ISSN 0915-2318 平成2年3月5日第三種郵便物認可
令和3年10月1日発行　毎月1回1日発行　第33巻第10号（通巻391号）

NTT技術ジャーナル

10 OCTOBER 2021
Vol.33 No.10

特別企画

東京2020オリンピック・パラリンピックとNTT R&D

特集

現実世界（ヒト・社会）とサイバー世界の新たな共生に関する革新的研究開発

トップインタビュー

大野　友義
NTT サービスイノベーション総合研究所　所長

グループ企業探訪

NTTアーバンソリューションズ総合研究所

from NTTファシリティーズ

雷対策導入を推進する雷サージシミュレーションとSPDの安全を向上するSPD分離器用ヒューズの開発

NTT
技術ジャーナル

10 OCTOBER 2021
Vol. 33 No. 10

CONTENTS

4 トップインタビュー
利他的であれ!
リターンは結果が答えてくれる
大野　友義
NTTサービスイノベーション総合研究所　所長

8 特別企画
東京2020オリンピック・パラリンピックとNTT R&D

9 はじめに

12 新しいスポーツ観戦体験に向けた取り組み

16 セーリング競技 × 超高臨場感通信技術 Kirari!

24 バドミントン競技 × 超高臨場感通信技術 Kirari!

30 マラソン × 超低遅延通信技術

38 特集
現実世界（ヒト・社会）とサイバー世界の新たな共生に関する革新的研究開発

40 ヒトと社会のデジタル化世界を創造するデジタルツインコンピューティング構想の実現へ向けた研究開発

44 人の思考力を理解・再現・拡張するための思考処理技術

50 人と人，人と機械の共生の実現をめざす共生知能研究

53 人と機械の共生をめざすサイバネティックス技術

57 リアルとサイバーの交錯空間を支える要素技術

35 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の技術レガシー　東京2020大会会場で見たムーンショット

61 **from★NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル**
UWB測距技術を用いた
おサイフケータイのタッチレス機能実用化検討

67 **挑戦する研究者たち**

鷹取 泰司
NTTアクセスサービスシステム研究所
上席特別研究員
「実験室」を飛び出して，
実社会で研究成果の「実力」を確かめる

72 **挑戦する研究開発者たち**

切通 恵介
NTTコミュニケーションズ
イノベーションセンター テクノロジー部門
AIリサーチャー
研究と開発のちょうど良いバランスを意識．
ステークホルダの立場と仕事を
「ある程度知っている」のがベター

77 **明日のトップランナー**

熊谷 充敏
NTTコンピュータ&データサイエンス研究所・
NTT社会情報研究所　特別研究員
AIにも人間同様の汎用性・器用さを与える
「転移学習」の研究

80 **グループ企業探訪**

株式会社NTTアーバン
ソリューションズ総合研究所
地域課題の解決と持続可能な社会の
実現をめざした「街づくり」に貢献

84 **from NTTファシリティーズ**
雷対策導入を推進する雷サージシミュレーションと
SPDの安全を向上するSPD分離器用ヒューズの開発

88 **テクニカルソリューション**
移動した地下メタルケーブルの引き戻しの取り組み

Webサイト　オリジナル記事の紹介 …………………… 92
11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サービスイノベーション総合研究所
所長

大野　友義

PROFILE：

1989年日本電信電話株式会社入社．1999年NTTドコモ 次期PHS位置情報システム開発，FOMA導入推進担当，2017年執行役員，2018年NTTドコモ・ベンチャーズ取締役兼務，2020年みらい翻訳社長兼務を経て，2021年７月より現職．

利他的であれ！
リターンは
結果が答えてくれる

NTTサービスイノベーション総合研究所は，すべての“ひと”が幸福であり，安心・安全・健康に自分らしく暮らせる社会の実現に向け，サイバー・フィジカルを融合させたシステムにより，地球・社会・個人の間で調和的な関係が築かれる世界の実現を３つの研究所によりめざしています．社会課題の解決や新たな価値創造に，既成概念を捨てつつチャレンジする大野友義所長に新たなミッションやトップに求められる資質について伺いました．

すべての“ひと”が幸せになれる未来を創り出していきたい

NTTサービスイノベーション総合研究所の所長就任おめでとうございます．まずは同総合研究所について教えていただけますでしょうか．

NTTサービスイノベーション総合研究所（SV総研）では，社会課題の多様化や，サイバー・フィジカル融合といったテクノロジも進展していく今後の社会において，すべての“ひと”が，身体的な健康（wellness）と心・精神の健康（mindfulness）の両面が満たされたWell-being な状態となることを大きな目標とした研究開発に取り組んでいます．

例えば，身体的な健康（wellness）を充実させるために，日常の食のアドバイス，長期の体調管理のための行動変容を促す研究開発，また，サイバー世界上に自分と同じ人格を持ったもう１人の自分（Another Me）をつくり出し，その経験や得た知識を自分自身にフィードバックすることで，精神的にも充実した人生を送れるような世界の実現をめざした研究開発に取り組んでいます．さらには，従来のAIに比べ，人間の脳と同様に，少ない学習処理で，汎用的に多数のタスクが実行可能な次世代のAI研究にも取り組んでいます．そして，このような“ひと”に関する研究開発の成果が倫理的な面も含め世の中に取り入れられるようにする社会システム基盤，また，AI機能が実世界のさまざまな場所に偏在し，自律的に連動するAIコンピューティング基盤などのWell-beingを支える基盤研究に取り組んでいます．これらWell-beingを指向するチャレンジ

ングな研究テーマに対して，従来のやり方，既成の概念にとらわれない姿勢でトライしています．

こうした未来創造に向けて，SV総研は3研究所体制で取り組んでいます．ヒューマンセントリックに基づき，サイバー世界発展の急加速に伴う実世界とサイバー世界の新たな共生に関する革新的研究開発を行う「人間情報研究所」，ICTにより高度化する社会システムや人間社会の変革と発展に向けた，広範な社会価値，セキュリティ，プライバシ，倫理，法律・制度などの融合的な研究開発を行う「社会情報研究所」，そして，規模や複雑さの観点から扱うことが困難であったデータを処理可能とし，人や社会に有用な価値を創出する，革新的な計算機科学とデータサイエンスの研究開発を行う「コンピュータ＆データサイエンス研究所」です．

所長として研究所をご覧になってお感じになったことをお聞かせいただけますか．

私は現職に着任する前は，NTTドコモで次期PHS位置情報システム開発，FOMA導入推進，お便りフォト，しゃべってコンシェル，フォトコレクションをはじめとする技術開発，サービス開発を中心にかかわってきました．2021年7月にSV総研所長に着任してとても驚いたのは，NTTドコモ時代にめざしていた世界と研究所のめざしている世界は同じであったことです．それは「Well-being，すべての“ひと”が幸福であり，安心・安全に自分らしく暮らせる社会」です．ただ，事業会社も研究所もWell-beingの創造という目的は同じなのですが，ビジネスを手掛ける事業会社では直近の課題をどう解決するかということを中心に議論し，一方の研究所は先を見据えています．これは，事業会社はビジネスのために今できることを検討しますが，研究所は世界を大きく変えるために今はできていないことに挑戦するという，スタンスの違いによるものです．

VUCAの時代だからこそ現場へ行き，試行錯誤を繰り返す

NTTドコモ時代のご経験が研究所の仕事に活きていると実感されることはありますか．

スタッフや研究者とはダイレクトコミュニケーションを心掛けているのですが，その際に「サービスってどうやってつくったら良いのでしょうか」と聞かれることがあり，このときにNTTドコモで長年サービス開発に携わってきた経験が活きています．

サービス開発にはいくつかのフェーズがあります．顧客が持つ課題の質を上げるためのプロセスであるカスタマプロブレムフィット（Customer Problem Fit）が最初のフェーズです．続いて顧客の課題を特定して解決し得るソリューションを見出した後に最小限の製品をつくって，実際に役立つかを検証するため試行錯誤をするプロセスを経て，顧客が抱える問題や課題を解決する製品（プロダクト，サービス）を提供している状態，プロブレムソリューションフィット（Problem/Solution Fit）のフェーズへ進みます．そして最後は，自社のプロダクトやサービスがマーケットにフィットしている状態，プロダクトマーケットフィット（Product Market Fit）へと展開させるのです．

ただ，現代は「VUCA（Volatility：変動性，Uncertainty：不確実性，Complexity：複雑性，Ambiguity：曖昧性）の時代」と呼ばれ，あらゆるものを取り巻く環境が目まぐるしく変化し，将来の予測が困難な状況です．これまではある程度の見通しを立てやすかった市場も今では予測不可能になっています．だからこそ試行錯誤を繰り返すしかないと私は考えています．

また，私はサービスをつくるとき，現場へ赴くことを大事にしてきました．あるとき，島根県の雲南市に伺って高齢者のヒアリングをしたことがあります．オンラインツールを使うことや高齢者の皆さんに東京まで来ていただいてお話を伺うこともできるのですが，やはり現地へ赴いてお話を伺うと，言葉や表情だけでは分からない当事者を取り巻く環境を五感で感じることができました．お話を伺って驚いたのが当事者である高齢者の皆さんは，日本としては超少子高齢化が社会問題となっているにもかかわらず，何にも困っていらっしゃらなかったことです．この経験

から社会課題と叫ばれている超高齢化社会においても，生活者，自治体，国家，それぞれの立場によって観点は異なり，取り組むべきことや必要性が変化することを改めて実感しました．

このように実社会をつぶさに見ることは大切です．研究者の皆さんの活動を支援していく中で，自分の研究成果の実社会における反応を見ることを意識付けしていくつもりですし，実際にダイレクトコミュニケーションではサービスをつくって世の中に出し，反応を見てみたいという方もいました．コロナ禍にあって難しいとは思いますが，私は研究者の実社会を意識する姿勢も大切にしていきたいと考えています．

現場主義の所長はトップとしてどんなことを大切にしていらっしゃるのですか．

失敗することが怖くて躊躇するという話はよく聞くと思いますが，まずは「やってみる」ということです．以前，携帯電話で写真を送る「お便りフォト」というサービスを開発していたときのことです．日本初のサービスをNTTドコモが開発し，開発完了の社内手続きを行っているときに，他社が類似サービスを先に報道発表してしまったのです．当時は，報道発表するためには開発完了の社内手続きが終了していることが社内ルールで決められていたため，他社に先を越されてしまったのです．私たちはこれをきっかけに見直しを図り，発売予定の段階でも報道発表ができるようにルールを変革しました．他社が先んじて報道発表をした時点では失敗でありましたが，まず日本初のサービスを「やってみた」ことで，プロセスの課題があぶりだされ事態の改善を図ることができた，つまり見方を変えると成功へとつながったということではないでしょうか．この例に代表されると思いますが，組織にルールはあるけれど，そのルールに研究者は縛られすぎないでいただきたいと思っています．かつての私の上司も（いい意味で）「まずルールは破るためにあるのだ」「ルールは自分でつくれば良い」等と話していましたが，私もこの姿勢を歓迎します．

また，トップという存在は部下が心地良く仕事をするためにあるというのが私の信念です．例えば，ルールのために良い仕事ができないのなら，ルールを変更する権限のある私が変更すればよいと考えます．リスクも含めて総合的にトップが判断し，プラスに動きそうならリスクを引き受けることも私の役目です．

それから，私が大切にしているのは，部下の成長のために「細部まで仕事をせずに任せる」ことです．過去に，自分たちの企画を実行に移すための会議等の資料は，A3用紙１枚に左上の背景から右下の結論まで，起承転結をまとめて作成するスタイルをとっていた時期がありました．上司は，冒頭の背景と最後の結論だけを指示して，資料づくりを部下に任せるパターンが多くありました．部下は背景をかんがみ，他社の動向や自社の強み等を考慮しながら，自由な発想で自分の考えた企画案を結論にマッチするように導いていくことができるのです．このように明確なゴールを示してやり，自由度を高めれば部下は成長できると思います．

大切なのは未来を予測するのではなく創る姿勢

とても心強いです．部下の皆さんを信頼していらっしゃるのですね．これからの時代，研究者の皆さんに求められる資質や姿勢を教えてください．

まず，お話ししたとおり挑戦することと試行錯誤を繰り返すことに加えてバックキャスト的な思考で取り組むことも大切ではないでしょうか．そして，早稲田大学の入山章栄教授が提唱しているイントラパーソナル・ダイバーシティ，つまり「１人の中に幅広い多様性を持つ」ことも重要です．強い専門性（縦軸）に加えて，他の人の専門分野とつながる横軸を持ってHの形をつくれる人材がイノベーションを実現する鍵になります．

それから欧米でよくいわれるノブレス・オブリージュ，NTTの場合で考えると社会的使命をかんがみていただきたいです．私は，IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想のようにNTTには日本を変える力

があると思っています．NTTの研究者は日本から世界を変えていけるポジションにいると思います．ぜひその役割を果たしていただきたいと思います．

そして“熱い想い”，これがビジネスを成功へ導くと信じています．アラン・ケイは「The best way to predict the future is to invent it.（未来を予測するもっとも確実な方法は，それを発明することだ）」と話しています．VUCAの時代だからこそ，アラン・ケイの言葉どおり，あるべき未来の姿や熱い想いを実現する姿勢で研究活動に臨んでいただきたいです．

最後に，一番大事なことは自分を大切にすることです．ヘレン・ケラーと同じ病を抱えている東京大学の福島智先生は「この世に生を受けた人で不要な人は誰1人としていない」とおっしゃいます．人生は短いですから自分を大切に悔いのない生き方をしていただきたいと思っています．ただし，利己的ではなく利他的な姿勢で臨んでください．Give and Give！ リターンは結果が教えてくれます．

（インタビュー：外川智恵/撮影：大野真也）

※インタビューは距離を取りながら，アクリル板越しに行いました．

インタビューを終えて

SV総研のテーマであるWell-beingにもつながるお話ですが，大野所長はクロスフィールズ社が提供するプログラムに参加して，ルワンダに赴かれたことがあるそうです．ジェノサイドの被害を受けた方からの話を聞いた帰りの飛行機で，人の幸せについて考えたと言います．銀河鉄道999のストーリーのごとく，有限であるから懸命に生きることができるのではないか，制約があるからこそ幸せを模索し，幸せを感じるのではないかと思ったと言います．

日々の仕事に加え，こうした経験を背景に自分を大切に生き，家族との思い出をできる限りつくることを大切にしていらっしゃる大野所長．当時11歳だったご長男へのお手紙を見せてくださいました．「人間社会の自分」というタイトルのお手紙には愛情たっぷりに他者への思いやり，努力をする喜びや生きる姿勢がTVゲームを例にして分かりやすく示されていました．大野所長の「トップの存在は部下が仕事をしやすくするためにある」という言葉は，家族ばかりではなくかかわる人すべてに愛情を注いでいるようにも感じます．所長の家族や部下に対する思い，そして，社会に対する熱い想いや使命感を伺った今回，ノブレス・オブリージュについて改めて考えさせられました．

特別企画

東京2020オリンピック・パラリンピックとNTT R&D

カテゴリ1 東京2020を『観せた』NTT R&Dの技術

■ はじめに 9

東京2020大会において実施したNTT研究所の取り組みの全体像，および3号にわたる本特別企画の構成について概説する.

■ 新しいスポーツ観戦体験に向けた取り組み 12

NTT R&Dがめざす新しいスポーツ観戦のかたちについて，超高臨場感通信技術 Kirari!の持つビジョンの重要性を踏まえ概説する.

■ セーリング競技 × 超高臨場感通信技術 Kirari! 16

江の島ヨットハーバーで行われたセーリング競技において，あたかもレースのすぐ近くで観戦しているかのような臨場感を提供する新しいスポーツ観戦体験について紹介する.

■ バドミントン競技 × 超高臨場感通信技術 Kirari! 24

武蔵野の森総合スポーツプラザで行われたバドミントン競技の様子を，あたかもその場にいるかのような臨場感と一体感を提供することをめざした次世代臨場感テクノロジ実証について紹介する.

■ マラソン × 超低遅延通信技術 30

札幌のマラソンコースと東京の応援会場をリアルタイムにつなぎ，沿道応援さながらの臨場感と，選手・観客の一体感を創り出す新しいスポーツ観戦の提案プロジェクトについて紹介する.

※NTTは，東京2020ゴールドパートナー（通信サービス）です.

はじめに

木下（きのした）　真吾（しんご）

NTT人間情報研究所

はじまり，未来提案に向けて

2013年９月７日，東京2020オリンピック・パラリンピックの招致が決まったとき，私は，当時常務取締役　研究企画部門長の篠原弘道さんとニューヨークに出張中でした．空港へ向かうタクシーの中で「東京2020で世界が驚く未来提案を行いたいですね」と話したのを昨日のことのように覚えてます．これが私の中での研究所の東京2020プロジェクト開始のきっかけとなりました．

過去，NTTは，オリンピックをはじめとする世界的イベントにおいて，さまざまな通信技術の未来提案を行ってきました．東京1964オリンピックでは，静止衛星を用いた世界初の生中継に通信技術協力し，テレビ中継の未来を提案しました．1970年に大阪で行われた世界的な博覧会は，世界初のワイヤレス通話システム電話を実験提供し（**図１**），パーソナルコミュニケーションの未来提案を行いました．長野1998冬季オリンピックでは，PHSマルチメディア通信システムを提供し，世界初の腕時計型PHSの実験も行いウェラブルコミュニケーションの未来を提案しました（**図２**）．そして，ロンドン2012オリンピック，2014年にブラジルで行われたサッカーの世界大会では，8KのIP伝送によるライブビューイングに技術協力し，パブリックビューイングの未来を描きました．2020年，こうした過去のレガシーを超えるものを未来提案する．それが私たちのミッションとなりました．

挑　戦

帰国後すぐに各研究所から総勢13名の研究員を集め検討チームをつくりました．このときのアイデアは，夢があり多様でワクワクするものばかりでした．そして，東京2020オリンピックが終了した今，このときの検討資料を見返してみると，数多くのアイデアが実装されていることに驚いています．

こうしたアイデアを東京2020大会へ本格適用し未来提案につなげることをミッションとする「2020エポックメイキングプロジェクト」が，当時のNTTサービスエボリューション研究所内に立ち上がりました．私は2015年からそのプロジェクトリーダを担当しています．そして，この年，当時サービスエボリューション研究所長だった川添雄彦さんがビジョンを創り，阿久津明人さんが研究推進した「超高臨場感通信技術Kirari!」がNTT R&Dフォーラムで紹介されると，一気に東京2020における研究所への期待感が高まっていきました．

その後，国内外の歌舞伎のイベント，米国オースティン開催の世界的テクノロジイベント，女性３人組テクノポップユニットによる世界三都市同期パフォーマンス，新国立競技場柿落としイベント，日本のプロサッカーリーグ・米国プロ野球リーグのライブビューイングなどのさまざまな実証実験を積み重ねながら，東京2020大会本番への提案を続けました．

東京2020オリンピック・パラリンピックに取り組む意義

NTTにとっての東京2020オリンピック・パラリンピックは，スポーツと平和の祭典であると同時に，テクノロジをはじめとするイノベーションの祭典でもあります．NTTの研究所が，オリンピック・パラリンピックに取り組む意義やメリットは３つあると考えます．

①　世界最大のイベントであり，世界中から注目が集まる

図１　1970年世界的な博覧会で実験した世界初のワイヤレス通話システム

図２　長野1998冬季オリンピックで実験した腕時計型PHS

② 要求条件や制約が厳しく，技術力だけでなく，企画力・推進力の向上・実証につながる

③ 大胆なチャレンジができる

まず，①については，オリンピック・パラリンピックは，世界で40億もの人々が視聴するといわれており，東京2020オリンピックの開会式だけでも，約６億人が視聴したとされています．また，オリンピックで採用された最新技術は，世間からも注目され，その後のレガシーとして他のスポーツイベントなどに展開されることも多くなってます．

次に，②は，これまであまり指摘されてきていませんが，私たちが実体験を通じて一番感じていることです．①の裏返しにもなりますが，注目される分，要求されるレベルも高くなります．技術の性能，品質，安全性だけでなく，表現やデザインなど，すべてにおいて世界最高レベルが求められます．さらに，技術だけでなく，企画力，提案力，調整力などすべて高い能力が必要となります．特に，調整範囲は非常に広く，例えば，企画提案では，東京2020組織委員会や国際オリンピック委員会（IOC），国際競技連盟との調整が必要となり，また，Kirari!のような競技映像のライブビューイングを行う場合には放映権者との調整が必要となります．さらに，撮影機器の設置に関してはオリンピック放送機構（OBS）との調整が必須で，システム構築・運用に関しては，東京2020組織委員会のテクノロジ担当やベニュー担当，セキュリティ担当，東京都や自治体，警察などとの調整が必要となります．それぞれの役割や責任があるため，最終的には針の穴を通すような解決策の発見が，突破の鍵となります．また，こうした活動を自社のWebサイトに紹介したり，ニュースリリースを出したりする場合には，スポンサーとしての権利内であるかが厳しくチェックされ，その表現方法などにも工夫が必要となります．NTTの場合，通信サービスがスポンサーカテゴリーですが，研究所の技術は，いわゆる通信回線など狭義の通信サービスにとどまらず，広義のコミュニケーションサービスに及ぶことも多く，その差異について，他のスポンサー権利を侵害しないよう丁寧に説明していく必要があります．

最後に③の「大胆なチャレンジができる」は，研究所にとってもっとも重要な意義だと思います．通常，研究所のテーマ選定では，技術の先進性，ビジネス性，世間からの受容性など，多くの観点から合理的に納得性のあるものが選定されることが多くなります．観点が多ければ多いほど，成功確率が高く，チャレンジ性も低い，平凡な研究テーマに落ち着くようになります．しかし，オリンピック・パラリンピックでは，世間も会社も，ポジティブかつオープンマインドになり，チャレンジを推奨する空気が強くなってきます．その結果，通常ではチャレンジしないような取り組みが積極的に行われ，思いも寄らない結果や価値を創造することがあります．

このような３つの意義を大切にしつつ，私たちは，さまざまな提案活動を２年以上続け，ようやくKirari!のライブビューイングをはじめ，合計10以上の技術適用を獲得することができました．

延期，無観客，そして最後まで諦めずに迎えた本番

しかし，その安堵も束の間，2020年始から拡がりはじめていた新型コロナウイルスにより，東京2020オリンピック聖火リレー開始直前の2020年３月24日に，東京2020大会の１年延期が決定しました．この延期によって，それまでの東京2020大会ビジョンである「史上もっともイノベーティブで，世界にポジティブな改革をもたらす大会」から，簡素化の方向へ大きく見直しが行われました．私たちが提案していたプロジェクトも含めすべてが見直し候補となりました．幸い，技術がもたらすイノベーションの重要性を理解いただき提案プロジェクトはすべて継続することとなりました．

次の懸念は，観客の有無となりました．私たちのプロジェクトは，有観客を前提とするものが多かったためです．そして，大会開幕の約１カ月前の2021年６月21日に，収容定員の50%以内で１万人以下を原則にするという方針が示されました．この段階で，私たちのプロジェクトは大きな影響を受けることなく推進できると安堵したのですが，その約２週間後の７月８日には，一部を除き無観客へ変更となりました．さらに，６月ごろ代々木公園で予定されていたパブリックビューイングに対する反対が大きくなり，最終的には，全国のパブリックビューイングに対する風当たりも強くなり，中止を決断するところが大半となりました．私たちは，準備は完了していますし，観客だけでなく，選手や関係者，メディアを通じた世界への発信を期待し，無観客でも実施しやり遂げることを決めました．

また，３月25日にスタートした，聖火リレーも開始当初は公道での実施が多かったのですが，次第に，公道を中止し点火セレモニーのみとなるケースも多くなりました．また，NTTは，４月13日大阪と，６月30日横浜で，当初5000人の参加者を招待する拡大型セレブレーションイベントを予定していました．こちらも一般の方の招待は中止し，オンライン配信のみとなりました．

新型コロナウイルスが与えた影響

前述の東京2020オリンピック・パラリンピックに取り組む３つの意義は，コロナによって大きく変化しました．それが研究所の活動にどう影響したのか振り返ってみたいと思います．

① 世界最大のイベントであり，世界

表　NTT R&Dの取り組み一覧

カテゴリ	テーマ	NTT R&D 取り組み内容	掲載号
1	東京2020を観せたNTT R&Dの技術	セーリング競技 x Kirari!	2021年10月号
		バドミントン競技 x Kirari!	
		マラソン x 超遅延通信技術	
2	東京2020を彩ったNTT R&Dの技術	聖火リレートーチ記念撮影 x Kirari!	2021年11月号
		聖火ランナー応援演出 x Swarm通信制御技術	
		聖火リレーセレブレーションステージ演出 x Kirari!	
		聖火リレー地域イベント x 音声認識通信技術	
3	東京2020を支えたNTT R&Dの技術	高効率Wi-Fi	2021年12月号
		ネットワークセキュリティ	
		選手を支える技術	
		スタッフを支える技術	
		観客を支える技術	

中から注目が集まる：世界からの注目が高い分，コロナ禍におけるオリンピック・パラリンピックの開催への反対など，ネガティブな注目が大きくなっていきました．その結果，開催の是非，観客の有無が注目のポイントとなり，テクノロジによる未来提案やスポーツエンタテイメントへの期待は非常に低くなっていきました．

② 要求条件や制約が厳しく，技術力だけでなく，企画力・推進力の向上・実証につながる：通常でも厳しい要求条件や制約は，コロナによってさらに厳しくなりました．例えば，観客や関係者のコロナウイルス感染対策の徹底はもちろん，イベントを開催する際，あらゆるバリエーションを想定した準備も必要となりました．例えば，100%観客ありの場合，50%の場合，無観客の場合では，企画内容も大きく変更せざるを得ません．それをいつどのように決定するかは大きな課題となりました．また，世論が激しく変化する中，ニュースリリースなど対外的な発表内容やタイミングについても，関係各社で意見が別れることも多く調整が大変でした．

③ 大胆なチャレンジができる：東京2020オリンピックに対する世間の批判的な意見の高まりや，大会直前の無観客への変更などによる多忙さなどにより，新しいことにチャレンジする機運は非常に低下しました．本来であれば，VR（Virtual Reality）観戦やリモート応援など，無観客を前提としたもっとチャレンジングな取り組みなどあっても良かったかもしれません．そうした雰囲気の中でも，私たちは，通信を活用したリアルタイムかつインタラクティブなリモート応援の重要性を訴え，マラソンとセーリングでの実施を提案しました．関係者には余力がない中，提案を受け入れてくれてなんとか実施にこぎつけましたが，選手に応援が届く瞬間を見たときに，関係者も含めチャレンジして良かったと実感しました．

NTT研究所の未来提案と本特別企画の構成

前述のような紆余曲折を経て，最終的に東京2020大会において実施したNTT研究所の取り組みを紹介します．**表**に示すとおり，3つのカテゴリに分類されます．

① カテゴリ1の「東京2020を観せたNTT R&Dの技術」は，Kirari!などを用いたスポーツ観戦の未来を提案するもので，セーリンング競技，バドミントン競技，マラソンへ技術適用しています．

② カテゴリ2の「東京2020を彩ったNTT R&Dの技術」は，Kirari!やSwarm通信制御技術などを用いたイベントの演出の未来を提案するもので，聖火リレーのセレブレーションイベントなどに技術適用しています．

③ カテゴリ3の「東京2020を支えたNTT R&Dの技術」は，高効率Wi-Fiやネットワークセキュリティ，選手を支える技術，スタッフを支える技術，観客を支える技術について紹介していきます．

本特別企画では，カテゴリ1を10月号，カテゴリ2を11月号，カテゴリ3を12月号に掲載予定です．

木下　真吾

◆問い合わせ先
NTTサービスイノベーション総合研究所
E-mail　svkoho-ml@hco.ntt.co.jp

カテゴリ1 東京2020を『観せた』NTT R&Dの技術

新しいスポーツ観戦体験に向けた取り組み

木下　真吾（きのした　しんご）

NTT人間情報研究所

NTT R&Dがめざす新しいスポーツ観戦のかたち

オリンピックで初めてテレビ中継が行われたのは，ベルリン1936大会でした．テレビといっても，走査線は180本，19インチ相当のスクリーンでした．ベルリン市内の28カ所の会場で100名の観客が，そこに映し出された映像で観戦しました．1940年に予定されていた東京大会では，走査線441本，毎秒25フレーム，縦横比４対５という今のテレビの原型となるような中継が計画されていましたが，第二次世界大戦によって東京大会は返上され，幻のテレビ放送となりました．その後，ローマ1960大会では，欧州18カ国へオリンピック初のテレビ生中継が行われ，米国，カナダ，日本へも１時間遅れですが放送されました．東京1964大会では，オリンピック初の衛星中継が行われ，NTTは，このとき無線中継技術の協力を行いました．その後，札幌1972冬季大会での全競技のカラー中継，ソウル1988大会では初の2Kハイビジョン放送，長野1998冬季大会での全競技2Kハイビジョン中継，ロンドン2012大会での8Kスーパーハイビジョンパブリックビューイングが行われ，NTTも技術協力を行いました．

このように80年間，進化してきた映像中継技術ではありますが，あくまでも四角い枠に囲まれたテレビという装置の中の話であり，スポーツ観戦体験そのものを根本的に変革させるものではありませんでした．NTTは，東京2020大会に向けて，新しいスポーツ観戦体験を再創造すべく超高臨場感通信技術Kirari!の研究開発を2015年から開始しました．Kirari!は，「実際の会場に来られない方にも，あたかも会場にいるかのような体験を届けたい」という想いのもと開始されたプロジェクトで，従来のテレビやパブリックビューイングで視聴する際の四角い枠を取り外し，空間そのものを伝送するという野心的なものです．

2015年以降，Kirari!は，スポーツに限らず，国内外の歌舞伎のイベント，米国オースティン開催の世界的テクノロジーイベント，女性３人組テクノポップユニットによる世界三都市同期パフォーマンス，新国立競技場杮落としイベント，日本のプロサッカーリーグ・米国プロ野球リーグのライブビューイングなどのさまざまな実証実験を積み重ねていきました（**図１**）．

当初，Kirari!は，遠方の方，チケットを購入できなかった方，病気等で外出できない方などを対象としたものでした．しかし，2020年新型コロナウイルスの感染拡大により，人々の移動制限が強くなっていく中，Kirari!が示すビジョンはますます重要になってきました．会場に行きたくても行けない，テレビやスマホで見ても何かが足りない，この感覚は，2020年になってさらに顕著となりました．2020年は，コロナ禍でコンサートやスポーツ等のイベントが中止となり，オンライン配信が一気に拡がった年でもあります．当初は，会場に行けないストレス，物珍しさ，お手軽さなどの理由から，オンライン配信を体験された方が多くいました．しかし，リアルライブを経験されたことのある方の多くは，リアルライブの方が臨場感，一体感，特別感があり良いと回答しています（調査結果の一例「音楽ライブ配信についての意識調査」SKIYAKI社2020年９月調査　リアルライブの方が良い：77%，リアルの方が良い理由，臨場感：92.9%，一体感：93.6%，特別感：69.6%）．

これらの感覚をどのようにして再現できるのか？　私たちは，改めてKirari!の持つビジョンの重要性を認識し，今回の東京2020大会にチャレンジすることとなりました．

図１　これまでのKirari!ショーケーシング

臨　場　感

スポーツ観戦における臨場感とは，あたかも実際の会場にいてスポーツ観戦をしているかのような感覚を意味します．実際の会場では，距離があり豆粒程度にしか見えず，オンラインのほうが見やすいのですが，「そこにいる」という実感がリアルの魅力となります．この「そこにいる」という感覚は，主に２つの要素が重要と考えています．①自分が「そこ（会場）にいる」，②選手が「そこ（目の前）にいる」という感覚です．テレビやスマホは，小さな四角い枠に収まっているため，別の空間と認識してしまい，選手との空間の共有や，会場に入って座ったときの空間の広がりも実感できません．

まず，①自分が「そこ（会場）にいる」感覚，すなわち，まるでスタジアムに座っているかのような感覚をつくり出すために，視野角を覆うような空間の広がりの再現を試みました．Kirari!の超ワイド映像合成技術を活用します．4Kカメラを複数台並べ，つなぎ目が自然となるようリアルタイムに合成し，１枚の超高解像度映像を生成します．横幅数十メートルのディスプレイに，20Kを超える解像度の映像を表示します．4Kや8Kカメラの映像を拡大し，視野角を覆うような巨大なディスプレイに投影することも可能ですが，どうしても映像が荒くなってしまい現場の臨場感を再現することは難しくなります．また，競技に応じた縦横のサイズを自在に変更することも難しくなります．NTTはこれまで，米国プロ野球リーグや日本のプロサッカーリーグ，

フランスでのテニス四大大会，ウィンドサーフィン世界大会，東京で行われる女性向け大規模ファッションショーなどにおいて実験を行ってきました．

今回，東京2020大会では，セーリング競技にこの技術を適用しました．セーリング競技は，観客席とレース会場が離れています．これまで，双眼鏡で観戦する必要がありましたが，Kirari!を用いることによって観客席近くの海に，レース空間をそのまま伝送し，あたかも目の前でレースが行われているような感覚の再現にチャレンジしました（**図２**）．詳細は本特別企画『セーリング競技 x 超高臨場感通信技術 Kirari!』で紹介します．

次に，東京2020大会の主役である②選手が「そこ（目の前）にいる」感覚をつくり出すために，彼らの立体映像化を試みました．Kirari!の任意背景被写体抽出を活用します．グリーンバックがない状態でも，選手の映像をリアルタイムに抽出しホログラフィックに表示します．同じ映像であっても，ホログラフィックに表示されることにより，観客は，選手の存在を強く感じられるようになります．さらに，選手映像以外，例えばバドミントンコートや卓球台などリアルな物体を設置することによって，臨場感はさらに強くなります．これまで，空手，柔道，バドミントン，歌舞伎，米国テキサス州での大規模音楽イベントなどにおいて実験を行ってきました．

今回，東京2020大会では，バドミントン競技にこの技術を適用しました．武蔵野の森総合スポーツプラザで行われている試合を8Kカメラで撮影した映像から選手の映像のみを抽出し，ライブビューイング会場である日本科学未来館へ伝送しました．ライブビューイング会場では，コートやネット，スタンドが本会場同様に設置され，そこに選手映像がホログラフィックに表示され，本会場さながらの臨場感をつくり出しました（**図３**）．詳細は本特別企画『バドミントン競技 ×

図２　セーリング競技 × Kirari!

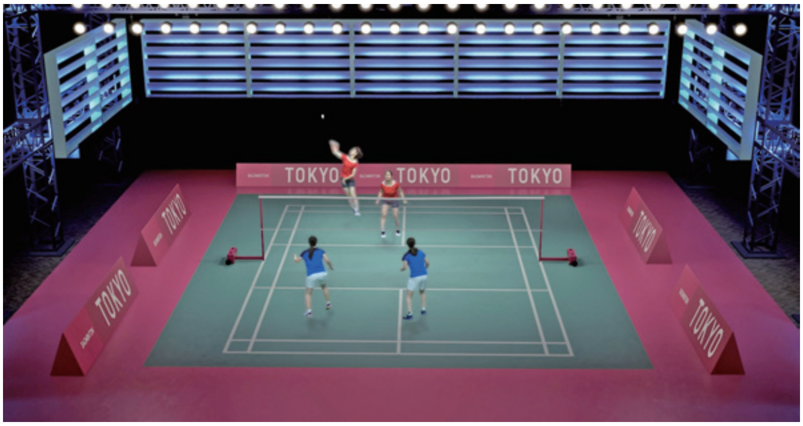


図３　バドミントン競技 × Kirari!

図４　マラソン × 超低遅延通信技術

超高臨場感通信技術 Kirari!』で紹介します．

一 体 感

選手と観客，観客どうしがつながっているという感覚を意味します．スポーツにおいて，つながりは，観客からの応援であり，選手にとって何よりの力になります．また，観客どうしも声援によってつながり，一体となってさらなる感動を生むことになります．2020年に拡大したオンライン配信では，リモート観客の映像をステージ上に表示したり，コールアンドレスポンスを行うなど，一体感を高める工夫がされてきました．しかし，実際には，応援や歓声のタイミングがバラバラで，つながっている感覚をつくり出すには不十分でした．

その理由は，主に通信の遅延やばらつきにあります．一般的に，遅延が数十ミリ秒を超えると音楽セッションは難しく，数百ミリ秒を超えるとコールアンドレスポンスに違和感が生まれるとされてます．遅延時間の構成要素はさまざまで，光の伝搬遅延は100 kmで約0.5ミリ秒，伝送処理遅延は数ミリ～数十ミリ秒，映像の符号化処理は数百ミリ秒になります．さらに，映像編集などが加わり，地上デジタル放送やネットライブ配信では，最終的には数秒から十数秒の遅延も珍しくありません．

今回，東京2020大会では，遅延時間を大幅に低減する超低遅延通信技術をマラソンに適用しました．東京の声援を，毎秒５ｍで走る札幌の選手に遅延なく応援を届け，距離を超えた一体感の醸成にチャレンジしました（**図４**）．詳細は本特別企画『マラソン × 超低遅延通信技術』で紹介します．

木下真吾

◆問い合わせ先
NTTサービスイノベーション総合研究所
E-mail　svkoho-ml@hco.ntt.co.jp

カテゴリ1 東京2020を『観せた』NTT R&Dの技術

セーリング競技 × 超高臨場感通信技術 Kirari!

宮武　隆／清水　健太郎
早坂　知行／青木　政勝
千明　裕／中嶋　淳一
浦田　昌和／小合　健太
吉田　由紀／木下　真吾

NTT人間情報研究所

NTTは，東京2020 組織委員会がオリンピック・パラリンピック期間中に実施した5G（第５世代移動通信システム）を活用した新たなスポーツ観戦体験を提供するプロジェクト「TOKYO 2020 5G PROJECT」において，超高臨場感通信技術 Kirari!の技術提供を行いました．本稿では，江の島ヨットハーバーで行われたセーリング競技において，レース会場間近で撮影した超ワイド映像を江の島の観客席へ伝送することで，あたかもレースのすぐ近くで観戦しているかのような臨場感を提供する新しいスポーツ観戦体験について紹介します．

プロジェクトの概要

セーリング競技では，レースが陸から離れた沖で行われるため，観客は防波堤から双眼鏡を使って観戦する必要がありました．今回，東京2020オリンピック・パラリンピック競技大会のセーリング競技にて，通信技術を活用することによってこの問題を解決し，あたかもクルーズ船の特等席からレースを観戦しているかのようなリアルを超える革新的な観戦スタイルの創造にチャレンジしました．具体的には，水平解像度12Kに及ぶ超ワイドなレース映像を，5G（第５世代移動通信システム）と超高臨場感通信技術 Kirari!を用いて，観客席近くの長さ55 mの洋上ワイドビジョンにライブ中継しました（**図１**）．

今回の取り組み概要は以下のとおりです．

- 期間：2021年７月25日～８月４日
- 場所：江の島ヨットハーバー
- 実施種目：10種目
- 体験者：延べ約4000名（無観客開催につき，選手や関係者のみ観覧）
- 体制：東京2020オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会イノベーション推進室，NTT，NTTドコモ，インテル株式会社の４社で結成した「TOKYO 2020 5G PROJECT」にて実施．NTTは技術主管として，本プロジェクトに参画（**図２**）．

また，超ワイド映像は，メインプレスセンターが設置されている東京ビッグサイトへもライブ中継し，国内での移動など行動制限を課せられているメディア関係者へも現場の臨場感を伝えました（**図３**）．

今回，オリンピックセーリング競技は無観客開催となりましたが，選手へ遠隔にいる家族や知人の応援を届ける「バーチャルスタンド」施策も実施しました（**図４**）．

図１　洋上ワイドビジョンでの中継模様

TOKYO 2020
intel.
NTT
NTT docomo
5G PROJECT

図２　5Gプロジェクトロゴ

システム構成

本取り組みの全体像を**図5**に示します．まず，複数台の4Kカメラを搭載した船やドローンから撮影を行います．撮影した映像は，超高臨場感通信技術Kirari!と高速大容量伝送が可能な5Gを用いて，横12K解像度の超ワイド映像としてリアルタイムに合成し，伝送します．伝送された映像は，セーリング競技観戦場所前の洋上に浮かべた長さ55 mの洋上ワイドビジョンと東京ビッグサイトのメインプレスセンターに設置された横幅13 mのLEDにリアルタイムで表示されます．

技　術

■超高臨場感通信技術 Kirari!

Kirari!は，観戦者が競技会場から離れた場所にいても，あたかも競技場にいるかのような観戦体験を実現するための通信技術です．本プロジェクトではKirari!の技術要素の中で，超ワイド映像合成技術と超高臨場感メディア同期技術を使った映像伝送を実施しました．

（1）　超ワイド映像合成技術

超ワイド映像合成の処理フローを**図6**に示します．まず，できるだけ各カメラの光軸を合わせ，隣り合う映像間で撮影範囲が20～40%程度重複するようにカメラを設置した状態で映像を撮影します．実際の合成処理を行う前に，事前処理として，各カメラの視差を補正するために，基準となる静止画を用いて，抽出した特徴点から射影変換行列を算出します．セーリングの場合は，レース直前に待機している競技艇などを撮影して基準画像としました．これを実現するため，基準画像取得から，ワイド合成パラメータの決定までの一連の流れを，今までより効率化（画像を圧縮し，伝送時間を短縮するなど）しました（従来の時間の3分の1ほどに短縮）．次に合成処理時は，各映像フレームに対して，算出した射影変換行列を使って視差の補正を行いつつ適切な映像の結合線（シーム線）を見つけること（本処理をシーム探索）で，映像フレームを合成します．合成処理においては，「同期分散処理」「シーム探索の高速化」「GPU（Graphics Processing Unit）活用」の3点を特徴としています．

同期分散処理では，リアルタイムに膨大な映像処理を実行するため，入力・出力条件により合成処理を複数サーバに分散します．この際，各サーバにおいて合成タイミングを同期させるために，入力時に映像フレームに対して同

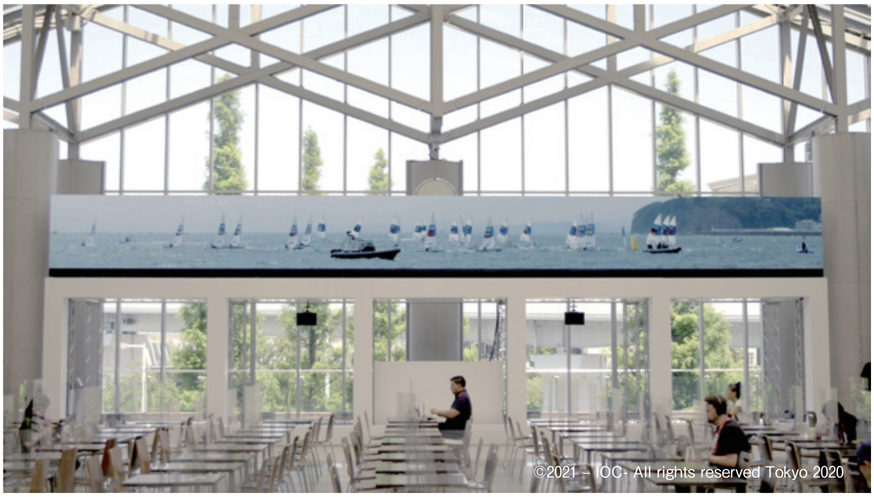


図3　メインプレスセンターへの映像中継

図4　バーチャルスタンド

じタイムスタンプを付与し，このタイムコードを後段のエンコーダ等の伝送装置に伝搬させることで，システム全体で同期制御を可能としています．なお，タイムスタンプは，撮影装置等で付与され入力映像に重畳されたタイムコードを利用する方法と，映像が入力された際にタイムコードを生成する方法の2つから選択することができます．

シーム探索の高速化では，シーム探索時に映像フレームを解析して得られる動物体の動きや形を用いることに加え，過去の映像フレームのシーム位置を用いることによりシーム位置のバタつきを防止します．この際，過去の映像フレームのシーム探索が終わってから次のフレームのシーム探索を行う方法ではリアルタイム合成を実現することが難しくなります．そのため，事前探索として縮小した映像フレームに対してシーム探索を行い，その事前探索結果を次のフレームにおけるシーム探索で利用する2段階シーム探索を行うことにより，リアルタイム合成を可能としています．

GPU 活用による高速化では，ほぼすべての映像処理をGPU 上で実行することにより，処理の集約化・高速化を達成しています．具体的には，GPU

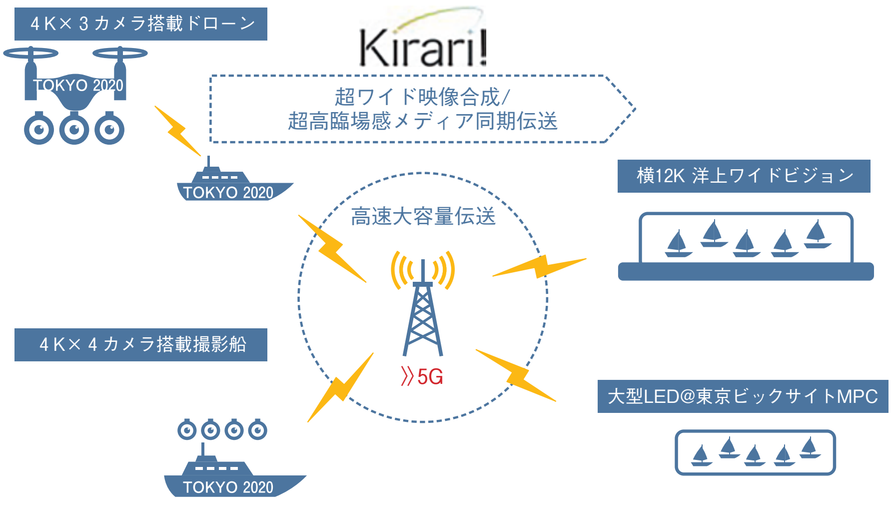


図5　取り組み全体像

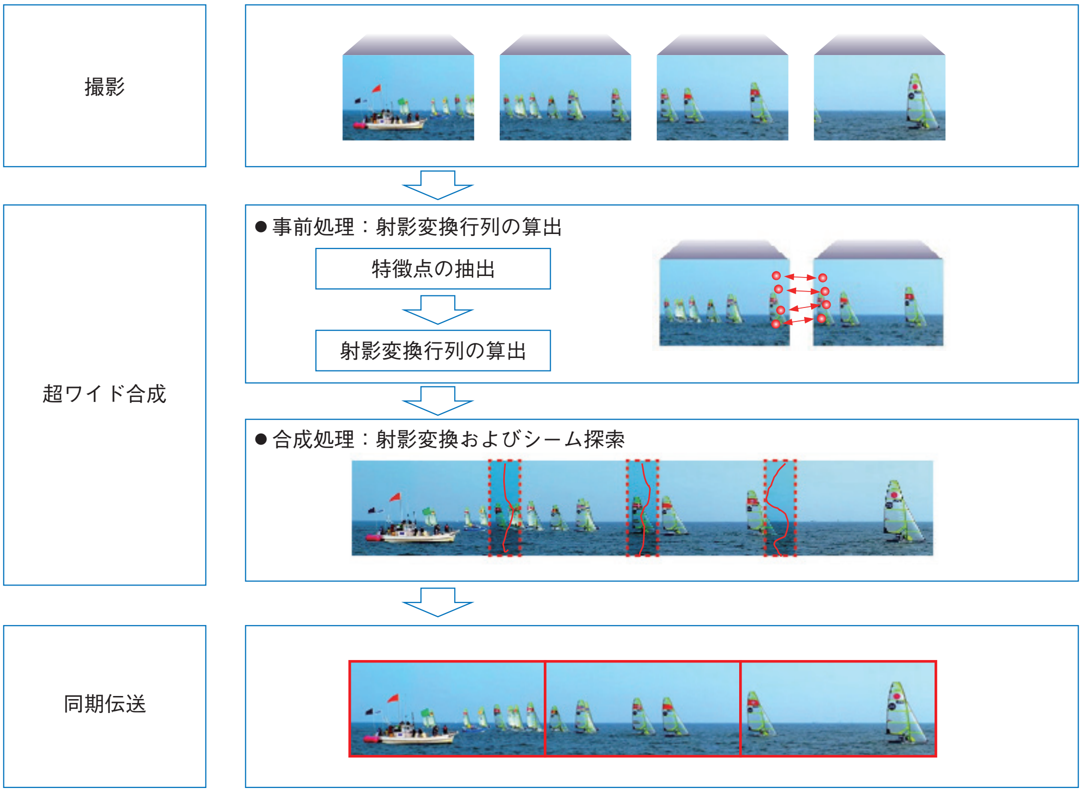


図6　超ワイド映像合成技術の処理フロー

を利用することにより，SDI ボードから入力された映像を最小限のGPU コストでGPU に転送し，その後の映像処理をGPU で実行します．その結果，例えば，4 台の4K カメラからの映像より12K（4K × 3）の超ワイド映像を合成する場合，GPU を使わない場合に比べて必要となるサーバ台数を3分の1（6台→ 2 台）に削減することができました．

(2) 超高臨場感メディア同期技術（Advanced MMT）

超ワイド映像合成技術によって生成された映像は，一般的な表示機器，エンコーダ・デコーダで扱うことができるように，複数の4K 映像に分割して伝送を行います．今回は横12K，縦1Kの映像のため，3つの4K映像に分割しました．Kirari!では，分割されて伝送される個々の映像・音声の再生タイミングを完全に同期させる手段として，超高臨場感メディア同期技術（Advanced MMT）を用います．超高臨場感メディア同期技術（Advanced MMT）は，メディア伝送規格MMT（MPEG Media Transport）に準拠したUTC（Coordinated Universal Time）ベースの同期制御信号の活用によって，複数映像・音声を低遅延に同期伝送する技術です．本技術により，ワイド映像だけでなく，特定選手を追跡するような複数アングルのカメラ映像（2K等）を同期して表示することや，各カメラ映像・音声が伝送されるネットワーク（専用線やインターネット，無線LAN等）や端末処理による遅延の違いを吸収することが可能となり，複数の映像・音声が完全同期した超高臨場感な視聴体験を実現できます．

■無線通信技術

東京2020オリンピック・パラリンピック競技大会でのセーリング競技は，6つの海面でレースが実施されました（**図7**）．本プロジェクトでは，Enoshima海面とZushi海面の2海面を実験海面としました．Enoshima海面では，撮影船からの超ワイド映像の撮影を，Zushi海面では撮影船に加えドローンを用いた超ワイド映像の撮影を行いました．両海面近くには，図中の位置に5Gの基地局が設置されました．

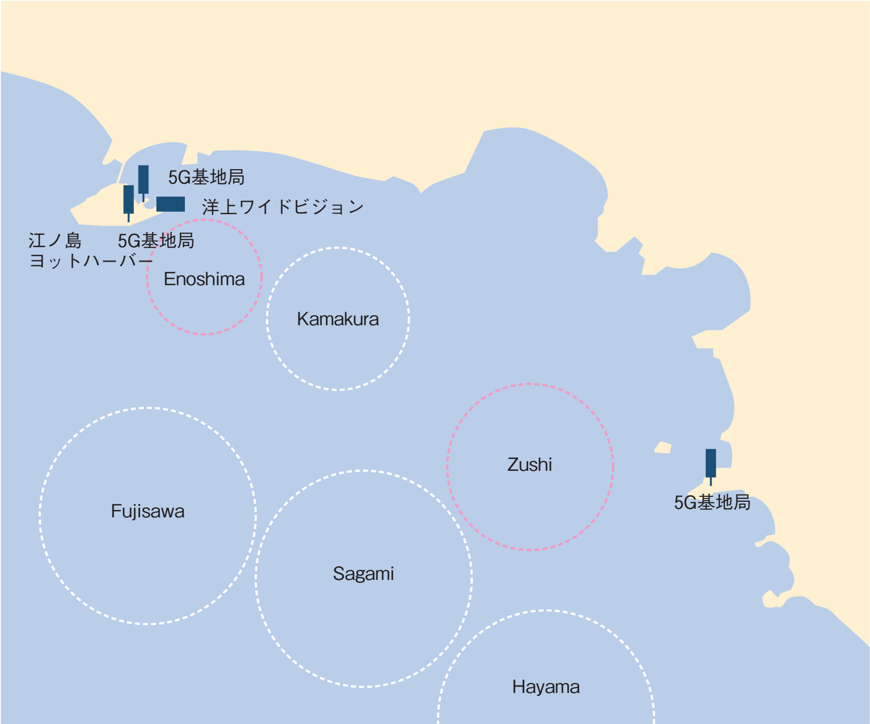


図7　セーリング競技でのレース海面図

本プロジェクトで用いたネットワークの構成を**図8**に示します．船から陸に向けての映像のアップリンク，および映像編集拠点からバージ船のLEDへのダウンリンクなど，NTTドコモの5G回線を軸に，通信帯域，距離，指向性など特性が異なる複数の無線通信も活用しました．またドローンの飛行コントロール，バックアップ映像や船上に配置されたサーバの制御などには，NTTドコモの4G回線を用いました．

(1) 5Gのダウンリンク伝送

映像編集拠点からバージ船LED間の映像伝送は，NTTドコモの5Gアクセスプレミアムサービスにて映像伝送を実施しました．受信端末は市販のCPE端末を利用しました．大会期間中200 Mbit/sの映像伝送を8時間以上連続運転し，安定した映像伝送を実施しました．

(2) 5Gのアップリンク伝送

ドローン映像の伝送を中心にNTTドコモの5Gアクセスプレミアムサービスを利用しました．受信端末は市販のCPE端末を利用しました．平均80 Mbit/sの帯域にて，2K映像×6本の映像を伝送しました．さらにバックアップ用に，NTTドコモの4Gサービスを利用し，5隻の船やドローンから，トータル50 Mbit/sの映像伝送を実現しました．

(3)　ドローンからの映像伝送

今回撮影を実施したドローンの構成を**図 9** に示します．１台のドローンに4Kカメラを３台搭載しました．ドローンで撮影した4K映像３ストリームを，ドローンの離発着を行うドローン船に向けて60 GHzの無線を用い，映像を伝送しました．その際３本の映像ストリームに対して，時間同期を行い伝送しました．ドローン船上ではワイド合成を実施し，5Gアクセスプレミアムと Advanced MMTにより，江の島の映像編集拠点まで同期伝送を実施しました（図８）．

ドローンとドローン船間の映像伝送には，NTTアクセスサービスシステム研究所が開発した技術により，60 GHzによる無線通信を実現しました．利用した無線機器は，常時アンテナ面を向け続ける必要があるため，より安定した無線通信を実現するため，アンテナ

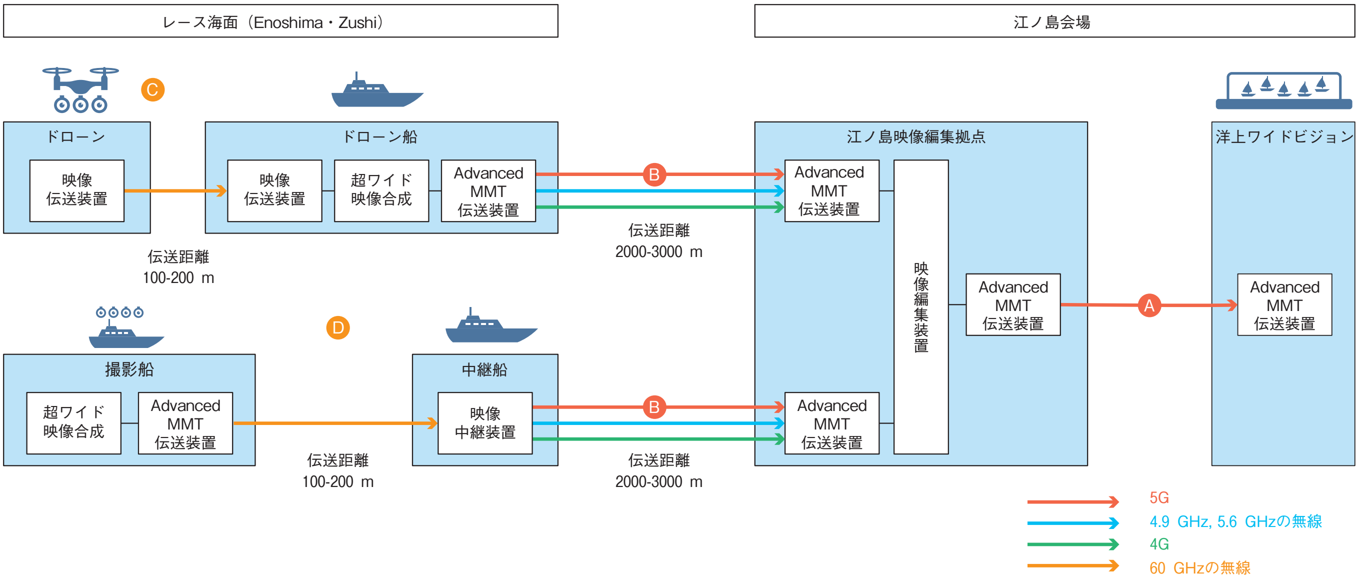


図８　ネットワーク概要図

図９　ドローンのシステム構成

の方向をRTK（Real Time Kinematic）のGPS情報を用いて自動制御し，ドローン方向に常にアンテナを向ける技術も開発しました．またドローンの撮影角度によっては，機体自身が無線通信の死角となることがあり，電波強度に基づきアンテナを自動切替する技術を開発しました．これら技術により，ドローンの撮影に自由度を与えながら，ドローンとドローン船間の安定的な映像伝送を実現しました．

またドローンのセキュリティ対策として，ドローンの飛行コントロールは4Gと2.4 GHzの２つの無線を利用し，２重化を行いました．

(4)　撮影船からの映像伝送

撮影船からの映像伝送については下記要件がありました．

① レース海面が，天候や風向きによって，直前に変更となることもあるため，撮影船は，柔軟に移動できるようにする必要がある．

② レース海面によっては，２～３km無線伝送を行う必要がある．

これらを実現するため，撮影船とは別に，陸まで長距離無線伝送を行う中継船を用意しました．撮影船と中継船間の映像伝送には，伝送距離は短いが大容量伝送が可能な60 GHzの無線を使いました．撮影船が柔軟に移動できるように，アンテナの指向性は比較的広角な無線を選定しました．中継船から陸に向けての映像伝送は，5Gに加え，4.9 GHz，5.6 GHzの無線通信も補助として利用しました（図８）．これらの無線通信は，長距離伝送が可能である反面，アンテナ指向性が強くなるため，常に送受信機のアンテナ面を合わせる必要があります．今回，２つのアンテナ制御機構を開発しました（**表，図10**）．

船の選定にも工夫を行いました．撮影船は競技近くでの撮影を実施したいため，競技艇の航行に影響を与えない小型漁船を選定しました．中継船には数キロの無線伝送を行うため，海上でも揺れをおさえることが可能な大型漁船を選定しました．

表　利用した２つのアンテナ制御方式

方式	内容	利用した無線
方式１ リモート操作	遠隔制御可能な監視カメラとアンテナを一体成型し，監視カメラ映像を用いたアンテナ制御をリモートで実施．具体的には船から陸向けの監視カメラ映像を使い，陸アンテナに向けた方向を遠隔操作し，無線通信を実現	アンテナ受信角度が挟角の中でも比較的大きい（30度）の無線機に利用
方式２ アンテナ自動制御	RTKによるGPS情報を用いて，船と陸に設置したアンテナの場所を常に互いに送り合い，アンテナが常に相手に向くように自動制御	アンテナ受信角度が挟角の中でも比較的小さい（10度）の無線機に利用

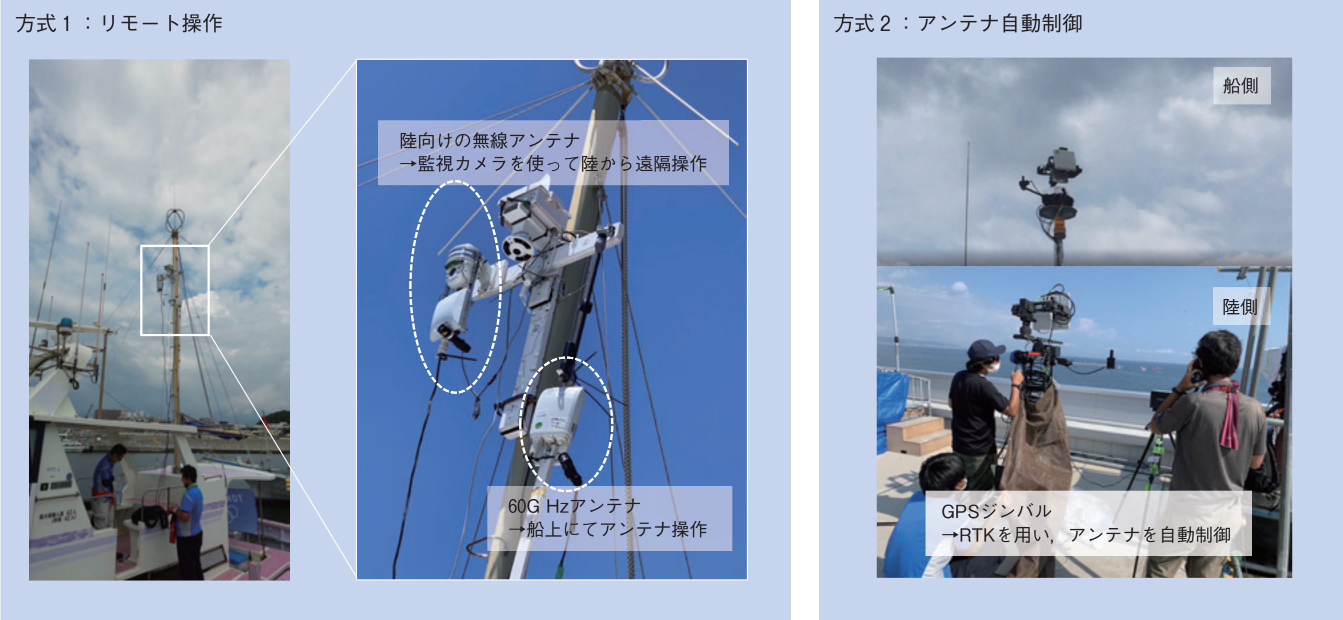


図10　２つのアンテナ制御機構の利用模様

陸側のアンテナについても海岸線かつ高い建物の屋上が確保できない場合がありました．その際，車両から高さを確保できるポールを持つ車両を確保，頂上にアンテナを設置することで，アンテナの見通しを確保しました．

60 GHz帯は，100 mの距離（船どうしの距離）で，100〜200 Mbit/sの通信速度を実現し，4.9 GHz帯や5.6 GHz帯は，2〜3 km（船―陸間）の距離で，50〜150 Mbit/sの通信速度を実現しました．通信速度は，波の状況に大きく依存しました．特に，台風8号接近中は波が高くなり，無線通信機のアンテナ制御が難しく，大きく通信速度が低下しました．

■洋上ワイドビジョン

あたかもレースのすぐ近くで観戦しているかのような臨場感を創り出すためには，①臨場感の高い映像と，②その映像を活かす空間が必要となります．

①に関して，リアルサイズの競技艇の映像，視野を覆い尽くすディスプレイのサイズ，高い解像度，ドットが目立たないディスプレイが必要です．今回，実装した洋上ワイドビジョンは，高さ5 m，幅55 m，水平解像度12K，垂直解像度1Kの仕様であり，ピッチサイズは4.8 mmですが，**図11**のように観客席から40 m離れた場所に設置し，ほぼ網膜解像度を超えているため，映像の荒さは目立ちません．また，②を実現するために，ディスプレイを配置する空間も重要となります．ディスプレイは，四角い切り取られたディスプレイであるため，どうしてもテレビのような不自然な感覚が残ってしまいます．これを洋上に浮かべ，ディスプレイの境界を自然の空や海と融合させることで，自然な臨場感を創り出すことができます．

洋上ワイドビジョンを設置するにあたり，LEDを設計構築する専門メンバーだけでなく，海上の揺れを踏まえた構造計算を実施する専門メンバー，船を航行，係留する専門メンバー，海事代理士，気象予報士などで体制を組み，大会本番での気象を考慮した検討を実施しました．

具体的には過去10年間の江の島の7〜8月の気象データを収集し，風速・風向・波高などを把握し，設計したLEDの強度，および係留時の固定方法の安全性を評価して，ワイドビジョンの避難基準を定めました．避難基準としては，風速25 m以上，波高1.6 mを超えてさらに高くなる場合を条件とした運用を行いました．この条件は上記のLEDの強度や係留時の船の固定強度での判断のみならず，江の島からお台場へ避時する際の江の島，およびお台場へ戻る途中の三浦半島の海上の気象も専門メンバーと熟慮を重ね決定しました．大会時に発生した台風8号についても，気象情報を常に把握，上記基準に基づき避難実施判断を行いました．結果として，避難不要と判断し，事故なく運用を実施することができました．

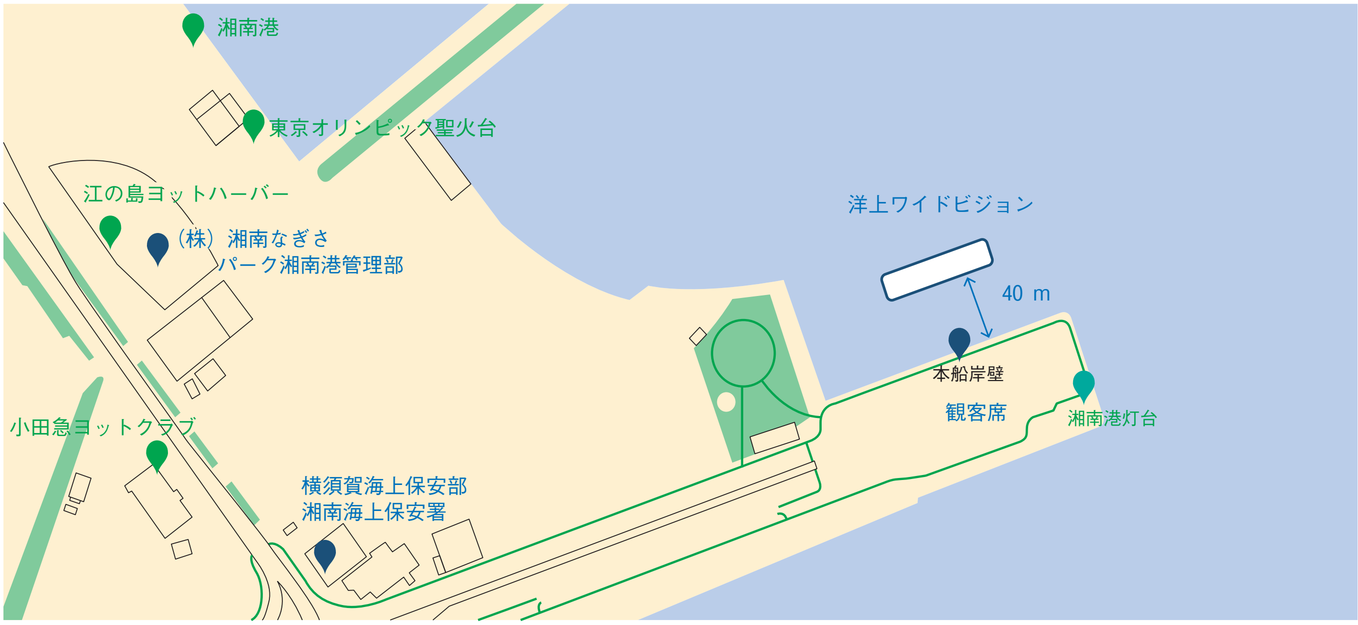


図11　洋上ワイドビジョンの位置

■波の揺れ補正技術

船での撮影は海上での撮影となるため，波の揺れにより映像に揺れが発生します．この揺れに対して，リアルタイムで波の揺れを補正する技術を開発しました．具体的にはオプティカルフローを用い，映像の揺れ方向を検出し，リアルタイムで補正を行い，揺れをできるだけ抑える技術を開発しました．

結　果

大会期間中，大きなトラブルなく，映像中継を実施しました．無観客開催でしたが，選手や関係者を中心に毎日数100人程度の方に体験していただきました．多くの方から，「これまでに体験したことがない高い臨場感に驚いた」「一般の方にも是非見てもらいたかった」「レースの状況が非常に分かりやすくなった」「こうした観戦スタイルが一般的になれば，セーリングファンも一気に増えるのに」など，驚きや感動，今後への期待の声が多数寄せられました．特に，私たちがめざしていた，「あたかもそこでレースが行われているような臨場感」については，海に浮かぶ洋上ワイドビジョンに表示された迫力あるリアルサイズの競技映像が，実際の海面や空などリアルな空間と融合されることによって，まさに「レース空間そのものがワープしてきた」体験を創り出せたように思います．

技術的には，5G含め無線通信が安定しない場面もあったこと，船やドローンからの撮影では，波やエンジンの振動を完全に吸収できず，映像が乱れたことなど，課題はまだありましたが，オリンピックという非常に高いレベルが要求される環境で素晴らしい実績を残せたと思います．

まとめ

商用5Gと研究所が開発した超高臨場感通信技術 Kirari!を用い，超ワイド映像の中継を実施しました．横解像度12Kの超ワイド映像は，江ノ島会場に浮かぶ55 mの洋上ワイドビジョンと東京ビッグサイトのメインプレスセンターにて表示され，選手や関係者，海外のメディアの方が体験され高い評価をいただきました．本プロジェクトで使用した通信技術を用いれば，同じ競技会場内にとまらず，海外も含めた遠隔へのライブビューイングも可能となります．コロナ禍において，NTTがめざすリモートワールドの実現に向けてのショーケースと位置付けることができます．今後は5G，さらにはIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）のオールフォトニクス・ネットワークをインフラとして，スポーツやエンタテインメント分野を中心に，さらなる通信技術の研究開発を進めていきます．

謝　辞

プロジェクトを実施するにあたり，一緒に検討を進めていただいた5G PROJECTメンバーである東京オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会イノベーション推進室，インテル株式会社の皆様に感謝します．また本施策を実施するにあたり多大なる協力をいただいた東京オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会各FAの皆様，ワールドセーリング様，および日本セーリング連盟様，撮影に必要な船を提供いただいた片瀬江ノ島漁協，腰越漁協，小坪漁協の皆様に感謝します．

（上段左から）宮武　隆/ 清水　健太郎/ 早坂　知行
（中段左から）青木　政勝/ 千明　裕/ 中嶋　淳一
（下段左から）浦田　昌和/ 小合　健太/ 吉田　由紀

◆問い合わせ先
NTTサービスイノベーション総合研究所
E-mail　svkoho-ml@hco.ntt.co.jp

カテゴリ1 東京2020を『観せた』NTT R&Dの技術

バドミントン競技×超高臨場感通信技術 Kirari!

NTTは，東京2020組織委員会が主導する「TOKYO 2020 未来のスポーツ観戦プロジェクト」において，超高臨場感通信技術 Kirari!の技術協力を行いました．本稿では，武蔵野の森総合スポーツプラザで行われたバドミントン競技の様子を遠隔会場（日本科学未来館）へホログラフィックに映像伝送することで，あたかもその場にいるかのような臨場感と一体感を提供することをめざした次世代臨場感テクノロジ実証について紹介します．

武藤（むとう）　誠（まこと）／長谷川（はせがわ）　馨亮（けいすけ）
並河（なみかわ）　大地（だいち）／紺谷（こんや）　精一（せいいち）
平地（ひらち）　信博（のぶひろ）／中村（なかむら）　泰治（たいじ）
鈴木（すずき）　健也（けんや）／木下（きのした）　真吾（しんご）

NTT人間情報研究所

プロジェクトの概要

ライブの魅力は，実際の会場に行ったときに感じる臨場感や一体感を体験できることです．これは，スポーツや音楽ライブなど，アスリートやアーティストが平面の中の像としてではなく，目の前にいること・同じ空間を共有していることの感覚を持てることと言い換えることができます．オンライン配信・ライブビューイングでは，画面のサイズや解像度などが飛躍的に向上してきましたが，依然として平面の映像しか送ることができません．そのため，アスリートのその一瞬にかける緊張感，身体の力強さと美しさ，観客とアスリートの一体感などの臨場感を十分に伝えきれてはいません．本プロジェクトでは，バドミントン競技を対象に，超高臨場感通信技術 Kirari!を用いてホログラフィックな映像伝送を行うことで，競技会場に行けない人にも，あたかも会場にいるかのような体験を届けることを目的とした技術実証を行いました（**図 1**）．

当初，一般参加者を招いてのライブビューイング実証を計画していましたが，新型コロナウイルス感染予防の観点から中止し，2021年 7 月30～31日，日本科学未来館において，メディア向けに「スポーツ観戦の未来～次世代臨場感テクノロジー実証プログラム～」を公開しました．

システム構成

本技術実証における全体のシステム構成を**図 2** に示します．東京2020オリンピックのバドミントン競技会場である武蔵野の森総合スポーツプラザに，8Kカメラを設置し（**図 3**），撮影したバドミントンの試合映像を，1 Gbit/sのネットワークで中継拠点に送ります．中継拠点では，Kirari!の要素技術である「任意背景リアルタイム被写体抽出技術」を用いて，送られてきた8K映像から選手やシャトルの映像のみを抽出します（**図 4**）．抽出映像と，OBS（Olympic Broadcasting Services）提供の映像や音声など複数の映像を，「超高臨場感メディア同期技術（Advanced MMT）」[(1)]を用いて，遠隔会場である日本科学未来館へ同期伝送します．

遠隔会場では，ホログラフィック投影装置を備えた実物大のコートと約100席

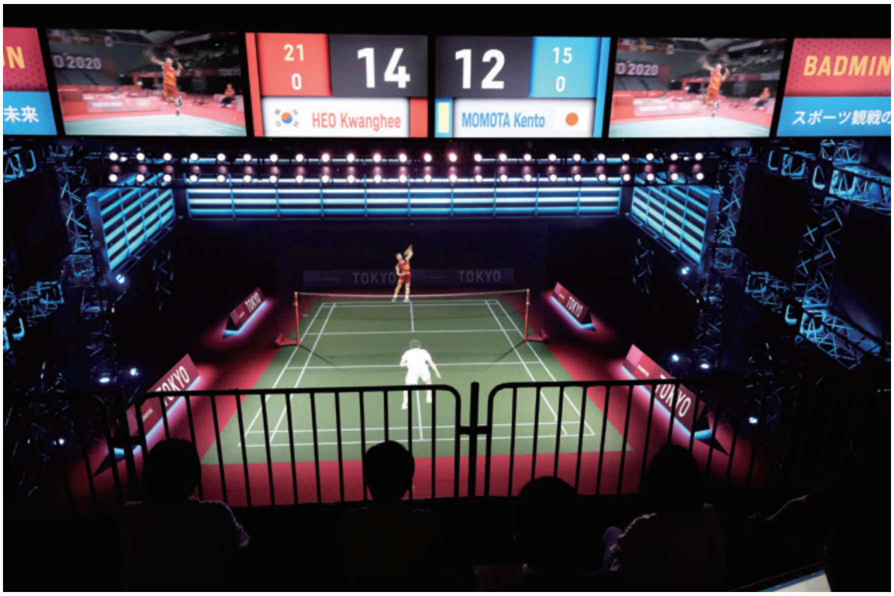


図 1　東京2020バドミントン競技のKirari!技術実証の様子

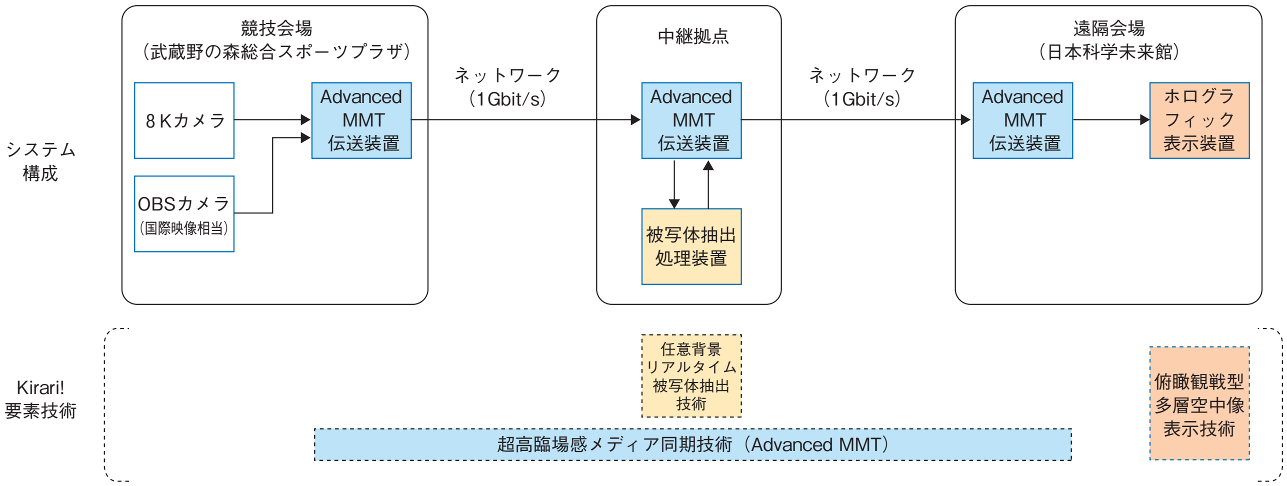


図２　全体のシステム構成

図３　競技会場に設置した8Kカメラ

図４　中継拠点の様子

の観客席（**図５**）を設置し，競技会場そのものを再現しました．伝送された選手とシャトルの抽出映像は，「俯瞰観戦型多層空中像表示技術」により，手前の選手はネットの手前に，奥の選手は奥に，ホログラフィックに表示されます．その結果，リアルなコートに2人の選手が降り立ったかのような空間を実現しました．

Kirari!の技術

■任意背景リアルタイム被写体抽出技術

「任意背景リアルタイム被写体抽出技術」は競技の撮影映像から，選手やシャトルなどの被写体映像のみを抽出する技術です[(2)]（**図６**(a)）．

通常，映像の中から被写体のみを抽出する場合，グリーンバックやブルーバックなどの背景を用意し，クロマキーによりその背景色を消す手法が取られます．本技術は，特別な背景環境を用意することなく，競技会場のそのままの映像からリアルタイムに被写体のみを抽出することが可能です．

今回，バドミントン競技への適応にあたり，５つの技術改善を行いました．

⑴　コートの手前と奥の選手の個別抽出

従来技術では，手前と奥の選手を分けて抽出することができませんでした．個別抽出を行うために，バドミントンコートの空間を模擬した深度情報を入力し，奥と手前の選手について同時に学習・推論できる深層学習モデルを考案しました．これにより，バドミントンのようにコートの手前と奥で選手が分かれる競技においても，個別に選手を抽出することを可能とし，安定的かつ高精度な被写体抽出に成功しています（**図７**）．

⑵　選手映像の解像度・フレームレート向上

従来技術では，4K・30fpsまでにしか対応していませんでした．4Kカメラでの撮影では，選手像の解像度が最大でも約640ピクセルとなり，空中像として等身大に拡大投影した際に荒さが目立ってしまいます．また，30fpsでは，スマッシュ等の速い動きに追従できず途切れ途切れの映像となってしまいます．今回は，処理する映像フレームの多重化や計算リソースの平滑化などの工夫を行い，8K・60fpsカメラ対応を実現しました．その結果，選手の解像度を930ピクセル・毎秒60フレームのスムーズな高精細映像にすることができました．

⑶　微小かつ高速移動するシャトルの安定的な抽出

映像中に映るシャトルは，非常に小さくかつ高速に移動するため，これまでの画像認識手法では，ノイズが多くちらつきが目立ったり，シャトルの軌跡が途切れがちになったりと十分ではありませんでした．今回，シャトル専用の抽出方式を開発し，正確なシャトル位置の検出と，さまざまな形に変形するシャトルの高精度な抽出に成功しました．シャトル位置の検出には，映像に映り込むシャトルと同様の小さな物体（客席のガイド照明など）の影響を排除するため，連続したフレームを畳み込みニューラルネットワーク（CNN）に入力し，シャトルの位置情報および移動情報を同時に学習させる方式を考案しました．CNNから得られ

図５　遠隔会場における投影装置，構築の様子

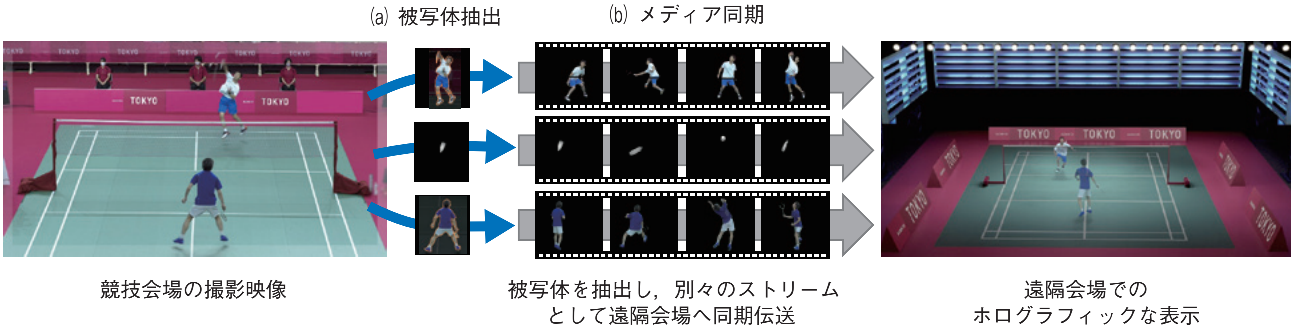


図６　Kirari!の被写体抽出，メディア同期の流れ

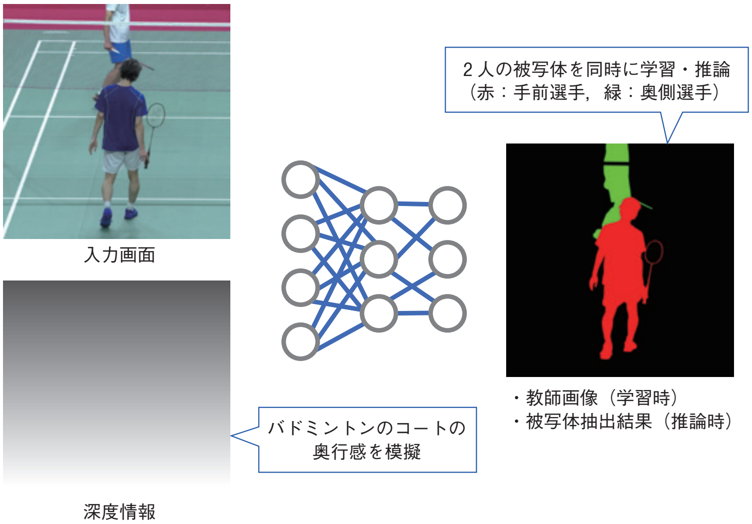


図７　コートの手前と奥の選手の個別抽出の仕組み

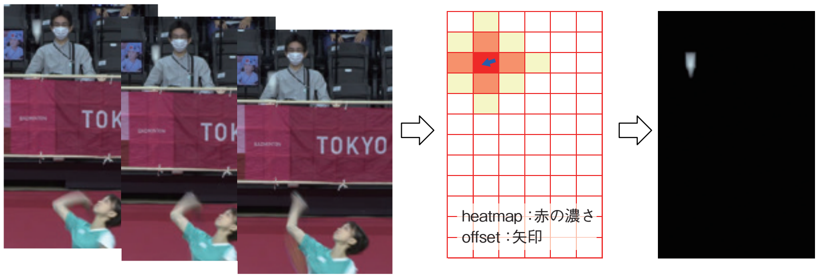


図８　シャトル抽出の仕組み

る大まかな存在位置（heatmap）と補正値（offset）を基にシャトル位置を求めます（**図８**）．シャトルの抽出には，検出されたシャトル位置・形状と，次フレームにおけるシャトル予測情報（位置・形状・モーションブラーの程度）でフィルタリングして再現率を高め，背景差分法により生成します．これらにより適合率90.7%，再現率90.3%を達成し，観戦に用いることができるレベルを達成しました．

(4)　選手映像の欠落部分の自動補完

図９のように，奥の選手がネットと重なった場合，選手像に黒い帯状の欠落が発生します．欠落部分の上下の色情報から，欠落部分の色を推定・補完することにより，欠落のない映像をつくり出します．

(5)　選手の影の自動生成

実際の会場で現れる選手の影を，遠隔会場にも再現することで，より自然な選手像をつくり出すことができます．選手の抽出結果を基に，映像から影を検出しました．この際，ジャンプの高さや競技会場の照明条件から，選手の影が存在し得る範囲を定めることにより高速化を図っています．

■**超高臨場感メディア同期技術**

「超高臨場感メディア同期技術（Advanced MMT）」はメディア伝送規格MMT（MPEG Media Transport）をNTTが独自に拡張した技術で，映像，音声，照明情報といった複数の連続するデータ（ストリーム）を，時刻的な同期を保ったまま伝送できる技術です．今回の取り組みでは，競技会場で撮影した競技映像，音声，競技映像から選手だけを抽出した映像，シャトルだけを抽出した映像，OBSから提供された映像，など複数のストリームを本技術によって同期伝送し，遠隔会場で必要なデータを適切なタイミングで表示することで，臨場感の高い空間表現を実現しました（図６(b)）．

■**俯瞰観戦型多層空中像表示技術**

あたかも競技会場で観戦しているかのような感覚を体験いただくために，物理的に実会場に似せた空間を構築しました（**図10**）．具体的には，実物大のコートおよびネットを設置し，そこを見下ろす角度も同じとなるよう観客席の高さも揃えました．そうした空間の中にホログラフィックな選手を実会場と同じ場所に出現させるための技術が，「俯瞰観戦型多層空中像表示技術」です．

ペッパーズゴーストと呼ばれる従来のホログラフィック表示手法では，ディスプレイの映像を斜め45度に設置したハーフミラーに反射させることで空中像を表示させます．この手法では空中像は単一の層のみに表示が制限されます．しかし，単一層の表示では，バドミントンのように，ネットを挟んで，手前と奥の選手を異なる場所（層）に表示することはできません．

本技術では，実際の競技会場に近い高

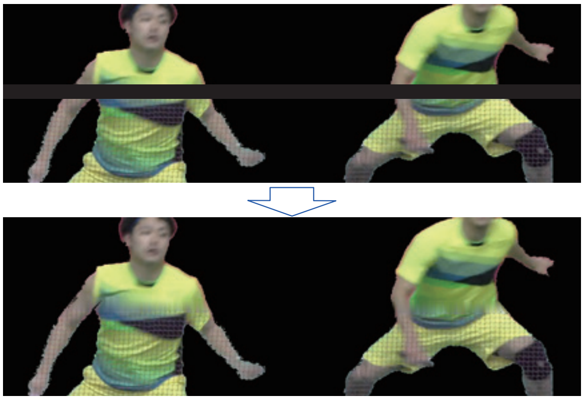


図９　ネットの黒帯状部分の推定

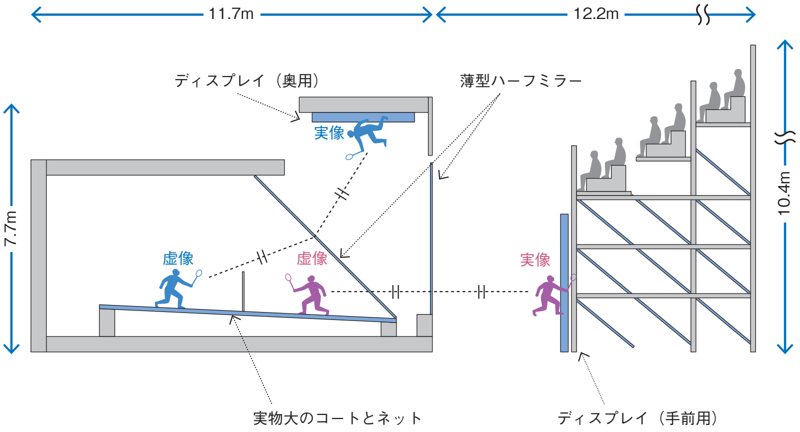


図10　装置のイメージと空中像表示の例

さの観客席を設置し，そこから見下ろす状況下において，手前と奥の選手が，ネットを挟んでリアルに見えるように，コート，ネット，２枚のハーフミラー，LEDディスプレイ・プロジェクタなどの配置を最適化しています．これにより手前と奥の選手は，それぞれ正しい位置でホログラフィックに表示できるようになります．

しかし，本技術では，２つのハーフミラーを用いているため，その間を行き来するシャトルが，不連続となってしまう課題が発生します．この課題は，２つの層が物理的に分離しているという構造的な問題に起因するため，完全に解決することはできません．より自然に見せるために，シャトルの表示層を切り替えるタイミングの試行錯誤を重ねた結果，選手がシャトルを打った瞬間，別の選手側に切り替えるタイミングが適切であると判断しました．そのタイミング判定には，コート側面映像の解析によるシャトル位置の判定，競技音声からの打球音検出によるシャトル打球タイミングの判定，手動判定を含む複数の判定方法を統合することで，ダイナミックなシャトル映像表示位置の切り替えを可能としました．

取り組みの結果

本技術実証は，バドミントンの決勝トーナメントが行われる2021年７月30日～８月２日の４日間行いました．予選などの録画映像だけでなく，男子ダブルス，女子シングルス，男子シングルスのライブ中継を，報道関係者などに体験いただきました．体験者からは，高い臨場感を体験できたという感想を多く得ることができました（**表１**）．

実物のコートやネット，そこに映し出された等身大のホログラフィックな選手，こうしたリアリティの高い環境は，いつのまにか目の前に，実際の選手がいるという錯覚を感じさせる効用があるようです．その結果，競技中の躍動感や臨場感はもちろん，試合開始前の選手の緊張感，さらには勝敗が決まったときの喜怒哀楽までも，テレビとは異なるレベルで感情移入しやすくなっていた可能性があります．桃田賢斗選手が第２回戦で敗退したときの崩れ落ちた様子が，本当に桃田選手がそこにいるかのような感覚を受け印象的でした．

被写体抽出の性能は，8K・60fpsで撮影した映像をリアルタイム処理することに成功しました．

選手どうしが重なった場合や，ダブルスなど，一部抽出精度にまだ課題はありましたが，計６回の中継実験において，それぞれ異なるユニフォームを着用した選手に対しても，観戦に問題のある誤抽出や欠けはない処理に成功しました．ネットの黒帯状部分の補完や影の付与についても破綻のないことを確認していま

表１　体験者からの感想

実物大の大きさで見ると，臨場感が全く違う
シャトルが高く上がったときに，少しシャトルの行方が見づらいときもあるが，まるで選手がその場にワープしてきたかのような，そんな感覚がある
まるで試合会場にいるようなリアル感を味わえる
実物大の選手は迫力があり，試合中，思わず会場にいるときと同じような歓声を上げてしまった

表２　遅延時間の内訳

撮影系	17 ms以下（1frame以下）
MMT伝送	1600 ms（4K 59.94p BT.709，エンコードレート40 Mbit/s, FEC5%）
被写体抽出処理	1000 ms（入出力バッファ込み）
表示系	〜120 ms（30fps換算で4frames）

す．シャトル表示については，視聴場所によって，不連続さが目立つことも多く，大幅な改善が必要となります．

通信性能としては，競技会場から遠隔会場までのエンドツーエンドの遅延時間は，トータルで2800 ms以下でした．**表２**にその内訳を示します．MMT伝送遅延には，ネットワークの伝送遅延である，競技会場〜中継拠点の約１ ms，中継拠点〜遠隔会場の約0.1 msも含まれます．被写体抽出処理の遅延には，処理時間のゆらぎ等を考慮したバッファも入っていますが，それを除いた抽出処理自体の遅延は400 ms以下です．

今回は，競技会場から遠隔会場への一方向の映像伝送であったため，３秒程度の遅延は大きな問題とはなりません．しかし，将来的に目標とする，両会場を双方向につなぎ，観客の声援を戻すような場合では，大きな遅延は問題となるため，さらなる処理時間の削減が課題となります．

これらの性能達成により，遠隔会場において，選手がそこにいるかのような体験を生み出すのに十分な性能を実現できました．

まとめ

今回，「TOKYO 2020 未来のスポーツ観戦プロジェクト」の中で，バドミントン競技へKirari!を適用し，あたかも競技会場にいるかのような臨場感を体験できることを実証しました．選手の抽出精度やシャトルの表示方法など課題もありますが，テレビを超える新しいスポーツ観戦の可能性をオリンピックという世界が注目するイベントにおいて，世界に発信できました．

今後は，抽出性能などの技術的改善だけでなく，他の競技や音楽コンサートなど他分野への展開，さらには，競技会場と遠隔会場を双方向につなぐための低遅延化などを検討するとともに，Kirari!をはじめとしたリモートワールドを具現化する研究開発を進め，未来提案へとつなげていきます．

謝　辞

本技術実証の実現に向け，共にさまざまな課題を克服してきていただいた東京2020組織委員会イノベーション推進室の皆様，主催者として先導いただいた日本科学未来館の皆様，そして，技術的に支えていただいたパートナー企業の皆様に感謝します．

■参考文献

⑴　外村・今中・田中・森住・鈴木：“超高臨場感ライブ体験(ILE)の標準化活動について，” ITUジャーナル，Vol.47，No.5，pp.14-17，2017.

⑵　柿沼・長尾・宮下・外村・長田・日高：“機械学習を用いた任意背景リアルタイム被写体抽出技術，” NTT技術ジャーナル，Vol.30，No.10，pp.16-20，2018.

（上段左から）武藤　誠/ 長谷川　馨亮/ 並河　大地/ 紺谷　精一
（下段左から）平地　信博/ 中村　泰治/ 鈴木　健也

◆問い合わせ先
NTTサービスイノベーション総合研究所
E-mail　svkoho-ml@hco.ntt.co.jp

カテゴリ1 東京2020を『観せた』NTT R&Dの技術

マラソン × 超低遅延通信技術

薄井（うすい） 宗一郎（そういちろう）[†1] /深津（ふかつ） 真二（しんじ）[†2]
松本（まつもと） 英一郎（えいいちろう）[†2] /井元（いもと） 麻衣子（まいこ）[†2]
白井（しらい） 大介（だいすけ）[†3] /木下（きのした） 真吾（しんご）[†2]

NTT研究企画部門[†1]
NTT人間情報研究所[†2]
NTT未来ねっと研究所[†3]

NTTは，東京2020組織委員会が2021年８月７日・８日に札幌で行われた東京2020オリンピック陸上競技 マラソンにおいて実施した，「東京2020 リアルタイムリモート応援プロジェクト」に「超低遅延通信技術」を提供しました．本プロジェクトは，札幌のマラソンコースと東京の応援会場をリアルタイムにつなぎ，遠隔地から観客の応援を選手に届け，安全性・安心感を保ちながら，沿道応援さながらの臨場感と，選手・観客の一体感を創り出す新しいスポーツ観戦の提案プロジェクトです．本稿では，このプロジェクトの取り組みや活用した技術について紹介します．

プロジェクトの概要

東京2020リアルタイムリモート応援プロジェクトは，コロナ禍において直接アスリートへ応援を届けることが難しくなってきている中，新たな通信テクノロジを活用することにより，遠隔地の観客とアスリートが，競技会場での興奮や感動，一体感を共有できる世界をめざす取り組みです（**図１**）．

NTTは，東京2020オリンピック・パラリンピックのゴールドパートナーとして，最先端通信テクノロジの提供を通じた史上もっともイノベーティブな大会の実現に貢献していくことをめざしてきました．現在のコロナ禍の状況をかんがみ，通信サービスを活用した新しいスポーツ観戦のかたちを提案し，レガシーとすることを新たなミッションととらえ，本プロジェクトへの技術提供を実施することにしました．

リモートの観戦体験において，遠隔会場の声援を試合会場に届ける際にもっとも大きな課題となるのは遅延時間です．特にマラソンにおいて，秒速５ mで駆け抜ける選手へ確実に応援を届けるには，わずかな遅延が大きな影響を与えます．これまでのリモート観戦では，光の伝搬遅延に加えて，伝送処理遅延や映像情報の圧縮遅延などメディア処理遅延を加えたトータルの遅延時間は往復数秒レベルでかかってしまい，選手へ応援を確実に届けることができませんでした．NTTでは，「超低遅延通信技術」によってこれらの課題を解決し，伝送処理にかかる遅延時間を片道約100 msに最小化させ，選手への応援を確実に届けることを目標にプロジェクトに取り組みました．

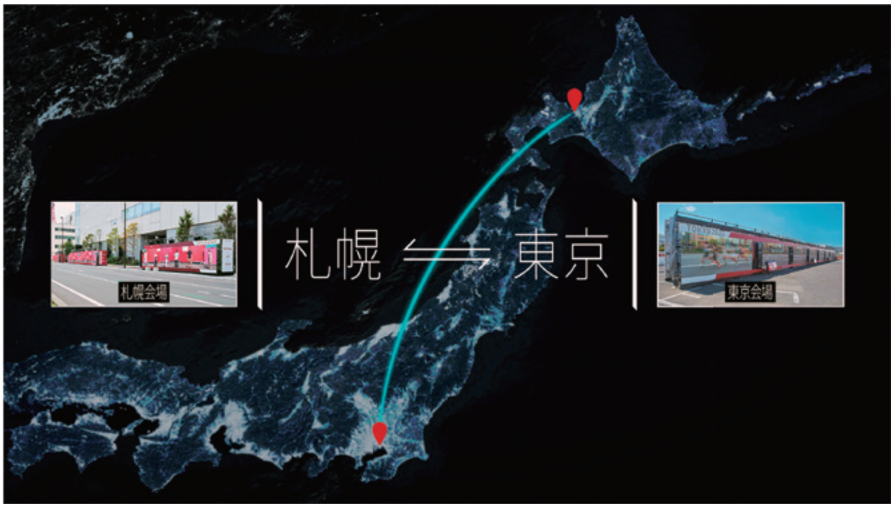


図１　東京2020リアルタイムリモート応援プロジェクトの概要

システム構成

全体のシステム構成を**図２**に示します．

今回のプロジェクトでは，遠隔にいる観戦者があたかも選手が走っている沿道で応援しているかのような空間を創り出すことをめざしました．そのために，札幌のマラソンコース（さっぽろ創世スクエア前）と，東京の会場の両拠点には，それぞれ，観戦者と選手がリアルサイズに表示できるように，幅約50 m，高さ２ mのLEDディスプレイを設置しました．LEDの合計幅は両拠点とも約50 mですが，設置場所の状況などに応じて設置場所や間隔など異なります（**図３**(a)(b)）．観戦者と選手の映像撮影のために，両拠点のLED前に８台のカメラを設置しました（図３(c)）．両拠点の4K映像は，「超低遅延通信技術」を構成する超低遅

延メディア処理技術を搭載したメディア処理装置，ディスアグリゲーション構成技術を搭載した伝送装置を経由し，20 Gbit/sの高速広帯域回線によって，遠隔地双方へ伝送されます．

超低遅延通信技術

NTTが中心に提唱する次世代コミュニケーション基盤構想「IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）」は，光を中心とした革新的技術を活用した高速大容量通信，膨大な計算リソース等を提供可能な端末を含むネットワーク・情報処理基盤の実現をめざしています．その構成要素の 1 つとして，ネットワークから端末まで，すべてにフォトニクス（光）ベースの技術を導入し，超低消費電力，超大容量，超低遅延をめざすオールフォトニクス・ネットワーク（APN）があります．本プロジェクトで活用した超低遅延通信技術は，APNの要素技術である「ディスアグリゲーション構成技術」と「超低遅延メディア処理技術」を用いています．

(1)　ディスアグリゲーション構成技術

「ディスアグリゲーション構成技術」は，従来，一体型で提供されていたネットワーク機能を，機能ごとに分離し，標準化されたインタフェースで制御できるよう構成することで，柔軟な構成変更，

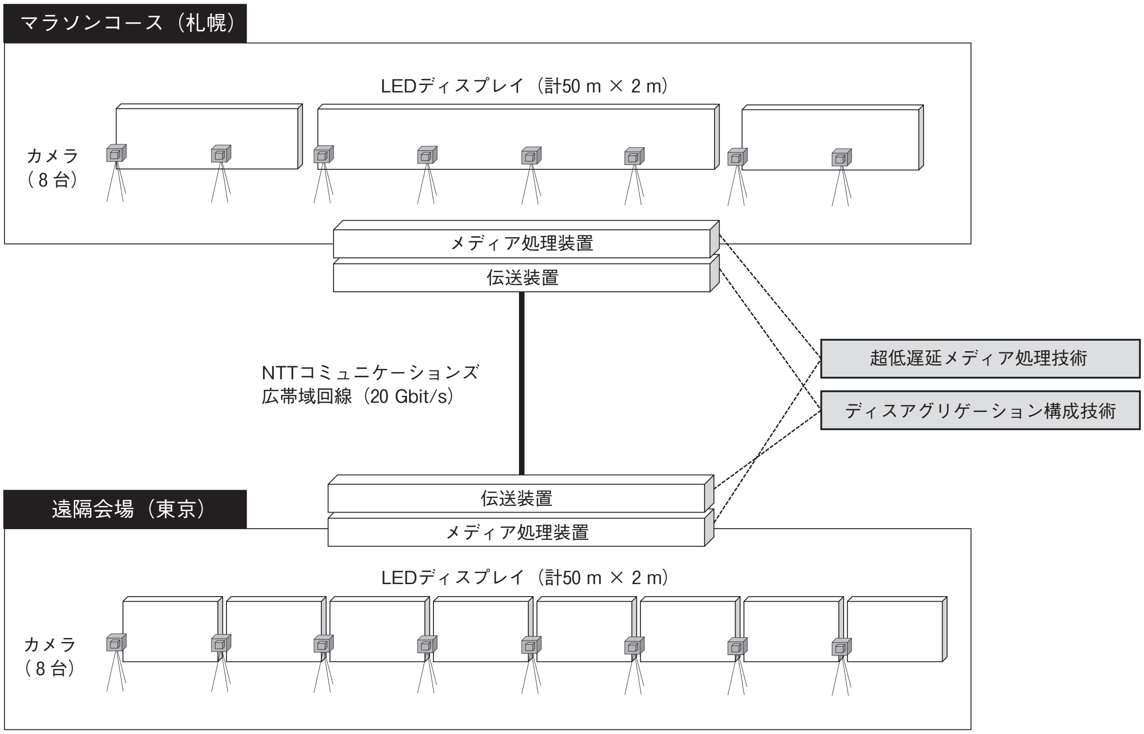


図 2　全体システム構成図

(a)　東京側会場に設置された幅50 mのLED

(b)　札幌マラソンコース（さっぽろ創世スクエア前）に設置された幅50 mのLED

(c)　マラソンコースに設置された 8 台のカメラとマイク

図 3　両拠点の外観

付加機能の実現，コストの低減等を可能にする技術です．今回，長距離伝送のための光トランスポンダを有するホワイトボックススイッチに，SDI信号の直収機能を付加するプラグインユニット（VideoPIU）を新規開発したことにより，非圧縮映像・音声を，光の長距離伝送路にダイレクトにSMPTE ST2110形式で送出可能となりました．これにより，送信側での映像入力から受信側での映像出力までの遅延を約1 msに抑えることに成功し，東京と札幌の距離遅延を含む片道の遅延時間を約20 msまで削減しました．また，ホワイトボックススイッチの制御ソフトウェアであるネットワークOS（NOS）にビデオルーチング向け機能群を実装し，ネットワーク機器・映像機器群の統合的な運用の実現を図りました（**図4**）．

⑵　超低遅延メディア処理技術

「超低遅延メディア処理技術」は，カメラから出力されるSDI映像信号をサブフレーム・ライン単位で取り込み，幾何変換や合成などの映像処理を映像信号レベルで実施する技術です．各映像処理をフレーム単位から映像信号レベルで実施することで，従来の映像処理で必要であったフレーム待ち時間を削減し，低遅延化を実現しました（**図5**）．

また，本構成においては，複数カメラ

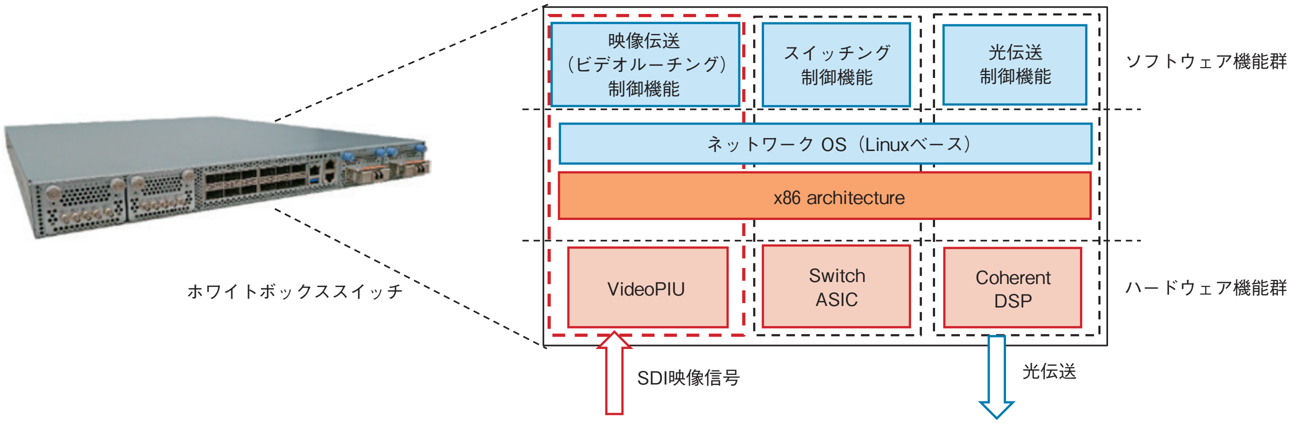


図4　ディスアグリゲーション構成

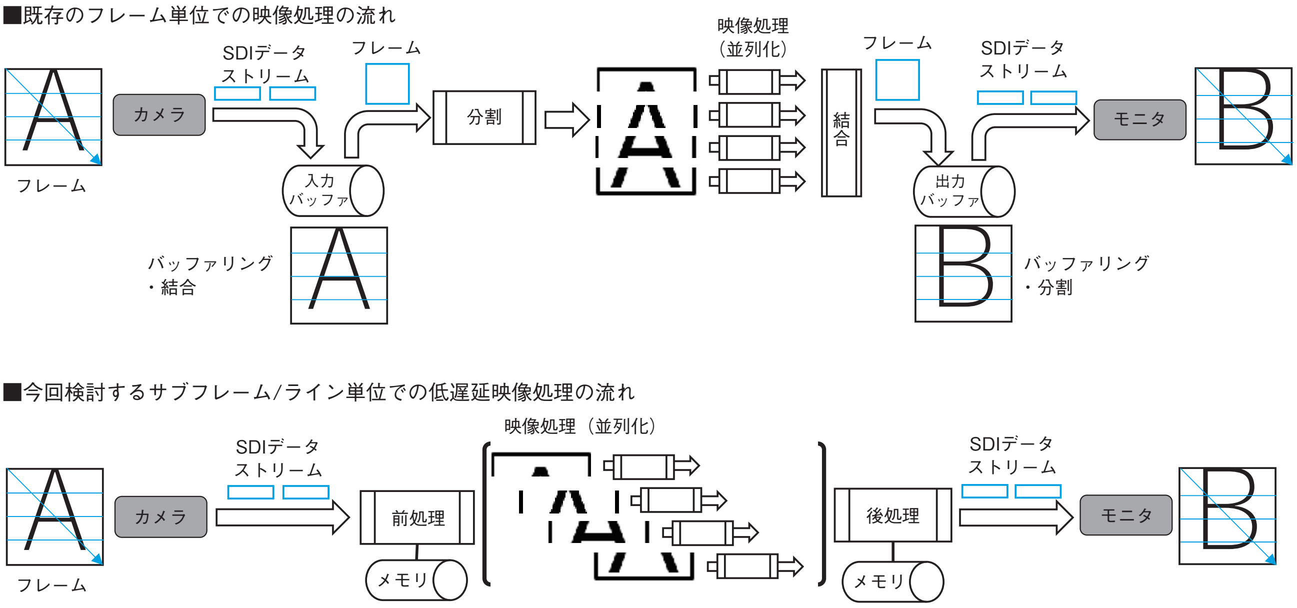


図5　超低遅延メディア処理技術

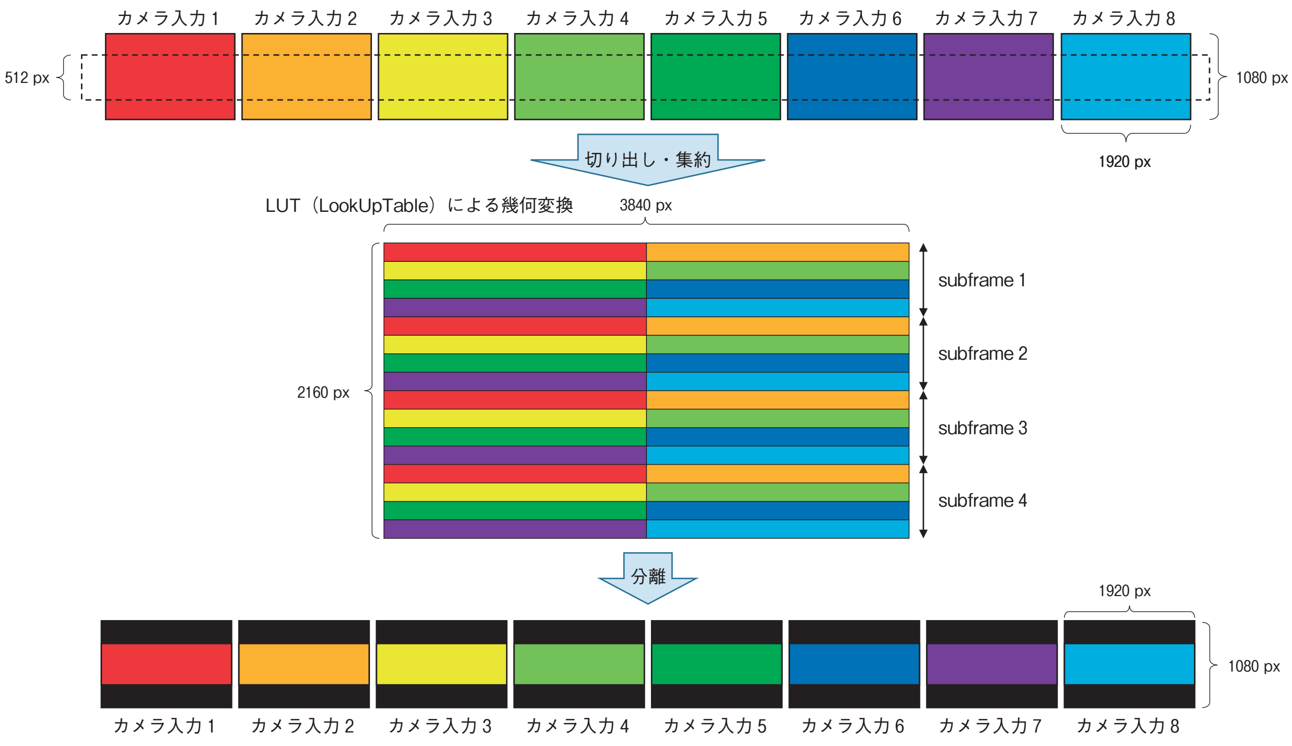


図6　複数カメラ映像の集約・分離処理

図7　超低遅延通信技術を提供したNTTのネットワーク設備

からの映像を伝送するのに際し，各カメラからのSDI映像信号をライン単位でまとめサブフレーム化し，受信したサブフレームを即時分離し複数ディスプレイに表示するかたちとすることで，さらなる低遅延化を実現しました（**図6，7**）.

取り組みの結果

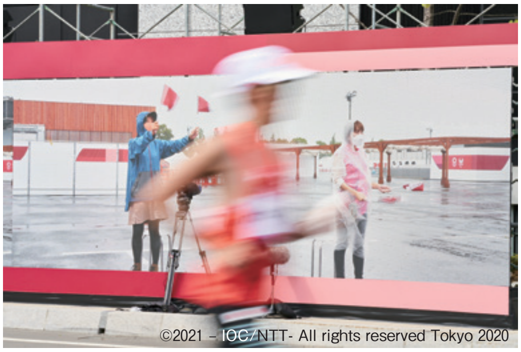
当日は，低遅延性を実証するデモンストレーションの後，マラソンの応援を行いました．幅50 mのディスプレイを通じて，東京会場ではまるで目の前に選手が走っているかの臨場感を提供し，関係者は拍手や旗を振ることで選手への応援を伝えます．これまで行われてきた遠隔からの応援体験では遅延によって応援タイミングが合わず，選手へきちんと応援が届く一体感を感じつつ応援するというのが難しい状況でしたが，今回，札幌のマラソンコースでは超低遅延通信技術によってその選手が通り過ぎる前にしっかりと応援が届く様子が確認でき，その一体感を東京会場でも感じ取れたことでさらに応援に熱が入っていきました（**図8**(a)(b)）.

この応援体験を通じて，東京会場側では「普段沿道で応援するのと全く変わらない臨場感とスピード感を体験できた」「多くの人で混み合う普段の沿道よりも，逆に選手に近い位置から応援ができたように感じる」「何よりも選手に応援が届

(a)　女子マラソンにおいて東京から札幌に応援する様子

(b)　女子マラソンにおいて東京からの応援がランナーに届く様子

(c)　男子マラソンにおいて東京から札幌に応援する様子



(d)　男子マラソンにおいて東京からの応援がランナーに届く様子

図８　プロジェクト当日の様子

くのが素晴らしく，楽しかった」というコメントが寄せられ，これまで行われていた遠隔からの応援の取り組みではなし得なかった競技会場へ応援がきちんと届くことによる一体感が得られたことに対し，大いに満足感を感じていた様子でした．また，マラソンコースでは世界初となる本ディスプレイによる遠隔地からのリアルタイムな応援に関心を示す選手が見受けられるなど，本取り組みの意義を十分確認することができました．

また伝送処理にかかる遅延時間は想定どおりの片道100 msに収まりました．

８日の男子マラソンの際はあいにく台風10号が首都圏に接近し，雨模様の中での実施となりましたが，安全を確保したうえで東京から札幌へ雨を吹き飛ばす勢いの応援を届けることができました（図８(c)(d)）．

今後の展開

本プロジェクトの成果を踏まえ，NTTは競技会場で応援することが難しい人々に対して，安心・安全な方法で，現地ならではの臨場感と一体感を体験していただける新たな競技観戦スタイルの実現をめざしていきます．今回は，東京の特設会場から応援を届けましたが，将来的には本技術を広く普及させ，各家庭からでも同様のリアルタイムなリモート応援ができるよう研究開発を加速していきます．

（上段左から）薄井　宗一郎/ 深津　真二/ 松本　英一郎
（下段左から）井元　麻衣子/ 白井　大介

◆問い合わせ先
NTTサービスイノベーション総合研究所
E-mail　svkoho-ml@hco.ntt.co.jp

特別連載

ムーンショット・エフェクト ――NTT研究所の技術レガシー

NTTの技術レガシー 東京2020大会会場で見たムーンショット

ノンフィクション作家の野地秩嘉（のじつねよし）氏による，NTT研究所の技術をテーマとした「ムーンショット・エフェクト――NTT研究所の技術レガシー」を2020年9月から2021年8月まで，12回にわたって連載してきました．今回は連載の総まとめとして，超高臨場感通信技術 Kirari!の体験を通した「NTTの技術レガシー　東京2020大会会場で見たムーンショット」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）．

■セーリングとバドミントンの現場で

あらためて説明すると，「ムーンショット」とは，遠い未来のことまでを視野に入れた計画で，実現すれば大きなインパクトをもたらす壮大な目標・挑戦を指す言葉だ．

かつてアメリカのジョン・F・ケネディ大統領がアポロ計画について述べたスピーチが言葉の由来とされている．

「1960年代が終わる前に，月面に人類を着陸させ，無事に地球に帰還させる」．

スピーチにある通り，1969年にはアポロ11号が月面に降り立った．

NTTがムーンショットと考える技術をお披露目するひとつの機会が東京2020オリンピック・パラリンピックだった．私は3年前の2018年からNTTのスタッフに取材を進め，さらに大会が始まったら，現場に出かけて行って，ムーンショットの技術が実際にどのように使われているかを見てきた．

さて，ひとつ覚えているシーンがある．

コロナ禍になって，東京2020大会の延期が決まった．NTTのスタッフはさぞ落胆しているだろうと思って，横須賀にある研究センタを訪れた．すると，出迎えてくれた木下真吾（現　NTT人間情報研究所）は微笑していた．そして，こう言った．

「野地さん，あと1年あればKirari!（超高臨場感通信技術）はもっといいものなります」

木下たちはその時点までに数年以上，開発と研究に時間を費やしていた．大変な苦労だったのに，彼らは苦労を表面に出さなかった．

大会が延期になっても動じることなく，すぐに改良に取り組んだ．そして驚くのは，大会が始まってからも，彼らはまだ，Kirari!の研究と改良を続けていたのである．Kirari!はまだ完成していない．永遠に改良を続けているところがKirari!をムーンショットと呼んでもおかしくない理由だ．

■江の島会場のワイドビジョン

Kirari!が活用された現場はセーリング（ヨット）競技が行われた江の島会場，バドミントンが行われた武蔵野の森総合スポーツプラザの体育館だ．

江の島会場へは2日間通った．Kirari!を使った全長55メートルのワイドビジョンはヨットハーバーにある突堤近くの海面に設置されており，選手，関係者とも競技期間中，毎日，朝から晩までワイドビジョンに見入っていた．

すぐ横にはテレビ中継用の大画面モニタも据えてあった．しかし，そちらに注目する人はいない．それは画面の大きさがせいぜい数メートルといったところで，ワイドビジョンとは比べるべくもなかったからだ．さらに，画質がまったく違っていた．Kirari!のワイドビジョンは海面とヨットを鮮明に映し出していたが，テレビ中継画面のそれよりも格段に優れていた．

結論からいえば，ワイドビジョンを使うKirari!はセーリングやロッククライミング，エアレースといった，人が直接，競技現場へ行くには難しいエクストリームスポーツをライブ配信するのにもっとも向いている．

むろん，テレビカメラだって，そういったスポーツを中継放送することはできる．しかし，Kirari!ほど鮮明に

映し出すことはできないし，また遅延なくリアルタイムで届けることはできない．

それは通信技術のレベルが違うからだ．Kirari!は光ファイバネットワークと５Gの無線技術で成り立っている．テレビ地上波の放送信号よりも格段に大容量で送信されているのである．

■セーリング競技とKirari!

セーリング競技の見どころとは次のようなものだ．

「海上に設置されたブイを決められた順に回り，ゴールの順位を争うセーリング．大小さまざまなヨットにウインドサーフィンを加え，男女合計10種目が行われる．大自然を相手にするため，重要になるのは風と潮の流れを見極める能力．刻々と変化する風をつかむため，ヨットはコースに沿って前に進むだけでなく，ジグザグ走行することもある．また，複数の選手が一斉にスタートするので，他とのポジション争いも激烈だ」．

競技は浜から遠い海上で行われる．通常はハーバーの沖合，300メートルから500メートル，水深が40メートル程度の海域で行われる．だが，江の島会場付近には漁業者が定置網を設けていたこともあって，さらに遠くの沖合で，しかも水深が100メートル近い海域だった．

そうなると，突堤に立って双眼鏡で眺めてもヨットはミニチュアの船くらいにしか見えない．つまり，この競技は船を出して海の上で見る，もしくは船やドローンで撮影した映像でしか見ることのできない競技なのである．

実際，私はゴムボートに乗せてもらって，海の上からも競技を眺めた．それでも近くに行けるわけではない．選手たちのヨットを妨害することになるから，100メートル以上は離れていなくてはならないのである．

広い海の上で，風を受けて走るヨットは直線的に走るのではなかった．風を受けてジグザグに走ったり，方向転換をする．素人はいったい，どの艇が先頭に立っているのか，よくわからない．

そこで役に立ったのがKirari!だ．江の島では船の上の４台の４Kカメラで撮影した映像を瞬時にひとつの画面にすり合わせ，切れ目のない画面にしてあった．それを前述のようにハーバー内に設置した全長55メートルのワイドビジョンに映し出した．

横幅が広い画面だから，散らばったヨットの位置関係も手に取るようにわかり，どの艇がリードしているかも一目瞭然だ．

これまでにも複数の映像をひとつの画面に構成することができなかったわけではない．しかし，リアルタイムでは不可能だった．一度，撮った映像を人間が時間をかけて編集していたのである．

日本セーリング連盟の河野博文前会長は「Kirari!のおかげでセーリング競技は誰もがわかる競技になった」と言った．

「沖合で行うセーリング競技は孤独な戦いです．Kirari!により競技を知らない人たちでも海の体験を共有することができます．競技の結果がわかることもさることながら，海へ出てヨットに乗りたいという人が増えると思う．私たちにとっても選手にとってもありがたいのがKirari!です」．

■バドミントン競技のKirari!

セーリング競技に使ったKirari!は現場の様子をそのまま再現したものだが，バドミントン競技のそれは選手とシャトルだけを抽出してパブリックビューイングの会場に転送したものだ．むろん，リアルタイムである．

私が見たのは青海の日本科学未来館で行われた「スポーツ観戦の未来　〜次世代臨場感テクノロジー実証プログラム〜」と題したデモンストレーションである．

これもまた木下のチームが開発しており，彼は技術の難しさを次のように語った．

「映像の中から被写体を抽出する場合，一般的にはグリーンバックやブルーバックなどの背景を用意して，クロマキーなどで背景色を消します．でも，Kirari!はブルーバックなどがなくても，現場の映像からリアルタイムに被写体のみを抽出できるのです．

ちょっと難しい説明になりますが，この抽出にはAI（人工知能）が使われており，AIが必要とする情報源として，入力画像に疑似深度画像などを加えました．そしてバドミントンコートの空間に最適化した深層学習モデルを作成したのです．そうして，バドミントンのように動きが速く，コートの手前と奥で選手が分かれる競技でも，個別に選手を抽出することができました」．

日本科学未来館の一室には実際の競技会場と同じ高さの観客席が設置してあった．視線の先にはコート，ネット，２枚のハーフミラー，LEDディスプレイ・プロジェクタがあった．武蔵野の森総合スポーツプラザで行われていたダブルスの試合が転送されてきたのを見たが，人物については，実物と同じような大きさ，動きが再現されていた．

ただし，シャトルについてはすべての動きを追うこと

ができたとはいえない．選手がスマッシュすると，シャトルの映像は一瞬消えてしまうのである．

スマッシュした場合，シャトルの速度 は最高で493キロだという．東北新幹線の最高速度（320キロ）より断然早く，球技の初速ではもっとも速い．カメラで追うこと自体がそもそも難しいのである．それを考えると，木下たちの次のミッションはバドミントンのスマッシュを抽出して，転送することだ．

なお，私は武蔵野の森総合スポーツプラザで行われた実際の競技も見に行った．誰もいない観客席に短時間座ってみた．オリンピックの本番が始まると競技会場の空気は一変し，選手以外，誰一人として声を出さない．息を止めてコートのなかの選手を見つめる．

張り詰めた空気のなか，選手はスマッシュすると，「ハッ」と気迫のこもった声を出す．

そうだ，気迫だ．

会場の緊迫した空気と選手の気迫は今のKirari!ではまだ再現できない．

木下たちNTTスタッフの次の課題はスマッシュのシャトルを抽出することと，もうひとつは選手の気迫をどう再現するかだ．

■ゴールボール

パラリンピックのライブイベントでもKirari!は活用される予定だった．種目競技はゴールボールである．

ゴールボールとは….

「視覚に障がいのある選手がアイシェード（目隠し）を着用し，得点を奪い合う．試合は 1 チーム 3 人，バレーボールと同じ広さの18メートル× 9 メートルのコートを使って行われ，所定のエリアからボールを転がして相手ゴールを狙う」（NHKパラリンピックホームページより）．

ボールのなかには鈴が入っていて，選手は音を頼りにしてボールをゴールに入れたり，防いだりする．

Kirari!の音響技術を使い，競技コートの音空間をそのまま横浜市にある盲特別支援学校の一室に創り出し，ライブイベントを行う計画だった．

私はその音空間を準備していた段階で実際に体験している．

実際に競技コートのなかでアイシェードをして音を聞いてみると….

ボールが遠くから近くに転がってくる音が完全に再現されていた．ボールがぶつかってくるのではないかと手で頭を守ったり，体を引いてしまった．聴覚によるゴールボールの観戦体験（耳で見るゴールボール）は完全に実用化されている．テレビ放送で見るだけでなく，耳による体験をすると，ゴールボールの迫力を感じることができた．

■支える人たちがいないとオリンピックはできない

話は江の島のセーリング会場に戻る．

私が出かけて行った時，気温は34度だった．ヨットハーバーに日陰はない．まして，Kirari!の 4 Kカメラで撮影するクルーは朝から晩まで船の上にいた．真っ黒に日焼けしていて，顔は火ぶくれしていた．彼らだけではない．入り口で関係者の持ち物をチェックする組織委の係員，自衛隊の人たちも汗だくで仕事をしていた．

コロナ禍のなかの東京2020オリンピック・パラリンピックだから，感染対策もしなくてはならなかった．誰もが普通の大会以上の努力をしていたのである．

今回のオリンピック，パラリンピックは選手たちの躍動が私たちに忘れていた活力を与えてくれた．コロナ禍のなかでも，スポーツを見て感動する自由はある．

オリンピック，パラリンピックは選手たちの祭典だ．しかし，選手たちを支えるスタッフがいなければ成り立たない．ムーンショットとなるような技術は支えるスタッフたちが作り出していた．

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）．新刊 3 冊好評発売中，『あなたの心に火をつける超一流たちの「決断の瞬間」ストーリー』（ワニブックス），『新 TOKYO オリンピック・パラリンピック物語』（KADOKAWA），『京味物語』（光文社）．

特集

現実世界（ヒト・社会）とサイバー世界の新たな共生に関する革新的研究開発

NTTでは，人を中心とし，人の能力を最大限活かすためにICTの研究開発を通して
新たな価値を創造するとともに豊かな社会の実現をめざしている．
ICTの目覚ましい発展により，現実世界から得られる情報から未来を予測したり，
視聴覚を超えたコミュニケーションを実現することで，
人の活動，能力の幅を広げていくことができるようになると考えている．
本特集では,現実世界（ヒト・社会）とサイバー世界の新たな共生に関する
革新的研究開発について紹介する．

デジタルツイン
コンピューティング

情報理解

行動モデリング

人と機械の共生

サイバー空間

Digital Twin Computing

ヒトと社会のデジタル化世界を創造する デジタルツインコンピューティング構想の実現へ向けた研究開発 40

「デジタルツインコンピューティング構想」の実現をめざすために設定した4つのグランドチャレンジの概要，および実現するための技術について紹介する．

人の思考力を理解・再現・拡張するための思考処理技術 44

人の思考力を拡張可能とする技術として，「視覚的機械読解技術」「行動モデリング技術」「音声認識技術」「思考拡張型刺激デザイン技術」を紹介する．

人と人，人と機械の共生の実現をめざす共生知能研究 50

ICTの活用によって，人や集団の振舞いを，より良い未来の実現や感動の共有に向けて取り組んでいる，共生知能研究に関する取り組みについて紹介する．

人と機械の共生をめざすサイバネティックス技術 53

人の生活を高いレベルで機械がサポートし，人と機械が共生する豊かな社会の実現をめざすための取り組みについて紹介する．

リアルとサイバーの交錯空間を支える要素技術 57

リアル空間を計測したデータを解析，空間や物体を認識し，データをコンパクトに圧縮することでサイバー空間を構築する技術について紹介する．

ヒトと社会のデジタル化世界を創造するデジタルツインコンピューティング構想の実現へ向けた研究開発

デジタルツインコンピューティング研究プロジェクトは，NTTが推進するIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想の主要な構成要素である「デジタルツインコンピューティング（DTC）構想」の実現をめざすプロジェクトです．私たちは，その目標として4つのグランドチャレンジを掲げ，それぞれの実現に向けた研究開発を行っています．本稿では，各グランドチャレンジの概要と実現するための技術について述べます．また，グランドチャレンジ横断での活動について解説します．

北原 亮（きたはら りょう）　倉橋 孝雄（くらはし たかお）
西村 徹（にしむら とおる）　内藤 一兵衛（ないとう いちべえ）
徳永 大典（とくなが だいすけ）　森 航哉（もり こうや）

NTT人間情報研究所

デジタルツインコンピューティング構想実現に向けたグランドチャレンジの設定

NTTが掲げるIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想[(1)]の主要な構成要素として「デジタルツインコンピューティング（DTC）構想」があります．これは，実世界におけるモノ・ヒト・社会に関する高精度なデジタル情報を掛け合わせることにより，従来のICTの限界を超えた大規模かつ高精度な未来の予測・試行や，新たな価値を持った高度なコミュニケーションなどの実現をめざすものです．それによって，世界中のさまざまな社会課題の解決や革新的サービスの創出を通じ，スマート社会の実現を加速します．

DTC構想の実現に向けて私たちは，実現目標として4つのグランドチャレンジ（「感性コミュニケーション」「Another Me」「未来社会探索エンジン」「地球規模の包摂的循環シミュレーション」）を設定し，2020年11月に報道発表を実施[(2)]，グランドチャレンジごとに具体的な検討を開始しました．本稿ではグランドチャレンジの概要，それを実現するための技術開発，今後の目標などを紹介します．また，最後にグランドチャレンジの実現加速のための横断的活動について述べます．

感性コミュニケーション

「感性コミュニケーション」とは，言語や文化の違いだけでなく，経験や感性などの個々人の特性の違いを超えて，心の中のとらえ方や感じ方を直接的に理解し合える新たなコミュニケーションの実現をめざす研究開発目標のことです．

本目標の実現に向けて，「感性モデリング技術」「感性変換提示技術」「状態変容・環境構築技術」の3つの技術を中心に研究開発に取り組んでいます．「感性モデリング技術」は，生体信号や画像，音声などのセンサ情報から，心の中のとらえ方や感じ方といった感性のコミュニケーションにおける表現を推定する技術です．「感性変換提示技術」は，個人ごとに異なる感性のコミュニケーションにおける表現を，コミュニケーション相手に適応したかたちで変換・提示するための技術です．「状態変容・環境構築技術」は，コミュニケーションにおいて交換される情報そのものではなく，受容性などの人の内面やコミュニケーションの場などに介入することで，心の中でのとらえ方や感じ方の変化を促すための技術です．

本研究開発目標の達成により，従来のコミュニケーションで課題となっていた「ディスコミュニケーション（意思疎通の断絶）」や「ミスコミュニケーション（相互理解の不全）」を解決し，言語・文化・経験・価値観・知覚・感性の違いを超えて，相手の心の中の物事のとらえ方や感じ方を我が身においてリアルに，かつ直接的に理解し合える新たなコミュニケーションのステージを実現します．そして，心理的安全性の向上や，相互理解のさらなる促進により，多様な特性を持つ人々が，その多様性を活かしながら共に活動し刺

激・成長し合える包摂的な社会をめざします（**図１**）．

Another Me

育児や介護と仕事の両立が困難となる状況や，関心や意欲があっても社会参加できないなど，人生におけるさまざまな機会の損失が社会課題となっています．活動範囲が現実世界から仮想世界へと拡大・融合する中で，人が活躍し成長する機会を飛躍的に増すために，現実世界の制約を超越して本人として活動し，活動の結果を本人自身の経験として共有できる，デジタルのもう１人の自分である「Another Me」の実現にチャレンジしています（**図２**）．主な取り組みは以下の３つです．

① 現実世界の制約の超越：人生における機会を狭めている時間・空間・能力の制約の超越のため，ユーザ自身としての活動をAnother Meが自動的に代理で実施できる自律エージェント技術，およびユーザから遠く離れている，あるいは障がい・加齢等の能力的な問題を解消するテレプレゼンス・身体拡張技術の確立

② ユーザの主体感の醸成：Another Meの活動を自身がなしたことのように感じ，達成感や成長を体験するための心理的なテレポーテーションやフィードバックを実現する経験転写技術，およびユーザ自身が活動したと自他ともに認められるよう，日々変化する本人像を継続的に学習し，価値観や性格などの個人性を表出するヒトDT（デジタルツイン）構築・成長技術の確立

③ 社会受容性研究：Another Meの社会浸透に向けた，自分というもののとらえ方をも踏まえた哲学，倫理，法的課題の検討

これにより，人生におけるさまざまな機会をとらえ，心の豊かさや健康，生きがいを向上させると同時に，多くの成長機会を得ることでAnother Meの経験も自身のものとして成長することで，自己実現を加速します．

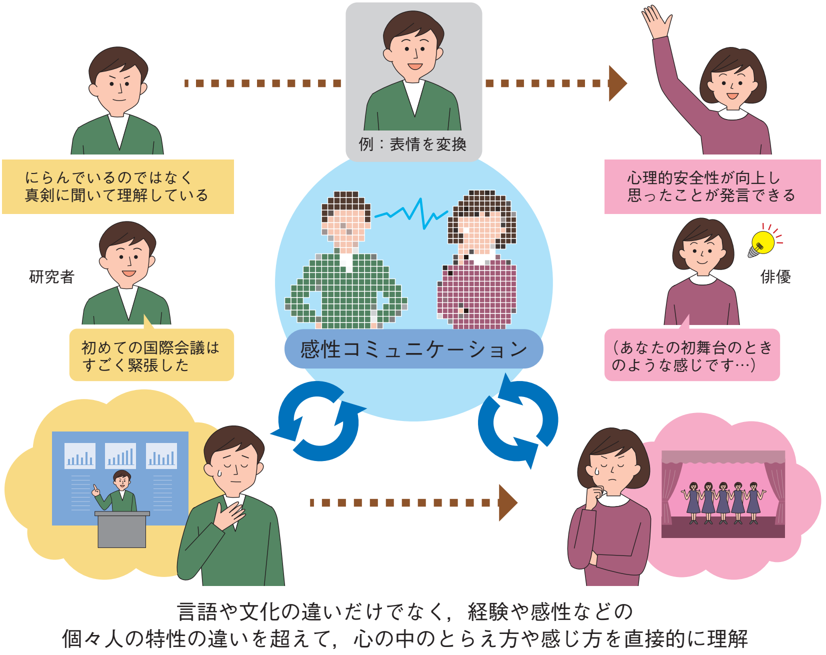


図１　感性コミュニケーション

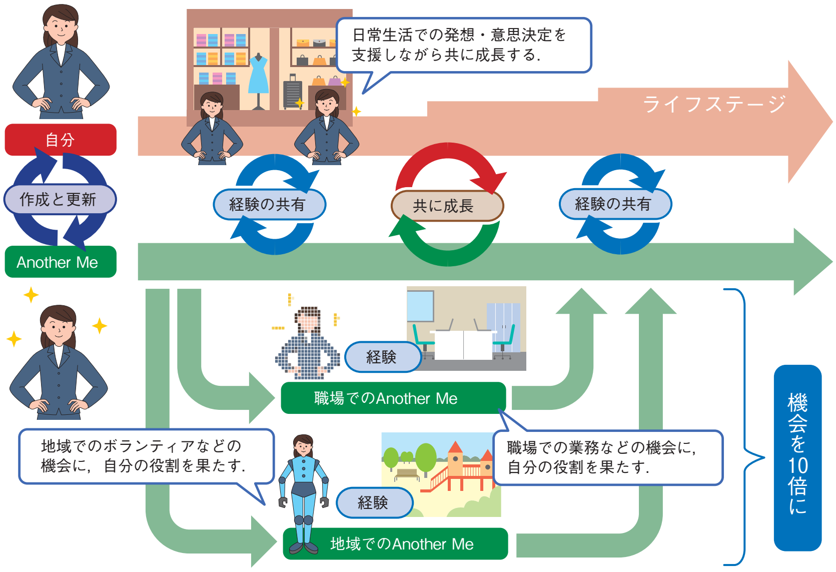


図２　Another Me

未来社会探索エンジン

社会構造の複雑化，自然災害等の不確実な事象の増加により，個人の行動・協力が社会や自然環境に与える影響，また，それによる個人への還元がみえにくくなっています．そこで私たちは，自然と共生する社会・生活のあり方を探索可能とするため，人々が活動する社会を「環境」「都市」「人」の層でとらえ，これらをデジタルツインで表現するとともに，この多層的な社会の変容をシミュレーションする未来社会探索エンジン技術の研究開発を進めています．

未来社会探索エンジンの実現に向けては，これまで取り組んできた時空間データ管理技術などの基盤技術を応用することで，センシングにより取得可能な現実世界のデジタルツインをリアルタイムに構築し，世論や個人の意識といった抽象的な情報をモデル化する技術と，それを都市・環境のシミュレーションと掛け合わせるシミュレーション基盤技術を研究開発しています．これにより社会のデジタルツインを駆動させさまざまな未来シナリオの提示や，理想的な社会像から逆算した現在とるべき打ち手の候補の提示を実現します．

未来社会の姿をさまざまなかたちで見える化することで，行政や企業経営側だけでなく地域社会の住民や個々人も同じ未来像を見ることにより，さまざまな連帯を強めていくことができると考えています．また，個人が望む社会を実現するための行動・協力を主体的に考えながら探し出し，自発的な活動を促せるようになる世界をめざしていきます（**図 3**）．

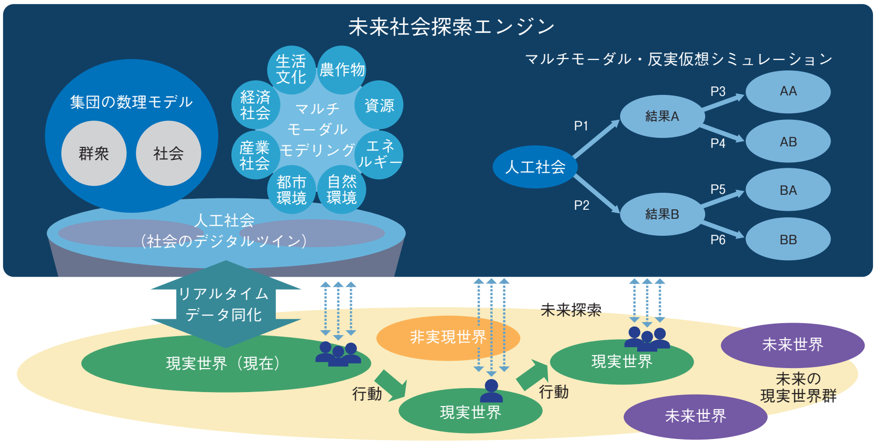


図 3　未来社会探索エンジン

地球規模の包摂的循環シミュレーション

現在地球規模で進行中の気候変動と社会的危機をかんがみ，地球の自律平衡性を維持できる経済および社会システムの再構築の議論が始まっています．これは不確実性の高い問題であるため，複数の選択肢・シナリオを用意し包括的アプローチを検討，実施することが重要です．そこで私たちは，環境・生態系・エネルギー・経済システム・人間社会等，地球を構成する多くの異なるシステムについて変化と相互に及ぼす影響（連鎖反応）をとらえ，いずれも臨界点を超えて崩壊することなく平衡状態を維持できる自律平衡性を保つための，エネルギー・経済システム・人間社会の変容に関する選択肢を提示することにチャレンジしています．

私たちはまず，気候・水循環の変化に対応したエネルギー供給と，経済システム・人間社会を題材にして実現するために，①多種多様な事象のモデル群を大規模に連成させモデル間の連鎖反応をシミュレートする大規模マルチモーダル技術，②環境や経済システムのシステム間連成を考慮し地球規模で設計するモデリング技術，③自律平衡性の重要指標とそれらの局所解を求める手法やシナリオごとの指標値群の評価手法の研究開発，に取り組んでいます．

これにより，現実世界の地球規模の多様な複雑な事象を，大規模な多種多様なモデルを連携させて地球規模で包摂的に循環シミュレーションし，変容に関する複数の選択肢を示すことが可能となります（**図 4**）．

グランドチャレンジの実現加速のための横断的活動

グランドチャレンジ実現のための技術開発は多方面にわたるため，グランドチャレンジ横断で一体感のある展開活動を行っています．ここでは①DTC Reference Modelの作成，②パートナーとの連携，③標準化活動の3つの活動を紹介します．

① DTC Reference Modelの作成

プロジェクト横断で技術成果を取りまとめたドキュメントであるDTC

図 4　地球規模の包摂的循環シミュレーション

Reference Modelの作成については，４つのグランドチャレンジを横通しで俯瞰しつつ，DTCに共通的なデジタルツインの概念をドキュメント化し，研究所内外に公開しています[3]．このドキュメントでは，デジタルツインの定義やヒトデジタルツインの構成などについて，現在DTC研究センタで検討している概念的な構造を記載しています．このような公開情報を通じ，共通のビジョンを持つパートナー企業などとの議論を一層進め，より本質的なDTCの概念を共同で探索していくことを目標としています．今後は，DTC研究センタで生み出される研究成果も追加し，より完成度の高いリファレンスドキュメントとしていくことをめざします．

② パートナーとの連携

次にパートナーとの連携によるグランドチャレンジの研究開発加速については，DTCの研究開発の加速につながる外部パートナーの探索と，連携体制の構築に尽力しています．グランドチャレンジによって必要とされる技術領域は異なりますが，人間の感情・行動を理解するAI（人工知能）技術からスマートシティのデジタルツイン構成技術まで幅広い分野を対象に，大学・研究機関・ベンチャー企業などを含め幅広くパートナリングを図っています．デジタルツインの分野は比較的新しいと同時に，XR（Extended Reality）などの仮想現実やデジタルヒューマンといった幅広い技術領域ともつながっているため，数多くの興味深い技術を持ったベンチャー企業が育ちつつあります．そのような企業とパートナーシップを結び協力していくことで，研究開発を加速させ，いち早く技術を具現化することが可能となると考えています．

③ 標準化活動

最後にグローバルでのDTCの共通化と普及をめざす標準化活動については，DTCのビジョンや研究成果をグローバルな場で可視化していく活動を進めています．具体的には，2020年に設立されたDigital Twin ConsortiumやIOWN Global Forumに参画し，DTCのビジョンやグランドチャレンジについての寄書や発表を行っています．これにより，NTTのデジタルツインの分野におけるプレゼンスを示すと同時に，DTCの実現に向けて協力できるグローバルパートナーとのデジタルツインにかかわる技術の標準化活動を進めています．

■参考文献

(1) https://www.rd.ntt/iown/0001.html
(2) https://group.ntt/jp/newsrelease/2020/11/13/201113c.html
(3) https://www.rd.ntt/_assets/pdf/iown/reference-model_en_2_0.pdf

（上段左から）北原　亮/ 倉橋　孝雄/ 西村　徹
（下段左から）内藤　一兵衛/ 徳永　大典/ 森　航哉

デジタルツインコンピューティング研究プロジェクトでは，DTC構想の実現に向けて，企業間連携も積極的に推進しながら研究開発を進めていきます．

◆問い合わせ先
NTT人間情報研究所
デジタルツインコンピューティング研究プロジェクト
E-mail　dtc-office-ml@hco.ntt.co.jp

人の思考力を理解・再現・拡張するための思考処理技術

NTT人間情報研究所（人間研）思考処理研究プロジェクト（思考P）では，「情報理解」「情報処理」「反応・行動」で構成される人の思考力について理解を深め，それらを計算機上で再現すると同時に，人の思考力を持続成長可能とする技術創出をめざしています．本稿では，この技術につながる「視覚的機械読解技術」「行動モデリング技術」「音声認識技術」「思考拡張型刺激デザイン技術」について紹介します．

西田 京介（にしだ きょうすけ）　倉島 健（くらしま たけし）
宮崎 昇（みやざき のぼる）　戸田 浩之（とだ ひろゆき）
西岡 秀一（にしおか しゅういち）
NTT人間情報研究所

はじめに

NTT人間情報研究所（人間研）思考処理研究プロジェクト（思考P）では，人の知覚から認知に至る「情報理解」，取得した情報を解釈し次の行動を起こすための「情報処理」，外界への働きかけである「反応・行動」，の理解を深め，それらを計算機上で再現すると同時に，人の思考力を持続成長可能とする技術創出をめざしています．この技術につながる4つの技術（文書を視覚的に理解する視覚的機械読解技術，行動から人の判断の仕組みを考える行動モデリング技術，人の内面を理解するための音声認識技術，人の思考力を引き出し拡張する思考拡張型刺激デザイン技術）について，紹介していきます．

文書を視覚的に理解する「視覚的機械読解技術」

人間研では情報検索や対話・質問応答サービスのさらなる発展をめざして，AI（人工知能）が自然言語（私たちが日常的に用いる言葉）で書かれたテキストを読み，その意味を理解する「機械読解」の研究に取り組んできました[(1), (2)]．機械読解の研究は，一部の評価データにおいてはAIが人間の読解力を超えるなど大きく発展してきましたが，テキスト情報しか理解できないという限界がありました．一方で，私たちが普段扱っているPDF文書やプレゼンテーションスライドには，言語情報のみならず，文字の大きさや色，図や表，グラフ，レイアウトの情報などさまざまな視覚的要素が含まれています．視覚と言語の統合的な理解は，オフィス作業や日常生活を支援するAIの発展に向けて必要不可欠といえます．

そこで人間研では，文書画像に対する視覚的機械読解（**図1**）の実現をめざして，VisualMRCというデータセット[(3)]を構築して研究を進めています．このデータセットはWebページのスクリーンショットの文書画像に対する自由記述型の質問応答データであり，文書内の領域をタイトル・段落・リスト・画像・キャプションなど9クラスに分類してアノテーションした点が特徴的です．私たちはこのデータセットを用いて研究を進め，物体認識技術を適用して抽出した文書中の領域と，さらに文字認識技術を適用して抽出したトークンの位置・外観情報を追加入力として考慮可能な視覚的機械読解モデルを提案しました[(3)]．この技術は，人間の質問応答精度にはまだ及ばないものの，テキストのみを扱うモデルに比べて文書の視覚情報を理解することで質問応答の性能が向上することが確認されています．人間研では今後も視覚と言語の統合的な理解に向けてさまざまな研究に取り組んでいきます．

行動から人の判断の仕組みを考える行動モデリング技術

私たちは，行動経済学等の人文・社会学的知見と，昨今のIoT（Internet of Things）の普及により得られるようになったさまざまな人のデータとの両面を活用しながら，不合理な判断を含む人の意思決定・行動判断のメカニ

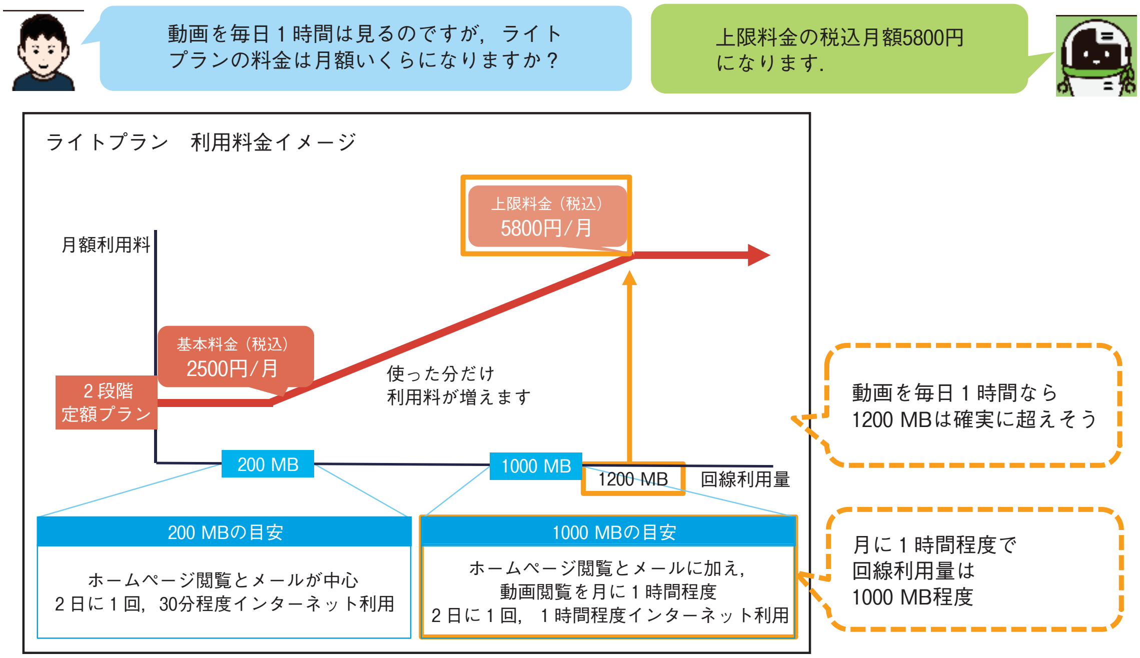
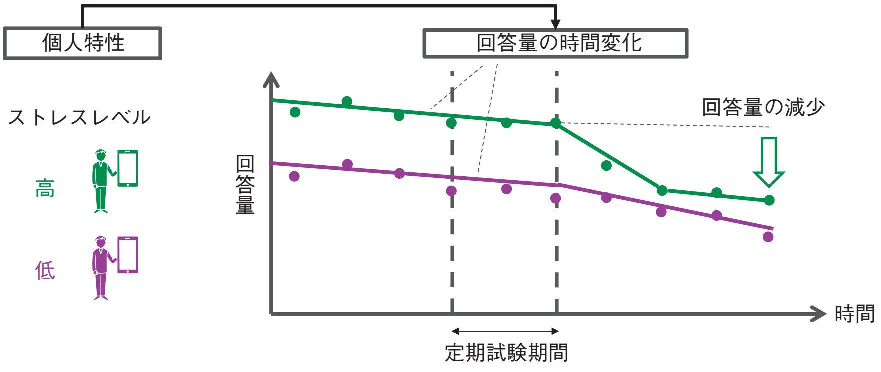


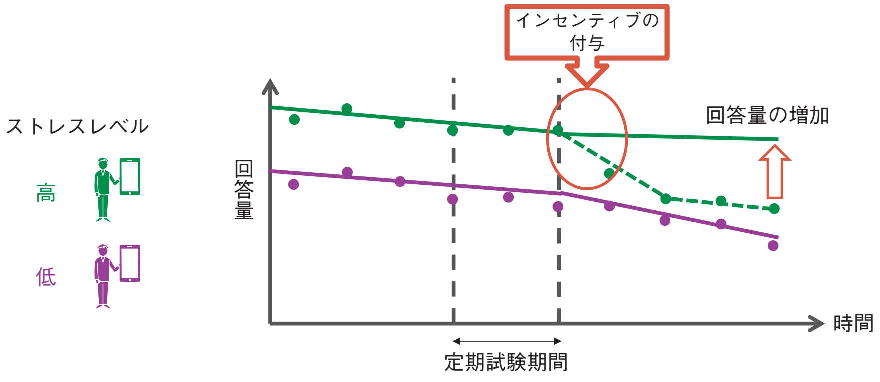
図１　視覚的機械読解

ズムを研究しています．さらに，得られた知見を骨組みとして人の意思決定や行動を再現する「行動モデル」を構築し，人に関する将来の予測やシミュレーションを可能とすることをめざしています．悪い未来が予測される場合には，より良い未来へと導く方策を，シミュレーション結果を使いながら探索することができるようになると考えます．

これまで，人の判断メカニズム解明の一環として，性格や価値観，身体的・心理的な状態，社会環境などの要因が個人の意思決定や行動に及ぼす影響について研究してきました．スマートフォンやタブレットなどのポータブルデバイスを通じて被験者に簡易な質問を送り，そのときその場の状況，思考や感情，そして行動について被験者に自発的に回答してもらう調査方法として，Ecological Momentary Assessment（EMA．別名で経験サンプリング法）があります．大学生を対象として実施された10週間にわたるEMAアンケート[4]の結果を用いて，個人特性ごとのEMAアンケートへの回答傾向の異なりを「時間変化」という観点から詳細に分析しました[5]．例えば，EMAアンケート調査開始前の事前調査で日常的にストレスレベルが高いと判定された被験者は，**図２**(a)に示すように，調査期間中もデバイス・機械に対して積極的に自己開示する傾向がありました．しかし，ストレスがかかるイベント（例えば定期試験）の直後は回答に非協力的になり，急激に回答量が落ち込む傾向があることが私たちの分析により分かってきました．また，事前調査で誠実性が高いと判定された被験者は，EMAアンケート調査が始まった直後は協力的で回答量も多い一方，時間の経過に伴い回答量が大きく減少する傾向があることも分かりました．こういった人間行動（ここではアンケートに自発的に回答する行為）の時間変化に対する理解が深まることにより，将来どうなるのか，といった人の行動や結果を予測することができ，未来をより良い方向に変える方策の決定がしやすくなると考えています．EMAアンケートは，その人の状態を常に把握



(a)　個人特性（ストレスレベル）や社会環境（定期試験）と回答量の時間変化の分析



(b)　回答量が減少するタイミングでインセンティブを与え回答量の増加を促す

図２　行動データ分析結果に基づく方策の探索

するという観点から，時間や被験者に偏りなく，均一に回答数を確保できることが望ましいです．例えば，図２(b)に示すように，ストレスレベルの高い被験者に対して，回答量が落ち込むであろう試験終了後に備え，特別なインセンティブを与えて回答を促す，などの方策をとることが可能となります．

以上で示したのは，複雑な人間行動の一側面をとらえた分析に過ぎません．今後は，これまでに私たちが取り組んできた行動モデル(6)をベースに，「不確実性に対する態度（リスク志向性）」や「待つことに対する態度（辛抱強さ）」など，行動経済学的な人間特性も考慮して人の意思決定・行動モデルの高度化に取り組む予定です．なお，ここでいうモデルの高度化とは，モデルがより「人間らしい」判断をするようになることを意味します．「人間らしい」モデルだからこそ，悪い未来を含め，社会の未来の姿を予測し描きだせるのではないか，と私たちは考えます．

人の内面を理解するための音声認識技術

スマートフォンやAIスピーカに話しかけて機器を操作する音声アシスタントの登場により，音声認識技術が世の中に急激に普及しました．このような，短い言葉のやり取りによる音声対話でコンピュータを操作するための音声認識技術の実用化は，古くは1980年代の自動音声応答装置や1990年代のカーナビゲーションへの導入などに始まり，近年では深層学習技術の導入による音声認識精度の大幅な向上によって，音声アシスタントの急激な普及につながりました．

一方，音声は人どうしのコミュニケーションにおける重要な情報伝達手段でもあります．人どうしの自然なコミュニケーションにおいては，音声アシスタントへ呼びかける短文音声とは異なり，比較的長い長文の音声が含まれ，より複雑な言語表現が現れることから音声認識にとっては対応が難しくなります．さらに，会話の相手が見知った相手になると，くだけた口調で断片的な発話が含まれるようになり，音としても，言語表現としても予測がさらに困難になります．一方で，このような音声を認識することで，コンタクトセンタに大量保存されている通話ログを対象とした会話内容の分析やリアルタイムの会話支援など，事業的に大きな価値のある用途に活用できるため，種々の深層学習を活用した音声認

識技術の検討が現在も活発に行われています．このように音声認識技術は，音声をテキストに変換する精度の向上とこれに伴う用途の拡大，扱う音声の複雑化が繰り返され，発展を遂げています（**図３**）．

一方，音声コミュニケーションを通じて伝達される情報には，言語情報（テキスト情報）だけではなく非言語的な情報（性別，年齢，感情，意図，態度など）も含まれています．私たちは，音声からテキスト情報を高精度に認識する取り組みとともに，非言語的な情報の認識・活用技術についても検討を進め，話者の属性（成人男性・成人女性・子ども），感情（喜・怒・哀・平静），疑問・非疑問を抽出できる技術を開発しています．また，コンタクトセンタ音声のようなオペレータと顧客との２名の話者からなる会話音声を対象として，顧客の怒り有無や満足度，オペレータ側の応対が顧客側に与える印象としての応対音声好感度を推定する技術の研究開発と実用化を進めています．

現在取り組んでいる，言語情報や非言語的な情報に対する認識技術は，より高度なサービスの実現に向けた，言葉に現れない人の心の状態を読み取る技術の第一歩です．私たちは普段の会話において，相手の感情や興味，好意や無関心などといった相手の心の内面にある情報を，声の調子や視線，表情，間の長さ，言葉遣いの変化などさまざまな手掛かりを使って推測することで，円滑なコミュニケーションにつなげています．このような人の内面情報を機械で認識することは，ユーザの気持ちに寄り添う音声対話エージェント，生徒１人ひとりの理解度や興味に応じた教育，問診対話データからの患者の体調や精神的ストレスの検出など，言葉に表れない人の心の機微を対象にした新たなサービスにつながることが期待できます．さらに，NTTグループが進めるIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想の１つであるDTC（デジタルツインコンピューティング）が取り組むグランドチャレンジ「感性コミュニケーション」がねらう，経験や感性などの個々人の特性の違いを超え，心の中のとらえ方や感じ方を直接的に理解し合える新たなコミュニケーションの実現に貢献することが期待されます．

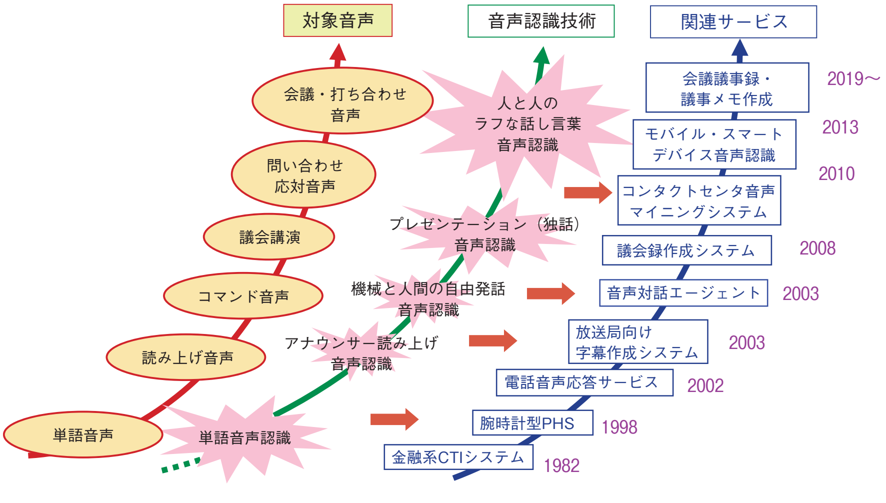


図３　NTTにおける音声認識技術の取り組み

人の思考力を引き出し拡張する思考拡張型刺激デザイン技術

石鹸のにおいをかぐと掃除がしたくなる[7]，商品パッケージの色を変えると，同じ中身でも異なる商品に感じる[8]ように，人の思考や行動は，言語や数値等のように意識的に解釈された情報の影響を受けるだけでなく，色や香り，話し方の雰囲気等のように，無意識的に感じる感覚や知覚の影響も受け，変化することが知られています．私たちのグループでは，「人が知覚する刺激」と「人の思考や行動」との関係性にかかわる知見を蓄積し，その関係性に基づいて，人の思考力をより引き出し拡張していくための知覚刺激生成・制御の研究に取り組んでいます．

これまでの取り組みの１つとして，発話者の話し方（声の高さ，話す速度，抑揚の大きさ）が人の心理的な状態や行動に及ぼす影響について調査した研

究[9]があります．この研究では，商品を宣伝する音声と，人の消費行動との関係を対象として，大規模な主観評価実験を実施し，購買行動につながる「購買意欲」と「話し方」との関係性を，感情を媒介として表現する消費者行動モデル[10]（**図 4**）を用いて分析しています．

■実験手順

クラウドソーシングにて，日本語を母語とする男女202名に，話し方を変えた電化製品に対する「宣伝文」を聴取してもらい，それを聞いた際に感じた「感情」と「購買意欲」についての評価項目に回答してもらいました．そして，得られた話し方（音声特徴）に関するパラメータ（声の高さ，話す速度，抑揚の大きさ）と，評価項目に対する回答を基に，音声特徴と感情，購買意欲の関係を分析しています．宣伝文は，プロの女性話者が読み上げ調で発話した音声を元に，**表 1** に示すパラメータを調整した音声を利用し，評価項目は**表 2** に示したものを利用しました．

■実験結果

消費者行動モデルに基づく 3 層モデルを利用して，音声特徴と，感情，購買意欲の関係性を分析した結果を**図 5** に示します．結果を見ると先行研究[11]でも示されているとおり，感情のうち，快感情と覚醒が購買意欲に影響を及ぼしていることが分かります．また，感情の中でも快感情の影響がもっとも強いことが分かります．また，声が高く，話速が早く，抑揚が大きいことが，感情の評価値が高くなることにつながり，その中でも話速の影響がもっとも大きいことが分かります．

これらの結果をまとめると，広告文の読み上げによる音声刺激においても「外部刺激⇒感情⇒購買意欲」のモデルが成立すること，話速がもっとも快感情に影響し，快感情がもっとも強く購買意欲に影響することが分かりました．

以上で示した取り組みは，複雑で多様な人の思考プロセスからすると，そのごく一部を取り上げた分析に過ぎま

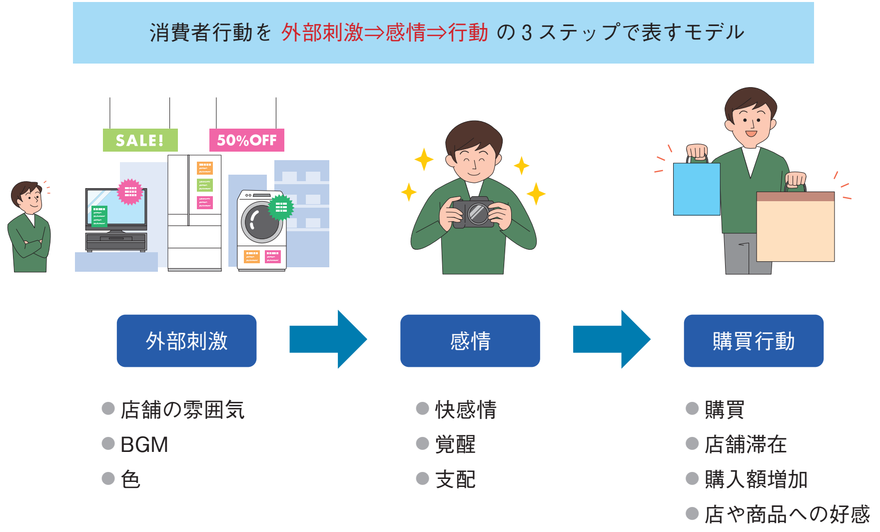


図 4　消費者行動モデル

表 1　音声のパラメータ

音声のパラメタ		設定値
声の高さ	平均F0［Hz］	0.9439倍，1 倍，1.059倍
話す速度	話速［mora/s］	0.890倍，1 倍，1.1225倍
抑揚の大きさ	F0分散［Hz］	0.6667倍，1 倍，1.5倍

表 2　評価項目

評価項目		設定値
感情	快感情	不快⇔快（7 段階）
	覚醒	睡眠⇔覚醒（7 段階）
	支配	服従⇔支配（7 段階）
購買意欲		非常に購入したい⇔全く購入したくない（7 段階）

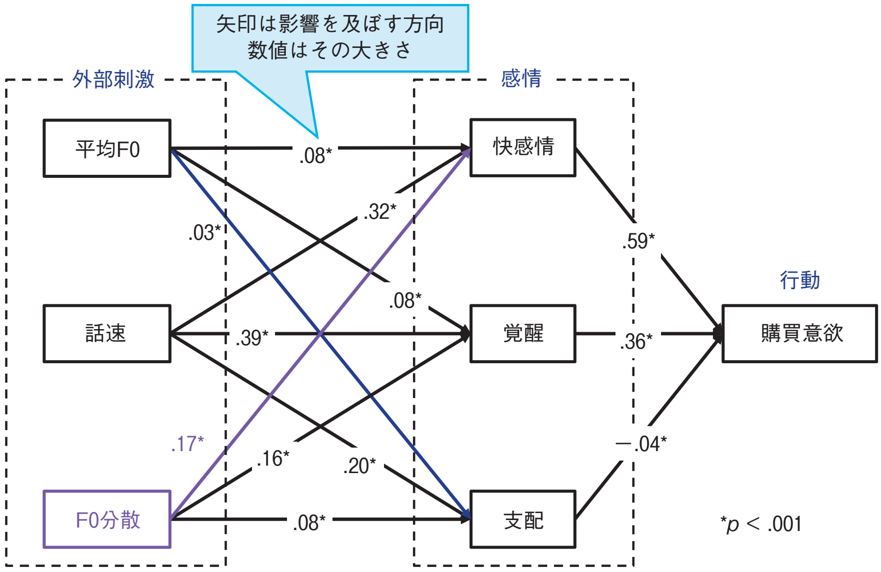


図５　音声特徴，感情，購買意欲の関係分析結果

せん．今後は，聴覚刺激においても聴取者の属性との関係等，より幅の広い要素について検討を進めるとともに，視覚や嗅覚など聴覚以外の刺激についても取り組む予定です．また，刺激により影響を与える人の思考現象も，直感的な判断から，論理的思考や人の価値観への影響等より深い段階への影響について検討を進める予定です．これらの研究を通じて，人の思考力を引き出すために何が必要かを明らかにし，人の可能性を高め，より良い社会の実現に貢献したいと考えます．

おわりに

今後は，前述した４つの技術を磨き上げることで，「情報理解」「情報処理」「反応・行動」で構成される人の思考力を理解・再現・拡張していく方針です．

■参考文献

(1) K. Nishida, I. Saito, K. Nishida, K. Shinoda, A. Otsuka, H. Asano, and J. Tomita: “Multi-style Generative Reading Comprehension,” ACL 2019, pp. 2273-2284, 2019.
(2) K. Nishida, K. Nishida, M. Nagata, A. Otsuka, I. Saito, H. Asano, and J. Tomita:：“Answering while Summarizing: Multi-task Learning for Multi-hop QA with Evidence Extraction,” ACL 2019, pp. 2335-2345, 2019.
(3) R. Tanaka, K. Nishida, and S. Yoshida：“VisualMRC: Machine Reading Comprehension on Document Images,” AAAI 2021, pp. 13878-13888, 2021.
(4) R. Wang, F. Chen, Z. Chen, T. Li, G. Harari, S. Tignor, X. Zhou, D. Ben-Zeev, and A. T. Campbell: “StudentLife: assessing mental health, academic performance and behavioral trends of college students using smartphones,” Proc. of UbiComp 2014, Seattle, U. S. A. , Sept. 2014.
(5) T. Tominaga, S. Yamamoto, T. Kurashima, and H. Toda：“Effects of Personal Characteristics on Temporal Response Patterns in Ecological Momentary Assessments,” Proc. of INTERACT 2021, Bari, Italy, August 2021.
(6) T. Kurashima, T. Althoff, and J. Leskovec：“Modeling Interdependent and Periodic Real-World Action Sequences,” Proc. of WWW 2018, Lyon, France, April 2018.
(7) K. Liljenquist, C. B. Zhong, and A. D. Galinsky：“The Smell of Virtue: Clean Scents Promote Reciprocity and Charity,” Psychological Science, Vol. 21, No. 3, pp. 381-383, March 2010.
(8) 槙究：“カラーデザインのための色彩学，” オーム社，2006.
(9) M. Nagano, Y. Ijima, and S. Hiroya：“Impact of Emotional State on Estimation of Willingness to Buy from Advertising Speech,” Proc. of INTERSPEECH 2021, 2021.
(10) A. Mehrabian and J. A. Russell：“Approach to environmental psychology,” The MIT Press, 1974.
(11) R. Donovan and J. Rossiter：“Store atmosphere: an environmental psychology approach,” Journal of retailing, Vol. 58, No. 1, pp. 34–57, 1982.

（上段左から）西田　京介/ 倉島　健/ 宮崎　昇
（下段左から）戸田　浩之/ 西岡　秀一

音声・言語処理等をベースに人の思考力を理解・再現・拡張することが可能な技術の研究開発を推進していきます．

◆問い合わせ先
NTT人間情報研究所
思考処理研究プロジェクト
E-mail　shikou-inquiry-ml＠hco.ntt.co.jp

人と人，人と機械の共生の実現をめざす共生知能研究

現実世界とサイバー世界の融合が急速に進展する中，人と人，および人と機械の共生のあり方は，大きく変化しています．ICTの活用によって，人や集団の振舞いを，より良い未来の実現や感動の共有に向けてそっと後押ししたり，人と機械とがより自然で複雑なやり取りのもと，一緒に働くことができるようになるでしょう．本稿では，このような未来像に向けて，共生知能研究プロジェクトが取り組んでいる研究内容について概要を紹介します．

杵渕（きねぶち） 哲也（てつや）　浅見（あさみ） 太一（たいち）
吉田（よしだ） 仙（せん）　山本（やまもと） 隆二（りゅうじ）

NTT人間情報研究所

はじめに

現実世界とサイバー世界の融合が急速に進展する中，私たちの働き方や生活は大きく変化しています．実空間に人が集まり対面で行われていた会議や協働作業，学校での授業や懇親会等は，今やリモート環境でも当たり前のように行われ，雑談や井戸端会議はSNSが主流になりつつあります．スタジアムやイベントホールに直接足を運んでいたスポーツ観戦や演劇視聴は，サイバー空間内でもリッチに体験できるようになってきました．新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の世界的な流行も，2つの世界の融合に拍車をかけています．

このような時代に，人と人，さらには人と機械は，ICTの力を活用することで，これまで以上に豊かに共生し，それによって人はこれまで以上のWell-beingを実現させることができると確信しています．例えば，人や集団を，より良い未来の実現や感動の共有に向けてそっと後押ししたり，人と同じような内面を持つ機械とより自然で複雑なやり取りのもと，一緒に働くことができるようになるでしょう．そのような未来像を見据え，私たちは人の振舞い，特に複数の人からなる集団の振舞い（思考，行動等）をモデル化，シミュレーションし，人と人，人と機械が協働し，共生する社会活動の将来予測や最適化に資する技術の研究開発に取り組んでいます．

具体的には以下の3つのテーマを掲げています．

① 群心理・行動モデリング：人とその集団の心理，判断，行動等の振舞いのモデリング，およびモデルに基づく行動のシミュレート，最適化

② 集団創発・ソーシャルブレイン：テキストコンテンツの内容を的確に理解・知識化し，人との協働において求められる情報を自然なやり取りで提供する知識処理

③ 情動的知覚制御：人の情動的な心理（熱狂・一体感等）の内面モデルの解明・センシング，および個々人の対人特性に寄り添いコミュニケーション齟齬を解消する協働作業支援

本稿では，3つのテーマについて私たちの取り組みを紹介します．

群心理・行動モデリング

本テーマでは，人の意思決定や行動のモデリングの研究開発に取り組んでいます．例えば，夕飯に何を食べるか，何を買うか，運動をするか・しないか，どこに遊びに行くか，SNSでどのような発言をするかなど，人は日々さまざまな意思決定を行っており，その結果として社会活動が形成されています．社会活動の将来予測やこれまで以上のWell-beingの実現のためには，こういった人の意思決定・行動のモデル化と計算機によるシミュレートが欠かせない技術となります．例えば，行動をモデル化し，メッセージングやインセンティブなどの介入手段によって行動がどう変わるかをシミュレートできれば，ユーザにより良い行動を促すアプリ・サービスの実現につながりま

す．私たちは，人の行動の分析，行動のモデル化・シミュレート，それに基づく行動変容策の導出に取り組んでいます（**図１**）．

行動のモデル化・シミュレートに向けて，深層学習を含むさまざまな数理モデリングとビッグデータに基づく最適化技術の応用は有望なアプローチです．しかし，多種多様な人の行動のデータを大量に集めることは容易ではありません．また，人の意思決定・行動のメカニズムを解明するためにも，単に既存の数理モデルを当てはめるだけではない，より踏み込んだアプローチが必要になると考えています．

人の行動に関しては，これまで行動経済学や社会心理学などの分野で研究され，多くの知見が蓄積されています．NTT人間情報研究所では，これらの知見を取り入れた数理モデルを新たに構築し仮説検証を行うことで，人の意思決定・行動のメカニズムを明らかにするとともに，計算機による効率的で高精度なシミュレートの実現をめざしています．

集団創発・ソーシャルブレイン

本テーマでは，テキストコンテンツの内容を的確に理解・知識化し，人との協働において求められる情報を自然なやり取りで提供する知識処理の研究開発に取り組んでいます．

テキストコンテンツの内容を的確に理解・知識化するための基盤となる技術に言語モデルがあります．言語モデルとは，日本語の例でいえば「日本語とはどういうものか」をプログラムが扱いやすいかたちで表したもので，最近ではこれを超大量のテキストデータから大規模事前学習により獲得した深層学習モデルとして実現する手法がこの分野を席巻しています．NTT人間情報研究所でも日本語の大規模事前学習言語モデルを構築し，さらにその性能を高めていくための研究開発を行っています．このような取り組みを通じて，人と人，人と機械が協働するための言語コミュニケーションの基盤の構築をめざしつつ，NTTグループのさまざまな言語処理関連サービスへの貢献を行っていきます．

テキストコンテンツにおける人と機械の協働の有望なユースケースの１つに文書要約技術があります．NTT人間情報研究所では，大規模事前学習言語モデルを利用した精度の高い要約が可能で，かつ要約の長さを用途に応じて調整したり，ユーザが指定したキーワードを含むような要約を生成したりできるような技術を開発しています．このような技術をさらに進化させ，例えば医療や知的財産関連などの文献を大量に調査する業務においてレポートを自動的に生成するような技術が実現できれば，大きな価値を生むものになると考えています（**図２**）．

人と機械の協働において，人と話すのと同じ言葉で機械とも会話できれば，協働はより自然なものとなります．人と自然言語でやり取りする技術は対話システムと呼ばれ，特定の仕事をこなすタスク指向対話システムと，いわゆる雑談を行うようなシステムに大別されます．NTT人間情報研究所では雑談対話システムの研究開発を行っており，特に対話システムにキャラクタ性を持たせることでユーザが親しみを感じられるような技術に取り組んでいます．

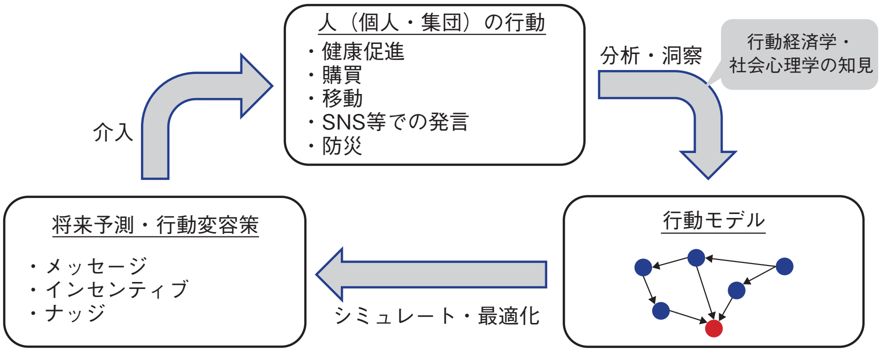


図１　群心理・行動モデリング研究の取り組み

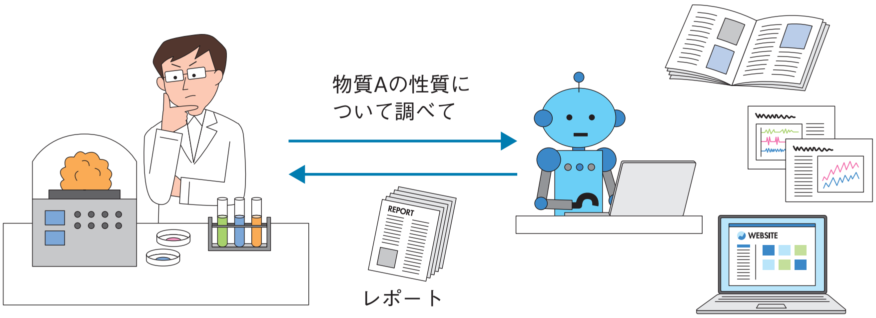


図２　人と機械の協働（レポート自動生成）

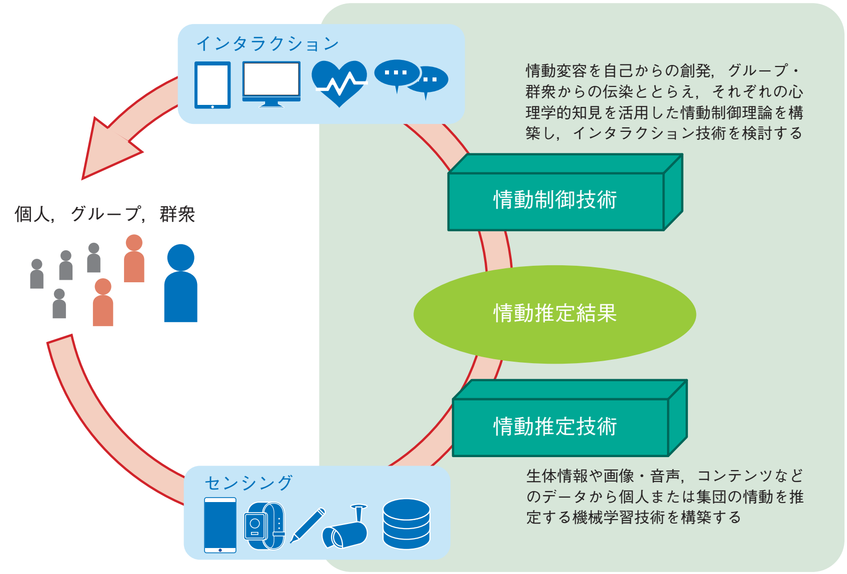


図 3　情動的知覚制御技術の概要

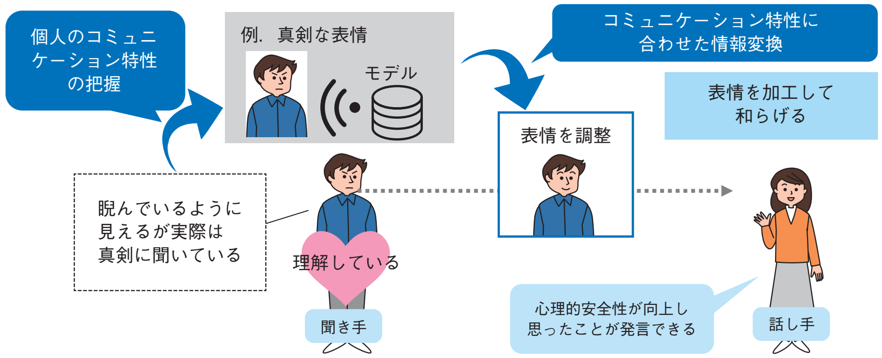


図 4　協働作業支援技術の概要

情動的知覚制御

本テーマでは，人の知覚から情動に至る特性を理解し，その特性に応じて人と人のコミュニケーションへの介入をすることで，集団としての共生の質を向上させる技術の研究開発に取り組んでいます．具体的には，以下の 2 つの技術の確立に取り組んでいます．

① 情動的知覚制御技術：人の情動表出特性を理解し，センシングやデータ分析を通して情動特性を推定するとともに，情動特性に合わせた知覚刺激により情動をコントロールすることで，コミュニケーションの拡張（情動の共有による一体感・熱狂の醸成など）を実現する技術

② 協働作業支援技術：人のコミュニケーション特性を理解し，特性に合わせた情報変換を通じてコミュニケーション齟齬を解消することで，コミュニケーションを円滑化する振舞いを誘起させ，集団での協働作業の質の向上を実現する技術

前者の情動的知覚制御技術では，生体情報や画像・音声，コンテンツなどのデータを利用して個人や集団（グループや群衆など）の情動を推定する情動推定技術と，推定結果に基づき情動を望ましい状態に変化させる情動制御技術の確立に取り組んでいます（**図 3**）．

後者の協働作業支援技術では，集団での協働作業の質を向上させる重要な要因として「心理的安全性*」に着目し，心理的安全性を高めることで多様な特性を持つ人々が共に働きやすくなることをめざしています．そのために，本技術では個人のコミュニケーション特性を把握し，その特性に合わせた言語情報・非言語情報の変換を行い，コミュニケーション齟齬を低減することで心理的安全性の向上を実現する技術の確立に取り組んでいます（**図 4**）．

＊ 心理的安全性：「無知，無能，ネガティブ，邪魔だと思われる可能性のある行動をしても，このチームなら大丈夫だ」と信じられることを意味します．

（上段左から）杵渕　哲也/ 浅見　太一
（下段左から）吉田　　仙/ 山本　隆二

共生知能研究プロジェクトでは，人と人，人と機械の豊かな共生の実現をめざし，社内外と積極的に連携しながら研究開発を進めていきます．

◆問い合わせ先
NTT 人間情報研究所
共生知能研究プロジェクト
E-mail　sil-contact-p＠hco.ntt.co.jp

人と機械の共生をめざすサイバネティックス技術

近年の計算機技術とAI（人工知能）技術の発展に伴い，高度な技術を用いたサービスを日常生活に利活用できる環境が急速に整いつつあります．私たちは，従来技術に対して，より人間らしく認識・理解する機構を導入することで，人の生活を高いレベルで機械がサポートし，人と機械が共生する豊かな社会の実現をめざしています．本稿ではこれらに対する取り組みについて紹介します．

青野　裕司（あおの　ゆうし）
瀬下　仁志（せしも　ひとし）
松村　成宗（まつむら　なりむね）
小池　幸生（こいけ　ゆきお）
松村　誠明（まつむら　まさあき）

NTT人間情報研究所

人と機械の共生をめざして

近年，計算機の演算能力が飛躍的に増加し，画像処理・認識精度が向上しただけでなく，各種センサの情報をクロスモーダルに扱う技術が洗練され，これまではSF等でしか描かれてこなかった自動車の自動運転も徐々に現実的なものになりつつあります．また，音声認識や文字認識・文脈理解の精度向上に伴い，チャットボットに代表される自動応対エンジンが窓口業務のサポートを行うようになり，スマートフォンに代表される高い演算能力を持つモバイル端末を持ち歩くようになったことから，高度なICTを用いたサービスを日常生活に利活用できる環境が急速に整いつつあります．これらの認識・理解の精度向上に大きく寄与している技術の1つが，大量の実データを用いて機械学習を行うAI（人工知能）技術です．

現在主流のAI技術は，人間の経験や記憶に基づくロジカルかつ客観的な「左脳のような働きを持つ認識・理解」をモデル化しているようなものであり，主に言葉で表現できるものや，画像・データのようにシンボル化できるものを対象として，人々の利便性向上に資することをめざしてきました．

これに加えて私たちは，感覚や動作など言葉にできないものや，個々人によって判断が異なるような主観的で一意に表せないものに対する「人間の右脳のような働きを持つ処理・作用プロセス」を解明し，より人間らしく認識・理解する機構を導入することで，人の生活を高いレベルで機械がサポートし，人と機械が共生する豊かな社会の実現をめざしています（**図1**）．

これらを実現するためのアプローチとして，私たちが検討を進めている取り組みの中から，高精度に人間の生体信号をセンシングしてその運動を支援する「運動支援」に対する取り組み，非言語で経験的な技能の獲得・発揮を支援する「身体知」に対する取り組み，遠隔操作ロボットを人間が操作する際の体感時間を制御する「ゼロレイテンシ」に対する取り組みの各技術について紹介します．

運動支援

1948年にノーバート・ウィーナーが提唱した「サイバネティックス」は，生体と機械における通信と制御を統一的に扱おうという考え方です．私たちはこの考え方に改めて着目し，人の運動を支援する技術開発に取り組んでいます．

人の運動は，脳からの運動指示が筋肉に伝達され，筋肉が収縮することで実行されます．また，その結果を刺激として感覚器を通じて脳が知覚・認知し，新たな運動の計画・指示を繰り返します．この人体における通信や制御に対し，脳波や筋電位等の生体信号のセンシングやフィードバックにより支援しようという試みです．

より具体的には，他者（熟練者）や過去の自分の運動を基に，今の自分自身に対して再現（転写）することで，運動能力の一時的・恒久的な拡張・支援を実現し，自分自身がより良く運動（生活）できる社会の実現をめざします．例えば，各種技能・スポーツにおいて熟練者の筋肉動作を筋電気刺激で再現するトレーニングや，日常動作において自身の運動記録を基にしたリハビリテーションなどが考えられます．

生体信号を活用した人の運動能力の再現（転写）実現に向けて，以下の4つの機能が必要と考えており，これらの実現に向けて取り組んでいます（**図2**）．

・生体信号の取得・運動モデル生成：転写元の生体信号（脳波・筋

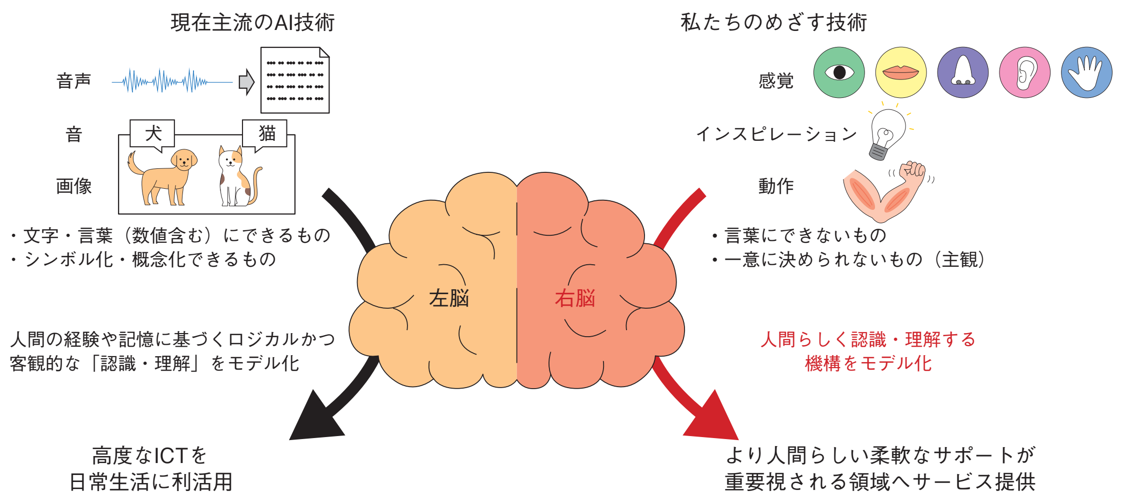


図１　私たちのめざす技術

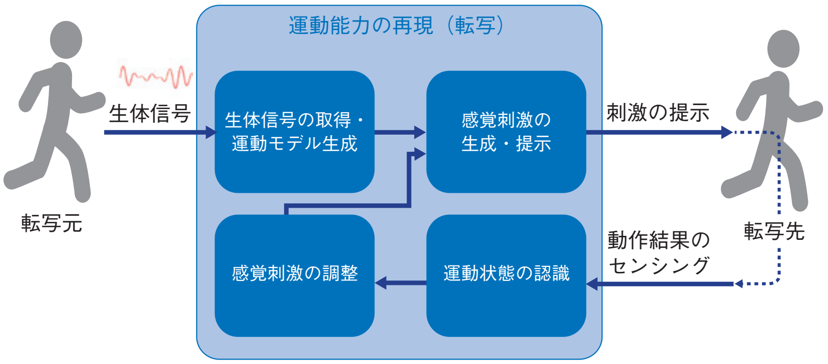


図２　生体信号を活用した人の運動能力の再現（転写）実現に向けての取り組み

電位等）をセンシングし，生体信号と運動の関係性を表す運動モデルを生成します．

・感覚刺激の生成・提示：生成した運動モデルを基に，転写先を運動制御する感覚刺激（筋電気刺激・振動・外骨格等）を生成し，提示します．

・運動状態の認識：刺激を受け動作した転写先の運動結果や生体信号をセンシングし，姿勢や筋肉収縮などの状態を認識します．

・感覚刺激の調整：運動状態の認識結果と運動モデルを基に，より良い運動結果や自然な運動体験となるよう感覚刺激のパラメータを調整します．この結果を基に転写先への新たなフィードバックを実施します．

私たちは，これまでにも筋電位等の生体センシング技術や触覚・筋電気刺激を用いた人体へのフィードバック技術に取り組んできました．一方で人の運動メカニズムは複雑であり，運動支援・運動能力拡張に関しては生理学分野・脳科学分野・生体医工学分野などさまざまな取り組みが進んでおり，学際的なアプローチが必要です．今後に向けて，蓄積された技術的強みを活かすとともに，社内外の専門家との学際的な連携を通じ，技術実現およびそれを通じた運動メカニズムに関する新たな知見の獲得をめざします．

運動にかかわる人間の処理・作用プロセスを解明し人間の能力拡張により，より高いレベルで人と機械が共生する社会の実現をめざしていきます．

身体知

人間の生活・社会的な活動にあって，「知（識）」は人の行動・思考の質や効率を高め，精緻にする基礎となるものです．それゆえに長い歴史の中で蓄積されてきた「知」を獲得し，日常のさまざまな場面で発揮することは，今を生きる人にとって重要な行為であるといえます．

ところで「知」を獲得するといってまず想像されるのは，学校での勉強・教科学習のようなものではないかと思われます．そうした，すでに体系化され，記述された知を「形式知」と呼び，その習得や発揮の方法が広く実践されていることは，誰もが経験しているところです．では，「知」とは「形式知」だけを指すものかというと，そうではありません．人が学び，発揮する「知」の中には体系立てることや記述することが困難で，頭で理解するのでなく経験を重ねることでしか文字どおり身に付けることができないタイプの「知」が存在します．それが，「身体知」と呼ばれるものです．

例えば「楽器の演奏ができるようになる」ために，一般には教本が存在し，

楽器の扱い方や機能・手指の運びなどが「体系的に記述」されています．では，これをすべて読み込んで「理解」できれば楽器が演奏できるようになるかというとそうではなく，実際には，その理解に立って自分の身体を動かし，練習を重ねることで初めて演奏できるようになります．このことは，教本に表された「形式知」とは別の，身体活動そのものに根差す「知」である「身体知」が存在することを示しています（**図３**）．

その性質上，「身体知」は行為者自身の感覚・主観に負うところが多く，客観的で言語化しやすい「形式知」のようにICTを活かした習得・発揮の支援とは縁遠いものでした．しかし，昨今の技術進化の中で，より当事者が受ける感覚に近い情報のセンシングや高速処理が可能になってきたことを背景に，私たちは行為者自身の認知を起点に行為の仕組みをとらえるネオ・サイバネティックスの観点から「身体知」の研究に取り組んでいます．具体的には，スポーツにおける「身体知」の獲得や発揮の仕組みを明らかにし，その支援を可能にすることを目的として，ウインドサーフィンを題材に競技者の身体活動と，自然環境や道具の挙動・競技パフォーマンスの間に潜むパターンを見出す分析手法と，見出したパターンを他者に伝える伝達表現，およびその表現を受けとった側にもたらされる価値（身体知の獲得や発揮，あるいは競技や自然に対する興味関心の変化）の向上について，実際の競技者のデータを基に検討を進めています（**図４**）．

「身体知」研究において，スポーツの領域は典型的なものといえますが，前述のような楽器の演奏・絵の描き方・上手なプレゼンなど，身体的な動作と強く結びついて獲得・発揮される「知」である技能は日常のさまざまな場面に存在します．そのため，私たちはスポーツ以外の領域についても並行して検討を進めながら，これまで人の中に閉じられてきた「身体知」を，身に付けたいその人自身の視点に寄りそうICTにより，誰もが獲得し，発揮できる世界の実現をめざしていきます．

ゼロレイテンシ

遠隔操作ロボットによる物理作業は，看護や介護等のサービス業での人手不足解消やパンデミック下の医療機関や災害現場等の危険作業での安全確保に非常に有望であるといえます．

しかし，遠隔操作においては操作者とロボットの間で必ず遅延が発生し，この遅延により作業ミスや作業効率低下・操縦者の疲労などの悪影響が発生することが知られており，遠隔操作ロボットの高度化により実用性が高まる反面，遅延による影響が無視できなくなってきています．遅延の発生原因は，通信時間だけでなく，カメラやディスプレイ・サーボなどの動作や，これらの制御にも時間が必要となるため，低遅延なシステムを用い，ごく近距離

学習により獲得される知

形式知	身体知
・言語的な知識 ・体系的で順序だった教授の理解	・非言語的な技能 ・感覚的で経験（訓練）による体得

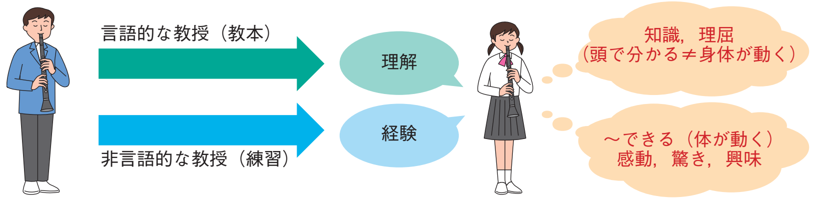


図３　「身体知」とは

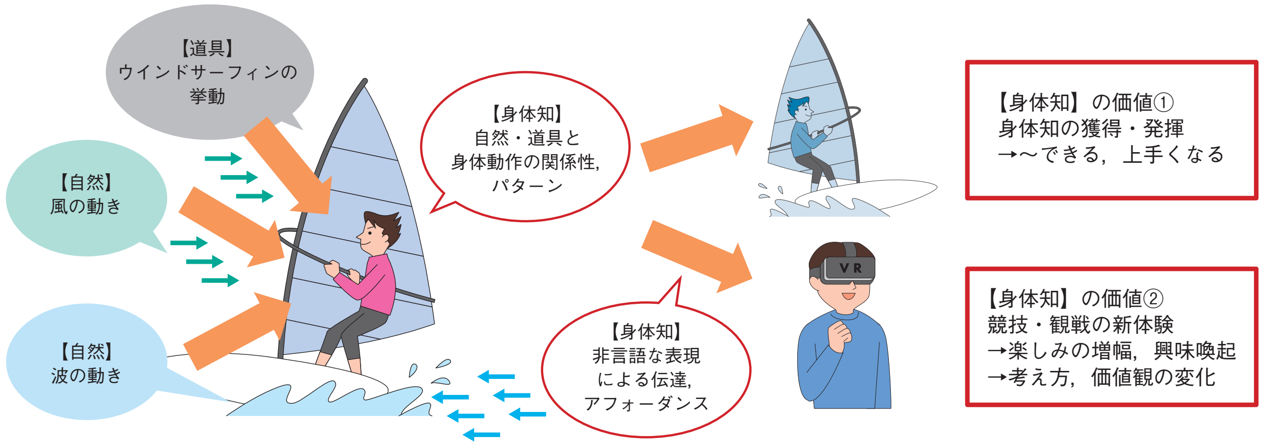


図４　ウインドサーフィンの「身体知」

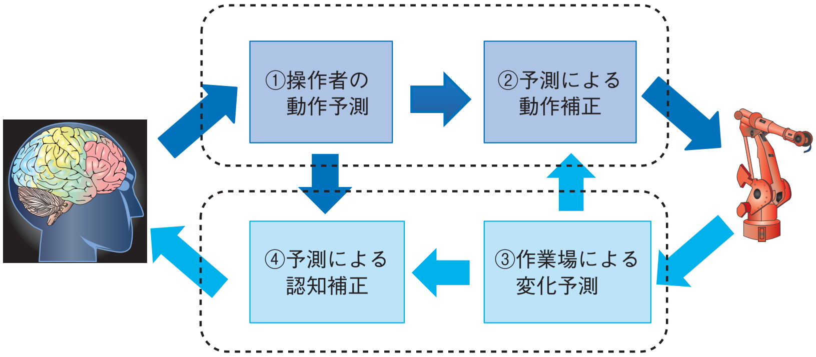


図５　ゼロレイテンシを実現する４種の技術

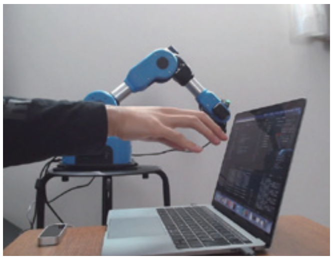


図６　操縦者の動作予測とロボットの動作補正を行う実験システム

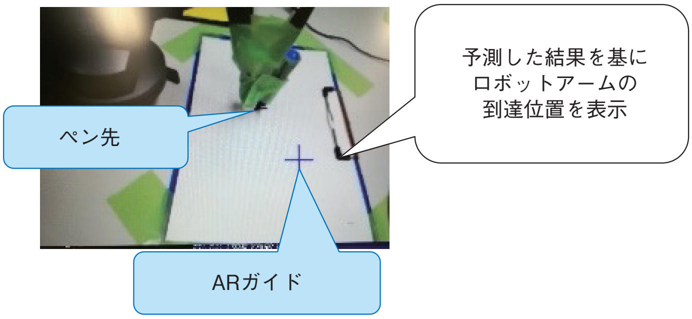


図７　ARによる認知補正の実験システム

で遠隔操作を行った場合でも，往復（カメラへの入射から操縦者への画面表示までの遅延時間と，操縦者の操作からアクチュエータの動作までの遅延時間合計）で100 ms以上の遅延が発生し，カメラやディスプレイ・サーボなどの動作原理から，遅延時間そのものを大きく削減することは困難です．

このことから，本研究では操縦者の動作予測・作業場所の物理変化予測・ロボットの動作補正・操縦者の認知補正の４種の技術により，操縦者に遅延を感じさせないことにより遅延による悪影響を解消し，操縦者の能力を完全に発揮可能な遠隔操作システムの実現をめざしています（**図５**）．

操縦者の動作予測とロボットの動作補正の一例としては，作業者の数100 ms先の未来の動作を予測し，その予測結果に基づいて操作者が動作を行う前にロボットを動作させることにより，遅延による影響を軽減します（**図６**）．ロボットの動作が操作者の意図しない間違えた動作となる可能性もあるため，現在は作業内容や物体の動きから作業者の意図を推定することで予測精度を向上する研究を進めています．

作業場所の物理変化予測とロボットの動作補正の一例としては，作業者の動作によりロボットがどのような動きを行うかロボットの物理構造からシミュレーションを行い，シミュレーション結果をAR（Augmented Reality）等によって作業者へ提示することにより，実際にロボットが動作する前に操縦者がロボットの動作結果を認識可能とし，遅延による影響を軽減させています（**図７**）．操縦者はARによる予測情報という直接作業する場合とは異なる情報を基に作業を行うこととなるため，現在は各種作業において，どのような情報をどのように提示すれば，より効果的に操縦者の支援が可能であるか研究を進めています．

今後の展望

現在は前述のように運動支援・知識と動作の関係性・ロボットとのインタラクションの個別技術について洗練していますが，将来的には，これらの技術を組み合わせ，特に人間らしい柔軟なサポートが重要視される業界に対して，一気通貫で技術を提供できるよう検討を進めていきます．

（上段左から）青野　裕司/ 瀬下　仁志/ 松村　成宗
（下段左から）小池　幸生/ 松村　誠明

体を動かすことが健康の秘訣である，とよく言われます．本技術によって，誰もが自分に合った体の動かし方・使い方が分かり，ひいては社会全体がより健康でアクティブになる，そんな未来の実現をめざし，研究開発を進めていきます．

◆問い合わせ先
NTT人間情報研究所
サイバネティックス研究プロジェクト
E-mail　cyberne-hosa-p-ml@hco.ntt.co.jp

リアルとサイバーの交錯空間を支える要素技術

誰もが快適で活力に満ちた質の高い生活を送ることのできる人間主体の社会に向けて，リアル空間とサイバー空間を高度に融合させたシステムの実現が期待されています．本稿では，リアル空間とサイバー空間の高度な交錯による価値創造の仕組みの実現に向けて研究開発を進めている，リアル空間を計測したデータを解析，空間や物体を認識し，データをコンパクトに圧縮することでサイバー空間を構築する技術を紹介します．

島村（しまむら） 潤（じゅん）　安藤（あんどう） 慎吾（しんご）
谷田（たにだ） 隆一（りゅういち）

NTT人間情報研究所

サイバー空間の構築

ICTのめざましい発展により，膨大なIoT（Internet of Things）データの収集や分析が可能となりつつあります．これに伴い，政府やさまざまな企業が，Society 5.0等で提唱されるようなサイバー空間とリアル空間を高度に融合させたシステムの実現をめざして研究開発に取り組んでいます．NTTでは，緯度・経度・高度・時刻の4次元の情報を可能な限り精緻に，リアルタイムに把握し，そこから社会実装に資する未来予測を実現できる基盤をめざして，4Dデジタル基盤®の研究開発に着手しています．

4Dデジタル基盤®は，高精度で豊富な意味情報を持つ「高度地理空間情報データベース」上に，人・モノなどのセンシングデータを統合し，多様な産業分野における高度な予測・分析・シミュレーション・最適化を可能とします（図1）．道路交通の整流化や，都市アセットの最適活用，社会インフラの維持管理等，さまざまな領域で活用の可能性があると考えています．「高度地理空間情報データベース」を整備

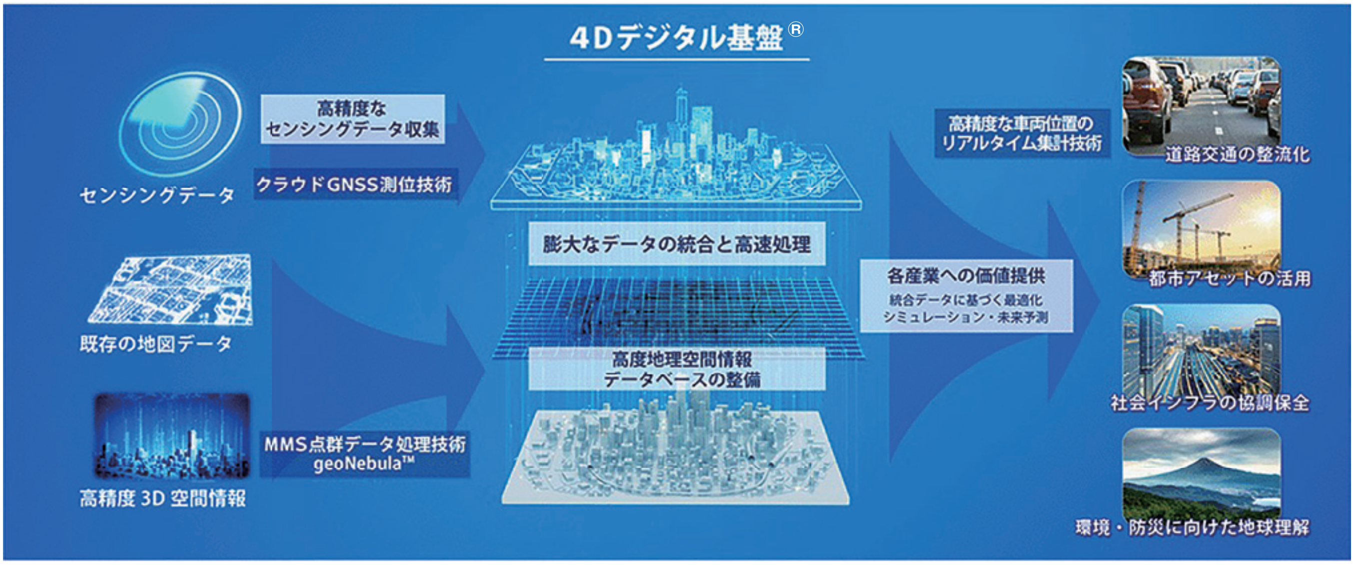


図１　4Dデジタル基盤®の全体像

するには，LiDARなどでリアル空間をデータ化しサイバー空間を構築する必要があります．この処理は一般的には以下の流れとなります．

・ステップ1　データ収集：LiDARなどでリアル空間をデータ化
・ステップ2　空間・物体認識：計測データから空間・物体を認識し，その正確な位置を取得
・ステップ3　データ保管：完成データおよび，更新作業や他用途利用に備えて元データも保存

各ステップの省力化・効率化に向けて，私たちが取り組んでいるMMS点群処理技術geoNebula™の最新の研究成果について，以降で紹介します．

データ収集や空間・物体認識の省力化・効率化を実現する「実空間構造化技術」

現在，LiDARなどで計測された三次元点群からの実空間構造化技術として以下2つの技術の確立をめざし，研究開発を進めています（**図2**）．

① 3Dデータ高解像度化技術
② 3Dシーン理解技術

3Dデータ高解像度化技術は，前述の「サイバー空間構築までの3ステップ」のうち，「ステップ1：データ収集」に位置付けられます．3D点群はその構造上，空間的に隣り合う点と点の間に一定幅の空隙ができてしまいますが，この空隙に対して新たな点を複数生成して補間することで，より高精細な3D点群を取得できる技術になります[(1)]．一方，3Dシーン理解技術は「サイバー空間構築までの3ステップ」のうちの「ステップ2：空間・物体認識」に位置付けられ，高密度な点群のすべてに対し，点単位で大規模かつ高精度に意味ラベル（「路面」「建物」など）を自動付与できる技術になります[(2)]．

ここでは2つの技術の詳細について説明します．まず，3Dデータ高解像度化技術についてです．一般に，安価なLiDARほど，点と点の間の空隙は大きくなる傾向にあります．そのような場合，対象の3次元的な形状情報の多くは失われ，細部の特徴が不明瞭なものとなってしまいます．一方，カメラ画像は近年高精細化が著しく進み，安価なカメラでも比較的密な2Dデータを取得可能となりました．そのため，別途撮影されたカメラ画像の情報をうまく活用できれば，疎な3D点群を補うことが可能と考えられます．そのための市中技術がいくつか存在しますが，前提としてLiDAR点群とカメラ画像との位置合わせ（キャリブレーション）を厳密に行っておく必要があります．両センサの位置合わせは一般に難しく，極めて高度なスキルが要求されます．そこで私たちは，比較的簡易に行ったラフなキャリブレーションでも安定して高密度な点群を生成できる手法を提案しました．導入コスト（装置の安価さ）だけでなく運用コスト（キャリブレーションの簡易さ）まで意識した手法はほとんどなく，他の既存手法と一線を画する特徴となっています．

次に，3Dシーン理解技術です．近年，3D点群のような非グリッド型のデータに適用可能な深層ニューラルネットワーク（DNN）がいくつか提案されています．3Dシーン理解技術は，まさにこの非グリッド型データ向けDNNの1つであり，「セマンティック・セグメンテーション」と呼ばれるタスクを解くために提案された手法に

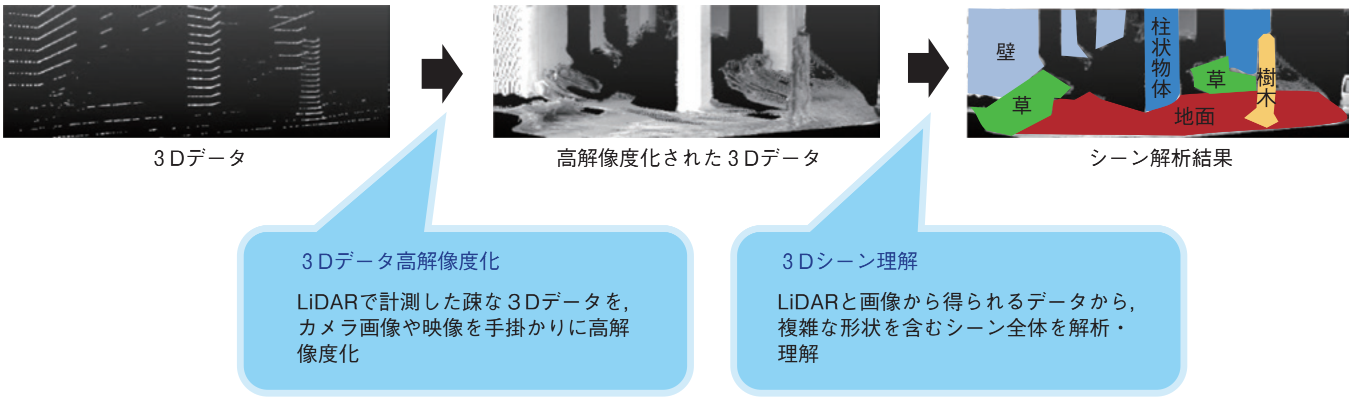


図2　実空間構造化技術

なります．3D点群におけるセマンティック・セグメンテーションとは，点群を構成するすべての点に対し，意味のあるラベルを付与することで複数のセグメントに分離する処理のことです．DNNであらかじめ学習しておくことで，未知の3D点群において各点に付与すべきラベルを推定できるようになります．しかし従来の手法は，屋内など限定された空間内での点群データが対象であるものが多く，街全体など広範囲にわたり，かつ高密度な点群を扱うには，それに見合ったハイスペックな計算機が必須となります．私たちは，比較的安価な計算機でも大規模な点群データを効率的にセマンティック・セグメンテーションできる手法を提案しました．これを前述の3Dデータ高解像度化技術と組み合わせることで，安価に高密度な点群を取得し，3Dシーン全体を細部まで隈なく理解することが可能となります．

3D点群データの高圧縮保存を実現する「4D点群符号化技術」

「4D点群符号化技術」は，LiDARやステレオカメラなどから得られた3D点群データを高圧縮して蓄積・保存する技術です[(3)]．本技術では，「高度地理空間情報データベース」で収集される道路や都市などの3D点群データをターゲットに，それらの高効率な圧縮と利活用時の利便性をかんがみた技術に関する研究開発を進めています．

広域な都市の3D点群データを蓄積し，活用するうえで課題となるのは，まずそのデータサイズです．大量の点群データを効率的に保管するためには，高効率な圧縮技術が不可欠となります．また車載LiDARなどにより時々刻々と収集される3D点群データは，計測車両の走行軌跡に沿って断片的に生成されていくため，それらを広域な都市の3D点群データベースとして蓄積，管理するためには，これらの断片的な3D点群データを統合する処理や，過去データからの時間変化を検知する機能が必要となります．さらには，このように統合された都市データの利活用においては，任意位置の3D点群データを取り出すランダムアクセス機能も備わっている必要があります．そこで私たちは圧縮機能に加え，データの統合・時間変化検知機能，およびランダムアクセス機能も含めた3機能をメインに研究開発に取り組んでいます．

まず圧縮機能に関してですが，本技術ではMPEG（Motion Picture Experts Group）で標準化が進められている点群符号化技術G-PCC（Geometry based Point Cloud Compression）に準拠することで，データサイズが大きい3D点群データを高効率に圧縮します．このG-PCCでは，空間を階層的に分割しながら，8分木構造を用いて点が存在する空間位置を効率的に表現することで，元データと比較してデータサイズを最大約10分の1にまで圧縮することが可能になりました（**図3**）．

次に3D点群データの統合および時間変化の検知機能についてです．ここでは個々のファイル自体のデータ圧縮に加え，それら圧縮されたファイルどうしのデータ統合や，データ間の差分比較などを簡易に行える機能についても検討を進めています．前述のとおり，G-PCCで圧縮した3D点群データは，点の存在する空間位置が8分木構造により階層的に保持されています．この階層構造により，データ内に写っているオブジェクトについて，その大まかな概形を符号化データから簡単に抽出することができます．この概形を抽出することで，例えば取得時刻が異なる3D点群データどうしの変化個所の検出や，オブジェクト境界を考慮しながら断片データどうしを結合させる処理を高速に行う機能を実現しました（**図4，5**）．

そしてランダムアクセス機能についてですが，本技術でもG-PCCの階層的な構造を利用することで例えば空間の一部のデータだけを取り出す機能に加え，高密度な点群データから低密度な概要データを取り出すスケーラブル機能も検討を進めています．これにより，部分的なデータの取り出しだけではなく，より広域なデータの概形把握

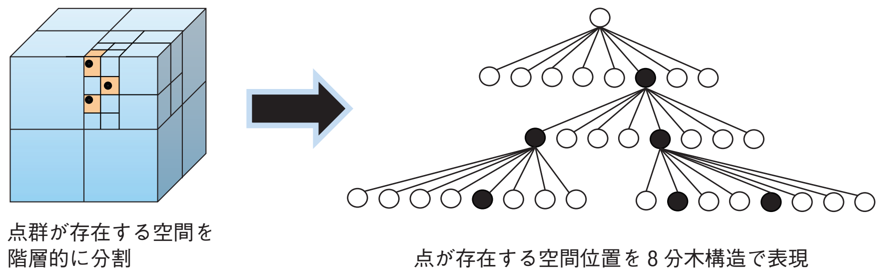


図3　8分木構造を用いた点群データの階層化

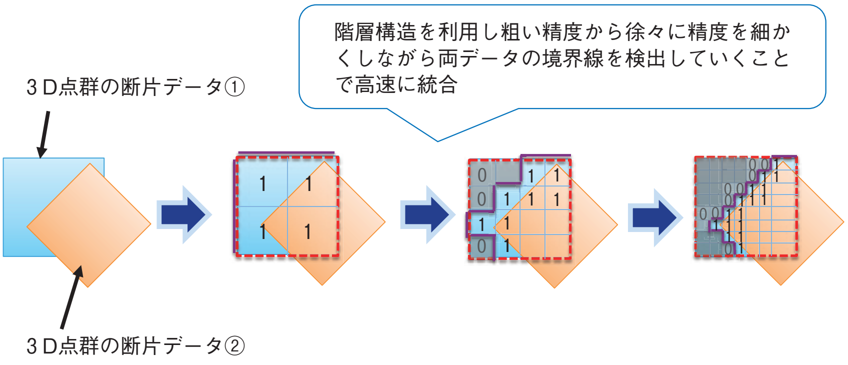


図4　3D点群データどうしの結合処理

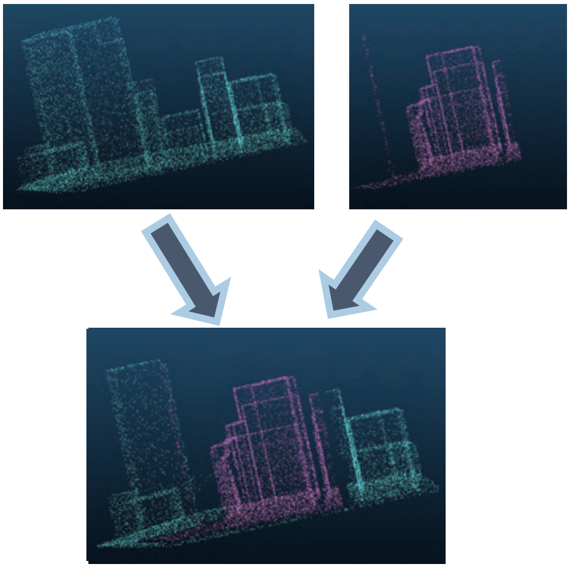


図5　3D点群データの統合結果

を簡単に行うことが可能になります．

現在，これら3つの機能を統一的に扱えるようなソフトウェアエンジンの研究開発を進めているところです．このエンジンを活用することで，広大な都市の3D点群データをコンパクトに保存しつつ，任意の位置・時刻のデータを容易に取り出すことが可能となります．また，今後はさらに3D点群データの流通量が増大していくことを踏まえ，より高速かつ高効率な符号化処理の実現をめざして研究開発を続けていく予定です．

今後の展望

今後，これらの技術をベースにリアル空間を精緻に再現可能なサイバー空間を構築する技術を確立するとともに，リアル空間とサイバー空間の高度な交錯による価値創造の仕組みを具現化し，誰もが快適で活力に満ちた質の高い生活を送ることのできる人間主体の社会の実現に貢献していきます．

■参考文献

(1)　Y. Yao, M. Roxas, R. Ishikawa, S. Ando, J. Shimamura, and T. Oishi: “Discontinuous and Smooth Depth Completion With Binary Anisotropic Diffusion Tensor,” IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.5, No.4, pp.5128-5135, 2020.

(2)　K. Kurata, Y. Yao, S. Ando, N. Ito, and J. Shimamura: “Aggregative Input Convolution for Large-Scale Point Cloud Semantic Segmentation,” The 7th IIEEJ IEVC 2021, Sept. 2021.

(3)　渡邊・五十嵐・谷田・木全：“あの日あの時あの場所へ：任意の時刻・場所の点群データを作るための圧縮された点群の効率的マージ手法，” DICOMO2021, pp.357-362, June 2021.

（左から）島村　潤／安藤　慎吾／谷田　隆一

人間主体の豊かな社会の実現をめざして，リアルとサイバーの交錯空間を支える要素技術と価値創造の仕組みの研究開発に取り組んでいきます．

◆問い合わせ先
NTT人間情報研究所
サイバー世界研究プロジェクト
TEL　046-859-2865
E-mail　cpsg-manager@hco.ntt.co.jp

挑戦する研究者たち

CHALLENGERS

鷹取 泰司

NTTアクセスサービスシステム研究所
上席特別研究員

「実験室」を飛び出して，実社会で研究成果の「実力」を確かめる

将来のネットワークにはこれまでのインフラの限界を超えた高速大容量通信や膨大な計算リソース等の提供が期待されています．この期待にこたえるべく，NTTは端末を含むネットワーク情報処理基盤IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想を掲げて研究開発を展開しています．IOWNの構成要素である6G時代の無線アクセスに向け，システム，デバイス，そしてサービスの多様化が進むと予想される無線アクセスの革新に挑む鷹取泰司上席特別研究員に，研究活動の実際と研究者としての姿勢を伺いました．

ユーザに意識させないナチュラルな通信環境を提供し続ける

現在手掛けている研究から教えてください．

私が研究しているのはIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）における6G（第６世代移動通信システム）時代の無線アクセスにおける複数無線アクセスの活用です．

無線通信領域においてはスマートフォンの通信量は増加し，IoT（Internet of Things）の発展によりさまざまなモノが接続され，さらには，自動運転車やドローンの遠隔制御，超高精細映像のやり取りなど，無線端末や利用形態が多様化しており，無線通信の果たす役割が生活のあらゆる場面で格段に高まり，通信量も今後ますます増大していくと予想されます．このような端末や利用形態の多様化は，人口の集中する都市部だけではなく，郊外地や田園地帯など，さまざまな場所に対しても無線ネットワークでカバーしていくことが必要になります．同時に，多様な利用形態に応じて無線通信品質に対する要件もさまざまなものとなるため，それらへの対応も必要です．

このような背景を受けて，私は「つながり続ける」の実現，体験の共有，未踏領域への展開をキーワードに新たな

価値創造に向けたネットワークの発展に挑んでいます．

5G（第5世代移動通信システム）は，高速・大容量，低遅延，多数端末同時接続といった特長がありますが，IOWNや6Gに向けては，性能向上だけでなく，これらを高度に組み合わせた要求条件が求められるようになると考えられます．先鋭化した個々のサービス要件に適した無線アクセスを，必要な場所に柔軟に届けるサービスをエクストリームNaaS（Network as a Service）と名付け，必要な技術開発を推進しています．その要素技術として，さまざまな無線の状態を把握し，無線アクセスをプロアクティブに制御するCradio®技術群の研究開発を進めています（**図1**）．

無線ネットワークを意識しない通信環境の実現に取り組んでいらっしゃるのですね．具体的にはどのようなことを追究しているのですか．

Cradio®はIOWNの構成要素の1つで，ユーザに無線ネットワークを意識させないナチュラルな通信環境を提供し続けるための無線技術群です．Cradio®は①把握（無線センシング・可視化技術）：無線状態収集・可視化，無線センシング等による実世界状態の可視化，②予測（無線ネットワーク品質予測・推定技術）：刻々と変化する無線通信品質の予測・推定，③制御（無線ネットワーク動的設計・制御技術）：環境や要件に応じた物理位置設計，無線パラメータの最適値導出，ネットワークのパラメータやリソース等の動的制御，の3つの無線技術群で構成されています．これらを高度化して，リアルタイムに連携させることで，ユーザ要求と時々刻々と変化する電波状況に追従し，ユーザに無線ネットワークを意識させないナチュラルな通信環境を提供し続けることが目標です．

また，無線通信のポテンシャルを最大化するため，電波が伝搬する空間そのものを制御する「インテリジェント空間形成技術」も追究しています（**図2**）．これは必要に合わせて伝搬路を制御することによって「快適につながる」を実現し，「与えられた伝搬路」から「つくる伝搬路」へ

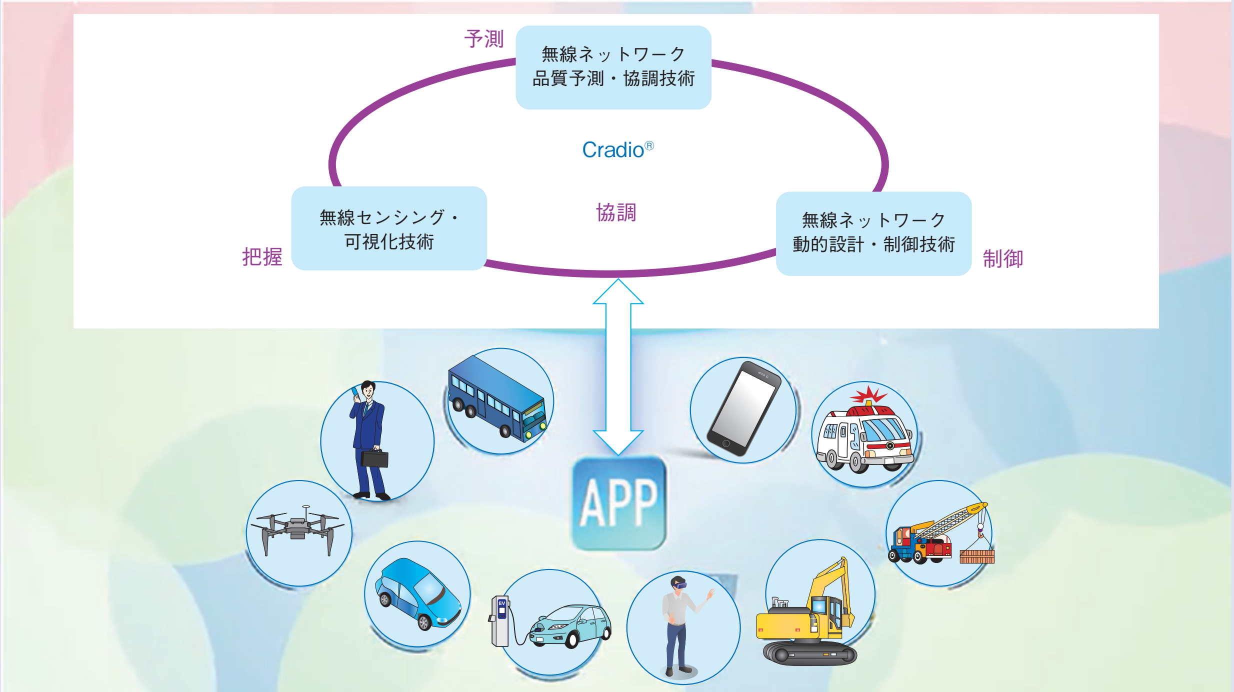


図1　マルチ無線プロアクティブ制御技術（Cradio®）と各種アプリケーション・社会システムの協調

のパラダイムシフトをねらっています．

これまで私たちは，環境は与えられるものだと考えて，与えられた環境に最適化した通信システムを実現することを考えていましたが，環境自体も自分たちでつくってしまうというように視点を変える研究開発を始め，さまざまな技術に取り組んでいます．例えば，通常の反射板はある方向から光，あるいは電波を受けるとそれに対して反射する方向が決まりますが，最近，開発されている反射する方向を任意に変化させられる反射板を利用して，反射する環境自体を変化させる実験に臨みました．

さらに，Cradio® を用いて，北海道岩見沢市の農道で実際に農機を自動走行させました．5Gなどの複数の無線ネットワークをまたがって農機が自動走行する中で，通信品質の変動をAIが予測して通信品質が劣化する前に適切なネットワークに自動で切り替えることで，農機の遠隔監視を中断させることのない，安定的な自動走行を実証しました．協調型インフラ基盤技術と連携することで，IPアドレスや通信方式の違いを隠蔽し，アクセスネットワークに依存しない接続性を提供することで，アプリケーションにネットワークを意識させないナチュラルな利用が可能となります．

「リアル」な影響を確認しながら実験，測定，評価を積み重ねる

従来の視点やアプローチを変えることで成果を得られたのですね．

これはチーム内のちょっとした雑談から生まれた発想な

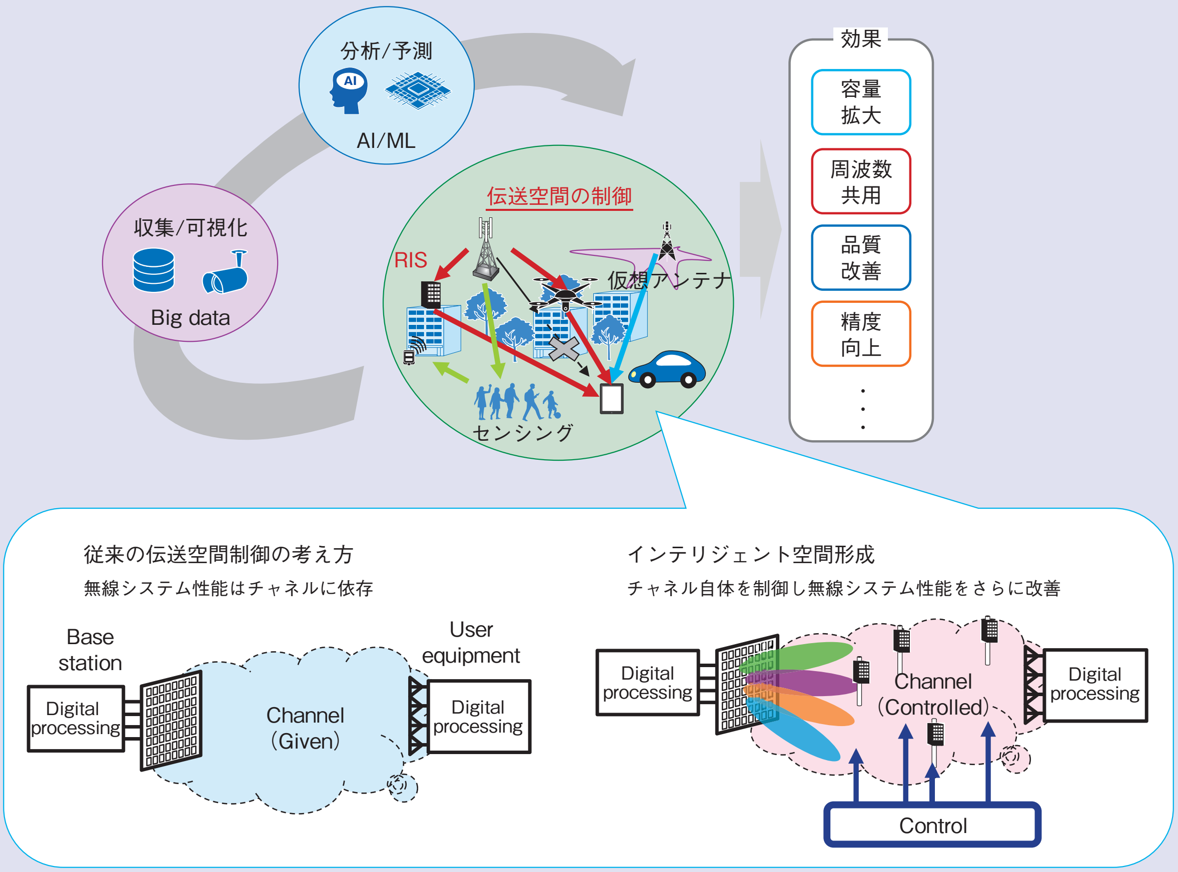


図２　インテリジェント空間形成

のです．ある技術は特定の環境下では良い成果が得られるけれど，別の環境では同様の結果が得られないことがあるように，技術は環境に依存することがあります．こうした観念に縛られて，勝手に限界点を設定してしまっていたのではないかと考えました．もっと自由にさまざまな発想を持って限界点を突破する，自ら環境をコントロールして世界観を変えていこうと思ったのです．

この発想の転換と挑戦には技術の進展も影響しています．かつて１つのエリアには同じ種類の無線通信は１つという環境でしたが，今では複数の無線通信が存在するようになりました．将来的に技術がさらに進展すれば，もっと多くの無線が折り重なる環境が生まれるでしょう．この状況を見据えたときにシステム単位の最適化を検討するよりは，複数の無線が折り重なる「環境」を想定した研究開発が求められると考えたのです．

おかげさまで，私たちの無線の研究開発にはさまざまな期待が寄せられています．この社会からの期待の高まりが私たち研究者のモチベーションにも響いています．意見交換の場でもさまざまな業界の方々が興味を持って議論に臨んでくださいます．こういう刺激は新たな発想を生むきっかけになりますし，研究開発を良い方向へ導いてくれます．ただ，議論が活発になればその分だけ課題が次々と出てきます．出てきた課題は順次解決していますが，新たな課題が出てくることもあり，すべてを解決するのは少し時間がかかりそうです．とにかく辛抱強く実験を繰り返し，少しずつ知見を蓄積していこうと考えています．こうした実験は地味で体力も要するものですが，世界中の誰も観たことのない唯一無二のデータを手にすることができるのです．そして，そのデータを基に新しい技術を創れるというというのはやりがいにつながります．

実験は実験室ばかりではなく，岩見沢市の例のように実際に現場に出向いて行うこともあるのですね．

実際に現場に行って実験や測定をするのは研究活動の面白さの１つです．いわゆる「リアル」な影響を確認しながら実験，測定，評価を積み重ねることは重要です．実生活において，より良いサービスを利用する際，どういう無線環境であるかを考えたとき，研究活動の場はやはり「実験室」ではありません．「私たちは実験室でさまざまな結果を出しました」というだけでは，やはり本物の成果とはならないのです．実社会で役に立ち，ユーザの期待にこたえるためには「実験室」を飛び出して，実社会で私たちの研究成果の「実力」を確かめることが大切だと思います．

こうした実験は現実に課題を抱えていらっしゃる方々等のご協力がなくては成り立ちませんから，実験の場を提供していただける機会を得ることは非常に重要です．岩見沢市の実験のほか，最近では鳥獣害の検知でお困りの方にご協力いただきました．野生鳥獣による農作物への被害は年間200億円前後で，特にイノシシとシカによる被害額は全体の約80%を占めています．加えて，これらの被害は営農意欲の減退や耕作放棄といった二次被害も引き起こし，深刻な社会問題となっています．このような鳥獣被害の対策として侵入検知に向けた電波を活用したセンシング技術の研究を展開していました．

ご協力いただいた方の要望は，檻に仕掛けたセンサが何を検知したかを遠隔で確認する技術でした．センサが何かを検知すると管理者等が確認に行くのですが，確認に行く担当者はイノシシやシカなど檻に捕獲されたものによって違うのだそうです．現状のシステムではそれが分からないため，現場に確認に行ったが担当ではない鳥獣が捕獲されており，別の担当者が改めて現場に向かうことがしばしば発生していました．檻を設置している山の中から画像を無線で送るのは，障害物が多く意外と難しい技術なのですが，私たちが研究開発していた技術とうまくマッチしたこともあり実験に至りました．

ほかにも，水産業の方々の沖に設置した網にかかった魚の種類や網の状態を知りたいという要望におこたえして水中ドローンで撮影した映像を沿岸に届ける実験もしました．こうした「リアル」な環境でどれだけ私たちの技術が実力を発揮できるかを確認できるのは貴重な体験です．また，実際に課題を抱えていらっしゃる方々に実験を持ちかけた際，「やってみましょう」とご協力くださること自体が私たちの研究，技術にご期待いただいているとも受け取れます．このように実社会でご評価いただけることが私た

ちのやりがいにもつながります．

限界を設定せず，突破することをねらう

課題や研究テーマを探す際にはどのようなことを心掛けていらっしゃいますか．

やはり，限界を設定しないことですね．これが最大の特性だという話が出てきたら，「何かおかしいぞ」と思い，打開するアプローチを模索します．この考えに至ったのは2004年から１年間研修したデンマークのオールボー大学での経験です．指導教官がグリエルモ・マルコーニの「It is dangerous to limits on wireless」という言葉を引用して，将来の無線に向けてどのような限界突破を考えていますかと投げかけました．これをきっかけに限界を突破することをねらっていこうと強く思い，自分が設定した課題の高さや発想の自由さをさらに検討するようになりました．

IOWN構想が実現されると，あらゆるものが連動する世界がやってきます．こうした時代の研究開発においては，無線だけではなくさまざまな要素を取り込んで研究開発に臨む必要があります．他分野の研究開発や視点を取り込むというこの考えは昔から重要であるといわれていますが，これから先はそれがより重要になりますし，そこをねらっていかなくてはいけないと考えます．

無線のみを検討すると通信品質や速度の評価をして，それをどう改善するか等の研究開発になる傾向にありますが，そうではなくてユーザの体感やサービスをどう改革できるかを念頭に置いて実際の環境で検証し，「リアル」な社会と連動していく技術をつくり上げていくことが重要だと思います．加えて，ユーザだけではなく，サービスを開発する人たちにとっても使いやすく，開発しやすいものを考えていく必要も感じます．

私は研究開発の世界に対して「球」のようなイメージを持っていて，球の表面を全般的にみるアプローチと球の真ん中に突き進んでいく専門性を磨いていくというアプローチがあると思っています．球の中心は１つであり，専門性を突き詰めて中心に近づけば近づくほど，どの分野から追究しても共通する感覚を持てる，本質的なところで理解し合えるのではないかと思うのです．私はこの球の真ん中に向かって突き進んで研究開発をしてきたいと思っています．

後輩の研究者に向けてエールを送っていただけますか．

研究活動においては年齢で先輩後輩が決まるものではないと思っていますから，研究者どうし，お互いに切磋琢磨していきたいと思っています．若い研究者と話をするときに，少しもったいないなと思うのは，皆さんとてもセンスが良くて，きれいな解答をスッと出してくるのだけれど，逆に少し変なことやうまくいかなかったものを切り捨ててしまっている傾向にあることです．

私はうまくいかなかったことがその先の大きなプラスにつながるという思いを持って，「ダメかもしれない」ことにもチャレンジしていくことも大切だと思うのです．あなたが何かを考えた時間はあなただけのもので，それ自体があなたの財産であり，次の研究開発に活かすことができるものです．

そして，せっかく考えたものをしまい込まずに，いろいろな考え方とぶつけ合って新しい技術を創りましょう．こうした営みを一緒にしていきたいと考えています．確かに行き詰ることもありますし，うまくいかなかった研究の何を取捨選択するか，継続の可否，是非についての意思決定は難しいこともあるでしょう．そのようなときは論理で考えて判断する部分とは別に「好きだ」「面白い」と感じ取れることがあるなら捨てなくて良いと思います．

私はNTTに入社して26年余りが過ぎましたが，入社したばかりのころは無線の研究開発が花開かないこともありました．しかし，多くの研究者が端末とネットワークの将来像を描く中では最後のアクセスは必ず無線となっていましたし，私もいつかそういう時代が来ると信じて研究を行ってきました．今になって無線への注目が高まっていることをかんがみると無線を研究してきて良かったと思っています．

研究開発は１年，２年で成果が得られるものではありませんから，長期的な視野を持って粘り強く続けていきましょう．いつか「やっていて良かった」という展開が必ず来ると思います．

挑戦する研究開発者たち
CHALLENGERS

切通恵介

NTTコミュニケーションズ
イノベーションセンター
テクノロジー部門　AIリサーチャー

研究と開発のちょうど良いバランスを意識．ステークホルダの立場と仕事を「ある程度知っている」のがベター

製造業ではIoT/AI技術で効率化を実現する第4次産業革命への期待が高まっています．こうした中，NTTコミュニケーションズは製造業のお客さまと連携し，AIによる製造現場の課題解決に取り組み，複雑な処理や分析の難しさを解消する「Node-AI」を開発しました．プログラミングの知識がなくてもIoTデータの分析が可能になり，お客さまが自ら試行錯誤することをも可能にするNode-AIの開発者，切通恵介氏に事業と研究の両立を図るための心構えを伺いました．

データ分析ツール「Node-AI」のサービス開発

現在手掛けている研究開発について教えていただけますでしょうか．

私は技術開発系の部署（イノベーションセンター）に所属し，2つの役割を担っています．1つはデータ分析ツール「Node-AI」のサービス開発です（**図1**）．開発には，アジャイル開発手法の1つであるスクラム開発を適用していて，スクラムの中でプロダクトオーナーという，プロジェクトの立ち上げから継続したシステム開発のプロダクトマネジメントを行う立場にあり，その中ではもちろん機能の方向性決定に関する役割もあります．

もう1つは，時系列データに対してのニューラルネットワークの判断根拠抽出（要因分析）と統計的因果推論の研究です（**図2**）．例えばプラントに異常が発生したときに知らせてくれるような異常検知・分析，もしくは1時間後の温度を予測するようなAIモデルにおいて，その分析や予測の判断根拠を抽出する研究です．研究者として大学との共同研究のほか，特許執筆，CVPR（Computer Vision and Pattern Recognition）やIJCAI（International Joint Conference on Artificial

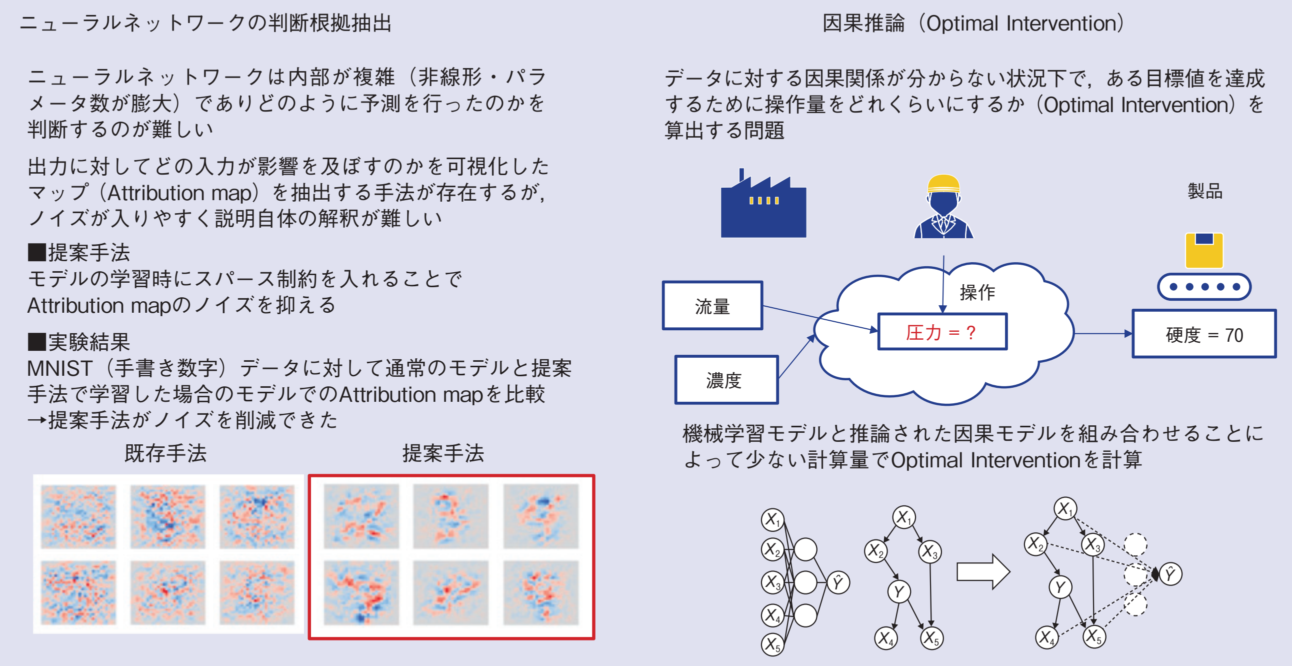


図１　研究テーマ

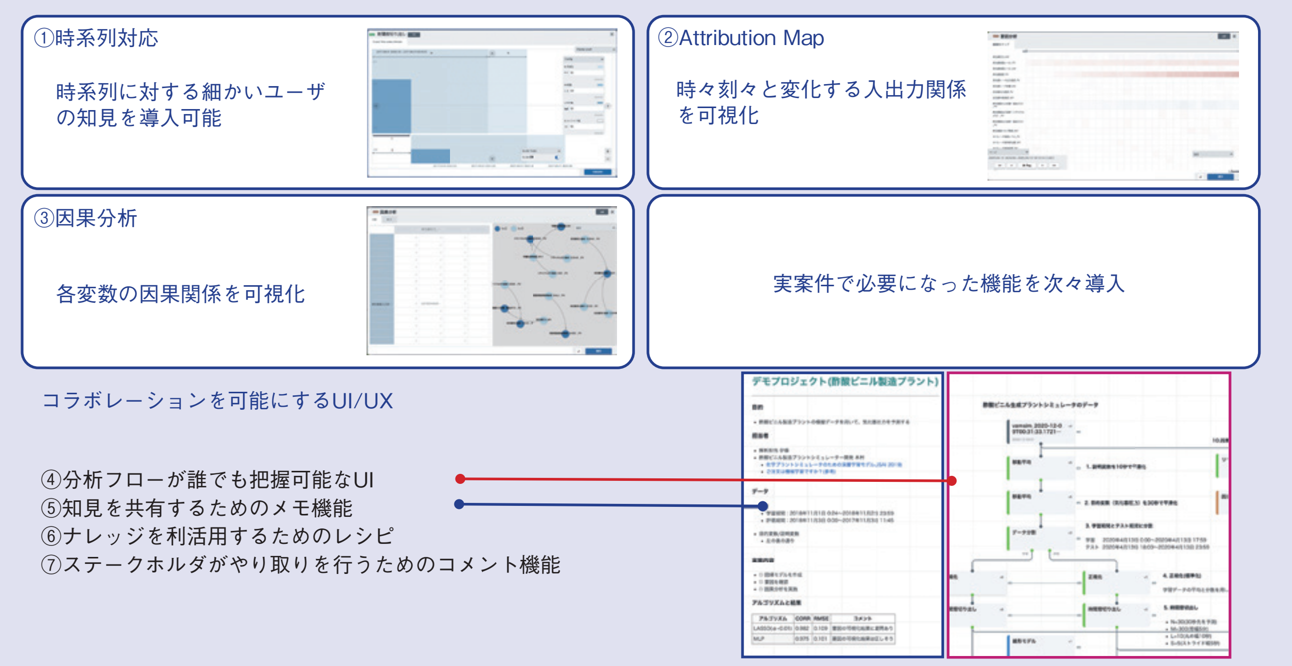


図２　Node-AI

Intelligence），KDD（Knowledge Discovery and Data Mining）のワークショップなどで論文を発表しています．

Node-AIのサービス開発と時系列データに対してのニューラルネットワークの判断根拠抽出と統計的因果推論の研究は，一見するとそれぞれ独立したテーマのようにみえますが，世の中でこの研究成果を役立てるようにするためにNode-AIのサービス開発というかたちでつながっています．世の中で利用されているAIの多くに機械学習が適用されていますが，そこに私の研究テーマである判断根拠抽出と統計的因果推論が活用されます．一方，AIはさまざまな分野で利用されるため，その分野ごとに学習モデルが異なり，必要となる知識も多様で専門性が高いものとなります．そこで，私たちはAI活用における各産業特有の課題に対応するためのGUIツール，Node-AIを開発しました．Node-AIを使えばプログラミングに関する専門知識がなくても機械学習によるIoTデータの分析が可能になります．これにより，産業界へのデータサイエンスの普及が見込めるばかりではなく，お客さまが自ら試行錯誤する「AIの普及」にもつながっていると考えています．

こうした研究開発は世界的に注目を集めているのですか．

最近ではExplainable AI（説明可能なAI）等の単語が流行していますからご存じかもしれませんが，要因分析はここ数年の間に注目を集めるホットな領域になりました．私たちはその少し前から研究開発を始めています．

NTTコミュニケーションズは事業会社で，提供サービスの中にはAIソリューションもあります．そして，私たちのチームは事業と連携しながら研究をしているチームですから，事業につながる研究をすることを大切にしています．担当している案件のお客さまから「AIが予測した意味，予測した原因が分からないのであれば導入するのは難しい」等のご意見をいただくことが多くありました．こうした声におこたえしようと研究開発を始めたのです．当初は誰も手掛けていない領域でしたが，お客さまとの日頃の会話の中で，ニーズはあると確信していましたし，また，学術的にも未開の領域であれば評価されやすいのではないかと考え，研究と事業の両面で展開し，Node-AIを導入していただく等，成果を上げつつあります．

さて，お客さまとお話をしていると多岐にわたるニーズがみえてきますが，1人のお客さまの強いご要望が，他の多数のお客さまの課題を解決することにつながるかというと，必ずしもそうではありません．事業化を視野に入れた場合，収益性はもちろん，お客さまへ訴求する効用，導入後の保守・運用等，意識しなければならないことが多方面にわたり，どのようなニーズ・技術に対応した研究開発を優先するのか悩ましいところです．

一方，研究の側面ではまだ大きな成果を上げられていないと感じています．抽出するデータによって要因は全く異なりますから，そのデータに詳しくなければその要因の確かさを判断するのが難しいのです．実験においては正解のデータセットが用意されているのですが，要因分析では扱うデータによって正解が異なり，場合によっては正解すらもありません．このため，著名な学会に論文を投稿しても，参照すべき正解がないことから正当性を問われて受理されないこともあります．今後は学術的な成果を残せるように努めたいと考えています．

事業と研究と両方の側面から1つの成果に挑むとき，事業（サービス）と研究のスパンの違いを踏まえておく必要があります．事業の開発スパンは研究ほど長くありません．お客さまからのフィードバックを受けてすぐに開発します．特に，競合他社との競争がある場合にはさらに短くなります．一方の研究は1年，2年と長いスパンで取り組まなくてはなりません．現在，取り組んでいることが数年後の成果を得られる段階に至ったときに果たして事業に取り入れられるのか，そこまで検証する必要があります．私はこの観点をとても大切にしています．

何を話しても許される環境が真のニーズを引き出す

研究と開発の2つの視点からチャレンジする対象を見極めていらっしゃるのですね．

成果を上げるには実験と改善の繰り返しが必要です．何

度も繰り返してようやく形になるものです．ニーズを軸に考えれば，お客さまのご要望を技術的に実現できるかを問われます．技術的に実現するために研究開発を進めるにしても，要因分析の分野においては理論的に積み上げられたものは少なく，技術もまだ確立されていません．だから実験してみないと分からないことが多いのです．

また，世の中の多くの研究者が悩んでいるとおり，研究開発を継続するには技術的や論理的に妥当か，あるいはお客さまが実際にお使いになれるか等の判断基準があります．一方で成果を定量的に測ることができない部分もありますし，急に思い浮かんだアイデアからブレークスルーして成果につながることもあります．

こうした背景もあって，私は研究開発をするときに「辞める」という判断をあまりしません．既存手法を改善して高い精度を出す手法はいったん中断し，問題設定を刷新して新しいものにチャレンジする手法をとることが比較的多いこともあります．この手法であれば新規性の評価は得られます．

加えて，問題設定の妥当性は重要ですから，経験やお客さまとの会話などからひらめきをいただく機会も大切にしています．例えば，私たち通信業と製造業のお客さまは業種が違いますし，会社の構造や置かれている環境も違います．データ分析においても私たちとは違う視点や使い方，課題があります．さらに，お客さまの抱えている課題も技術面だけではなく，かかわる人に依存するケースもあります．こうしたディテールをしっかりと把握することでより妥当な問題設定ができると考えています．私が要因分析をテーマとしたのはまさにこうしたお客さまとの会話がきっかけです．だからこそ，お客さまとは何でも話せる関係や環境を築くことを大切にしていて，仕事によってさまざまですがメールのやり取りも含めて月に10時間程度はお客さまとお話ししています．

お客さまとの会話以外にも研究開発をするうえで大切にしていることはありますか．

まずやってみることを信条としています．例えば，当該研究分野の論文を読んでサーベイし，先行研究から自分の立ち位置を確認することや，当該手法の改善点や精度を検証するのは王道だと思います．しかし，私は学生時代の指導教員の影響もあって，やってみたいことがあったらまず始めます．一般的には良しとはされない手法ですが，好奇心のほうが勝ってしまいますし，楽しいと感じる手を動かすことを優先してしまいます．

また，事業会社では研究に接する機会が少ないのですが，事業会社の研究者という存在にも価値があると考えています．私は入社当時から，サービス開発を軸にしていても，心情は研究者であることを自分に課していて，どんなに忙しくても論文は必ず読みますし，必ず年に 1 本以上は論文を投稿すると決めています．論文を読まないと時流を把握できませんし，論文を読むことは研究活動以外のサービスやマーケティングの仕事においても大切だと考えているからです．研究者と連携して技術開発をすることも頻繁にありますし，自分が研究をしていないと表面的なことしか分からないし，研究者側の事情も推し量れないのです．

入社してから5， 6 年このような生活を続けていますが，研究との両立はかなり大変です．論文の締め切りと事業の節目の時期が重なるときもよくあります．先日も，国際学会で論文発表と開発したツールの社内レビューが重なってしまいました．このような生活をしていると，タイムマネジメントは大変ではないかと聞かれることもありますが，私は研究日を設けたりせずに業務に疲れたら研究したり，空いた時間にちょっと実験したり，論文を読んだりして隙間時間を活用しています．根性でやり抜くというよりも興味の赴くままにやっています．今の研究と事業のバランスは私にとってちょうどよくて，たとえ忙しくても，事業ではお客さまからダイレクトにニーズが伺えますし，研究することで好奇心が満たされるのでモチベーション維持に役立っています．

皆さん，もっとつながりませんか?

研究と事業の両方を知る立場からみて，それぞれの役割や価値はどう解釈されていますか．

研究者は論文執筆や特許出願を主体とし，基本的なアウ

トプット先はアカデミアでしょう．研究開発者は研究と開発の「のり付け」のような役割を担う存在だと考えています．ニーズに対して自らの研究のみならず，世の中の研究を分かりやすく伝え，開発に活かすことを求められています．そして，技術，知識を備えておくことは大前提ですが，加えて営業力やニーズを引き出すインタビュー力も求められていると思います．

私たちの仕事にかかわる人たちは研究者，研究開発者，開発者等，さまざまな立場がありますが，それぞれ自分の立場だけ深く理解していれば良いわけではなくて，ステークホルダすべての立場をある程度知ってることがベターではないでしょうか．

例えば，NTTコミュニケーションズは研究寄りの研究開発者がすごく少なくて，技術寄りの開発者が多く在籍していますが，技術寄りの研究開発者はニーズを知る場は自ら設けることができますから，研究できることは自ら研究して，開発とのバランスを取れると良いですね．研究開発者は部下も従えて仕事をしていますので，研究を理解していないと部下にも話ができません．

研究者の方にも同じように開発を知っていただきたいと思っています．研究しているとき，「なぜこの研究をしているのだろう…」と，研究に意義を感じられなくなったら負けだと思うのです．そんなときにお客さまの顔が浮かんで，「あのサービスに組み込めたらいいな，ニーズもあるよね！」と現実を想像できるとモチベーションも上がると思います．

私は将来的にはもう少し研究者寄りの研究開発者になりたいと思っています．しかし，私は研究面も事業面もスキルがまだまだ足りません．研究者としてはステータスの高い学会で論文を受理していただくことやPhDの学位も修め，事業面では市場を知るための努力をしていきたいです．とにかく，やりたいことがたくさんあります．

研究開発者の仲間に向けて一言お願いいたします．

私は研究開発者の皆さんともっとつながりたいと常に望んでいます．例えば，私が手掛けているAI系の技術の分野でいえば，NTTグループ全体のAI系の関係者が集まるDeep Learning連絡会がコミュニティとして存在します．この場で多くの研究所の方と知り合えましたし，議論の機会も得ています．

コミュニティは大事だと思います．「事業会社に来てください」「今すぐ電話で会議できませんか」「ニーズがありますので研究開発していただけませんか」と言いたくても知らない方に話すのはハードルが高いと思うのです．しかし，ニーズや技術について「ゆるく」話せる場や機会やあれば，そのハードルも下げられます．このAI系の他にもコミュニティができたら良いと思います．ただし，誰かに指示されてコミュニティをつくるのではなく自然発生的なのが好ましいと思います．

たとえ，コミュニケーションが苦手だったとしてもSNS等のチャットスペースに入れば情報は入手できますし，必要がなければ発言はしなくて良いのです．加えて，オンラインで会議や発表会をすることもありますが，コミュニティでURLを入手して参加することもできます．コミュニケーションが苦手な人は，こうしたコントリビューションの運営は頑張りが必要かもしれませんが，私はそういう方々も巻き込めたら嬉しいと思っています．チャットベースでどんなに浅い質問でも良いから発信することを心掛けたいです．

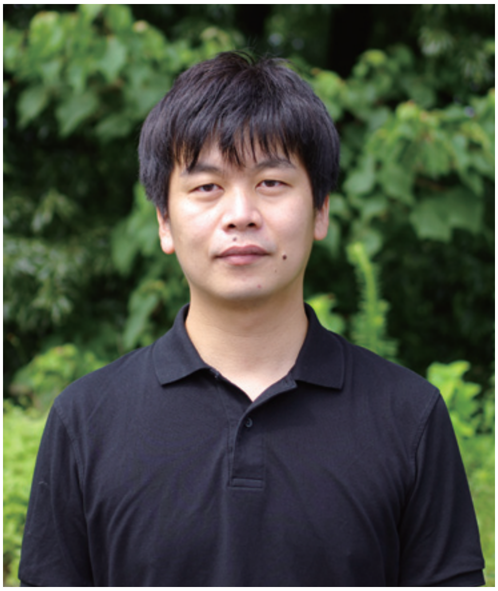
最後に，コミュニケーションを図る際に私が一番心掛けているのは自分が発表者になることです．勉強会やコミュニティでは自分が発表すれば参加した方々から質問されますし，議論もできます．これをきっかけに人とつながれますし，自分のプレゼンスも価値も上がります．皆さん，もっとつながりましょう！

明日のトップランナー

NTTコンピュータ＆データサイエンス研究所・NTT社会情報研究所

熊谷　充敏 特別研究員

AIにも人間同様の汎用性・器用さを与える「転移学習」の研究



AIを構築するために必要な機械学習．機械学習を実施するには大量の学習データが必要です．しかし，質の高い学習データが常に必要なだけ得られるとは限りません．さらにAIの経年劣化を防ぐためには，刻々と変化するデータに合わせて定期的に再学習を行う必要もあります．今回は，理想的なデータが得られない場合においてもAIの性能向上を可能とする「転移学習」の技術について，熊谷充敏特別研究員に伺いました．

◆PROFILE：2012年日本電信電話株式会社入社，機械学習とサイバーセキュリティの研究に従事．NTTセキュアプラットフォーム研究所（2012年～2021年６月），NTTソフトウェアイノベーションセンタ（2018年～2021年６月），NTTコンピュータ＆データサイエンス研究所（2021年７月～），NTT社会情報研究所（2021年７月～）に所属．

データが足りなくてもAIの性能を向上できる「転移学習」

◆「転移学習」とはどのような技術なのでしょうか．

学習データが不足しているタスクや未知のタスクが与えられたとき，関連するタスクの学習データを活用しデータ不足を補い，性能を向上させるのが「転移学習」技術です．転移学習技術を用いることで，AIに人間同様の汎用性・器用さを与えられるのではないかと考えて研究しています．どういうことかというと，例えば，人間は料理をする，簡単な計算をする，読み書きをする，話す，走る，ボールを投げるなど，さまざまなタスクをこなすことができます．また，今まで見たことのないような新しいタスクを与えられたときにも，過去の知識や経験などをうまく活かすことで比較的少ない試行により身につけたり，適応したりすることができます．

一方，最近のAIは画像認識など大量のデータを用意できる特定のタスクでは人間と同等，あるいはある意味人間の能力を超えるような性能を出せるようになってきました．囲碁の分野で「AlphaGo（アルファ碁）」というAIが人間のトップ棋士を打ち負かしたというニュースがありましたが，それはその一例でしょう．しかし，人間が持っているような汎用性や器用さはありません．これは私だけでなく多くの研究者の共通認識だと思います．

そこで，汎用性や器用さを備えたAIを構築しようとしたときに，重要な要素となり得るのが「転移学習」技術です．汎用性を持ったAIを構築するためのもっとも単純な方法は，すべてのタスクを列挙し，それぞれのタスクに対して大量の学習データを用意することでしょう．しかし，それを実行する場合，「すべてのタスクを列挙する」のがまず難しく，仮にできたとしてもそれぞれのタスクに対して大量の学習データを集めるのは，コストとリソースを考えると現実的ではありません．そこで，「転移学習」技術を用いることで，学習データが不足しているタスクや未知のタスクでも，関連する学習データを活用しデータ不足を補い，性能を向上させられますので，汎用性・器用さを備えたAIの構築に役立つのではと考えています．

◆具体的にはどのような研究をされているのでしょうか．

１番目は「正常データしか得られない状況で適切な異常検知器を高速に生成する」技術の研究です．「異常検知」は，正常データとは異なる性質を持つ「異常データ」を見つけ出すタスクです．通常，高精度な異常検知器を作成するためには，学習データとして正常データ群，異常データ群の両方が必要です．ところが，異常データはもともと非常に希少なもので実際にはなかなか手に入らないため，異常検知器の学習に利用できないことが実用では多いです．

そこで，正常データしかない状況でも，正常データ・異常データの両方を含む「似たような」データセットを活用し，異常検知

器を生成しようというのがこのアプローチです．**図1**は，正常データ・異常データを含む複数の関連データセット（1,2,…）を活用し，正常データ群から異常検知器へのマッピングをNNモデル（ニューラルネットワークモデル）であらかじめ学習しておき，異常データのない目標データセットを学習済のNNモデルに入力することにより，適切な異常検知器を生成するイメージ図です．

通常のAI学習では，新たな問題が提示されるたびに再学習という非常に計算コストの高い処理を行う必要がありますが，この方法では新しいデータセットをNNモデルに入力するだけで異常検知器を生成できるため，リアルタイム性を求められるようなケースや計算リソースが限られているなかで異常検知を行いたいケースなどにフィットするのではないかと思います．

2番目は「時間変化するタスクのための転移学習」技術の研究です．機械学習ではデータを分類する「分類器」というものを学習します．ところがデータは刻々と変化しますから，それに伴って分類器も変化していきます．こういった変化は現実社会の問題においても非常に多く起きていて，例えばマルウェア検知器の場合，攻撃者は検知器をかいくぐろうと次々に新たな攻撃手法を編み出します．そのためいったん学習したマルウェア検知器をそのまま使い続けていると，分類精度がどんどん劣化してしまいます．

分類器の精度の劣化を防ぐ有効な対策として，最新の追加データを利用して分類器を適時アップデートしていく方法があります．この方法はシンプルで非常に効果的ですが，追加データを収集するコストがかかります．例えば画像データには「この画像は猫」「この画像は犬」などラベル付けが必要となりますが，これらの作業は基本的に人間の手で行うためコストがかかります．また，それ以外の要因，例えば個人情報保護の観点などから，ラベル付きのデータが得にくいような場合もあるでしょう．

そこで，ラベルありデータを使用して学習した決定境界から，追加のラベルありデータを使用することなく未来の決定境界を予測しようというのがこのアプローチです．**図2**でいうと，ラベル付きのクラスA，クラスBのサンプルがある決定境界が時間変化に伴い3段階に変化したとして，その先の決定境界の変化を推測しようというものです．転移学習では通常，適用先にデータを仮定するものですが，この研究では追加のラベル付きデータを用いないという点が面白いところです．

◆現在の課題は何でしょうか．

一番の課題は，学習したモデルが正しいことをいかに担保するかです．一般の機械学習では，学習したモデルの妥当性を確認するために検証用のデータを別に用意します．検証用のデータをどれだけ正しく判別できるかで学習の正確さを評価できるわけです．

ところが今回紹介したような研究では，そもそも検証用のデータを作成しにくい，もしくは検証用データが存在しないというこ

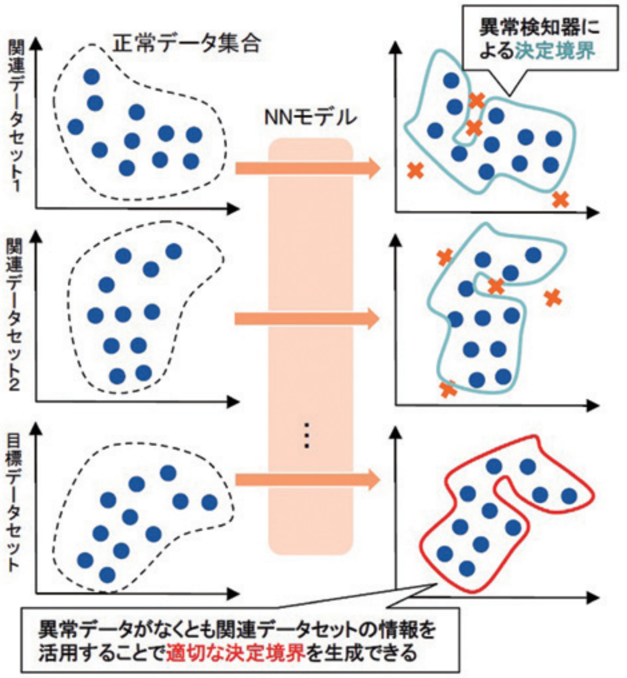


図１　正常データのみから異常検知器を高速に生成

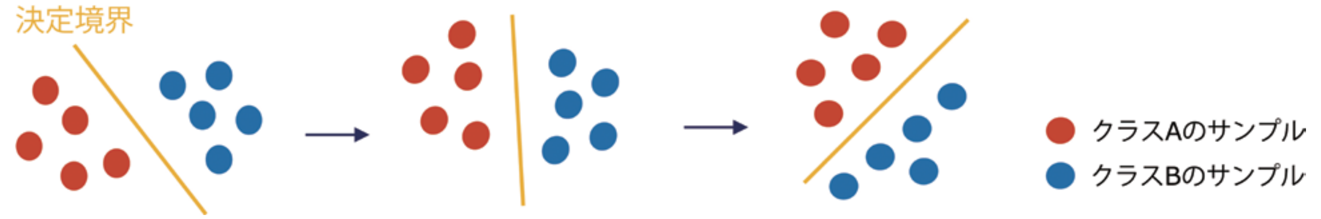


図２　時間変化による分類器の決定境界の変化

とも起こり得ます．特に未来予測については検証用データがない状態となるため，予測したものがどれだけ正しいのかを判断できないことが難しいところです．

今後の実用化，特にミッションクリティカルな分野への応用を考えたときには，安全性も担保しなければならないため，この点は大きな課題となります．

将来的には汎用性・器用さを備えたAIの構築をめざす

◆本研究はどのような分野に応用が可能なのでしょうか．

「異常検知」の分野でいうと，例えば複数の工場を所有するメーカがあったとして，新たな工場を建設し，そこでの機器監視業務を自動化するようなAIをつくりたいとします．これは機器の正常データとは異なる性質を持つ「異常データ」を見つけ出す異常検知器をつくることに相当します．当然，新工場には稼働実績がないため，希少な機器の異常データが十分集まるまで性能の良い異常検知器をつくれないかもしれません．しかし，ほかに長期間稼働している工場があれば，そこでの正常データ・異常データのデータセットを活用し，新工場の正常データを入力すれば即座に高精度な異常検知器を作成することができます．また，複数顧客のネットワークのセキュリティを送信サービスにより一元管理するような場合では，正常データを入力するだけで顧客に応じた条件を自動的に作成することもできます．

（今回はリモートにてインタビューを実施しました）

「時間変化するタスクのための転移学習」技術でいうと，先ほども例に挙げたセキュリティの面では自動更新するアンチウイルスソフトなどへの応用も考えられます．また，企業によってはマルウェアなどから自社を守るために接続してはいけないサイトの「ブラックリスト」のようなものを使って運用することがありますが，そのブラックリスト作成に私たちのつくった技術を使うことも考えられます．

そのほかにも，eコマースへの応用なども考えられますね．年齢とともに変化する顧客の趣味・嗜好を的確に予測し適切な商品を推薦するとか，新規ユーザや利用頻度の少ないユーザのニーズを転移学習により推測するなどです．いきなり長期にわたって予測し続けることは難しいかもしれませんが，更新が必要となるまでの時間を少しだけ延ばしコストを削減できる可能性はあると思います．

複数のデータセットがある状況で精度を高めるという研究は汎用的なものですので，応用範囲は広いのではないかと思います．

◆今後の研究の方向性について教えてください．

現時点でも，画像認識や言語処理など，転移学習をうまく活用して実用レベルの精度を確保できている分野はあります．しかし，可能性が見逃され，転移学習をうまく使えていないブルーオーシャン的な分野も存在するのではないか，と考えています．中期的な目標として，そのような分野を重点的に探っていき，転移学習の適用範囲を広げるような研究を行っていきたいと思っています．学習データの不足は結構いろいろな分野で問題になり得ますから，転移学習がそういった実用的な問題を解決できる手段になるのではないかと期待しています．

さらに長期的には，最初に申し上げたような汎用性・器用さを備えたAIを構築したいと考えています．新しい問題やタスクが生じるたびに人間がAIに学習やチューニングを行うのではなく，AIが勝手に学習し1つのモデルで何でもできるようになれば面白いですね．

株式会社NTTアーバンソリューションズ総合研究所

https://www.ntt-us.com/usri/

NTTアーバンソリューションズ総合研究所

地域課題の解決と持続可能な社会の実現をめざした「街づくり」に貢献

NTTアーバンソリューションズ総合研究所は，NTTアーバンソリューションズグループが手掛ける「街づくり」に向けた情報基盤構築とそれを活用するシンクタンクとして設立された．地域課題の解決と持続可能な社会の実現をめざした「街づくり」への思いを坂上智之社長に伺った．

NTTアーバンソリューションズ総合研究所　坂上智之 社長

「街づくり」に向けた情報基盤構築とコンサルティングで街づくりオーナーのパートナーをめざす

◆設立の背景と目的，事業概要について教えてください．

不動産開発とマネジメントを主業務としているNTT都市開発と，エネルギーと建築に関するエンジニアリング・運用を主業務とするNTTファシリティーズを傘下に収めるかたちでNTTアーバンソリューションズ（NTT US）は設立されました．グループの方針として，単に不動産開発やエネルギー・建築のエンジニアリングを提供するだけではなく，地域の皆さまをサポートし，ともに考える「街づくり」へ取り組み，NTTグループ各社とも連携しながら，全国各地で街づくりへの参画に向けた提案活動を進めています．その中で，社会情勢の変化とともに多様化，複雑化する地域課題への迅速な対応と，街づくり推進体制の強化を目的に，2021年7月1日，NTTアーバンソリューションズ総合研究所（US総研）が設立されました（**図**）．

US総研は，街づくりに関する情報や知見等を，一元的に収集・分析・蓄積し，それを付加価値の高い提案やコンサルティングにつなげていくことをミッションとしています．こうした活動をもとに，自治体や地域の団体をはじめとする街づくりオーナーの方々と一緒に街づくりを推進していくパートナーをめざしています．「街づくりに関するコンサルティング」「街づくり情報の収集・調査・研究・分析」「街づくりを支援するデータベースの運用・構築」の3つの軸で事業を行っていますが，それぞれを有機的に連携させることで，街づくりにおける付加価値の高い提案を提供していきたいと思います．

◆街づくりとはどのようなものでしょうか．

よく「再開発」という言葉を耳にすることがあると思います．ある特定のエリアの細分化した土地や老朽化した建物を更新するため，土地の高度利用によって土地や建物，公共機能の整備を行うものです．その多くはオフィスビルや商業施設を開発して地域の活性化につなげるものですが，「街づくり」は必ずしも不動産開発や賑わいの創出といった側面だけで語ることのできるものではありません．地域の歴史や文化を受け継ぎ，街の魅力を感じながら未来に期待や希望を持って暮らすことができる場所をつくる営みでなければなりません．

一方，現在の日本は，人口減少，少子高齢化が進展する中，都市への人口集中が加速している状況です．さらに，環境問題の深刻化，気候変動や異常気象による災害への対応などに直面し，社会は大きな変革が求められています．

街づくりとは，このような社会的課題への対応を前提として，それぞれの地域が抱える課題を解決し，その街で人々が豊かに暮らし続けることができる持続可能な社会の実現をめざすものです．

期待の高まるICTで持続可能な社会をつくる

◆街づくりの実現に向けてどのように取り組んでいくのでしょうか．

それぞれの地域にはその場所ならではの魅力があり，また抱える課題もさまざまです．US総研は街づくりのシン

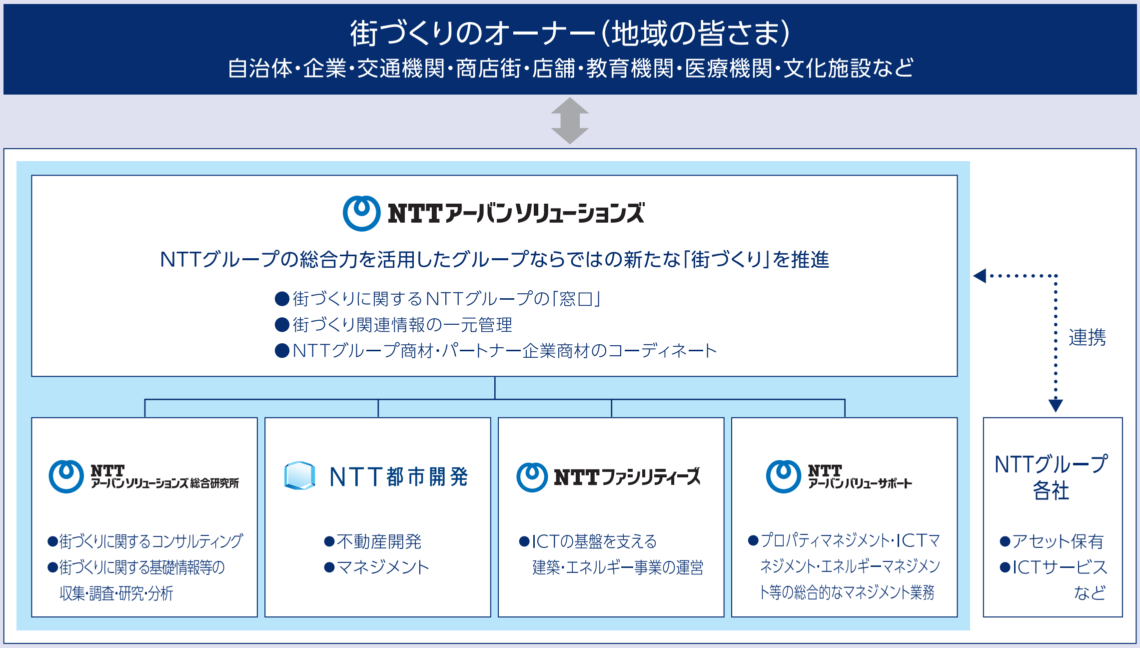


図　街づくり推進体制

クタンクとして，地域の魅力や課題を読み解き，街の皆様の想いを具現化する街づくりをサポートしていくことになります．

まず，街づくりにつながる地域の魅力や課題を浮かび上がらせるためには，地域の人の声に耳を傾け，街のさまざまな姿を直接感じ取ることが大切です．そこから，街づくりに向けた与件の整理や取り組むべきテーマを見出し，街づくりのビジョンの策定につなげていく流れになります．ビジョンの具現化にあたっては，不動産開発のみならず，環境やエネルギーに関する提案を組み込んでいくこと，これはまさにNTT USグループ各社がサポートできるところです．そして，安心・安全，快適で豊かな社会をめざして，情報のデジタル化やICTの活用といった生活を支えるシステム，これはNTTグループとして期待されるところだと思います．さらには日々の暮らしや街の賑わいを支える，街の運営，例えばエリアマネジメントなどを通じて地域にかかわり続けることが非常に大切な取り組みになると考えられます．

つまり，NTTグループとして，さまざまな角度からの地域へのサポートと持続的な取り組みで，街の皆さまの想いを理想の街へつなげていく，それがNTTグループの「街づくり」なのではないでしょうか．

◆今後の展望についてお聞かせください．

デジタル化やICTによるスマートシティについては重要なテーマの1つとして取り組んでいきたいと思います．ただ，新しい技術やサービスは街づくりを支える基盤であり，それが目的ではありません．街づくりはそこに住む人がその街に魅力を感じ，愛着を持って暮らし続けられることをめざすものです．単にICTやデジタルの技術で生活が便利になる，快適になるといったところにとどまるのではなく，人間として真に豊かな生活とは何なのか，人間らしくあり続けるとはどういうことなのか，という本質を追究することによって，人が主役の街づくりを考え続けることが大切だと考えています．

US総研は，街づくりへの理念を持った専門家集団であるべきと思っています．とはいえ，街づくりのために必要な知識や技術は幅が広く，私たちだけでは対応できない領域も多くあるので，全国各地でビジネスを展開しているNTTグループの皆さんと連携させていただき，そこで暮らす皆さまとともに街づくりを考え，進めていくことが重要だと考えています．人，街，地域のために活動されている皆さまとコラボレーションしながら，街づくりに取り組んでいきたいと思います．

蓄積された情報や知見をベースに街づくりのコンセプトを提案・コンサルティング

街づくりデザイン部　上席研究員
竹内　絵理子さん
横山　健児さん

◆担当されている業務について教えてください.

街づくりデザイン部では，蓄積された情報や知見を基に，街づくりのイメージやコンセプトの策定，実現に向けた手段を検討し，それを提案やコンサルティングのかたちでお客さまに提供しています.

竹内　絵理子さん

竹内：私は，どちらかというとイメージ・コンセプト側を担当しています．最近の自治体は，ビル等をつくった後の社会の姿や運営等にかかわるエリアマネジメントに関心が高まる傾向にあります．安心・安全，快適，便利で豊かな社会は，ICTの活用により実現できることが多く，NTTグループだからこそICTで何かできるのではないか，といった期待が寄せられているのを強く感じています.

横山　健児さん

横山：私は，実現に向けた手段側を担当しています．環境エネルギー関連を主な専門分野としていますが，最近はICTを利用したソリューション的な提案を求められることが多くなり，お客さまの関心が多様化してきているように感じます.

◆ご苦労されている点を伺えますか.

自治体の街づくり案件は，公共的な要件と民間の事業的な要件があり，これらを提案型のコンペで評価・採択されることが多いのが特徴です．公共的な要件が混在していることもあり，見積もりの積算方法を含めコスト的制約も多いのですが，創意工夫を凝らして付加価値のある提案を行っています．そうした中でどのように事業性を担保するか，といった点の検討に苦労していますね．さらに，受注前の提案だけでは収益を得ることが難しい場合は，US総研として，NTT USグループの中で付加価値のあるビジネスモデルを構築して収益を得ていくための施策を常に考えていかなければなりません.

◆今後の展望について教えてください.

NTTグループが街づくりに参入したということで，同業他社や自治体からは大きな期待を持って注目されています．その期待にこたえられるようにスキルアップだけでなく，エリアマネジメントやデジタル関係を専門とするメンバーとの協働が必要と考えています．また，カーボンニュートラルを意識した蓄電池や水素の活用等，時流に乗った専門性も高めていきたいと思います．街づくりは総合力が求められるので，主体性・多様性・協働性そして専門性を大切にして，街づくり関係者の期待にこたえていきたいと思います.

街づくりに関する情報，知見を一元化する情報基盤

街づくりリサーチ部　上席研究員
杉田　敏さん

◆担当されている業務について教えてください.

杉田　敏さん

街づくりリサーチ部は，街づくりに関して共通して持つべき知識，考え方，情報を収集・分析・蓄積し，USグループが行う提案やコンサルティング活動に活用してもらうための情報基盤を構築しています．将来的にターゲットとなりそうな街（都市）の一般的な情報から，特定の案件における課題やテーマをとらえて調査しています.

例えば，最近ではカーボンニュートラルというキーワードが日本も含めて世界的に使われるようになりましたが，街づくりにおいても，関連した基本的な情報に加えて，カー

ボンニュートラルをどのようにして街づくりに取り込み，対応していくのか，といったことを調査しています．

◆ご苦労されている点を伺えますか．

US総研の前は，NTT USグループでソリューション関係の仕事をしていました．立場が変わって，NTT USグループのソリューション関係の人と意見交換を進める中で，彼らの困っていることや悩みごとを的確にとらえることが，少し前までは自分も同じような悩みを持っていたはずなのに，改めて難しいと感じています．US総研は，そのような悩みごとに対してきめ細かく対応していかなければなりませんが，意見交換を繰り返していく中でどうしたら一番効率的にそれができるのかということを考えています．

◆今後の展望について教えてください．

US総研設立から間もない現時点では，コンサルティング案件に直結するようなリサーチを短期間で仕上げていくというのが，重点課題だと考えています．

とはいえ，常に将来に向けたリサーチも必要であり，今後カーボンニュートラルをはじめとしたさまざまなテーマについて，時代をとらえながら，個人の考えにあまり左右されないよう中立的に調べていきたいと思っています．さらに，IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想も視野に入れて，デジタルツインコンピューティングをどのように街づくりに適用させていくのか，といったテーマのリサーチにも取り組んでいきたいと思っています．

NTTアーバンソリューションズ総合研究所 ア・ラ・カルト

■HP制作を通じたコミュニケーション

会社設立前の準備室の段階に策定した企業ビジョンをベースに，若手社員が中心となって，会社のホームページ（HP）を制作しているそうです．HP制作経験がない社員がほとんどですが，企画から工程管理，そして経営幹部との意識合わせまで，すべてメンバーのみで実行しています．US総研はNTT USグループから社員が集まっており，お互いに面識のない人が多い中，このHP制作が良いコミュニケーションの場になるとともに，新しい会社を知り，自分がその一員であることを強く自覚できたそうです．

■バラエティーに富む人材

シンクタンクの専門家としてどのように行動するか，といった心構えである行動指針を現在策定中です．行動指針は，経営幹部がある程度の方向性を示しながら策定していくことが多いと思いますが，設立間もない会社ということもあり，将来を担う若手を中心に，最初から自分たちで考え，検討し，将来像を思い描きながら策定しているそうです．行動指針はある意味，会社の雰囲気（社風）とも背中合わせになるようなものなので，HP制作から行動指針策定まで，まさに若手が中心となって会社をつくり上げています．

■メンバーの顔合わせ

会社設立の日に全社員が一堂に会したものの，コロナ禍でテレワークが中心のため，その後はなかなか社員どうしのコミュニケーションをとる機会がないそうです．そこで，本コラムの取材で偶然オンライン親睦会の話が出たのをきっかけに，試しにやってみようかということになりました．会社の行事でもない全くの自由参加で，案内の翌日開催という急な話であるにもかかわらず，約20名の社員のうち半数が参加しました（**写真**）．「まさか今日の明日の話でこれほど集まるとは思わなかった」（主催者の街づくりリサーチ部　斉藤さん）と驚きを隠せません．顔合わせ的な部分もありますが，参加者どうしの話に花が咲き，２回目，３回目の希望もチラホラ出ているそうです．

写真

雷対策導入を推進する雷サージシミュレーションとSPDの安全を向上するSPD分離器用ヒューズの開発

NTTファシリティーズでは，雷害低減のため，各種雷対策の導入推進に必要な定量的評価技術や電気安全技術の向上に取り組んでいます．ここでは，NTTファシリティーズで開発している，雷対策の有効性を定量的に評価する「雷サージシミュレーション」と，電源用SPDの安全な運用を実現する「SPD分離器用ヒューズ」について紹介します．

増える雷害

地球温暖化に伴い，日本は少しずつ亜熱帯気候に変化しつつあります．降雨日数の増加やゲリラ豪雨，迷走台風，暖冬，連日の猛暑日に加え，雷の増加もその1つで，こうした雷の増加により，電気電子機器の雷害が増えています．家電機器の被害発生率の推移を**図1**に示します(1)．昨今ではIoT（Internet of Things）技術により，あらゆる装置がネットワークにつながるようになりました．より便利になっていく一方，接続される配線の数だけ，雷サージの侵入ルートが増加しています．回路の集積化や動作電圧の低電圧化で電気電子機器が雷サージに対して脆弱化していることも，雷害の増加に拍車をかけています．

雷対策の課題

雷対策には，接地の等電位化や雷対策品の設置があります．接地の等電位化とは，複数の接地極（A種，D種接地等）を連接することで，接地極間で発生している電位差を解消するという考え方です．さらに1つのボンディングバーに対して装置それぞれに接地線を配線する方法などがあり，通信局舎における接地方法についてはITU-T（International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector）で規格化されています．雷対策品の設置では主にSPD等*1があげられます．装置の通信線，電源線と接地線の接続部に設置し，雷サージを放流することで過渡的な過電圧を抑制します．

しかし，雷対策には次の課題があります．まず，雷対策の有効性を定量的に示すのが困難なことです．雷対策を提案しても定性的な雷害リスク評価および効果では，費用対効果を得にくく，雷対策の導入には至りません．雷対策の導入推進には，定量的に示すことが重要です．次に電源用SPDは劣化による漏れ電流で温度上昇を続け，熱暴走を起こし，短絡故障に伴う火災リスクがあることです．電源用SPDは電源インピーダンスが低く，高い電圧のかかる電源線に設置することや，温度が上昇すると抵抗値が低下する負の温度特性を持つMOV（Metal Oxide Varistor：金属酸化物バリスタ）(2)をSPDに使用するためです．

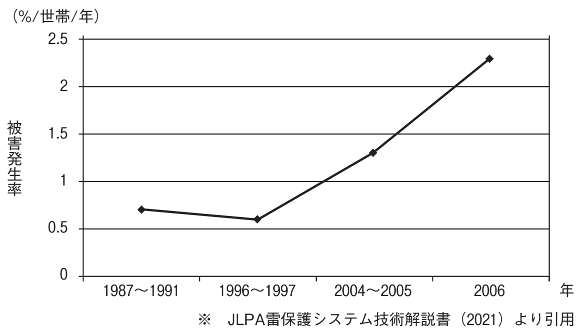


図1　家電機器の被害発生率の推移

雷サージシミュレーション

■雷サージシミュレーションの概要

近年，建物に落雷があったときに，構造物を伝って大地に放電される雷サージによって，各所にどれだけの電流，電圧，電磁界を発生させるのかをシミュレーションによって再現し，雷害リスクを把握しようという動きが高まっています．

雷サージシミュレーションには3次元解析としてFDTD（Finite Difference Time Domain：時間領域差分）法や

＊1　SPD（低圧サージ防護デバイス）の適用電圧範囲は，交流1000 V以下，直流1500 V以下です．高電圧用には，適用範囲3.3 kV～1000 kVの酸化亜鉛型避雷器が適用されます．

有限要素法＊2などがあります．しかし，装置に発生する過渡的な過電圧を3次元解析で追うには膨大な計算負荷を要します．そこで，NTTファシリティーズでは，実用的なレベルまで計算負荷を低減すべく，3次元解析ではなく等価回路解析での雷サージシミュレーション技術開発をしています．

この方法では，建物，ケーブル等の導体をインダクタンスや抵抗による回路素子として扱います．さらにそれらの間にある電磁結合や静電結合を電磁結合係数やキャパシタンスとして，3次元空間を再現します．これらを組み合わせて1つの回路とすることで，建物の落雷に対する電気的特性をモデル化します（**図2**）．この方法の利点は，現象の考察から影響が少ないと考えられる結合係数を等価回路から排除することで，計算負荷を低減できることです．そのため，この回路に装置の内部回路まで組み込むことができ，装置内部で発生する過渡的な過電圧を導くことができます．装置で発生する過渡的な過電圧の大きさが推定できれば，装置の過電圧耐力から雷害リスクを定量的に評価できます．さらにSPD等の雷対策品を等価回路へ組み込めば，雷対策効果を定量的に推定できます．

■落雷で装置に発生する過渡的な過電圧の導出

建物に落雷があったときに，建物内の装置に発生する過渡的な過電圧を導くため，まず，建物の等価回路を作成します．次に建物内に敷設されているケーブルと構造物間の結合係数を導きます．さらに評価対象となる電源装置について，電源入力側から雷サージの影響のある範囲までの等価回路を導きます．これらを合体したものを**図3**に示します．

このように作成した等価回路で行った雷サージシミュレーションで，装置に発生する過渡的な過電圧を導きます．結果例を**図4**(a)に示します．装置に発生する過渡的な過電圧が，電源装置の過電圧耐力を上回るため，電源装置の故障が推定されます．そこで，雷対策としてSPDを電源装

＊2　有限要素法：物体を要素に分割し，連立方程式により解析する計算手法のこと．

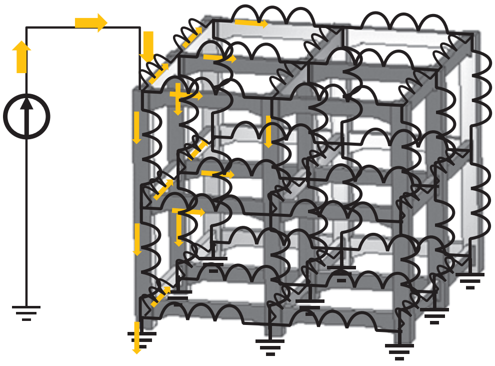


図2　建物の等価回路

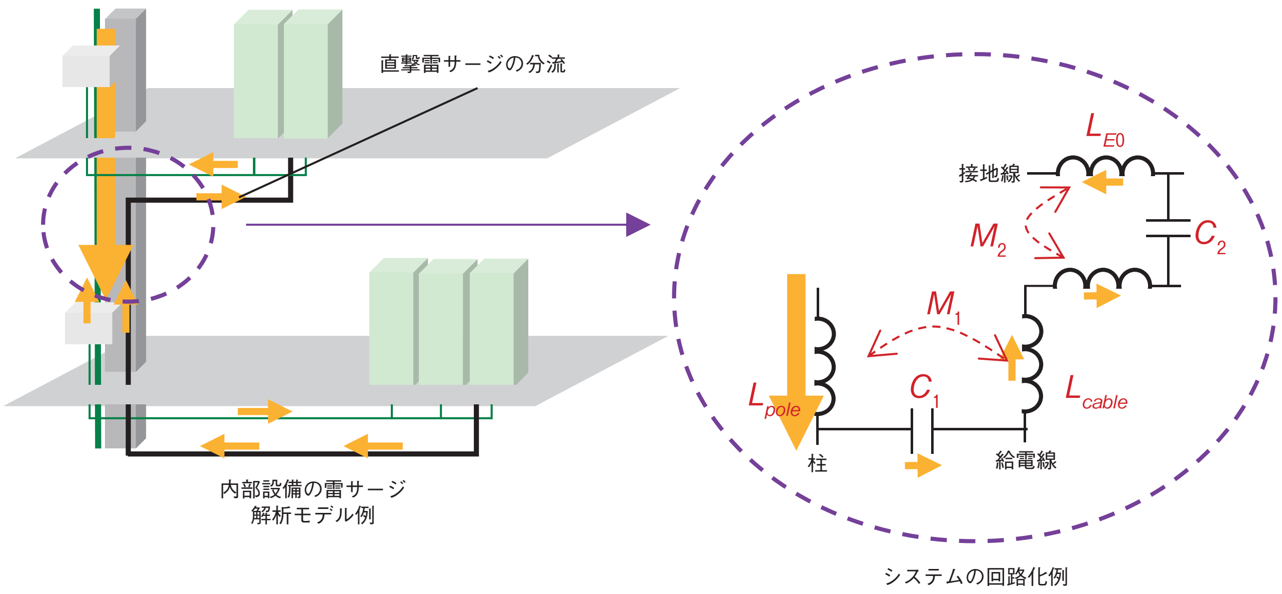


図3　建物内部設備の等価回路

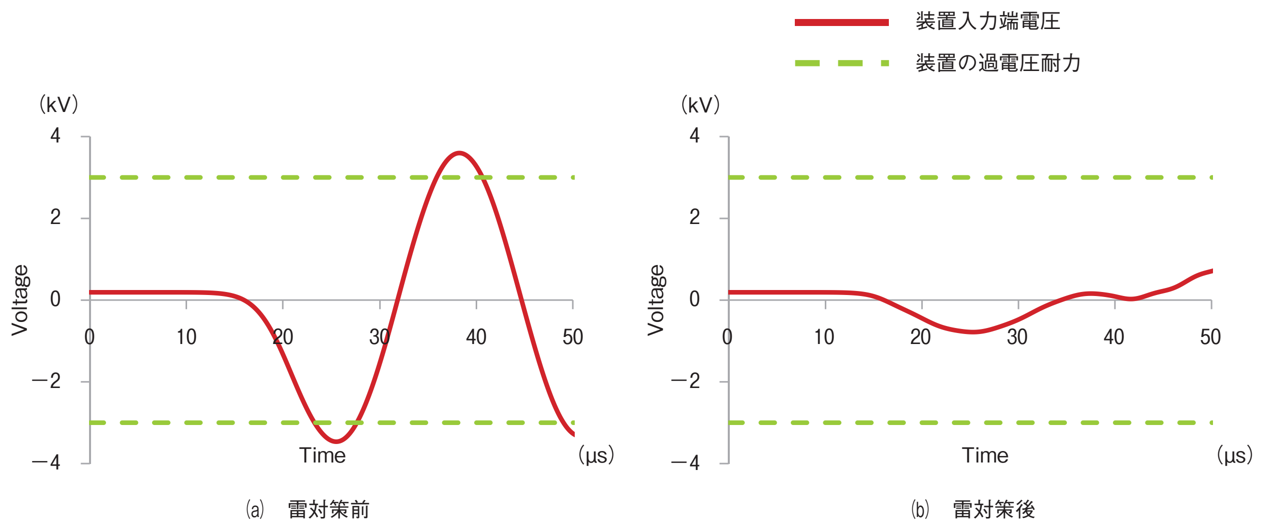


図4 雷サージシミュレーション結果

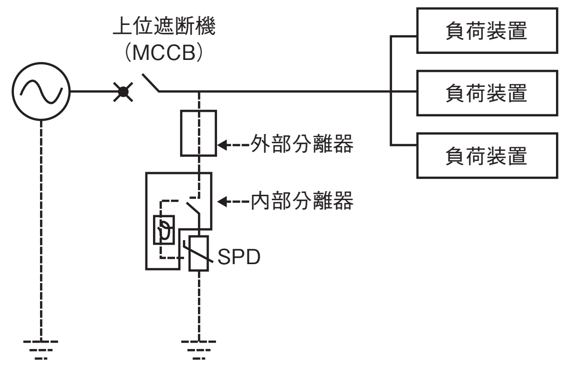
置の入力部に設置した場合の雷サージシミュレーション結果例を図4(b)に示します．SPDにより装置に発生する過渡的な過電圧は，電源装置の過電圧耐力を下回るため，電源装置を雷害から守れることが分かります．

このように，雷害リスクと雷対策の効果の定量化で，雷対策の導入を推進したいと考えています．

SPD分離器用ヒューズ

■SPD分離器の概要

SPDは，雷サージによる過渡的な過電圧から電気電子機器を保護する装置であり，SPD分離器は，SPD故障時の短絡電流を安全に遮断する装置です．SPDとSPD分離器の設置形態を**図5**に示します．電源用SPDに使用されるMOVは，加わる電圧により，漏れ電流が変化する電子材料で，高い電圧が加わるほど漏れ電流が増加する特性があります．時間応答性が高いため，雷サージなどのマイクロ秒単位の過渡的なサージをバイパスできる特性があります．MOVは，経年劣化や雷サージの繰り返しの侵入により，絶縁性能が低下し，通常時の漏れ電流増加によるMOVの発熱や，熱暴走によるショート（短絡）を引き起こす場合があります[(2)]．このMOVの劣化による短絡電流を安全に遮断するのがSPD分離器で，従来では配線用遮断器や，電流ヒューズなど市販技術が適用されていました．しかし，配線用遮断器は電力ケーブルを火災から保護する目的で設計されているため，SPDがショートしても短時間で安全に遮断できずSPDが発火する場合があります．電流ヒューズは電子回路を保護する目的で設計されているため，サージ電流耐量が小さすぎて，雷サージの侵入のたびに，サージにより流れる電流で溶断し，SPDの性能を十分に発揮できないなどの問題がありました．SPD分離器が不適切な場合の設備焼損例を**図6**に示します．

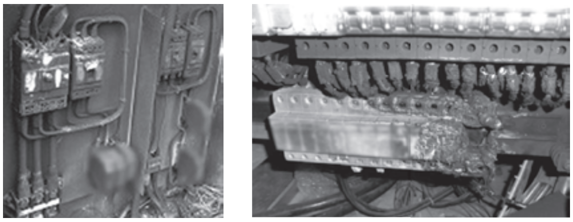


※ JLPA雷保護システム技術解説書（2021）より引用

図5 SPDとSPD分離器の設置形態

■SPD分離器の開発

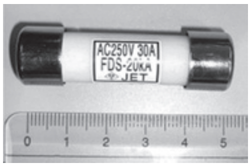
これらの問題解決のためにSPD分離器用ヒューズを開発しました．SPD分離器用ヒューズの主要特性を**図7**に



引込盤の焼損　　SPDの焼損と過熱による変形

※　JLPA雷保護システム技術解説書（2021）より引用

図６　SPD分離器が不適切な場合の設備焼損例



φ14.3 mm×51 mm　筒型ヒューズ

型番		FDS-20 kA
サージ耐量		20 kA
定格電圧		AC250 V AC400 V
定格電流		30 A
遮断容量	定格	10 kA
	最大	100 kA

図７　SPD分離器の主要特性

示します．このSPD分離器用ヒューズは，定格電流が小さい（30 A）が，大きなサージ電流（20 kA：８/20 μs）が流れても溶断しないのが特徴です．同等のサージ電流耐量を，市販技術の電流ヒューズで実現するには，定格電流が125 A必要です[(3)]．これにより，SPD故障時の電気火災や，部分停電を未然防止し，電源系統から安全に故障したSPDを分離することが可能となりました．

■SPD分離器用ヒューズの国内規格化の取り組み

SPD分離器用ヒューズの開発では，タイムディレイ型の電流ヒューズをベースに製品開発を行ってきました．しかし，電流ヒューズには，従来のJISやIECの規格類で，定格電流と遮断特性に対する要求性能があるため，開発したSPD分離器用ヒューズは，規格適合や安全認証への適合性の観点から，当初はなかなか市場に受け入れられませんでした．そこで，当社ならびに複数のSPDメーカが所属する，低圧サージ防護デバイスの標準化委員会であるSC37A/B＊3国内委員会のメンバーで構成されるワーキンググループを結成し，国内でのSPD分離器用ヒューズの業界規格化の活動取り組みを行い，電子情報技術産業協会（JEITA）により，SPD分離器用ヒューズの業界規格化（JEITA　RC-4501，RC-4502　2013/12発行）が実現しました．

今後の展開

雷サージシミュレーションとSPD分離器用ヒューズ等の推進には，標準化が鍵となります．すでに製品化したSPD分離器用ヒューズは，国内外での学会発表活動を通して，その普及活動を行ってきました．現在，その成果として，官庁施設の設計の拠りどころとなっている国土交通省発行の「建築設備設計基準」の電力設備の雷対策へ反映されています．当社のSPD分離器用ヒューズは国内の複数のSPDメーカに採用され，多数の設備への導入が進んでいます．今後は，IECにおいてもSPD分離器用ヒューズの規格化が進むよう標準化活動を行い，安全性の高い雷対策技術の普及を図っていきます．

一方，現在開発中の雷サージシミュレーションは，現在の市場はまだ大きくはありませんが，将来的には標準的に実施されることをめざしています．雷対策の有効性を定量的に示すことによる雷対策の導入推進で，雷害の発生を削減することをめざします．

＊3　IEC（国際電気標準会議）のSC37A（サージ防護デバイス）およびSC37B（SPDサージ防護部品）．

■参考文献

(1)　日本雷保護システム工業会：“5.1.1　設備・機器の雷被害，”雷保護システム技術解説書　第８版，pp.5-6，2021.
(2)　日本雷保護システム工業会：“5.4.3　避雷器，SPDの適用について，”雷保護システム技術解説書　第８版，pp.5-36，2021.
(3)　日本工業規格“短絡バックアップ保護及びサージ耐量，”JIS C 5381-12 低圧サージ防護デバイス第12部　附属書P，p.125，2014.

◆問い合わせ先

NTTファシリティーズ
研究開発部　データマネジメント部門
TEL　03-5669-0832
FAX　03-5669-1652
E-mail　satoua29@ntt-f.co.jp

Technical Solution
テクニカル ソリューション

移動した地下メタルケーブルの引き戻しの取り組み

電気通信サービスを提供するためのケーブル設備は，地下のとう道や管路，マンホール，地上の電柱等に敷設されています．その中で，地下管路に敷設されたメタルケーブルの中には，敷設当時の位置から時間の経過とともに移動してしまうものがあります．その移動量が大きくなると，接続点でクロージャから脱落する，マンホール内でケーブルが屈曲・変形するといった近傍の設備の新たなトラブルとなることがあります．NTT東日本技術協力センタでは，既存設備の延命化を図り，安全で低コストな地下ケーブル移動の解消方法として，敷設時の位置までケーブルを引き戻す工法について考案し，検討を行いました．ここでは，その検討状況について紹介します．

地下ケーブルの移動とその影響

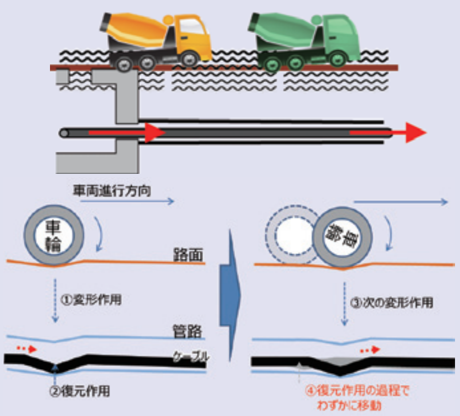
■車両走行等の振動を受けた地下ケーブルの移動

地下管路内に敷設されたケーブルは，車両の走行等に伴う振動の影響で移動することがあります．この現象をクリーピングと呼び，主に大型車両の通行量が多い，軟弱地盤上の道路で発生しやすいといわれています．**図1**に示すように，管路上の路面を大型車両が移動すると，その重さにより管路およびその内部のケーブルに変形させる力が加わります．車両が移動することに伴い変形する位置も移動していくため，ケーブルが復元する作用の過程でわずかに移動していく現象が発生します[(1)]．

■ケーブル移動による影響

地下管路内でケーブル移動が発生すると，その影響はマンホール内のケーブルに現れます．**図2**に示すように，接続点のクロージャからケーブルが引き抜かれる（図2(a)），クロージャへのケーブル挿入角度が変化する（図2(b)），突き出してきたケーブルが過度に曲がる・捻じれる（図2(c)）等が発生します．これらの現象が生じることでさまざまな設備故障が発生する可能性があり，特に地下メタルケーブルにおけるガス漏洩*につながるため，速やかな対処が必要となります．

＊ ガス漏洩：地下メタルケーブルでは，ケーブル外被に傷やピンホールが生じたときに，水の浸入を防ぐために，高い圧力の乾燥空気（ガス）をケーブル内部に送り続けています．ガス漏洩により圧力が低下すると，浸水による絶縁不良などの故障につながることから，圧力を常時監視し，圧力低下の警報が発せられると，その都度，傷等の補修や圧力低下地点近傍へガスボンベを設置し，ガス供給の補充などを行っています．



【ケーブル移動が起こりやすい個所】

(1) 車両通行車線下に管路，ケーブルが埋設されている個所

(2) 大型車両が通行が多く，路面の凹凸が著しい個所

(3) 周囲が田畑，河川，沼地等軟弱地盤である個所

図1　車両走行振動に起因するケーブル移動

ケーブル移動防止対策

■ケーブル移動対策の現状

これまでケーブルの移動防止対策として，マンホール内のケーブルに対して，移動方向の壁面，ダクト際の位置に**図 3** に示すケーブル移動防止金物を取り付けて移動に対するブレーキをかける方法が行われてきました．しかし実際の現場では，敷設時には移動が予測されず移動防止金物が設置されなかった場所や取り付けたタイプの金物では保持力が不足していた場所等があり，この対策方法が上手く機能せずに移動が進行する事例が発生しています．

■新たな対策方法の検討

ケーブル移動が進行してしまった場所において，ケーブルを更改する方法では膨大なコストと時間がかかってしまいます．そこで，ケーブル更改を回避し，ケーブルの継続使用を可能とするため，当該ケーブルを引き戻す方法について検討を行いました．

検討にあたっては，重量のあるメタルケーブルを簡単に引き戻す方法だけでなく，引き戻す過程における新たな外被の損傷の発生やクロージャ等の関連する設備での新たなトラブル発生の有無等，その影響等の課題についても考慮しました．

ケーブル引き戻しの検証

■仮設ケーブルによる検証

まず仮設のケーブルを用いて，引き戻すために必要な牽引力の計測，およびケーブル移動防止金物を把持具として利用した牽引の実験を行いました．実験用の管路に仮敷設した40 mのメタルケーブル（0.4-2000PEC-Hケーブル）をＢ形ケーブル移動防止金物で把持し，牽引する検証を行いました．検証の結果，約1000[N]の牽引力を加えると40 mのケーブルを引き戻せることが確認できました．

ケーブルの引き戻しに必要な牽引力は下記の⑴式[2]で与えられます．

⒜　クロージャから引き抜かれたケーブル　⒝　ケーブル挿入部の変形　⒞　ケーブルの屈曲，変形

図 2　ケーブルの移動によるマンホール内のトラブル例

A形ケーブル移動防止金物
（保持力：2000Nまで）
⒜　Ａ形ケーブル移動防止金物

B形ケーブル移動防止金物
（保持力：2000Nから6000Nまで）
⒝　Ｂ形ケーブル移動防止金物

図 3　ケーブル移動防止対策品

$$T=g \times \mu \times w \times L \qquad (1)$$

T：ケーブルにかかる張力[N]，w：単位長当りのケーブル質量[kg/m]，g：重力加速度[m/s^2]，L：直線部の長さ，μ：摩擦係数（管路）

この(1)式と検証した牽引力の実測値を用いることで，長さの異なるケーブルの引き戻しに必要な牽引力を計算しました．

■移動ケーブル引き戻し装置の試作

仮設ケーブルを用いた引き戻し検証を基に，実際の現場に敷設されたケーブルの引き戻しを行うため，**図4**，**5**に示すようなB形ケーブル移動防止金物を把持具とした装置を試作しました．

試作した装置は，2本の油圧シリンダとB形移動防止金物の組み合わせからなり，シリンダから伸びた脚部側をマンホール壁面に，反対側はケーブルを把持したB形ケーブル移動防止金物に取り付けます．油圧シリンダはオイルホースで手動または電動，いずれかの油圧ポンプと接続されます．油圧ポンプによってシリンダに圧力を加える（シリンダを伸ばす）ことで，マンホールの壁面からケーブルを遠ざける方向にケーブルを引っ張ることが可能となります．

また，管路に対し曲がって挿入されているケーブルや重量のあるケーブルでも引き戻しができるように，**図6**に示す付属品も併せて開発しました．曲がって挿入されているケーブルに対しては，壁面とシリンダの接触面に角度のついた硬質ゴムのスペーサーを取り付けます．また，重量のあるケーブルに対しては，B形ケーブル移動防止金物を連接するための治具を取り付けます．これにより，B形ケーブル移動防止金物の2倍の把持力までの牽引を可能としました．

■未使用（非現用）ケーブルによる検証

次に，実際の現場で未使用（非現用）となったケーブルに対して引き戻しの検証を行いました．検証では，試作装置による牽引だけでなく，牽引側のマンホールでの牽引力，および対向のマンホールでの押し込み力について計測を行いました．また，対向するマンホール側からケーブルを押し込み（押し戻す）力を加えた場合の牽引の影響等を計測しました．実設備での検証の結果，以下の知見が得られました．

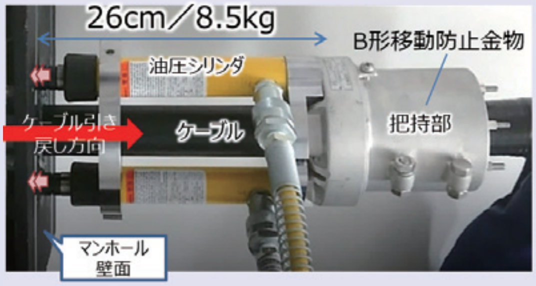


図4　移動ケーブル引き戻し装置

図5　移動ケーブル引き戻し装置構成

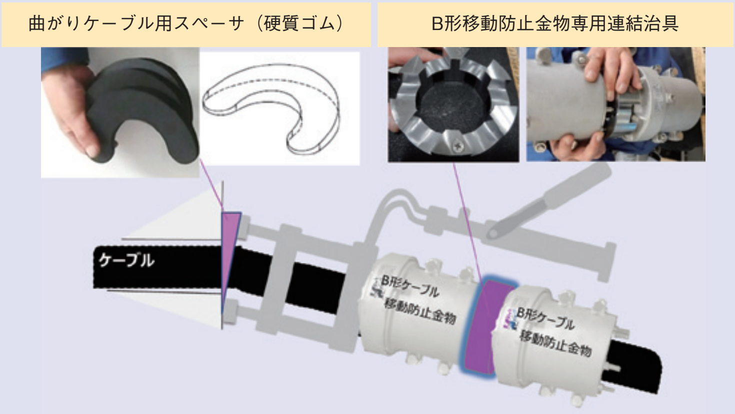


図 6　付属品

① ケーブルの引き戻し作業では，対向するマンホール側から管路内に向かって押し込む作業を行うことで，より少ない牽引力で引き戻しが可能でした．したがって，牽引と同時に押し込む作業を行うことで牽引力を小さくすることができ，引き戻すケーブルへの物理的負荷を軽減できると考えられます．

② 実際のマンホールでは，さまざまな種類のケーブルが複数あることから，押し込むための装置については，作業スペースの限られた場所で効率良く動作させるための工夫が必要だと考えられます．

今後の予定

今後は，最終目標である現用ケーブルに対して，簡単で安全な引き戻し方法の実現に向けて追加の検証を行っていきます．特に，通信サービスへの影響を考慮し，下記の項目の検証を実施する予定です．

① 設置性，作業性の向上：狭隘マンホールでの実施も想定した引き戻し装置の改良とコンパクト化．

② 引き戻しアシスト装置（仮称）の開発：ケーブル引き戻し作業を省力化し，既設ケーブルへの負荷を軽減．

③ 通信への影響の確認：ケーブル牽引時，内部心線の電気的特性の変化等を検証．

④ 近傍設備への影響：長期間変形，変位したケーブルやクロージャを適正な状態，および位置に収めるための検証．

おわりに

技術協力センタでは，55年以上の技術協力活動を行ってきました．これまでに蓄積された知識と経験を基に，引き続きアクセス設備の信頼性向上や故障の早期解決，および保守コスト低減に向けた取り組みを進めていきます．

■参考文献

⑴ https://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11425379

⑵ NTT東日本技術協力センタ：“アクセス系設備に関わる故障事例集　第1版　外部要因編,” 2017.

◆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　アクセス技術担当

TEL　03-5480-3701

FAX　03-5713-9125

E-mail　gikyo-ml＠east.ntt.co.jp