生したことが示唆されます．

今回，調査を実施した鋼管柱の地際の防食塗装（タールエポキシ樹脂塗装）は，軽度の損耗程度であるため，現状では安全性にかかわる強度低下はないと考えられます．一方で，鋼管柱の片側全面にわたる表面錆の発生により，めっき部が消失していることから，将来的には腐食の進行が早まることが予想されるため，計画的な更改が必要となります．

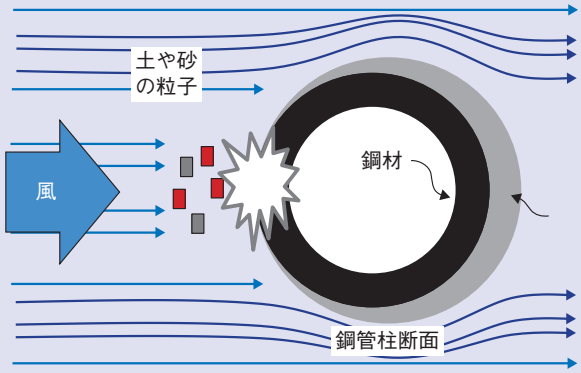


図 4　腐食のメカニズム

NTTビルの搬入口の手摺り扉の腐食破断事例

■設備の状況

NTTビルには，上層階に通信装置を搬入するために，搬入口が設置され，転落防止等のための手摺り扉が設置されています．今回，あるNTTビルへの機器搬入時に手摺り扉を開けようとした際に，手摺り扉の蝶番部分が破断して，手摺り扉が外れる事例がありました．

■破断面分析および破断再現試験

手摺り扉の構造と破損した蝶番の写真を**図 5** に示します．蝶番の上部側（写真A，B）の心棒の破断面は発錆しており，破断後一定の時間が経過していたと考えられます．一方，蝶番の下部側（写真C，D）の心棒の破断面は金属光沢が残っていたため，今回，手摺り扉を開けたときにねじ切れたものと考えられます．

現場より撤去した蝶番の破断面の観察を走査型電子顕微鏡（SEM）により実施しました．破断面A，Bは発錆が進行しており，破断面表面を観察することができませんでしたが，破断面CのSEM像では，金属に過負荷がかかり破断した際にみられる特徴的な断面形状である伸長ディンプルが観察されました（**図 6**）．また，下部側の蝶番を分解すると，蝶番と心棒との間に発錆がみられました．

心棒の破断原因を追究するために，現場より撤去した蝶番の心棒の直径（10 mm）と同様の軟鋼製のボルト

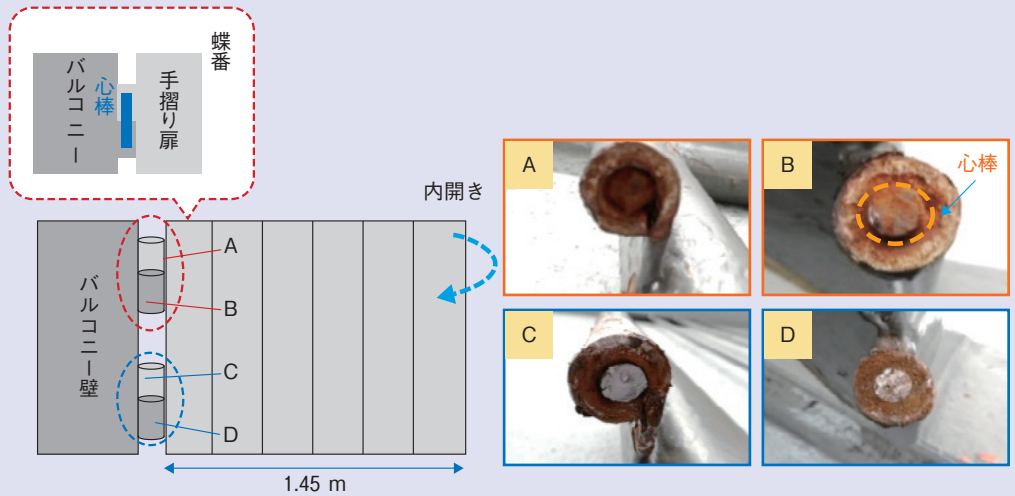


図 5　手摺り扉の構造（ビル側から見た場合）と破損した蝶番の破断面

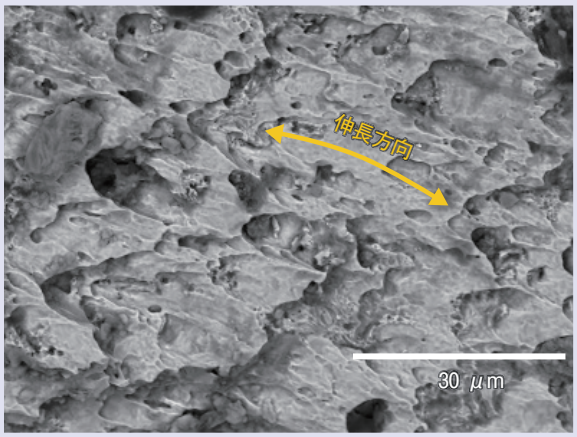


図 6　破断面CのSEM像

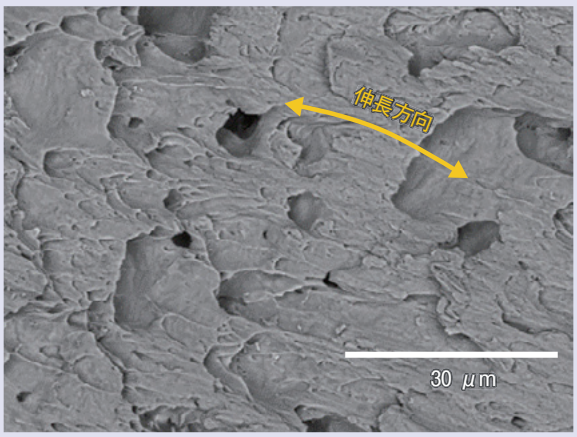


図 7　ねじ切り後の破断面のSEM像

をねじ切る破断再現試験を行い，その際に心棒にかかるトルクの計測および破断面の観察を行いました．その結果，約100 N·mのトルクで心棒が破断しました．また，ねじ切り後の心棒の破断面をSEM観察した結果，破断面Cと類似した伸長ディンプルが確認されました（**図 7**）．

■破断の原因の推定

上記の破断面の観察や破断再現試験の結果より，手摺り扉の破損原因は以下のステップで進行したと推定しました．

① 当該ビルは海岸からも離れており塩害による腐食の影響が小さいと考えられる地域ではあるが，上部の蝶番と心棒はすき間に滞留した水分の影響で，経年によって腐食が進行し，固着した状況で利用されていたと考えられる．また破断面から扉上部の心棒（A，B）は，事例発生当日よりも以前に破断していたものと考えられる．

② 時間経過とともに下側の扉の蝶番と心棒も腐食で固着したため，事例発生当日には，扉がスムーズに開閉できなかった．

③ 開閉しづらくなった扉を作業者が強い力で開けようとして，破断トルクを上回ったため下部側心棒（C，D）がねじ切れた．

手摺り扉など使用頻度が少なく蝶番のような目視で確認できない構造を有する設備においては，気付かないうちに腐食が進行していることが考えられます．その場合，無理に扉の開閉を実施すると，蝶番のような可動部位が破断し，上層階から扉が落下するなどの２次災害等が起こる可能性があります．そのため，使用頻度が少なく，腐食が予想される設備については，使用する際に点検を実施し，扉が開きにくいなどの不具合があった場合は，慎重に開閉するとともに，交換などの適切な措置が必要になります．

今後の展望

今回紹介したように，通信設備はさまざまな環境に設置されることや，長年にわたり利用することなどから，金属，プラスチックなどの材料が劣化し，想定していなかった故障が発生することがあります．そのため，長く安全に設備を利用するためには，日々の点検や利用前の点検をしっかりと行うことが必要です．技術協力センタ材料技術担当では，設備の長寿命化や事故防止のために，材料の劣化原因の究明や対策方法を立案し，現場にフィードバックしています．これまで56年以上にわたり行ってきた技術協力活動で蓄積された知識と経験を基に，通信設備の信頼性向上や故障の早期解決だけでなく，新たな技術への対応や保守コスト低減に向けた取り組みを進めていきます．

◆問い合わせ先
NTT東日本
ネットワーク事業推進本部　サービス運営部
技術協力センタ　材料技術担当
TEL　03-5480-3703
E-mail　zairyo-ml @ east.ntt.co.jp