ISSN 0915-2318 平成2年3月5日第三種郵便物認可
令和4年5月1日発行　毎月1回1日発行　第34巻第5号（通巻398号）

NTT 技術ジャーナル

5 MAY 2022
Vol.34 No.5

特集

IOWN/6Gに向けた光・無線伝送技術

NTTとトヨタでつくる コネクティッドカー向けICT基盤の取り組み

グループ企業探訪

地域創生Coデザイン研究所

from NTTファシリティーズ

運転データを用いた空調機故障予見技術の開発

NTT
技術ジャーナル

5 MAY 2022
Vol. 34 No. 5

CONTENTS

4 特集
IOWN/6Gに向けた光・無線伝送技術

6 幅広い領域をカバーし新たな通信パラダイムを切り拓く研究開発
11 デジタルコヒーレント光伝送技術の今後の展開
16 スケーラブル光トランスポート技術の研究開発
20 6G時代の多様な無線アクセスを支える先端無線技術の研究開発

26 特集
NTTとトヨタでつくるコネクティッドカー向けICT基盤の取り組み

28 コネクティッドカー分野の技術開発・検証の全体概要
31 実証実験の取り組みと成果——基盤関連
35 実証実験の取り組みと成果——ネットワークエッジ基盤
39 高速時空間データ管理技術（Axispot®）
44 車両データ選択的収集アルゴリズム
48 垂直分散コンピューティング技術
53 レーン別渋滞検知技術
57 集計突発指標算出技術

61 挑戦する研究者たち

東中 竜一郎
NTT人間情報研究所
NTTコミュニケーション科学基礎研究所
客員上席特別研究員

研究者は「やりたいことドリブンで何でも実行」.
好奇心優先で,まずは何でもやってみる

65 挑戦する研究開発者たち

安藤 智浩
NTTドコモ
移動機開発部　XRサービス開発　担当部長

つくったモノは使っていただいてナンボ.
「これ,どう?」と,問い続けていきたい

69 明日のトップランナー

金子 卓弘
NTTコミュニケーション科学基礎研究所
特別研究員

二次元画像から三次元情報を推定
AR-GANで「三次元世界を理解する」コンピュータの実現へ

72 グループ企業探訪

株式会社地域創生Coデザイン研究所
持続可能な地域社会への変革をめざして
持続可能な地域創生活動を支援

76 from NTTファシリティーズ
運転データを用いた空調機故障予見技術の開発

Webサイト　オリジナル記事の紹介 …… 80
6月号予定
編集後記

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

本誌掲載内容についての
ご意見,ご要望,お問い合わせ先

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

本誌ご購読のお申し込み,
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2022
●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.

特集

IOWN/6Gに向けた光・無線伝送技術

新型コロナウイルス感染症よって促進されたリモートワークの浸透など，
遠隔を前提とした社会活動が行われるようになり，
それを支えるための基幹光伝送ネットワークの大容量化や，無線通信のカバレッジ拡張といった
IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）/6G（第6世代移動通信システム）で想定される
次世代通信ネットワーク実現への期待がますます高まっている．
本特集では，IOWN/6Gの実現に向けてNTT未来ねっと研究所で取り組んでいる，
光・無線伝送技術について紹介する．

光伝送技術

無線伝送技術

デジタルコヒーレント

光パラメトリック増幅中継器

無線ネットワーク品質予測

Optical and Wireless Transmis

幅広い領域をカバーし新たな通信パラダイムを切り拓く研究開発 6

IOWN/6Gで想定される次世代通信ネットワークの実現に向けた要素技術である，光・無線伝送技術，システム化技術について紹介する.

デジタルコヒーレント光伝送技術の今後の展開 11

デジタルコヒーレント光伝送技術の最新の動向と今後の進化について， 高速大容量化，低電力化，ソフトウェアによる自律制御の観点を中心に紹介する.

スケーラブル光トランスポート技術の研究開発 16

IOWN APN（All Photonics Network）のためのPbit/s級長距離光ネットワーク実現に向け， 光増幅帯域ならびに電気信号処理帯域を飛躍的に拡大可能なスケーラブル光トランスポート技術について紹介する.

6G時代の多様な無線アクセスを支える先端無線技術の研究開発 20

6Gの実現に向けて推進している，OAM（Orbital Angular Momentum）無線多重伝送技術，海中音響通信技術，無線ネットワーク品質予測技術について紹介する.

sion Technologies

幅広い領域をカバーし新たな通信パラダイムを切り拓く研究開発

NTT未来ねっと研究所（未来研）では，新型コロナウイルス感染症の猛威によるリモートワークの浸透等，情報化社会の変革を支えるための「基幹光伝送ネットワークの高度化・大容量化」や「無線通信のカバレッジ拡張」など，IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）/6G（第6世代移動通信システム）で想定される次世代通信ネットワークの実現に向けた要素技術の確立をめざし，研究開発を行っています．本稿では，未来研で取り組んでいる光・無線伝送技術，システム化技術について紹介します．

岩科（いわしな）　滋（しげる）　島野（しまの）　勝弘（かつひろ）
高杉（たかすぎ）　耕一（こういち）　赤羽（あかばね）　和徳（かずのり）
才田（さいだ）　隆志（たかし）
NTT未来ねっと研究所

はじめに

新型コロナウイルス感染症によって促進されたリモートワークの浸透など，遠隔を前提とした社会活動が行われるようになり，それを支えるための基幹光伝送ネットワークの高度化・大容量化や，無線通信のカバレッジ拡張といった，IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）/6G（第6世代移動通信システム）で想定される次世代通信ネットワーク実現への期待がますます高まっています．NTT未来ねっと研究所（未来研）では，光・電波・音波等のさまざまな周波数帯の物理的な波動を駆使し，光ファイバ・水中・空中等の通信媒体を含む幅広い領域に対して長距離・高速大容量の情報伝送を可能とする通信技術の確立をめざして，研究開発に取り組んでいます．特に，これらの研究対象に対して電磁波伝搬や光伝搬，デジタル信号処理やメディア処理といった，物理学や数学等に基づく学術的な知見をもって新たな通信パラダイムを切り拓くことをミッションとしています．

未来研の研究領域は**図1**に示すとおり，広範にわたっています．従来は光ファイバや無線電波伝搬を扱っていましたが，現在は音波のような低い周波数帯まで研究領域を広げ，通信媒体としても光ファイバのような閉空間や空中のみならず，水中から宇宙まで，あらゆる空間・媒体を研究対象としています．例えば，水中を対象とする海中音響通信では，動画伝送が可能なMbit/s超級の情報伝送をめざして研究に取り組んでいます．また，6G時代に向けた超大容量無線伝送の実現をめざし[(1)]，OAM（Orbital Angular Momentum）多重伝送無線通信や，空中や宇宙空間を想定した自由空間光通信，究極の安全性を実現する量子暗号通信といった新たな領域の研究開発にも取り組んでいます．

未来研では，NTTが推進するIOWN構想における三本柱の1つであるオールフォトニクス・ネットワーク（APN）[(2)]の実現に向けた具体的な研究開発についても推進しています．例えば，デジタルコヒーレント光伝送技術により400 Gbit/s級の信号伝送を実現する低電力DSP（Digital Signal Processor）の開発や，広帯域パラメトリック光増幅中継による一括光増幅帯域拡張の実証，大容量光通信回線の自動設定技術の開発など，APNが想定する「さまざまなお客さまへ簡易に大容量の光通信回線を提供する」ための次世代光通信ネットワークの実現に向けた要素技術の研究開発に取り組んでいます．

以降では，未来研で取り組んでいるIOWN/6Gに向けた最先端技術に関する取り組みのいくつかを，フロンティアコミュニケーション技術，波動伝搬技術，トランスポートイノベーション技術に分けて紹介します．

フロンティアコミュニケーション技術

フロンティアコミュニケーション技術の概略を**図2**に示します．スマートシティなどサイバーフィジカルシステムの実現に向け，広域に分散したコン

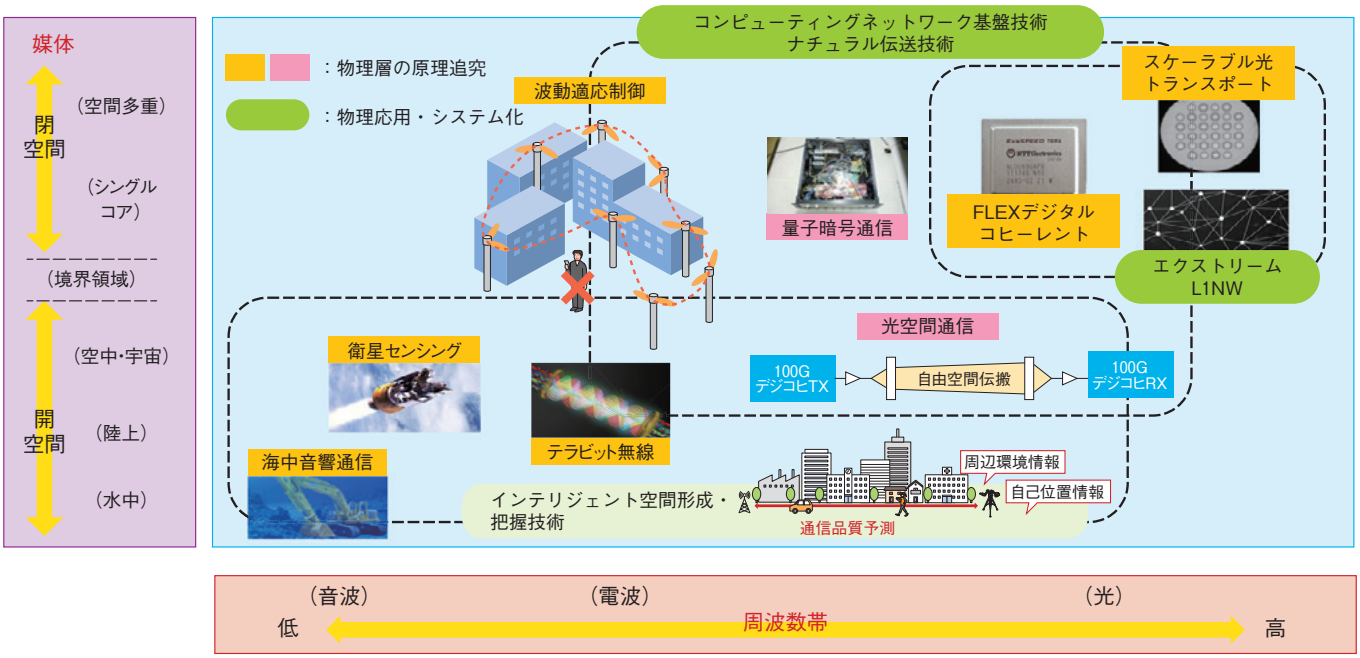


図1　IOWN/6Gに向けてNTT未来ねっと研究所が取り組む領域

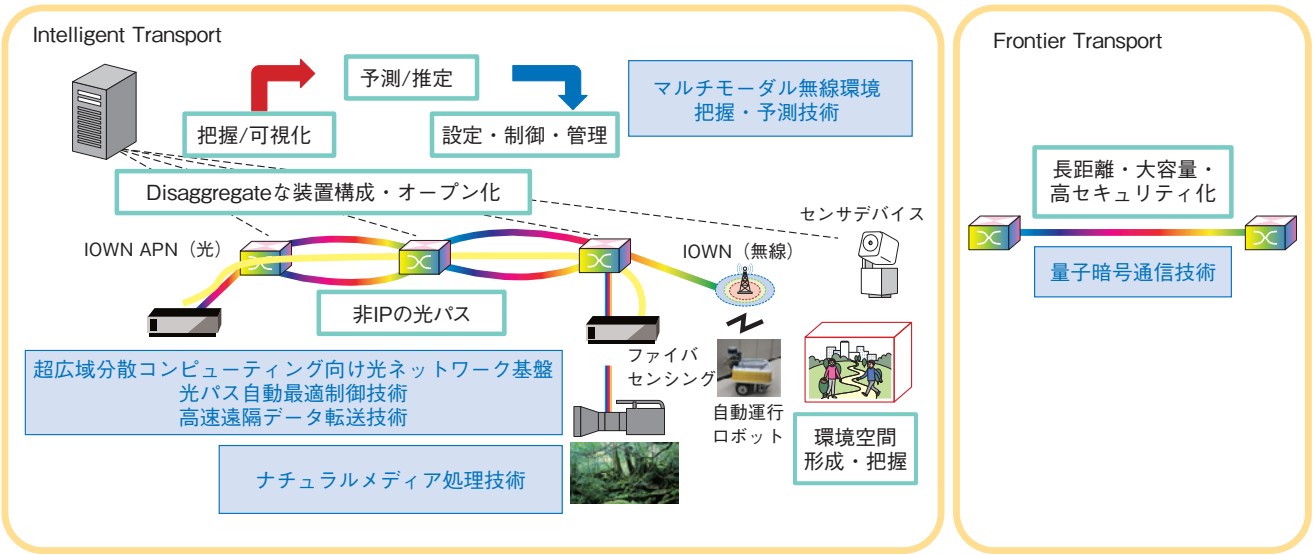


図2　フロンティアコミュニケーション技術の概略

ピューティングリソースをIOWN APN上で接続する光パス自動最適制御および大容量低遅延のデータ転送を実現する高速遠隔データ転送に取り組んでいます．これにより，超広域分散コンピューティング向け光ネットワーク基盤を確立します．また，映像をはじめとした超高臨場コミュニケーションの実現に向け，物理空間の構成情報をリアルタイムで低遅延に伝送するナチュラルメディア処理技術，センシング・AI（人工知能）等により，通信品質・環境を予測し，設定・制御・管理するマルチモーダル無線環境把握・予測技術に取り組んでいます．さらに量子コンピュータを想定したセキュリティ・伝送技術の確立に挑戦していきます．

■超広域分散コンピューティング向け光ネットワーク基盤

APN上に超広域分散配置されたアクセラレータ・メモリ等のコンピュー

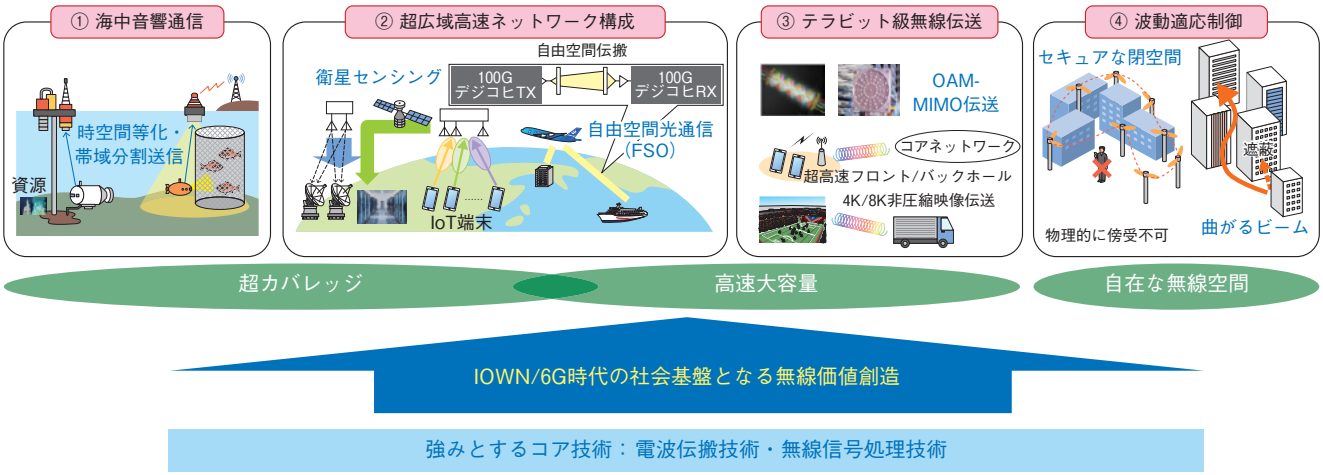


図 3　波動伝搬技術に関連する研究開発

ティングリソースを，光学特性に基づいた伝送モードや光パスの最適設計・制御により動的に接続する技術に取り組んでいます．これにより，光伝送性能を最大限引き出す光パスを構築することができます．さらに，超長距離光パスの帯域を占有利用し，超低遅延で遠隔のメモリ間の同期を実現する高速遠隔データ転送技術により，スマートシティの実現に必要な超広域分散コンピューティング向け光ネットワーク基盤の確立をめざします．

■ナチュラルメディア処理技術

超高臨場コミュニケーションの実現に向け物理空間の構成情報を，時系列の高速デジタル信号としてAPNの光パスに収容し，超低遅延での長距離伝送を可能にする高速メディア転送極低遅延化と，軽量機械学習を活用することによる超低遅延での空間再構成の技術に取り組んでいます．将来的には，ヒト・モノ・環境の入出力をレイヤ横断で収集・推論し，状態監視や異常原因検知から運用等の自動最適化までを可能にするクロスレイヤAIモニタリング技術の確立をめざしています．

■マルチモーダル無線環境把握・予測技術

IOWNで実現されるネットワークサービスの多様な要求を満たすため，カメラやセンサ等の非通信デバイスを含むさまざまなフィジカル空間情報を利用し数秒先の未来の通信品質を予測し，最適な通信手段により高品質な通信を常に維持する技術に取り組んでいます．将来的には，フィジカル空間情報と無線通信システム情報の関係性を用い，無線通信システム情報から，位置情報などのフィジカル空間情報を抽出する環境把握技術の確立をめざします．

■量子暗号通信技術

IOWN構想における長期のイノベーションへの貢献に向け，光技術を基礎とした新たな技術領域への取り組みを行っています．具体的には光ファイバ伝送技術および通信プロトコル技術を活かして，従来の量子暗号通信（QKD）における，距離・通信速度の限界を突破する，量子暗号通信システムの実現をめざしています．さらに量子コンピュータ時代のセキュリティ技術および伝送技術の確立に取り組んでいきます．

波動伝搬技術

IOWN/6G時代の無線通信には，無線通信の新たな価値創造のために海や宇宙などの陸上以外も含めた超カバレッジ拡張，つながっていることを意識しない高速大容量伝送，狙ったエリアに電波を閉じ込める自在な無線空間形成が求められると予想されます．未来研では，IOWN/6G時代の社会基盤となる無線価値創造に向け，①海中音響通信技術，②超広域高速ネットワーク構成技術，③テラビット級無線伝送技術，④波動適応制御技術の4つの技術に取り組んでいます（**図 3**）．

■海中音響通信技術

海中では高速・安定・長距離伝送を実現可能な無線通信技術が確立されておらず，海底資源開発や港湾工事に利用される無人探査船や海中重機などは海上の支援船と100 m以上の通信ケーブルで接続し，遠隔操作を行っているため[(3)]，作業の効率性の面で大きな課題があります．本研究では，音波特有の劣悪な波形歪みを補償する時空間等化技術，広帯域伝送による高速化を実

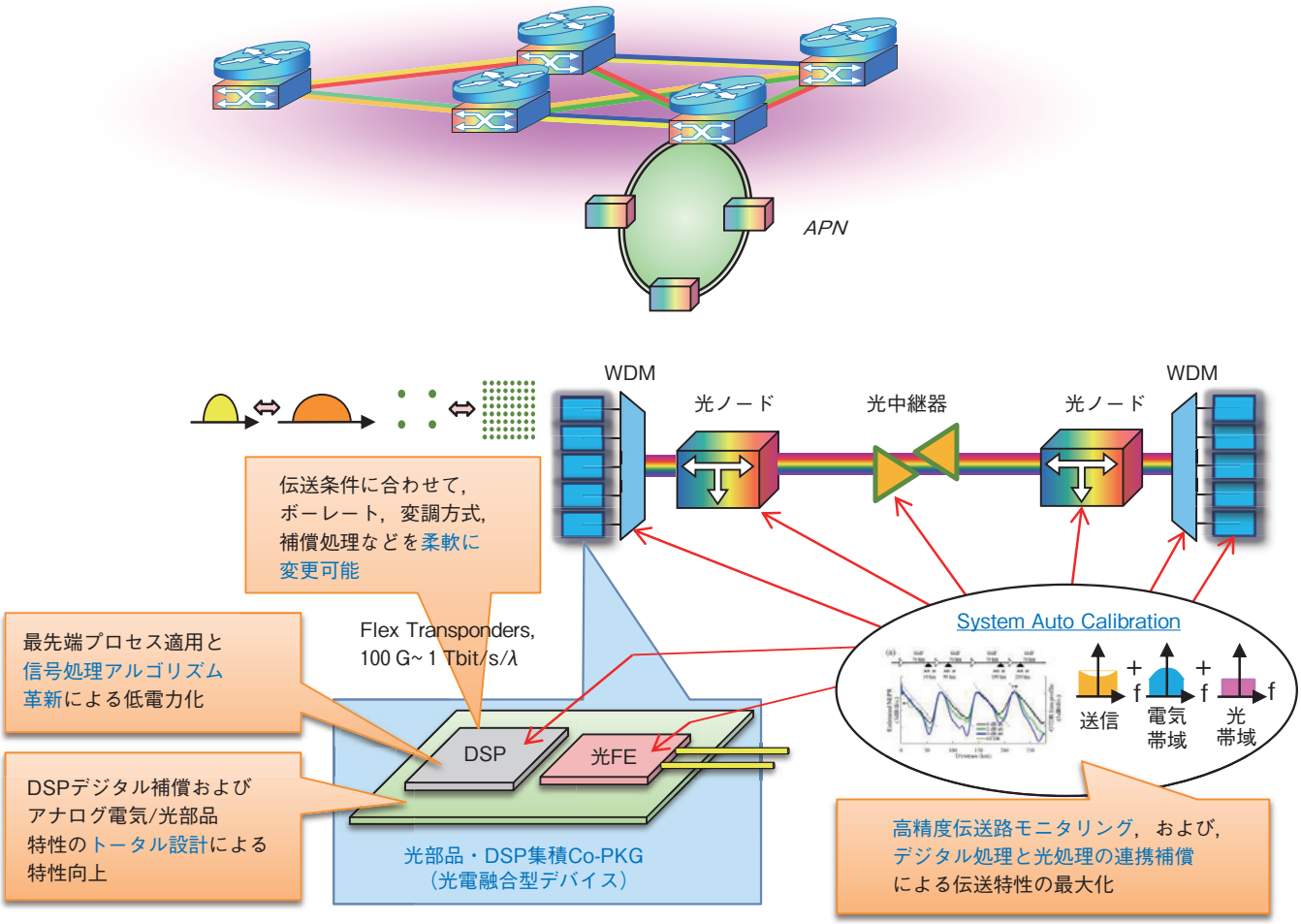


図4　APNへの展開をめざすデジタルコヒーレント光伝送基盤技術

現する帯域分割送信技術などにより，海中機器の無線遠隔制御を可能にするMbit/s級の海中音響通信技術の確立をめざしています．

■超広域高速ネットワーク構成技術

田園地帯や山間部，外洋などの人の住んでいないエリアでは経済性の観点から陸上の無線通信インフラが整備されていないことがあります．本研究では，無線通信インフラが未整備なエリアでの超広域高速ネットワークの実現に向け，低軌道衛星を用いて地球規模のセンサデータ収集を可能にする衛星IoT（Internet of Things）プラットフォーム基盤技術[4]，外洋などでの100 Gbit/s級高速通信を可能にする自由空間光通信（FSO: Free Space Optics）の基盤技術に取り組んでいます．

■テラビット級無線伝送技術

IOWN/6G時代のフロントホール・バックホールにはテラビット級の無線伝送技術が必要になると考えられます[5]．本研究では，テラビット級無線伝送の実現に不可欠な伝送帯域と空間多重数のさらなる拡大に向け，軌道角運動量（OAM: Orbital Angular Momentum）やLOS-MIMO（Line-of-Sight Multi-Input Multi-Output）方式等の空間多重を実現するデジタル信号処理技術，OAM多重伝送の広帯域化を実現する高周波数帯バトラ回路構成技術などに取り組んでいます．

■波動適応制御技術

無線通信では，一般に通信したいエリア以外にも電波が四方八方に広がるため，エリア外への漏洩電波による秘匿性低下，干渉増大，電力損失が普遍的な課題です．本研究では，波動制御に基づく電波の漏れない究極の無線通信の確立に向け，基地局だけでなく端末も連携して適応的に無線空間を形成する端末協調ユーザセントリックRAN技術，電波の軌道を自在に制御

するマルチシェイプ波動制御技術などに取り組んでいます．

トランスポートイノベーション技術

IOWNの基盤となる超大容量光パスを実現するためのトランスポートイノベーション技術に取り組んでいます（**図4**）．デジタルコヒーレント伝送技術の研究開発を推進し，低電力な1 Tbit/s級光通信用デジタル信号処理回路（DSP）の実現をめざすとともに，光と電気，アナログとデジタルを連携した光電融合技術に取り組んでいます．また，ユーザとオペレータに新たな価値をもたらす革新的レイヤ1ネットワーキング技術に取り組み，APNにおけるユーザエクスペリエンス（UX）改革に向けた要素技術の開拓なども行っています．さらに，将来の膨大なトラフィックを効率的に収容することを目的に，ノード当り10 Pbit/s級スループットの革新的な超大容量伝送技術，およびこれを可能とする光信号処理技術を開拓するスケーラブル光トランスポート基盤技術に取り組んでいます．

■FLEXデジタルコヒーレント光伝送基盤技術

IOWNを経済的に実現するための要素技術として，APN構築に必須となる1 Tbit/s/λ級の大容量光伝送の長延化と低電力化を実現するFLEXデジタルコヒーレント光伝送基盤技術を確立することをめざしています．従来のキャリア向け長距離伝送だけでなく，データセンタインターコネクト（DCI）等の近距離伝送にも適用され，急速に拡大する適用領域に対して，DSP機能を駆使して，高精度な伝送路モニタリングに加えて，伝送方式，補償処理等を柔軟に変更することで最適な光パスを実現することをめざしています．

■スケーラブル光トランスポート基盤技術

将来的なクラウドサービス拡大やスマートフォン普及などにより増加する将来の膨大な通信トラフィックを収容可能なペタビット級光ネットワークの実現に向けて，広帯域パラメトリック光増幅中継による一括光増幅帯域拡張の実証[6]や，コア多重やモード多重を駆使した大容量空間多重伝送技術[7]などに取り組んでいます．革新的な超大容量伝送技術，およびこれを可能とする光信号処理技術を開拓し，リンク当り1 Pbit/s容量級のスケーラブル光ネットワーク基盤技術を確立することをめざしています．

■エクストリーム レイヤ1ネットワーク技術

レイヤ1ネットワーキングによりユーザとオペレータに価値をもたらすとともに，コラボレータとともに具体的なユースケースの実証を進めAPN具現化に貢献することをめざしています．要素技術として，あらゆる場所への一瞬のレイヤ1通信パスによりユーザエクスペリエンスに変革をもたらす技術，レイヤ1無瞬断切替で自由自在なネットワーク構成変更を可能としオペレーションに変革をもたらす技術などに取り組んでいます．これら技術開発を通して，レイヤ1通信パス遅延調整技術を用いることでプロレベルにおいても公平なeスポーツ遠隔対戦ができることを実証するなど[8]，さまざまなユースケース開拓にも取り組んでいます．

おわりに

本稿では，未来研で取り組んでいるIOWN/6Gに向けた最先端技術に関する取り組みの概要を紹介しました．今後も2030年に計画されているIOWN/6Gの実現に向け，さまざまな産業分野のパートナーの方々や専門家の方々とのコラボレーション等も活用し，各要素技術の早期確立をめざしていきます．

■参考文献

(1) 岸山・須山・永田：“5G evolution & 6Gへの動向とめざす世界，” NTT技術ジャーナル，Vol. 33, No. 9, pp. 10-15, 2021.
(2) https://www.rd.ntt/iown/0002.html
(3) 港湾技術センター：“海洋新技術と無人化施工の動向と展望，” SCOPE NET, Vol. 70, 2014.
(4) https://group.ntt/jp/newsrelease/2020/05/29/200529a.html
(5) Z. Zhang：“6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies,” IEEE Veh. Technol. Mag., Vol. 14, No. 3, pp. 28–41, Sept. 2019.
(6) https://group.ntt/jp/newsrelease/2021/01/28/210128b.html
(7) https://group.ntt/jp/newsrelease/2020/03/09/200309b.html
(8) https://group.ntt/jp/newsrelease/2021/11/02/211102b.html

（左から）岩科　滋／島野　勝弘／高杉　耕一／赤羽　和徳／才田　隆志

情報化社会の変革に向け，光・電波・音波等のさまざまな周波数帯の波動伝搬を駆使し，光・無線通信システムの高度化・大容量化や通信可能領域の拡張を可能とする要素技術／システム化技術の確立をめざして，研究開発に取り組んでいきます．

◆問い合わせ先
NTT未来ねっと研究所
企画部
TEL　046-859-3008
FAX　046-859-3727
E-mail　kensui-mirai-p@hco.ntt.co.jp

デジタルコヒーレント光伝送技術の今後の展開

振幅・位相・偏波といった物理量をデジタル的に取り込み，高度な信号処理により伝送性能を最大化するデジタルコヒーレント光伝送技術は，最新世代の光伝送技術であり，IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想の実現と発展に向けてさらなる進化をする必要があります．本稿では，デジタルコヒーレント光伝送技術の最新の動向と今後の進化について，高速大容量化，低電力化，ソフトウェアによる自律制御の観点を中心に紹介します．

木坂（きさか）　由明（よしあき）
西沢（にしざわ）　秀樹（ひでき）
山崎（やまざき）　悦史（えつし）
才田（さいだ）　隆志（たかし）
NTT未来ねっと研究所

はじめに

インターネットの登場以来，さまざまなサービスの登場と普及とともに，日本でも世界でもインターネットトラフィックは指数関数的に増大し続けています．光ファイバ伝送技術は，この需要を支えるために，波長多重や光増幅中継など新技術を導入して世代進化を続けてきました．最新の世代が，光の偏波，振幅，位相をすべてデジタルデータとして取り込み，高度な信号処理によって光ファイバ伝送路や光電子デバイス中の歪みを補償するデジタルコヒーレント光伝送技術です[(1)]．IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想がめざすリアルとバーチャルが融合して多様性を受容する豊かな社会に向けて，光伝送技術も，さらに大容量に低電力に高機能に進化していく必要があります．本稿では，デジタルコヒーレント光伝送技術の最新の動向と今後の進化について，高速大容量化，小型低電力化，およびソフトウェアによる自律制御の観点から紹介します．

高速大容量化の取り組み

データセンタ間・データセンタ内通信の拡大と，オンデマンドビデオストリーミングやクラウドコンピューティングなどのさまざまなアプリケーションの浸透により，光伝送の大容量化への需要はさらに高まっています．大容量化においては，ネットワークを経済的に構築するために，波長チャネル当りの大容量化が必要になります．**図1**(a)に，オフライン実験および実用化システムでの波長チャネル当りの光伝送容量の進展を示します．近年では，波長当り1 Tbit/sを超える大容量伝送の実験実証が報告されています．これらの実証実験では，大幅な変調速度の高速化と変調方式の高多値化が進んでいます．変調速度は，デジタルコヒーレント光伝送の第一世代（波長当り100 Gbit/s）では32 Gbaudでしたが，最近では100 Gbaud級以上に高速化しています[(2), (3)]．これは，アナログ-デジタル（AD）・デジタル-アナログ（DA）変換器，光変調器，ドライバ，フォトダイオード，トランスインピーダンスアンプ（TIA）などのアナログ構成部品の高速化によって実現されています[(4)～(6)]．また，シャノン限界に近い容量を達成できる確率的コンステレーションシェーピング（PCS）[(7)]が注目され，変調多値度が64点以上の直交振幅変調（QAM）とともに利用されています．

光伝送システムの大容量化では，送受信機のアナログ部品による信号歪みが主要課題となります．シンボルレートの高速化，変調多値度の増大により，アナログ部品自体，およびプリント回路基板など電気配線の周波数帯域制限，クロストークなどが信号歪みを引き起こします．これらの歪みは，送受信それぞれのデジタル等化フィルタに対して，キャリブレーションによって推定された最適なフィルタ係数を設定して補償されます．NTT未来ねっと研究所（未来研）ではこのような波形歪みを，高精度に補償する技術を開発しています．送信側で行うデジタル

予等化はPeak-to-average ratioを上昇させ信号品質を低下させる課題があり[8]，動作温度・経年劣化・制御ディザによる波形歪みの時間変動への追従といった課題もあります．このため，送信側予等化と受信側等化をどう役割分担させるかが伝送性能を確保するために重要となってきます．これら研究開発技術を適用し，これまでに最大600 Gbit/sのデジタルコヒーレント伝送を実現するASICを実用化しています[9]．

未来研では，さらに次世代の光伝送方式として，変調速度168 GBaudまで高速化し，波長当り容量1 Tbit/sの信号光の3840 km伝送，および1.2 Tbit/s信号光の1280 km伝送の実験実証を達成しました[2]．高速な変調速度は，AMUXフロントエンド集積モジュール[5]を用いて実現され，それぞれ偏波多重PCS-16QAMおよび36QAM変調方式を用いています．この信号光を光周波数間隔175 GHzにて波長多重（WDM）しています．図1(b)は，伝送前後のWDM信号光スペクトルであり，伝送後でも高い平坦性を実現しています．伝送路は純シリカコアファイバ（Pure Silica Core Fiber）で構成され，光増幅中継区間80 km，後方励起分布ラマン増幅とエルビウム添加ファイバ増幅を併用しています．スペクトル利用効率はそれぞれ5.71および6.85 bit/s/Hzに達成しています．図1(c)は，1 Tbit/sおよび1.2 Tbit/s信号の規格一般化相互情報量（NGMI）伝送距離依存性の測定結果を示しています．1 Tbit/s信号は3840 km伝送後，1.2 Tbit/s信号光の1280 km伝送後において，冗長度21%の誤り訂正しきい値である0.857よりも高いNGMIが得られており，エラーフリー伝送が可能であることを示しています．この実験実証では，光帯域はC帯のみで行っていますが，L/S帯へ拡大する研究開発も進めていきます．

小型低電力化の取り組み

ますます増加を続ける通信トラフィックを収容するため，光ネットワークには持続的な大容量化が求められますが，光伝送装置の設置スペースや供給電力には制限があるため，大容量化の実現には，光インタフェースの小型化・低電力化が必要となります．小型化により放熱性能が低くなるため，小型化を実現するためには，光インタフェースを構成するデバイスの小型化・高密度実装だけでなく，低電力化が重要になります．このため，光インタフェースの電力消費の大きな部分を占めるDSP（Digital Signal Processor）の低電力化が不可欠です．

デジタルコヒーレント光伝送技術は

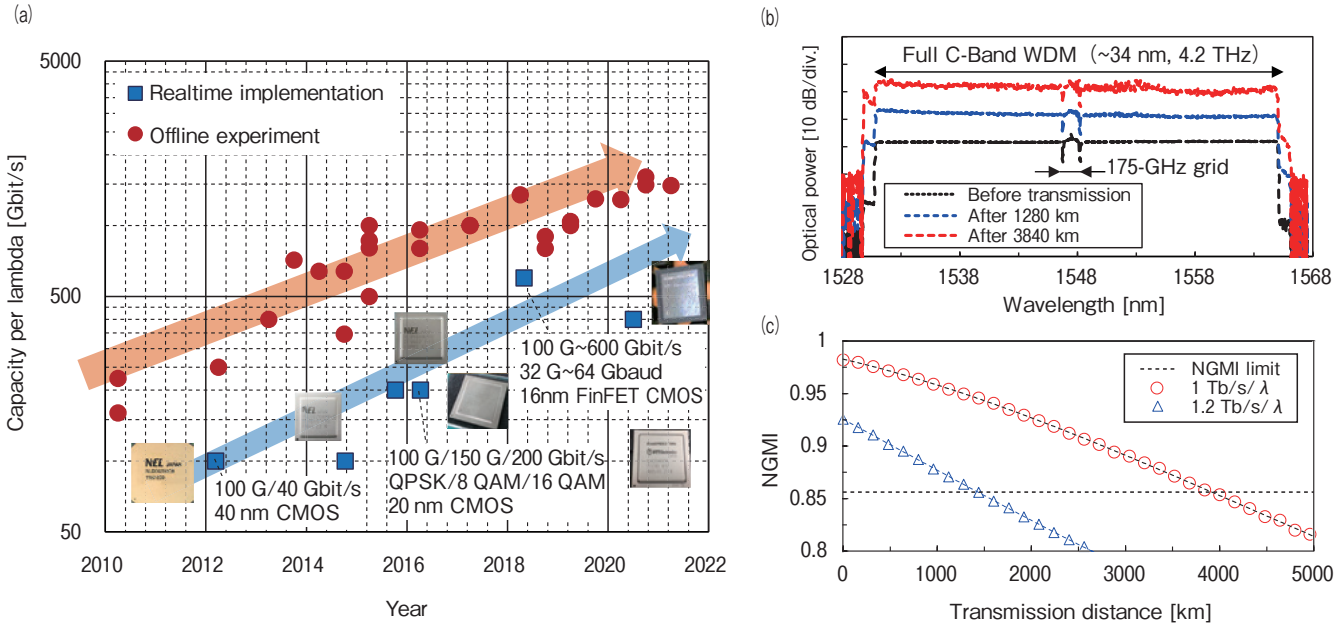


図1　波長当り伝送容量の進展と1Tbit/s超伝送実験例

通信キャリアの基幹ネットワークの長距離伝送システムから導入されましたが，技術の成熟により小型化，低電力化，低コスト化が進み，メトロネットワークやデータセンタ間（DCI）ネットワークといった短距離伝送システムにも適用領域を拡げて普及が進んでいます．今後はアクセスネットワークやデータセンタ内ネットワークへの適用が期待されています．また，将来のマルチコアファイバを用いた空間多重方式を適用した超多並列の大容量光伝送システムの実現に向けて，低電力化技術はますます重要となります．

コヒーレントトランシーバの小型化と低電力化の進展を**図 2** に示します．図下部にはNTT研究所で研究開発・実用化し，コヒーレントトランシーバに搭載されているDSPも示しています．メトロ・DCIネットワーク向けには，主にコヒーレントトランシーバが使用され，DSPの低電力化に伴って急速に小型・低電力化が進展しており，現在，CFP2-DCO，QSFP-DD等の400 Gbit/sプラガブルトランシーバが実用化されています．光通信用DSPには非常に高速かつ低電力での動作が求められるため，常に最先端のCMOSプロセスを適用して低電力化が図られていますが，CMOSプロセス微細化による低電力化だけでは，要求される低電力化を達成できないため，デジタルサンプリングレート低減化，波長分散補償・適応等化・前方誤り訂正等の各機能での新しい信号処理アルゴリズムの適用やアプリケーションに応じた機能の選択[10]や性能最適化が進められてきています．最先端CMOSプロセスの適用や信号処理アルゴリズムの革新により，デジタル回路の電力は大幅に低減してきていますが，DAC/ADC等のアナログ回路は送受信信号の高速化の影響もあり，大きな電力低減は実現できていません．このため，DSP全体の消費電力のうち，アナログ回路の電力が占める割合がDSP世代ごとに大きくなっており，今後のさらなる低電力化に向けてはアナログ回路の低電力化が大きな課題の1つとなっています．

近年では，さらなる小型化・低電力化に向けて，DSPとシリコンフォトニクスを用いた光送受信デバイス（COSA）[11]を1つのパッケージに実装するコパッケージ実装技術の研究開発が進められています．DSPとCOSAの高密度実装により大幅な小型化を実現するとともに，DSPとCOSAの間の高速アナログ電気信号配線の短縮により損失を小さくし，信

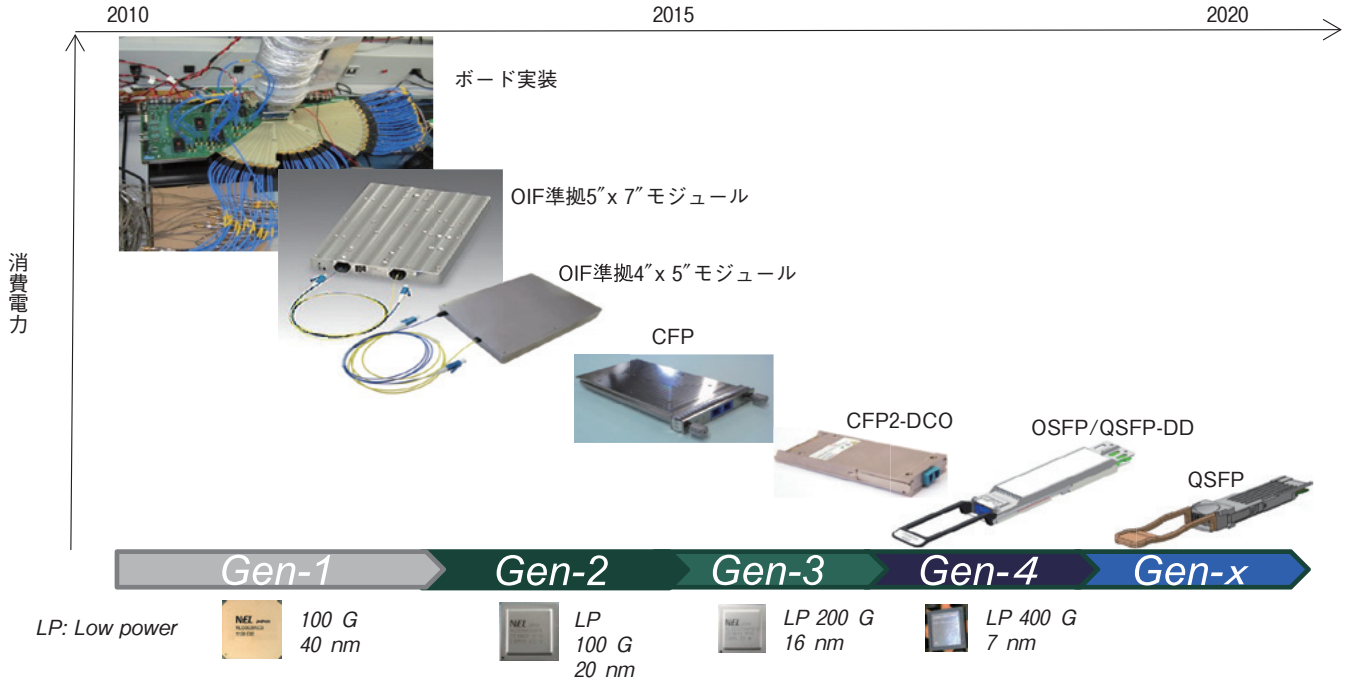


図 2　コヒーレントトランシーバの小型化と低電力化

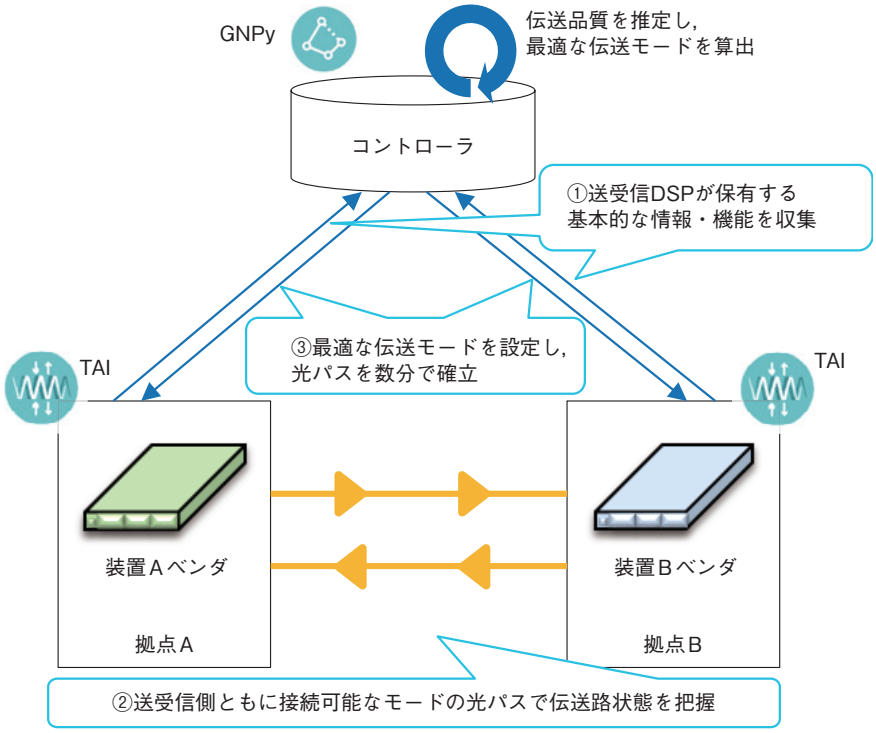


図3　異ベンダ・異装置間の光パス伝送モード自動最適化

号駆動電力を低く抑えることができます．将来のIOWN APNの実現に向けて，現在デジタル信号処理で行っている機能を光処理にオフロードすることで抜本的な低電力化をめざす研究開発を進めています．未来研では，光送受信デバイスの帯域特性による信号波形歪みをデジタル信号処理と光処理で連携して補償することで800 Gbit/s級光伝送での大幅なOSNR耐力向上を実証しています[12]．この性能向上を利用してデジタル信号処理を簡易化することでDSPの消費電力を低減することも可能となります．

ソフトウェアによる自動制御の取り組み

近年，ルータ等の転送機器市場では物理的なネットワーク・装置ハードウェアとその制御プレーンを分離し，ソフトウェアを用いて管理するSoftware Defined Wide Area Network（SD-WAN）技術の商用導入が進んできて，離れたユーザ拠点間を接続しソフトウェアで集中制御できる仕組みが整ってきています．IOWNが本格化する時代には，コヒーレントモジュールを搭載したルータやホワイトボックススイッチ等さまざまな伝送機能を備えたユーザ端末の普及が進みます．これらの端末を，光電気変換の回数を減らして低遅延・省電力に接続するため，キャリアネットワークを経由してダイレクトに接続するユースケースが検討されており[13]，ソフトウェアによる光伝送ネットワークの自動設定技術の実現に期待が高まっています．

一方，レイヤ1以下の光伝送部分については，光アンプの波長依存性やファイバ非線形光学効果などの複雑な物理要因が障壁となって，SD-WANのようなソフトウェアによる自動制御は難しいと考えられてきました．任意のユーザエンド間をダイナミックに接続するためには，光伝送ネットワークの伝送距離・容量を決定する伝送路特性を短時間で推定する新たな手法と，受信器による伝送品質のリアルタイム測定が必須となります．

光とIPネットワーキングにおいてオープンな技術・アーキテクチャ・インタフェースの定義を目的としたTelecom Infra Project Open Optical & Packet Transport[14]にて，Gaussian Noiseモデルによる伝送品質推定に基づいたオープンな伝送路設計ツールGNPy[15]や，Transponderのハードとソフトを分離するTransponder Abstraction Interface（TAI）[16]の開発が進んでいます．未来研はこれらのオープン化に貢献するとともに，TAIやGNPyといったオープンなインタフェースやツールを活用し，異ベンダ・異装置間で光パスの伝送モードを自動最適化し，短時間で光パスの接続を確立する技術の実現をめざしています（**図3**）．

従来，こうした光パスの接続には人手による作業が不可欠で，サービスオーダから光パスの接続確立までに数日から数週間と長い時間を要していました．また，デジタルコヒーレント光伝送方式が高度化し，伝送モードが多様化してきたことによって，光パスの設計・調整が複雑化しているという課題もあります．本技術は，マルチベン

ダの伝送装置が導入された環境下においても，それらの情報をTAI経由で収集し，伝送路状態・伝送品質をGNPyなどにより推定することで最適な伝送モード（変調方式やFEC種別）を算出します．そして，それらを送受信側DSPに設定することで，光パスの接続確立を数分で完了します[17]．具体的には，これらは以下のシーケンスにより実施されます．

① 送受信DSPが保有する基本的な情報や機能（設定可能な変調方式やFEC種別等）をTAI経由で収集し，送受信ともに接続可能な伝送モードを設定のうえ，光パスの接続を確立する．

② ①により，受信側DSPからBERや波長分散値といった伝送路の品質を推定するためのパラメータを収集できる．これらから，GNPyにより推定されるGSNRを基に，マージンを適切に設定したうえで最適な伝送モードを算出する．

③ 算出した伝送モードから，変調方式，FEC種別といったパラメータを送受信側のDSPに設定し，数分で異ベンダの伝送装置間に光パスを開通する．

ま と め

未来研ではデジタルコヒーレント光伝送技術を，高速大容量化，低電力化，ソフトウェアによる自律制御という観点で研究開発を行い進化させ，IOWNを支える光伝送技術を実現します．

■参考文献

(1) K. Kikuchi: “Fundamentals of Coherent Optical Fiber Communications,” J. Lightwave Technol., Vol. 34, No. 1, pp. 1-23, 2016.

(2) M. Nakamura, F. Hamaoka, M. Nagatani, Y. Ogiso, H. Wakita, H. Yamazaki, T. Kobayashi, M. Ida, H. Nosaka, and Y. Miyamoto: “192-Gbaud signal generation using ultra-broadband optical frontend module integrated with bandwidth multiplexing function,” OFC2019, p. Th4B.4, 2019.

(3) M. Nakamura, T. Sasai, K. Saito, F. Hamaoka, T. Kobayashi, H. Yamazaki, M. Nagatani, Y. Ogiso, H. Wakita, Y. Kisaka. and Y. Miyamoto: “1.0-Tb/s/λ 3840-km and 1.2-Tb/s/λ 1280-km Transmissions with 168-GBaud PCS-QAM Signals Based on AMUX Integrated Frontend Module,” OFC2022, San Diego, U.S.A., March 2022.

(4) M. Zhang, C. Wang, X. Chen, M. Bertrand, A. S. Ansari, S. Chandrasekhar, P. Winzer, and M. Lončar: “Ultra-high bandwidth integrated Lithium Niobate modulators with record-low Vπ,” OFC2018, p. Th4A.5, San Diego, U.S.A., March 2018.

(5) Y. Ogiso, J. Ozaki, Y. Ueda, H. Wakita, M. Nagatani, H. Yamazaki, M. Nakamura, T. Kobayashi, S. Kanazawa, T. Fujii, Y. Hashizume. H. Tanobe, N. Nunoya, M. Ida, Y. Miyamoto, and M. Ishikawa: “Ultra-high bandwidth InP IQ modulator for beyond 100-GBd transmission,” OFC2019, p. M2F.2, San Diego, U.S.A., March 2019.

(6) M. Nagatani, H. Wakita, H. Yamazaki, Y. Ogiso, M. Mutoh, M. Ida, F. Hamaoka, M. Nakamura, T. Kobayashi, Y. Miyamoto, and H. Nosaka: “A Beyond-1-Tb/s Coherent Optical Transmitter Front-End Based on 110-GHz-Bandwidth 2:1 Analog Multiplexer in 250-nm InP DHBT,” IEEE J Solid-State Circuits, Vol. 55, No. 9, pp. 2301–2315, 2020.

(7) T. Yoshida, M. Karlsson, and E. Agrell: “Short-block-length shapingby simple mark ratio controllers for granular and wide-range spectral efficiencies,” ECOC2017, pp. 1–3, Gothenburg, Sweden, Sept. 2017.

(8) T. Sasai, M. Nakamura, E. Yamazaki, A. Matsushita, S. Okamoto, K. Horikoshi, and Y. Kisaka: “Wiener-hammerstein model and its learning for nonlinear digital pre-distortion of optical transmitters,” Opt. Express, Vol. 28, No. 21, pp. 30952–30963, Oct. 2020.

(9) https://www.ntt-electronics.com/product/photonics/exaspeed-tera.html

(10) O. Ishida, K. Takei, and E. Yamazaki: “Power Efficient DSP Implementation for 100G-and-Beyond Multi-Haul Coherent Fiber-Optic Communications,” OFC2016, W3G.3, Anaheim, U.S.A., March 2016.

(11) S. Yamanaka and Y. Nasu: “Silicon Photonics Coherent Optical Subassembly for High-Data-Rate Signal Transmissions,” OFC2021, Th5F.2, June 2021.

(12) A. Matsushita, M. Nakamura, K. Horikoshi, S. Okamoto, F. Hamaoka, and Y. Kisaka: “64-GBd PDM-256QAM and 92-GBd PDM-64QAM Signal Generation using Precise-Digital-Calibration aided by Optical-Equalization,” OFC2019, W4B.2, San Diego, U.S.A., March 2019.

(13) https://iowngf.org/technology/

(14) https://telecominfraproject.com/oopt/

(15) https://gnpy.readthedocs.io/en/master/

(16) https://github.com/Telecominfraproject/oopt-tai

(17) K. Anazawa, S. Kuwabara, T. Sasai, T. Mano, T. Inoue, T. Inui, and H. Nishizawa: “Automatic Modulation-Format Selection with White box Transponders: Design and Field Trial,” OECC, JS2A.14, Oct. 2021.

（左から）木坂 由明/ 西沢 秀樹/
山崎 悦史/ 才田 隆志

IOWNのAPNを支える基盤として，社内外との連携を強化し，デジタルコヒーレント光伝送技術を今後も進化させていきます．

◆問い合わせ先

NTT未来ねっと研究所
トランスポートイノベーション研究部
TEL 046-859-3011
FAX 046-859-5541
E-mail ti-hosa-mirai-p@hco.ntt.co.jp

スケーラブル光トランスポート技術の研究開発

本稿では，IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）APN（All Photonics Network）のためのPbit/s級長距離光ネットワーク実現に向け，光増幅帯域ならびに電気信号処理帯域を飛躍的に拡大可能なスケーラブル光トランスポート技術の現状と展望について述べます．従来の光増幅中継器の増幅帯域を2.5倍以上に拡大しつつ伝送距離の長距離化を実現できる可能性を有する光パラメトリック増幅中継技術，ならびに，従来の光ファイバと同じ外径を保ちつつ，伝送容量を10倍以上に拡大できる可能性を有するモード多重MIMO（Multiple-Input and Multiple-Output）信号処理を用いた空間多重光通信技術について解説します．

宮本（みやもと）　裕（ゆたか）[†1]　渡辺（わたなべ）　啓（けい）[†1, 2]
中島（なかじま）　和秀（かずひで）[†3]

NTT未来ねっと研究所[†1]
NTT先端集積デバイス研究所[†2]
NTTアクセスサービスシステム研究所[†3]

はじめに

我が国では，2020年度に第5世代移動通信システム（5G）が商用導入され，今後，自動運転等をはじめ，あらゆるモノが高信頼，低遅延，大容量にネットワークへつながるIoT（Internet of Things）社会の基盤として発展が期待されています．IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）APN（All Photonics Network）の実現を通したネットワークインフラ技術の進化の加速により，5Gに続く次世代Beyond 5G（B5G）技術は，2030年代には当たり前のネットワークサービス技術として普及することが予想されます．また，ネットワークインフラ基盤の持続的な進化は，昨今の新型コロナウイルスの世界的な感染拡大に伴う，グローバルな産業構造やライフスタイルの変化を，柔軟に支えていくうえでも不可欠と考えられています．

ブロードバンドサービスの進化を支える大容量ネットワークインフラ基盤の実現には，大容量光トランスポートネットワークの不断の進化が必須であり，NTTでは，**図1**に示すとおり，これまで，1980年代から導入を進めたシングルモード光ファイバ（SMF: Single Mode Fiber）ケーブルを基盤とした大容量光トランスポートシステム・ネットワークの持続的な発展を実現してきました．光ファイバ1心当りのシステム容量は，さまざまな光通信方式の重層的な技術革新とともに，ほぼ年率約1.4倍（20年で1000倍）の速度で進化し，2030年代には，システム容量が1 Pbit/s を超えると予想されます．最近では，光の波としての性質を活用し，SMF の伝送特性を最大限に引き出すための伝送技術として，デジタル信号処理を駆使したデジタルコヒーレント光通信技術が実用化され，2019年にはファイバ1心当り16 Tbit/s容量の光トランスポートネットワークが実用化されています[(1)]．し

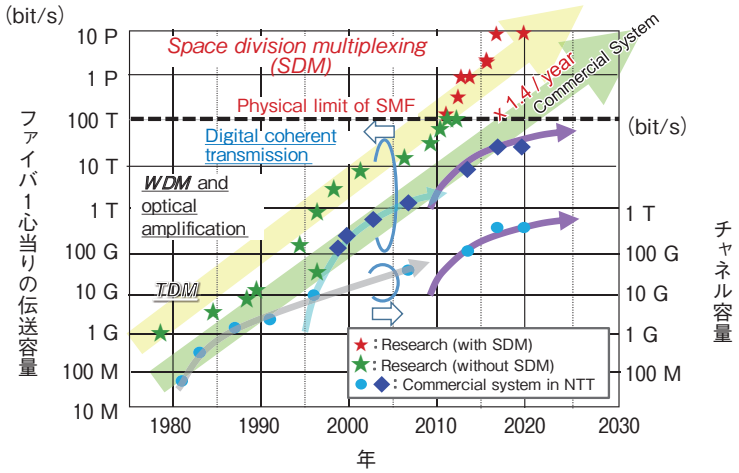


図1　超大容量光通信システム技術の変遷

かしながら，近年では長距離光トランスポートネットワーク基盤を支えてきた伝送媒体であるSMFの物理的な容量限界（キャパシティクランチ）が，現在の約10倍の100 Tbit/s容量付近に存在することが明らかになり，システム容量の持続的な発展を実現する革新技術が求められています．

本稿では，IOWN APNにおいて，キャパシティクランチの課題を克服するスケーラブル光トランスポート技術として，２つのアプローチを解説します．１つは，従来のSMFを用いて一括光増幅中継する中継器の光信号帯域を従来の２倍以上に拡大し，SMFで経済的な大容量化を図る広帯域光パラメトリック増幅中継技術です．また，もう１つは，１本の光ファイバ中にマルチコア・マルチモードといった新しい自由度を導入することで複数の独立な並列通信路を形成し，既存のSMFの限界を超えてPbit/s 容量級の大容量通信を実現する空間分割多重（SDM：Space Division Multiplexing）光通信技術です．以降では，個々の技術要素の最近の進展について解説します．

広帯域光パラメトリック増幅中継技術

現在の光ファイバ伝送システムでは，エルビウム添加光ファイバ増幅器（EDFA）が増幅可能な約４THzの光波長帯域に，約100波長程度の光信号を波長多重し，デジタルコヒーレント技術*1により光信号１波長当りの伝送容量を拡大することで，伝送システムの大容量化を実現してきました．

NTTが提唱するIOWN構想を構成するAPNにおいては，豊富な波長資源を活用したフレキシブルな光ネットワークの実現をめざしており，従来の１波長当りの大容量化とともに，利用可能な波長資源（光波長帯域）の拡大が求められています．NTTでは，広帯域かつ低歪みな光増幅技術として，PPLN（Periodically Poled Lithium Niobate）*2導波路を用いた光パラメトリック増幅*3に着目し，研究開発を進めてきました(2)．PPLN導波路による光パラメトリック増幅では，単一偏波の信号のみが増幅可能であり，通常の光増幅にとっては不要な位相共役光が発生するため，現在デジタルコヒーレント方式で用いられている偏波多重光信号の光増幅中継器として，さらなる広帯域化やトラフィックに応じた安定な光信号の挿入抜去を行う際に課題がありました．

そこで，モジュール化した複数のPPLN導波路（PPLNモジュール）を用いた新たな増幅器構成を提案し，偏波多重光信号の安定な増幅および，利得15 dB以上で10.25 THzの増幅帯域を実現しました．シンボル速度100 Gbaud超級の超高速信号生成技術(3)を用いた１波長当り毎秒800ギガビットの偏波多重デジタルコヒーレント信号を検証信号として，利得飽和領域において，単一波長，波長多重信号入力ともに低歪みな信号増幅を確認しています．また，APNにおける波長資源の活用で想定される波長数の高頻度な変動を模擬し，１波長と41波長の入力信号切り替えに対する高速応答性も確認しました．開発した光パラメトリック増幅器を，光増幅中継器として適用し，１波長当り毎秒800ギガビットの波長多重信号を用いて光信号帯域が従来技術の2.5倍以上の10.25 THz以上に拡大可能なことを実証しました(4)．

今後は，広帯域光パラメトリック増幅技術と高シンボル速度の超高速信号生成技術を併用することで，**図２**に示すとおり，既存の光ファイバ通信システムの限界性能に迫る100 Tbit/s超級の長距離伝送性能を追究していきます．．

モード多重を用いたSDM光通信技術

SMFのキャパシティクランチを克服し大容量化を実現するためのSDM光通信技術の研究開発では，伝送媒体であるSDM 光ファイバは，その製造性を考慮すると，現在広く用いられているSMFの標準クラッド径125 μm

---

*1　デジタルコヒーレント技術：デジタル信号処理とコヒーレント受信を組み合わせた伝送方式です．コヒーレント受信とは，受信側に配置した光源と，受信した光信号を干渉させることにより，光の振幅と位相を受信することが可能な技術です．偏波多重や振幅・位相を利用した変調方式により周波数利用効率を向上させるとともに，デジタル信号処理を用いた高精度な光信号の歪み補償と，コヒーレント受信により，大幅な受信感度向上を実現します．

*2　PPLN：周期的分極反転ニオブ酸リチウム．非線形媒質であるニオブ酸リチウム（$LiNbO_3$）において，自発分極と呼ばれる結晶内の正負の電荷の向きを一定の周期で強制反転させた人工結晶です．周期的分極反転ニオブ酸リチウムは，元のニオブ酸リチウム結晶よりも圧倒的に高い非線形光学効果を得ることができます．

*3　光パラメトリック増幅：物質中で生じる非線形光学効果を利用して，異なる波長の光どうしを相互作用させることで，特定の波長の光を増幅します．非線形媒質として，高非線形ファイバやニオブ酸リチウムが知られています．

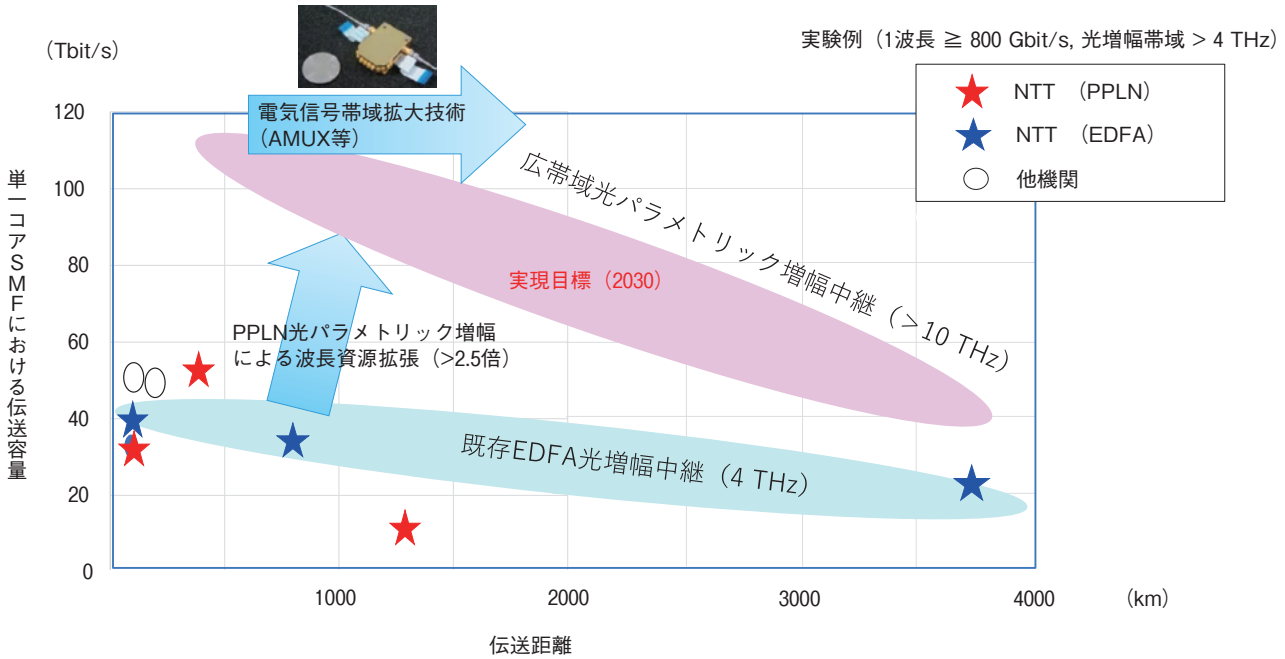


図 2　広帯域光パラメトリック増幅中継技術と
電気信号処理帯域拡大技術による既存SMF伝送特性の拡大

と同等であることが望まれます．標準クラッド径のSDM光ファイバで，複数のコアや伝搬モードを用いて信号伝送を行う場合には，特に空間多重数 4 を超える領域では，各空間モード間で強い結合が生じ，クロストークや空間モード分散により信号波形に歪みが生じます．現在のSMFを用いたデジタルコヒーレント光伝送システムでは，異なる 2 つの偏波を用いて独立な信号を伝送する偏波多重が適用されています．伝送路における偏波回転や偏波間の遅延差（偏波モード分散）が組み合わさることで生じる動的な波形歪みは，受信機内のデジタル信号処理回路に実装された 2 × 2 のMIMO（Multiple-Input Multiple-Output）信号処理*4により適応的に補償され高品質な伝送が実現されています．しかし，これを単純に拡張しマルチモード多重を用いたSDM 伝送システムに適用すると，空間多重数の 2 乗に比例してMIMO 信号処理の回路規模が増大します．さらに，マルチモードファイバ特有の空間モード分散（SMD：Spatial Mode Dispersion）は，現状，偏波モード分散に比べて10倍以上大きく，モード間結合が大きいマルチモードファイバにおいては伝送距離の平方根に比例して累積するため，MIMO信号処理に必要なデジタルフィルタのタップ数はそれに応じて拡張する必要があります．

前述の技術課題を克服するため，研究所では，空間モードを積極的に活用・制御した大容量・長距離光トランスポート技術を検討しています（**図 3**）．具体的には，光ファイバケーブル敷設環境や量産性に適した標準クラッド径125 μmの空間モード制御光ファイバ実装技術，また，ケーブル敷設特性に起因する動的光学特性を考慮したモード多重MIMO処理構成技術，さらに両者を統合した空間モード多重光増幅中継技術を有機的に連携させた基盤技術の確立です．モード多重MIMO処理構成技術に関する最近の検討結果の一例[(5)]として，6 つの独立な空間モードを用いたモード多重光通信において，異なる空間モード間の伝

*4　MIMO信号処理：同一のキャリア周波数（波長）を使って，1 つ以上の信号を，複数の信号伝搬路（伝搬モードやコア）を持つ伝送路で送受信する技術です．無線通信では，広く使われている技術であり，光通信においては，SMF内の直交する2つの偏波モードを用いた2入力2出力（2×2）のMIMOが，偏波多重技術としてデジタルコヒーレント技術により実用化されています．

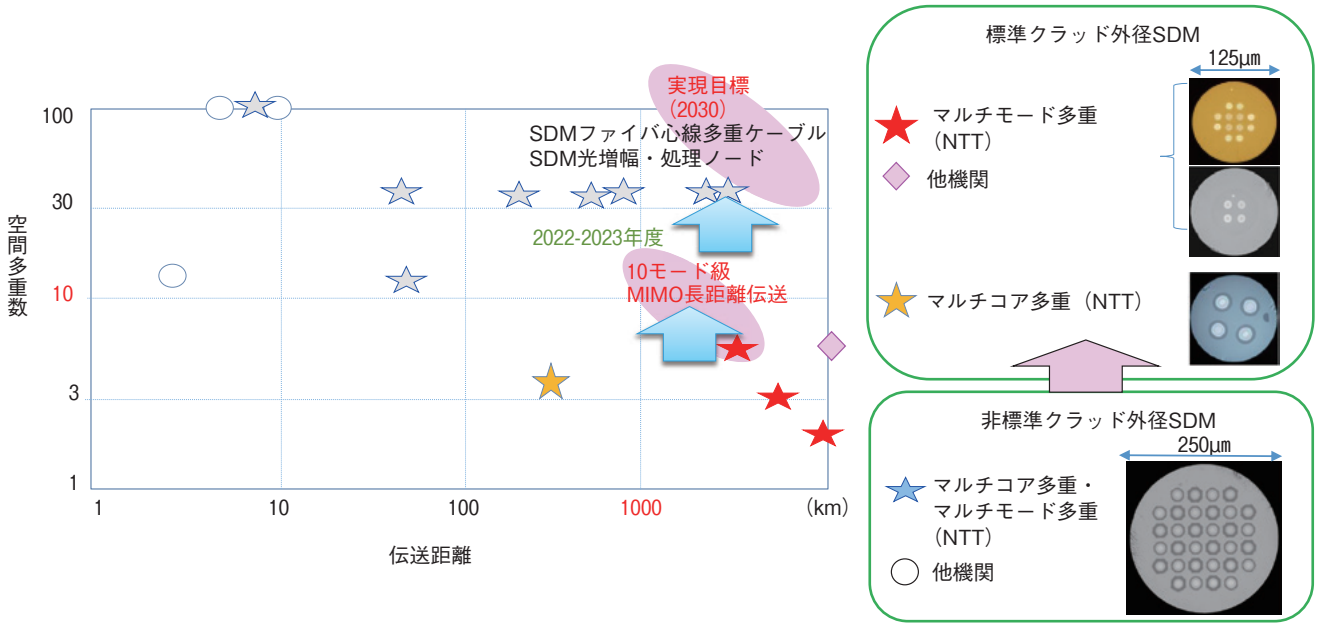


図 3　モード多重MIMO信号処理と標準クラッド外径モード多重ファイバ実装技術による
キャパシティクランチの克服（空間多重数＝1 は既存SMF伝送システム容量）

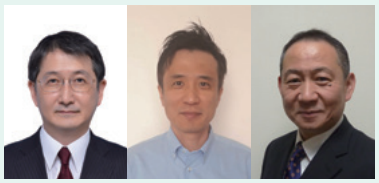
送損失差や伝搬遅延差に対して強い補償特性を有するMIMO信号処理方式や光増幅中継方式を提案することで，6000 km以上の長距離伝送を実証に成功しています．また，モード多重ファイバを既存の陸上光ファイバケーブルに実装した状態で，モード多重伝送における光学特性を制御するための実装技術の有効性実証実験に成功しています[(6)]．これらの要素技術群の確立に向けては，一部NICT委託研究の支援の下で外部パートナーと連携して研究開発を加速しています[(7)]．

ま と め

本稿では，IOWN APNの実現に向け，キャパシティクランチの課題を克服するスケーラブル光トランスポート技術として検討を進めている広帯域光パラメトリック増幅中継技術，およびモード多重SDM光通信技術について，現状と今後の展望を解説しました．

■参考文献

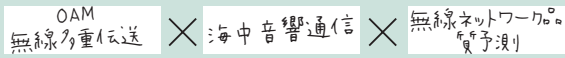
(1) https://www.ntt.com/about-us/press-releases/news/article/2019/1209.html
(2) https://journal.ntt.co.jp/article/3521
(3) https://group.ntt/jp/newsrelease/2019/03/07/190307a.html
(4) https://group.ntt/jp/newsrelease/2021/01/28/210128b.html
(5) https://group.ntt/jp/newsrelease/2020/03/09/200309b.html
(6) https://group.ntt/jp/newsrelease/2020/03/09/200309a.html
(7) 宮本・中島・長谷川・エマニュエル・杉崎・長瀬：“Beyond 5 G時代に向けた空間モード制御光伝送基盤技術の研究開発，”電子情報通信学会総合大会，企画シンポジウム，BI- 3 -1, 2022.



（左から）宮本　裕/ 渡辺　啓/
中島　和秀

既存技術の光通信システムの技術課題であるキャパシティクランチを克服するために，スケーラブル光トランスポート技術を確立し，将来のIOWN APN実現を通して大容量ネットワークインフラ基盤のさらなる進化に貢献していきます．

◆問い合わせ先
NTT未来ねっと研究所
トランスポートイノベーション研究部
TEL　046-859-3011
FAX　046-859-5541
E-mail　ti-hosa-mirai-p@hco.ntt.co.jp



6G時代の多様な無線アクセスを支える先端無線技術の研究開発

2030年代の実現をめざす6G（第6世代移動通信システム）に向けて，高速・大容量，高信頼・低遅延等の基本性能の進化，非陸上を含めたカバレッジ拡張等の技術領域の検討が始動しています．本稿では，それらの実現に資する新たな先端無線技術としてNTT未来ねっと研究所で研究開発を推進しているOAM（Orbital Angular Momentum）無線多重伝送技術，海中音響通信技術，無線ネットワーク品質予測技術について紹介します．

増野（ましの）　淳（じゅん）　藤野（ふじの）　洋輔（ようすけ）
工藤（くどう）　理一（りいち）
NTT未来ねっと研究所

はじめに

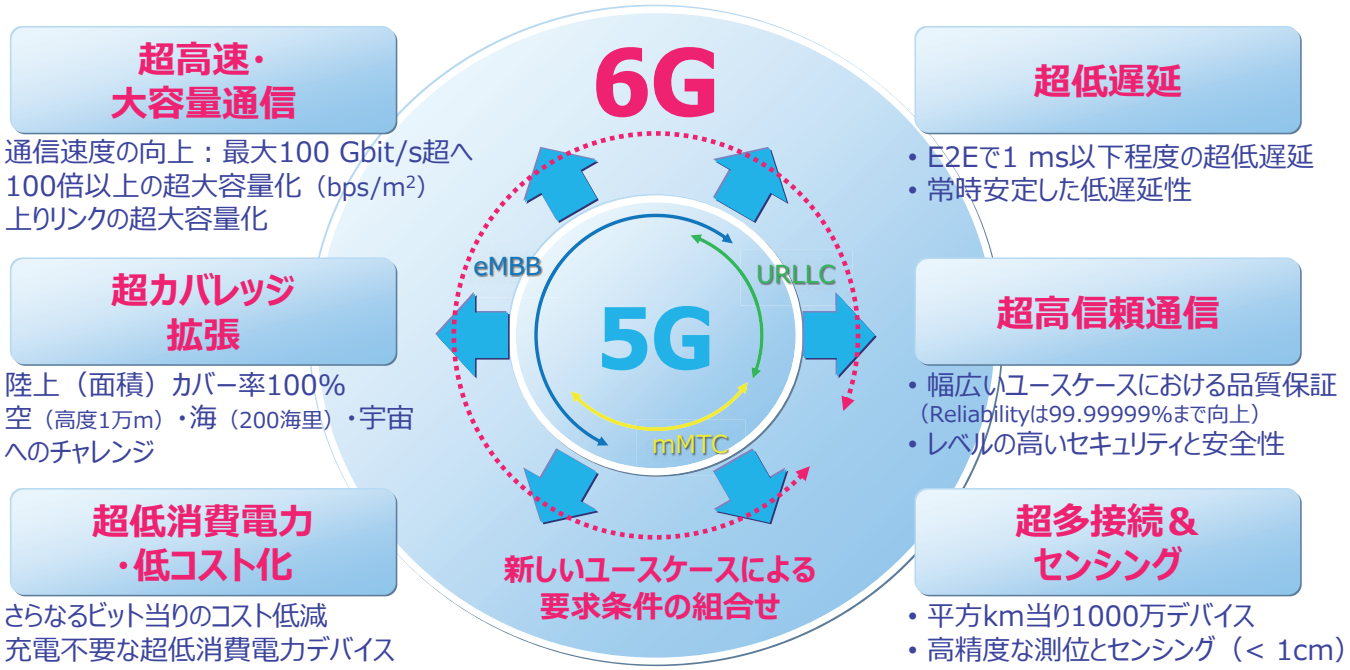
携帯電話を中心に私たちの生活に欠かせない存在となった移動通信システムは，およそ10年に一度の周期で世代交代がなされてきました．日本では2020年に5G（第5世代移動通信システム）のサービスが開始され，5Gの高度化，さらには2030年代の実現をめざした6G（第6世代移動通信システム）に向けた技術検討・研究が世界各国で始動しています．移動通信システムがめざす世界観としては，3G・4GがWebサイト表示，動画コンテンツ，アプリの充実といったモバイルマルチメディアの機能の実現が主であったのに対し，5G・6Gはそれらの進化に加えて，社会課題を解決し，多様な産業を支える社会インフラとしての役割まで期待されている点が大きな特徴といえるでしょう．

5Gの高度化ならびに6Gにより期待されるさまざまなユースケース，目標性能，技術要素などは6Gホワイトペーパー[(1)]に掲げられており，NTTグループが主導するIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）の革新的なネットワークや情報処理技術と移動通信システムが有機的に融合したコンセプトが記述されています．6Gの技術発展領域は，超高速・大容量通信，超低遅延・超高信頼通信，超多接続等，基本性能の進化にとどまらず，空・海・宇宙など移動通信システムとして未踏領域への超カバレッジ拡張の実現等の新たなチャレンジも含まれています（**図1**）．本稿では，6G実現に向けた新たな先端無線技術としてNTT未来ねっと研究所（未来研）で研究を推進している3つの技術，「OAM-MIMO無線多重伝送技術」「海中音響通信技術」「無線ネットワーク品質予測技術」について紹介します．

テラビット級無線伝送を実現するOAM-MIMO無線多重伝送技術

5Gでは移動通信向けとして初めてとなるミリ波帯と呼ばれる高周波数帯の導入により，広帯域化による高速伝送の恩恵がもたらされ，今後の高度化により最終的には20 Gbit/sの無線アクセス実現が目標とされています．6Gではさらなる広帯域化をめざしてサブテラヘルツ波の領域まで踏み込んだ高周波数帯の周波数資源の開拓が検討されており，無線アクセスの目標伝送速度は100 Gbit/sに達すると予測されています．一方，これらの高周波数帯では，電波の直進性の高さ・遮蔽によるカバレッジホール等の問題から，従来よりも高密度に基地局アンテナを配置する必要があり，基地局設備間を光伝送で接続するxHaul*には，柔軟かつ導入の容易なネットワーク構成が求められることになります．xHaulを大容量無線で実現することができれば，光配線が困難な環境での基地局設備の高密度設置，導入が容易という特徴を活かした臨時の基地局設備の増強などが実現できることになります．ここで，前述のとおり6G無線アクセスでは100 Gbit/s級への進化が見込ま

＊ xHaul：基地局設備間を接続するフロントホール，ミッドホール，バックホール等の伝送ネットワークの総称．



＜ドコモ6Gホワイトペーパーより引用＞

図1　6Gでめざす無線ネットワーク技術への要求条件

れることから，基地局設備間の機能分担，さらには複数設備の従属接続等を考慮すると，無線xHaulには1 Tbit/s級（テラビット級）の極めて高い無線伝送能力が求められます（**図2**）．

未来研では，電波の軌道角運動量（OAM: Orbital Angular Momentum）の性質に着目した空間多重伝送技術として，OAM-MIMO無線多重伝送技術の研究開発を推進してきました[(2)]．OAMの性質を持つ電波は，電波の進行方向の垂直平面上で位相が回転しながら進行するように表され，同一位相の軌跡が進行方向に対して螺旋形状に表れます．位相の回転数が整数倍の関係にあるOAMモードの電波は互いに直交しており，すなわち，送信時と同じ位相の回転数を持った受信機を使うことで，複数のOAMモードの同時送受信（空間多重）が可能になります（**図3**）．

NTTが独自に考案したOAM-MIMO無線多重伝送では，OAMモードの送受信のためのアンテナ構成として，現実的な実装を考慮して円環状にアンテナ素子を配置したUCA（Uniform Circular Array）を採用しています．半径の異なる各UCAをサブアレーアンテナとみなして複数セットのOAM多重信号をMIMO多重伝送することで，電力の空間拡がりの問題のある高次のOAMモードの利用を避けながら，大きな空間多重数の実現をねらう思想となっています．また，OAM多重はアナログ信号処理，MIMO多重はデジタル信号処理と，信号処理を機能分担することで，広帯域化で問題となるデジタル信号処理の負荷を軽減し，省電力化に貢献できる構成である

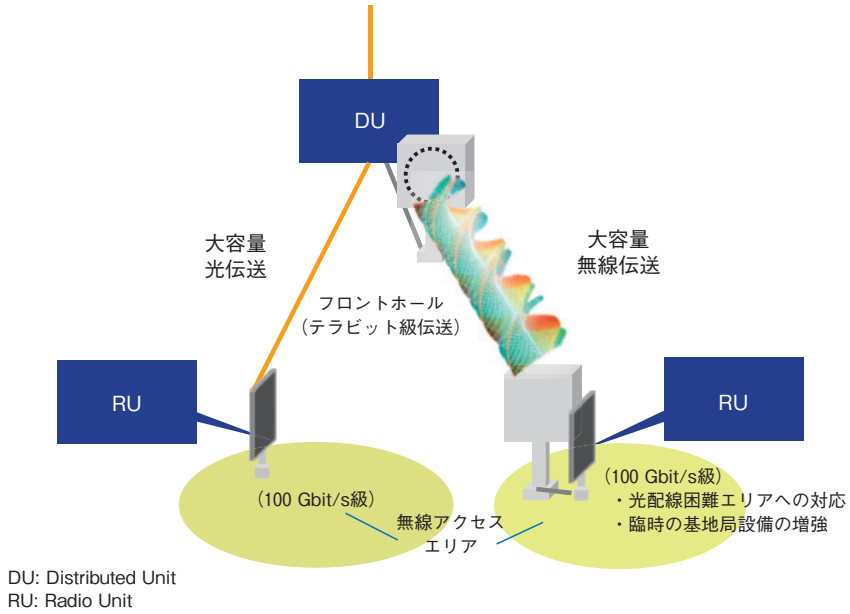


図2　基地局設備におけるxHaulの例

ことも1つの特徴です．xHaulで想定されるPoint-to-Pointの見通し伝送環境は，一般的には空間多重数を稼ぎにくいとされますが，28 GHz帯においてOAM-MIMO送受信装置を用いて空間多重数の限界に挑み，屋内実験において**図4**に示すように偏波を併用した21空間多重に成功，201.5 Gbit/sの大容量無線伝送を実現できることを実証しています[(2)]．また，40 GHz帯ではOAM-MIMOの長距離伝送の実証に挑戦し，屋外実験環境において200 mの伝送距離で117 Gbit/sを達成しました[(3)]．将来的には10 GHz程度までの帯域幅の拡張と，さらなるOAM-MIMOの進化による20～40程度の空間多重を組み合わせることで，テラビット級の大容量無線伝送を達成できる見込みで，6G時代に求められる大容量無線xHaulの実現に向けた技術確立をめざしていきます．

海中までカバレッジを拡張する海中音響通信技術

近年，石油・ガス田などの海底資源開発が活発に行われており，その探査，開発，生産に遠隔操作可能な無人探査船が用いられています．また，港湾工事においても作業の安全性，効率性の観点から海中重機等の無人遠隔施工の研究が行われています．海中では光学映像や音響映像を伝送可能なMbit/s級の無線通信技術が実用化されていないため，これらの海中で利用される機器は海上の支援船と有線ケーブルで接続し，遠隔操作を行っています．しかし，ケーブルを巻き上げるためには大型の支援船，専用の人員を必要とするため運用コストがかかり，ケーブルが潮流によって流されるため作業の効率性，安全性にも課題があります．したがって，より効率的かつ安全な水中機器の遠隔操作を実現するため，高精細な映像伝送を可能にする通信速度1 Mbit/s以上の高速な海中無線通信技術の確立が望まれています．これまでも低周波電磁界，光，音波などさまざまな媒体を用いた海中無線通信が検討されていますが，NTTではこの中でも環境にも依存せずに安定して長距離な通信が可能な音波を使った海中音響通信に着目し，その高速化技術に取り組んでいます．

海中音響通信に限らず，無線通信ではさまざまな経路を通ってきた波が受信側で干渉することで波形歪みが生じるため，通信を成立させるためには波形の歪み方（送受信アンテナ間の位相・振幅応答）を推定し，その逆特性で補償する波形等化が不可欠です．しかし，海中音響通信では伝搬速度が桁違いに遅いことから，陸上無線通信に比べて伝搬路が非常に高速に変動します．そのため，一般的な陸上無線通信で用いられている波形等化を適用することができず，海中の高速な伝搬路変動で生じる波形歪みを補償できなかっ

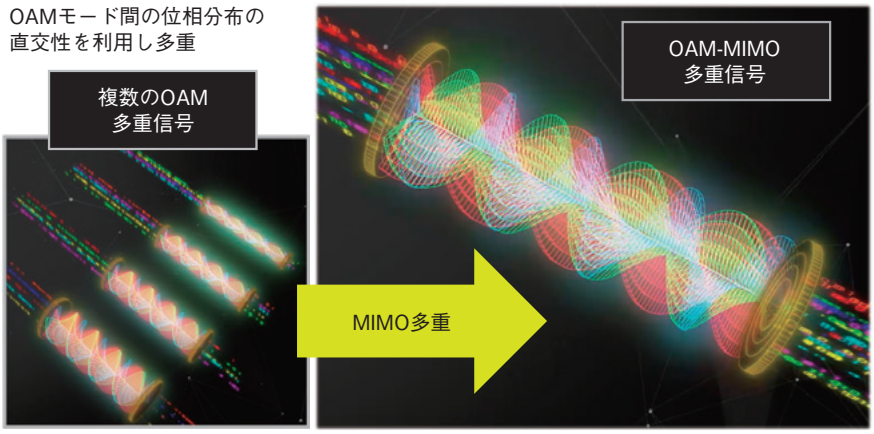


図3　OAM-MIMO無線空間多重伝送の概念

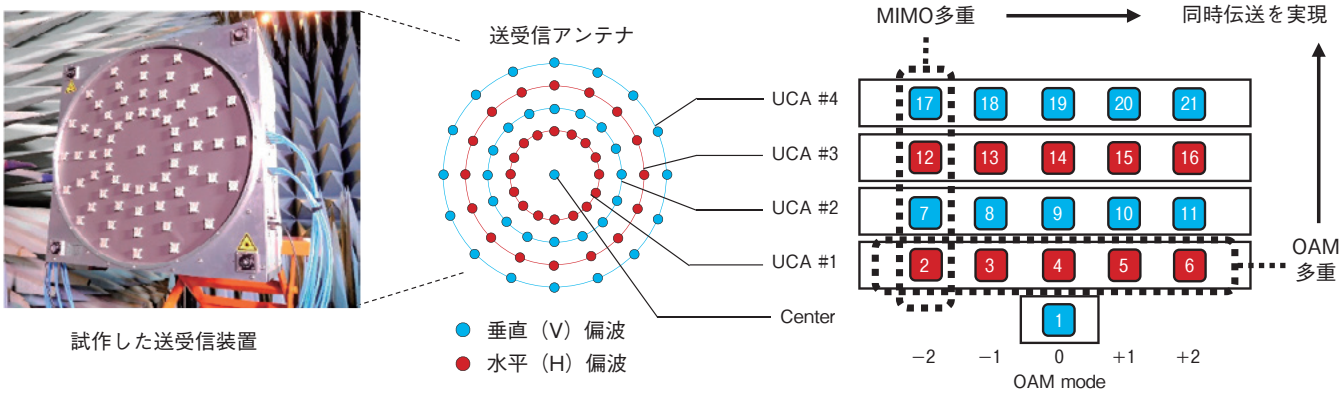


図4　送受信アンテナと21空間レイヤの割り当て

たため，実海域での利用に耐える海中音響通信システムの通信速度は数10 kbit/s 程度にとどまっていました[4]．

NTTでは，このような海中音響通信の高速化を妨げる高速な伝搬路変動を克服するため，時空間等化という新たな波形等化アプローチを提案しています[5]．本技術は，受信側のビーム制御により，波形歪みを引き起こす根本原因である遅延波を空間的に除去することで波形等化を行います．これにより波形の歪み方を推定することなく波形等化が可能であるため，これまで困難とされてきたMbit/s級の高速な音響通信が可能となります．

NTTでは，本技術の有効性を確認するため実海域での伝送実験を実施し，距離18 mで5.12 Mbit/s，距離60 mで1.2 Mbit/sの伝送に成功しています[6]．現在，異なる共振周波数を持つ送波器を用いて広帯域信号を高効率に送信する帯域分割送信技術を組み合わせ，距離300 mで1 Mbit/s以上の伝送速度の達成に向けた検討を行っています（**図5**）．

フィジカル空間情報を用いた無線ネットワーク品質予測技術

6G時代には，日本のめざすべき未来社会の姿として提唱されているSociety 5.0[7]の実現に向けた取り組みが加速し，センサ・カメラからの情報など，膨大なフィジカル空間情報がサイバー空間に蓄積され，利用が進むと考えられます．未来研では，フィジカル空間情報を用いて，無線通信システムにさらなる進化をもたらすための基礎検討を進めています[8]，[9]．これまで無線通信システムは，無線通信システムにおいて得られる電波伝搬に関する情報を高度に利用し，高速・大容量化してきましたが，昨今の無線通信システムへの要求条件は多様化・高度化しており，ベストエフォート型の通信だけでなく高信頼通信への期待も高まっています．フィジカル空間情報を利用することで，無線通信システムにおいて得られる情報で予測することが困難だった，通信機器や周辺の物体の長周期の動きをとらえることができます．より遠くの未来が予測できることで，さまざまなプロアクティブな制御が可能となり，新たな無線通信の役割を構築できると考えています．

研究開発を進めている技術の例として，カメラから取得される無線通信機器を有するモビリティロボットの映像を用い，モビリティロボットの未来の動きを予測することで数秒後の無線通信品質を予測する技術を**図6**に示します．図6で示すカメラから得られる映像を取得し（Step1），あらかじめ外観を学習したオブジェクト認識モデルにより，通信に係る端末の位置や動きからなるオブジェクト情報を抽出（Step2），最後にオブジェクト情報から，将来の無線通信品質を予測する構成となります（Step3）．また，将来的にIOWNに接続される多数のカメ

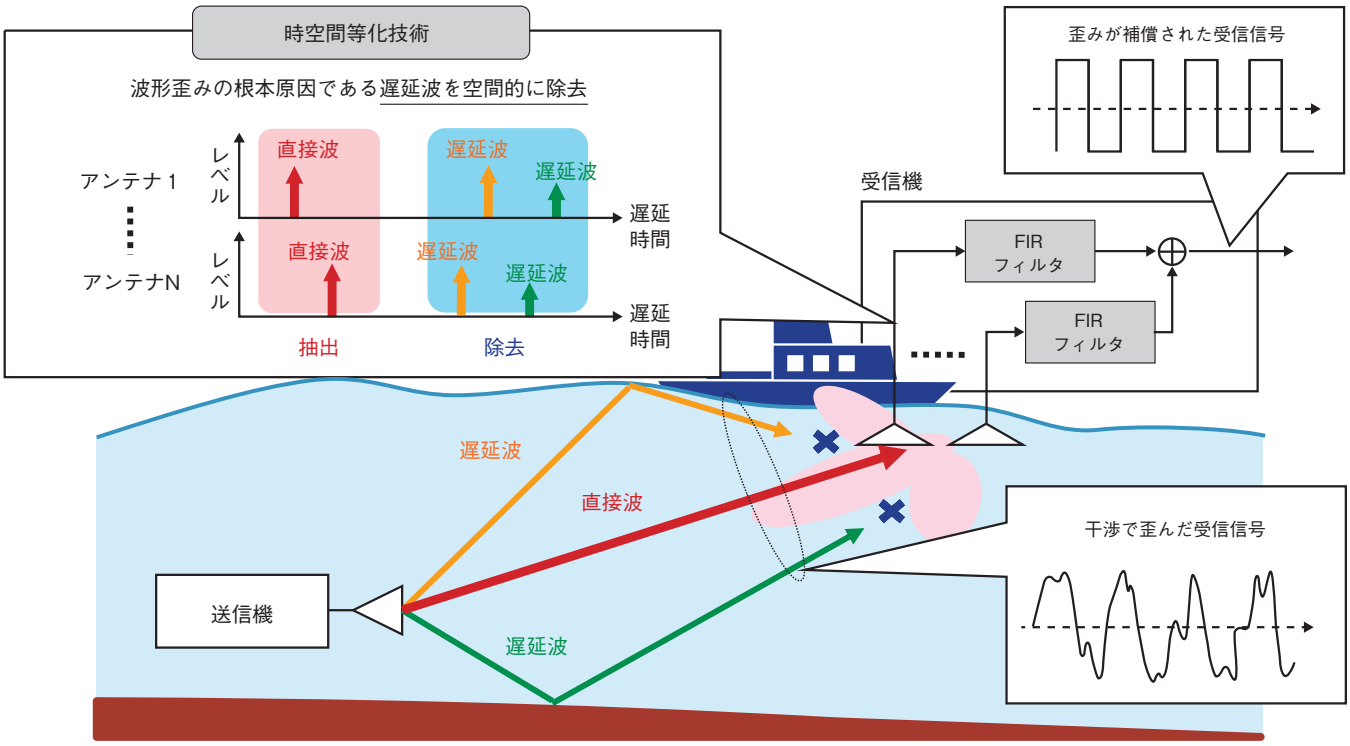


図5　時空間等化技術の動作イメージ

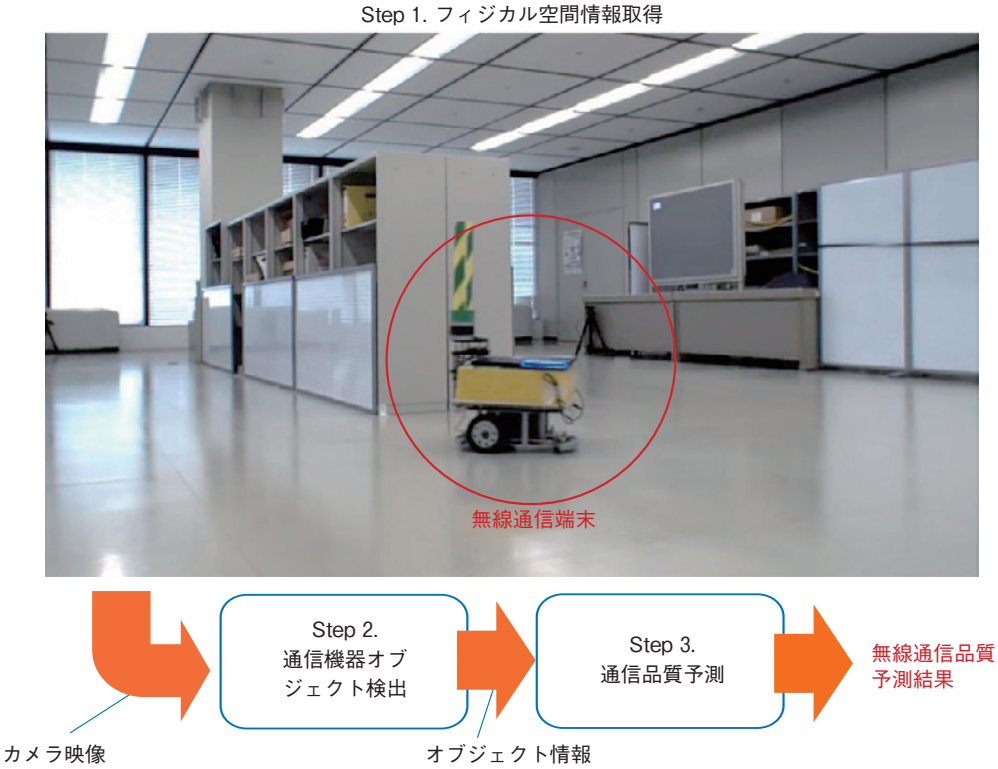


図 6　カメラ映像による無線通信品質予測

ラ・センサにより無線通信品質の長期予測を行う場合に，カメラ・センサの追加や故障の検知も同時に行える予測モデルの構築方法の検討を進めているほか，屋内において膨大な実証実験データを自動で収集するAI（人工知能）検討用実験環境の構築も進めています．各端末の無線通信品質が，今後どのように変化していくのか，短期から長期までの未来を予測・推定することができれば，無線通信品質の低下や回線切断を未然に検知し，より良い品質のネットワークの切り替えや併用，映像などアプリケーションの伝送レートの変更，無線通信端末の経路変更や運行ルール変更，などのさまざまなプロアクティブな制御が可能となり，高信頼な無線通信利用の可能性が広がるものと考えています．

■参考文献

(1) https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper_6g/
(2) Y. Yagi, H. Sasaki, T. Yamada, and D. Lee：“200 Gbit/s Wireless Transmission Using Dual-polarized OAM-MIMO Multiplexing on 28 GHz Band,” Proc. of IEEE GC Wkshps on HCPtP, Waikoloa, U.S.A., Dec. 2019.
(3) Y. Yagi, H. Sasaki, T. Semoto, T. Kageyama, T. Yamada, J. Mashino, and D. Lee：“Field Experiment of 117 Gbit/s Wireless Transmission Using OAM Multiplexing at a Distance of 200 m on a 40 GHz Band,” Proc. of IEEE ICC Workshop on OAMT, Montreal, Canada, June 2021.
(4) S. Sendra, J. Lloret, J. M. Jimenez, and L. Parra：“Underwater acoustic modems,” IEEE Sensors Journal, Vol. 16, No. 11, pp. 4063–4071, June 2016.
(5) 藤野・福本：“水中音響通信の高速化に向けた時空間等化技術，” 信学通誌，Vol.15, No.4, pp. 284-297, 2022.
(6) H. Fukumoto, Y. Fujino, M. Nakano, K. Sakamoto, and T. Tsubaki：“Field Experiments Demonstrating Mbps-Class Underwater Acoustic Communication with Spatio-Temporal Equalization,” Proc. IEEE Global OCEANS2020, Biloxi, U.S.A., Oct. 2020.
(7) https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/
(8) R. Kudo, M. Cochrane, K. Takahashi, T. Inoue, and K. Mizuno：“Experimental Validation of Link Quality Prediction Using Exact Self-Status of Mobility Robots in Wireless LAN Systems,” IEICE Trans. on Commun., Vol. E103-B, No. 12, pp. 1385-1393, July 2020.
(9) R. Kudo, K. Takahashi, T. Inoue, and K. Mizuno：“Using vision-based object detection for link quality prediction in 5.6-GHz channel,” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Oct. 2020.

（左から）増野　淳／藤野 洋輔／工藤 理一

次世代の社会インフラとして期待される6G実現に向け，先端無線技術の検討，実証を進めていきます．

◆問い合わせ先
NTT未来ねっと研究所
波動伝搬研究部
TEL　046-859-4285
FAX　046-859-3351
E-mail　jun.mashino.uf@hco.ntt.co.jp

特集

NTTとトヨタでつくる コネクティッドカー向け ICT基盤の取り組み

NTTグループとトヨタ自動車は,コネクティッドカー向けICT基盤の技術開発に取り組んでいる.
2018年から2020年にかけて共同実証実験を実施し,
さまざまなユースケースおよび基盤検証を通じて基盤技術を確立した.
本特集では，協業に参画したNTTグループの事業会社，NTT研究所より,実証実験の取り組み内容やその成果,
および適用技術，提供価値，今後の課題等について紹介する.

コネクティッドカー

IoT

ビッグデータ

デジタルツイン

データ収集

Connected Cars

コネクティッドカー分野の技術開発・検証の全体概要 28

NTTグループとトヨタ自動車のコネクティッドカー向けICT基盤の研究開発に関する協業における各種取り組み，および全体概要について紹介する.

実証実験の取り組みと成果――基盤関連 31

車載機からCAN（車両制御）データ，画像データ等を収集・蓄積，活用するためのコネクティッドカープラットフォーム全体のリファレンスアーキテクチャを紹介する.

実証実験の取り組みと成果――ネットワークエッジ基盤 35

実証実験により，車両とアプリケーション群の間に複数の機能群を持つネットワークエッジを配置するアーキテクチャを実装し，その有効性について紹介する.

高速時空間データ管理技術(Axispot®) 39

Axispot®のコア技術である，「時空間インデックス技術」「限定的ノード選択技術」「高速ポリゴン検索技術」「時空間データ高速集計技術」について紹介する.

車両データ選択的収集アルゴリズム 44

車両の位置や進行方位，カメラ画角といったメタ情報に基づいて各車載カメラの撮影範囲を推定し，必要な画像のみを選択的に収集する技術について紹介する.

垂直分散コンピューティング技術 48

「アプリ垂直分散アーキテクチャ」と「処理ノード動的選択技術」が解いた課題とその解決方法，および実証実験における検証結果について紹介する.

レーン別渋滞検知技術 53

コネクティッドカーの収集可能な情報から，レーン単位の渋滞車列を検知する技術について紹介する.

集計突発指標算出技術 57

集計突発指標算出技術の概要や提供価値，今後の課題等を実証実験でのユースケース検証について紹介する.

コネクティッドカー分野の技術開発・検証の全体概要

コネクティッド・自動化・シェアリング・電動化といった技術革新によって自動車業界が大きく変化する中，ITや通信技術に対する期待や重要性が急速に高まっています．NTTグループとトヨタ自動車は，コネクティッドカー向けICT基盤の研究開発に関する協業において，2018年から2020年にかけて共同実証実験を実施し，さまざまなユースケースおよび基盤検証を通じて，基盤技術を確立しました．本特集では，協業に参画したNTTグループの事業会社やNTT研究所より，実証実験の取り組み内容やその成果，適用技術，提供価値，今後の課題等について紹介します．

小泉（こいずみ）　敦（あつし）　三橋（みつはし）　慎（しん）
NTT研究企画部門

コネクティッドカーの概要

通信機能を装備したクルマである“コネクティッドカー”は，車両や通信ネットワーク（有線・無線），クラウドなど，さまざまな構成要素で成立しています（**図1**）．これらの仕組みを実現するためには，データをやり取りするネットワークや近接で処理するエッジコンピューティング，収集したデータを蓄積・処理し，データ分析・活用するための基盤，ソフトウェアアップデートなど，幅広い技術を開発・活用し，組み合わせる必要があります．

さらに，今後はビッグデータの活用可能性が拡がるとともに，データ量が大幅に増加していくことが予見されます．つまり，コネクティッドカーからデータを受ける，ネットワークやデータセンタといったICT基盤がより重要性を増しているのです．

車両ビッグデータの可能性

コネクティッドカーはすでに市場へ投入されており，今後，より一層の市場拡大が予想されます．コネクティッドカーが持つ大量のデータを素早く・大量に・廉価に処理することができれば，既存センサではとらえられない情報の活用や，より迅速で確実なサービスの実現によって，利便性や効率性が向上するだけではなく，ドライバーの安心・安全な運転の実現やカーボンニュートラルに向けた渋滞緩和・解消や移動時間の短縮などが期待できます（**図2**）．

図1　コネクティッドカーの概要

共同研究開発の目的と領域

NTTグループとトヨタ自動車は，2017年3月にトヨタが保有する「自動車に関する技術」とNTTグループ各社が保有する「ICTに関する技術」を組み合わせて，コネクティッドカー分野での技術開発・技術検証およびそれらの標準化を目的に協業を行うことに合意しました．

各社が持つ技術やノウハウを共有し，クルマから得られるビッグデータを活用することによって，事故や渋滞といった社会が直面しているさまざまな課題の解決や，お客さまへの新たな

モビリティサービスの提供に必要となる技術の研究開発に共に取り組むことで，将来の持続可能なスマートモビリティ社会の実現をグローバルな視点を持ってめざすべく，協業活動を開始しました．

技術領域は大別すると３つあります．

① データ収集・蓄積・分析基盤：数100万台～数1000万台の車両から送られるデータを格納し，分析する仕組みの構築

② IoTネットワーク・データセンタ：世界中の車両のデータを収集するためのネットワークとデータセンタの最適配置の確立

③ 次世代通信技術：5G（第５世代移動通信システム）の自動車利用の技術検証，エッジコンピューティング技術の適用性の検証

2018年12月より，大量の車両からのデータおよび外部からのデータを処理して，外界実空間を秒単位のリアルタイム性や数10 cm単位の精度で再現することを目標に設定し，クルマ～ネットワーク～データセンタを含めたEnd-to-Endでの実証実験に取り組みました．

コネクティッドカー向けICT基盤

コネクティッドカー向けICT基盤とは，通信機能を装備したクルマとエッジコンピューティングおよびクラウド間 を5G/LTE と IoT（Internet of Things）ネットワークで接続し，コンピューティングリソースを用いて，クルマが保有するもしくは収集するデータを収集・蓄積・分析する基盤です（**図３**）．

コネクティッドカーのデータは，モバイル網，エッジを通じてデータセンタへアップロードされます．その後，データセンタでは収集・蓄積の処理を行い，必要に応じて分析した結果についてネットワークを通じてクルマに返します．このようなデータの流れ自体は，スマートフォンや小さなIoT機器と大差はありませんが，これらを高速・大規模かつ正確に処理する仕組みは，人々の暮らしや社会全体を支える重要な基盤の１つになり得ると考えます．

図２　車両データの提供価値

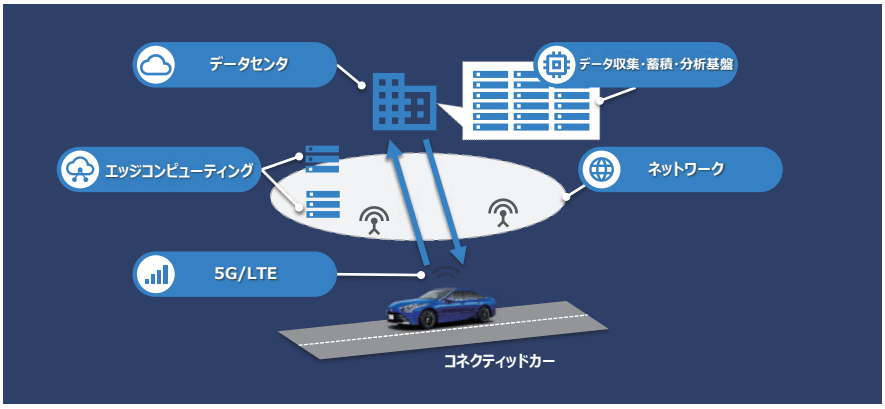


図３　コネクティッドカー向けICT基盤の全体像

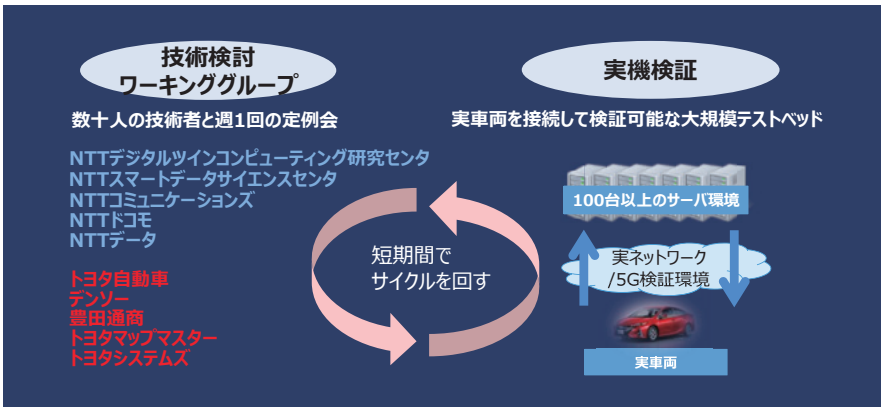


図４　共同研究開発の進め方

共同研究開発の進め方

共同での研究開発は，技術検討を進めるワーキンググループと検討結果を検証する実機検証の２つの活動を交互に実施しました（**図４**）．

ワーキンググループでは，複数のテーマを並行して各社の技術者間で議論し，週１回の定例会を通じて技術検討を進める一方，実機検証では，100台以上の物理サーバと5G含めた通信回線，実車両というテストベッドを用いて技術検証を進め，その結果をワーキ

ンググループへフィードバックし，そのサイクルを短期間で回すという進め方です．各社が保有する技術や知見・ノウハウを持ち寄ってサイクルを回すことにより，双方が共に成長を重ねながら，さまざまな技術課題を早期に解決できたと自負しています．

コネクティッドカー協業における取り組み

本特集では，2018～2020年度に実施したコネクティッドカーICT基盤の実証実験について，中心的役割を担ったNTTデータとNTTコミュニケーションズから全体像や詳細な取り組み内容を説明するとともに，得られた技術成果や実績，今後の課題等について紹介します．

① 実証実験の取り組みと成果
基盤関連：アーキテクチャ全体やユースケース検証や基盤検証の概要，検証結果等[2]

② 実証実験の取り組みと成果
ネットワークエッジ基盤：ネットワークやエッジコンピューティング基盤の概要や特徴，方式等[3]

また，コネクティッドカー向けICT基盤にはさまざまな技術課題が存在します．今回の特集では，それらの課題解決のために研究開発に取り組んできた代表的な技術について，実証実験でのユースケース検証の実例を交えて，技術概要や提供価値，今後の課題等を紹介します．

③ 高速時空間データ管理技術（Axispot®）：大量の動的オブジェクトのデータをリアルタイムに蓄積・検索・分析する高速時空間データ管理技術[4]

④ 車両データ選択的収集アルゴリズム：位置情報や時刻情報，観測範囲，周辺車両による遮蔽状況といったメタ情報に基づき，データ収集の優先順位を判断する技術[5]

⑤ 垂直分散コンピューティング技術：車両の状態に応じて，応答処理を実行するサーバを動的に変更することで，限られたサーバリソースの有効利用を実現する技術[6]

⑥ レーン別渋滞検知技術：最適な走行レーンのナビゲーションを実現するため，ドライブレコーダーの映像や走行データを収集・分析してレーン単位の渋滞車列を検知する技術[7]

⑦ 集計突発指標算出技術：ICT基盤における処理量を削減するため，車両から収集した集計値の周期性・突発性について，定常状態からの乖離度合いを基に指標化する技術[8]

成果と今後の展開

このたび3年にわたる実証実験の成果や課題を「コネクティッドカー向けICT基盤に関する技術資料」に取りまとめて公開しました[9]．私たちの活動成果を，ICTやモビリティの業界関係者はもとより，他業界の方々にも幅広く参考にしていただきたいと考えます．

今後もNTTグループとトヨタ自動車は，さらなるコネクティッドカーの普及に備えて，コネクティッドカー向けICT基盤の高速化・効率化・精緻化に取り組むとともに，クルマから得られるビッグデータの有効活用・付加価値向上に向けて，事故や渋滞といった社会が直面しているさまざまな課題の解決に資する技術開発を継続して推進します．

加えて，得られた技術成果は，コネクティッドカー向けICT基盤の社会実装はもとより，スマートシティ分野への技術展開などを検討していきます．将来的には，これまでのインフラの限界を超えた高速大容量通信ならびに膨大な計算リソースを提供可能な技術開発や，さまざまな企業・団体やサービスと連携を図り，新たなモビリティサービスの創出・提供につなげて，カーボンニュートラルへの貢献と安心・安全をもたらす持続可能なスマートモビリティ社会の実現をめざします．

■参考文献

(1) https://group.ntt/jp/newsrelease/2017/03/27/170327a.html
(2) 千葉：“実証実験の取り組みと成果――基盤関連，” NTT技術ジャーナル，Vol.34，No.5，pp.31-34，2022.
(3) 野地・亀井・船引・村田・金丸：“実証実験の取り組みと成果――ネットワークエッジ基盤，” NTT技術ジャーナル，Vol.34，No.5，pp.35-38，2022.
(4) 磯村・重松・上野・沖・荒川：“高速時空間データ管理技術（Axispot®），” NTT技術ジャーナル，Vol.34，No.5，pp.39-43，2022.
(5) 高木・松尾・中田・森：“車両データ選択的収集アルゴリズム，” NTT技術ジャーナル，Vol.34，No.5，pp.44-47，2022.
(6) 松尾・高木・中田・森：“垂直分散コンピューティング技術，” NTT技術ジャーナル，Vol.34，No.5，pp.48-52，2022.
(7) 森・横畑・林・秦・神谷：“レーン別渋滞検知技術，” NTT技術ジャーナル，Vol.34，No.5，pp.53-56，2022.
(8) 林・横畑・秦・森・神谷：“集計突発指標算出技術，” NTT技術ジャーナル，Vol.34，No.5，pp.57-60，2022.
(9) https://group.ntt/jp/topics/2021/11/29/techdoc_rel_ntt_toyota.html

（左から）小泉　敦／ 三橋　慎

来るべき自動運転時代の安心と安全をもたらす持続可能なスマートモビリティ社会の実現に向けて，トヨタとNTTグループが取り組んでいるコネクティッドカー協業の活動成果や確立した基盤技術をご覧ください．

◆問い合わせ先
NTT 研究企画部門
プロデュース担当
TEL　03-6838-5370
E-mail　contact_mobilityp @ ntt.com

実証実験の取り組みと成果――基盤関連

NTTグループとトヨタ自動車はコネクティッドカー向けICT基盤の研究開発に関する協業において，2018年から2020年にかけて共同実証実験を実施し，さまざまなユースケースおよび基盤検証を通じて，基盤技術を確立しました．本稿では，車載機からCAN（車両制御）データ，画像データ等を収集・蓄積，活用するためのコネクティッドカープラットフォーム全体のリファレンスアーキテクチャ，およびその実装と実証実験を通じて抽出した技術成果・課題の概略を紹介します．

千葉（ちば）　祐（ゆう）
NTTデータ

コネクティッドカーの特徴とその技術課題

コネクティッドカーから得られるCANデータ，センサデータ，画像データなど各種データの量は，コネクティッドカーの台数の急速な増大に合わせて膨大なものとなっており，それらデータを効率的に，かつ高速に処理することが大規模コネクティッドカープラットフォームの将来的な活用に対しての大きな技術課題となっています．加えて，コネクティッドカーが独自の特徴である「モバイル網を使った通信が必要であること」「高速に移動するデバイスであること」「車のライフサイクルが長いこと」「扱うデータ量が1日の中でも時間によって大きく変動すること」などにより，大規模コネクティッドカーデータをさまざまなユースケースで活用するためには，複雑かつ多くの技術課題が存在します．本検証では，その中でも，特に重要な要素技術となる，大規模データ量処理，大量データのリアルタイム処理，データ処理の精度の3つの視点で達成目標を設定し，コネクティッドカーや自動運転技術に期待されるさまざまなユースケースを実現するコネクティッドカープラットフォームの実現に取り組みました（**図1**）．詳細につきましては後述します．

実証実験でのターゲットユースケース

本取り組みでは，2018年から2020年までの3年間，試験車両を活用した公道の実証実験を実施しています．主な目的は将来的に数100万台のコネクティッドカーがつながる大規模プラットフォームの技術確立と性能評価にあります．それらを評価するための実際に実現が期待される3つのユースケースをサンプルに技術検証を実施しました（**図2**）．

① 静的地図生成：コネクティッドカーから収集した車両の位置データ，動画データを，センタ側で分析し，自動運転技術等に必要とされる高精度な静的地図を生成

② 障害物検知・後続車への通知：

検証分類		技術開発テーマ	目標値
ユースケース	アーキテクチャ	コネクティッドカーのデータをセンタ側に収集，処理し，再度配信するエンド・ツー・エンドアーキテクチャ	系として動作
基盤	接続車両数（データ量）	大量の車両・画像データを同時に収集，蓄積できるスケーラブルな分散処理技術	3000万台
基盤	リアルタイム性	高速に移動する車両の位置情報などをリアルタイムに収集・蓄積・配信する基盤技術	7秒
基盤	精度	画像データに基づき，車両や標識，信号機などの位置を高精度で推定する技術	10 cm

図1　技術テーマと目標設定

コネクティッドカーの車載カメラの画像データを活用し，車道に存在する落石などの危険な障害物を検知，センタ側で管理し，後続車両に通知

③　レーンレベル渋滞検知：CANデータの統計情報を活用，および動画データのリアルタイム活用により，定常渋滞と突発渋滞を検知して，突発渋滞の先頭地点の画像を分析することで渋滞原因を特定

本検証では，これら3つのユースケースの実現性を，実証実験をとおして評価するとともに，大規模コネクティッドプラットフォームに必要な要素技術の中で，特に目標設定したデータ処理量，リアルタイム性，精度の3つの視点で検証・評価を実施しました．

コネクティッドプラットフォームのリファレンスアーキテクチャ

コネクティッドカーから無線網〔4G（第4世代移動通信システム）/5G（第5世代移動通信システム）網〕を介してデータ処理用のサーバを集約するセンタにデータを収集・蓄積し，それらデータを分析，必要なデータを再度コネクティッドカーに送信するというエンド・ツー・エンドでのシステムアーキテクチャをリファレンスモデルの確立に取り組みました．本リファレンスアーキテクチャは，コネクティッドカーとつながる「ネットワークエッジ基盤」，そこからデータを受信する「受信・アノテーション基盤」，データ処理を行う「CANデータ処理基盤」と「画像データ処理基盤」，データ管理を行う「ダイナミックマップ基盤」，そして，センタから，コネクティッドカー側への通信を管理する「配信・通知基盤」の処理ブロックで構成しています．

それぞれの基盤の実装では，すでにグローバルマーケットでデファクトスタンダードとなっている，オープンソースのソフトウェアを活用しています．本協業では，特定企業のソフトウェアに依存することなく，よりオープンな技術を中心にして技術確立するという方針で活動しており，技術の標準化につながる技術開発を目標としています．そのため，これらのソフトウェアは，今後の技術の進歩や，技術革新によって，見直しができるような構成としています（**図3**）．

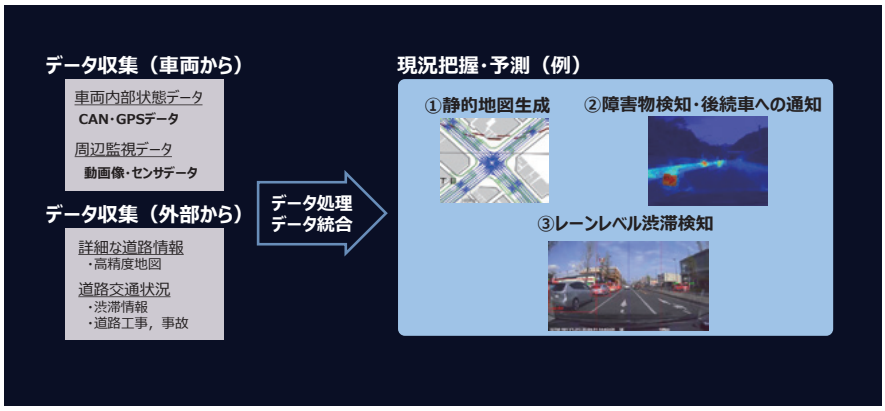


図2　サンプルユースケース

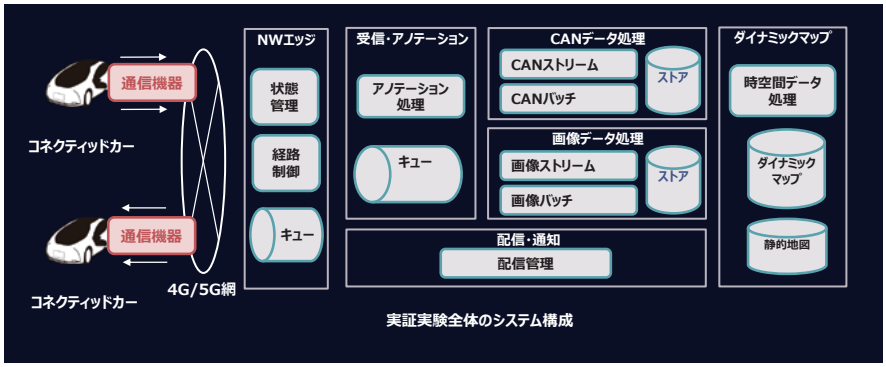


図3　リファレンスアーキテクチャ

ユースケース検証の実施概要

前述のリファレンスアーキテクチャに基づき実装した実証実験用のサーバ環境をセンタ側で構築し，試験車両を活用して3つのユースケースの実現性検証を実施しました．

⑴　静的地図生成

本ユースケース検証では，まずセンタ側にいるオペレータが地図生成の指示を出します（**図4**①）．対象エリア（②）を走行中のコネクティッドカーに通知が届く（③）とCANデータ，および画像データがセンタに送信されます（④）．センタ側では，これらデータを活用し，画像からの地図化の処理（⑤），画像から信号機などの地物の位置を推定（⑥），地図データを作成し，地図データベースに登録するまでの処理（⑦）をすべて検証しました．

⑵　障害物検知・後続車への通知

本ユースケース検証では，車載カメラの画像と，障害物の学習済みのデータから，画像に映る地物の推論を行います．地物が障害物だった場合は，障害物の位置推定を行い，結果をダイナミックマップデータベースに登録します．このユースケースでの課題は，リアルタイム性です．本ユースケースの

実用化を見据え，障害物を検知し，後続の車両に通知するまで７秒で実現しなければなりません．そこで本検証では，リアルタイム性を高めるため，処理の一部をネットワークエッジにオフロードするアーキテクチャを採用しリアルタイム性を大きく，改善させました．加えて，後続車への危険通知を２段階通知として，１回目の通知は，対象エリアを詳細には絞らず広く通知することで高速性を高め，２回目の通知では，レーンレベルで危険な車両を特定したうえで通知するという方式を導入し，初回通知の高速性を改善させました（**図５**）．

⑶　レーンレベル渋滞検知

本ユースケース検証では，３つのSTEPで渋滞原因の特定を行いました．STEP1では走行中の車両のCANデータをリアルタイム分析し，渋滞の候補となる地点の絞り込みを実施します．メッシュ単位，レーン単位での車両密度を活用して絞り込みを実施しますが，この際，定常的に発生する渋滞については除外しています．これは，定常的に発生する渋滞については事前に原因が推察可能であり，本検証では突発的に発生する渋滞の原因を特定することに焦点を当てているためです．STEP2では，STEP1で絞り込んだ渋滞候補レーンの周辺を走る車両から車両の走行画像を収集し，この画像データを用いて，渋滞の発生有無と，渋滞の発生地点，“渋滞の先頭地点”を算出し，その原因の特定を行います．そして，STEP3で対象となるレーンを走行中の車両に対して，STEP2で得られた渋滞原因に関する情報を通知します（**図６**）．

基盤検証の実施概要

基盤検証では，リファレンスアーキテクチャを基に実装した５つの処理ブロックごとに技術検証を行いました．

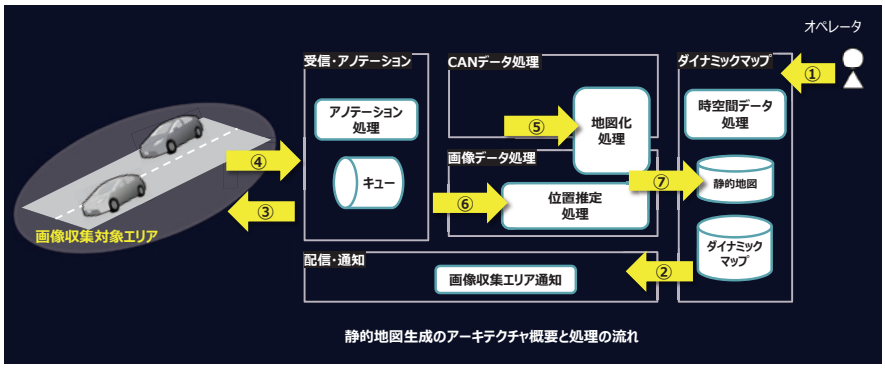


図４　静的地図生成

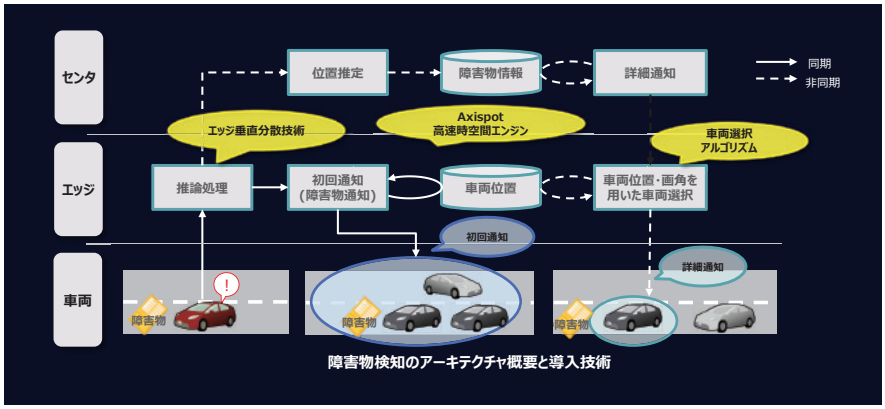


図５　障害物検知・後続車への通知

図６　レーンレベル渋滞検知

⑴　受信アノテーション

受信アノテーション基盤の評価では，CANデータ，および画像データ処理における性能限界の評価として，500万台の車両が，送信間隔10秒未満，最小１秒間隔でデータを送信した場合の，アノテーション処理，キューイング処理の負荷性能，ボトルネックの見極めを実施しました．

⑵　CANデータ処理

CANデータ処理基盤の評価では，リアルタイム性と，スループットの２つの視点での評価を実施しました．リ

アルタイム性の高い処理，例えば定常的な車両の位置情報の格納処理についてはCANストリーム処理として実装して，レスポンスタイムの限界性能を評価しています．

⑶　画像データ処理

画像データ処理基盤の評価では，リアルタイム性とスループットの視点で評価しています．障害物検知のような高速な画像処理が求められるケースは画像ストリーム処理として実装し，限界レスポンスの評価を行いました．

⑷　配信・通知処理

配信・通知基盤の検証では，各ユースケースにおけるボトルネックとなり得る画像収集コストに注視した検証を実施しています．画像データ収集時におけるトラフィック削減として，NTTの保有する「車両データ選択的収集アルゴリズム」を活用していますが，収集データの絞り込みを行った際の性能評価を実施しています．

なお，ネットワークエッジ基盤については，本特集記事『実証実験の取り組みと成果――ネットワークエッジ基盤』[1]にて説明します．

抽出課題と今後の取り組み

本検証では，リファレンスアーキテクチャの検証をするため３つのサンプルユースケースついて，公道での試験車走行を通じて技術検証を行いました．特にプラットフォーム技術の視点では，データ量，リアルタイム性，精度の３つの視点で目標設置をし，２つを達成できました（**図７**）．データ量としては，シミュレーションデータを活用し，3000万台規模のデータ処理基盤の検証に成功しました．リアルタイム性としては，ネットワークエッジ技術を活用し，障害物検知のユースケースにて平均通知時間５秒（目標７秒以内）を達成しました．ただし，精度については，V-SLAM（Visual - Simultaneous Localization and Mapping）*や，ランドマークの位置情報の活用，IMU（Inertial Measurement Unit：慣性計測装置）等を用い，精度向上に取り組みましたが，依然，目標とした10 cm精度を達成することはできておらず，今後の技術開発への継続課題となります．

本検証では，精度の視点を除き当初の目標を達成することができましたが，それと同時に多くの技術課題を抽出することができました．特に動画データを含めた大量のデータの収集・蓄積・活用には，ネットワークやサーバリソースに大きな負荷がかかります．今後，これらの技術が社会実装されるためには，機能面での実現性だけではなく，より効率的に低コストで実現する技術が必要となるため，本協業においてもすでに進めているエッジコンピューティングの活用による処理の分散化や，リソースの効率仕様などの技術開発も継続して行っています．また，これら技術の利用用途においても，現在，自動車産業に期待される低炭素社会の実現への貢献など社会課題解決につながるケースへ拡充して検討を継続していきます．

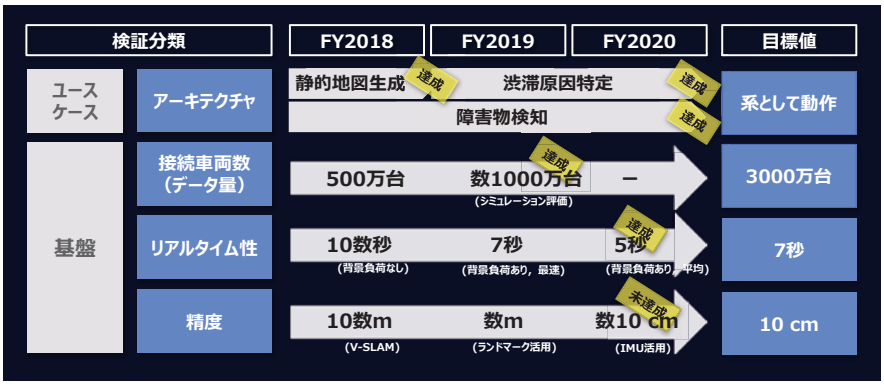


図７　取り組み成果

■参考文献

⑴　野地・亀井・船引・村田・金丸：“実証実験の取り組みと成果――ネットワークエッジ基盤，” NTT技術ジャーナル，Vol.34, No.5，pp.35-38，2022.

千葉　祐

自動車産業は日本における重要産業であり，トヨタ自動車と一緒にコネクティッドカー社会の実現に向けた共同研究を進めることは大きなモチベーションとなっています．

◆問い合わせ先

NTTデータ
製造ITイノベーション事業本部
第五製造事業部
TEL　050-5546-7982
E-mail　Yu.Chiba＠nttdata.com

＊ V-SLAM：周囲の三次元情報から自己位置推定と環境地図作成を同時に行う技術．

実証実験の取り組みと成果 ――ネットワークエッジ基盤

NTTグループとトヨタ自動車は，各社が持つ技術やノウハウを共有し，2018年より3年にわたって実証実験を行ってきました．実験では，エッジを使った分散処理により系全体の効率化と処理速度高速化を実現しましたが，同時に処理拠点が分散することによる新たな課題も生じました．それらの課題を解決するため，エッジ拠点上に，「複数のネットワーク機能を持たせた基盤システム」を含むアーキテクチャを策定し，有効性を実験にて検証しました．

野地（のじ）　亮介（りょうすけ）　亀井（かめい）　貴行（たかゆき）
船引（ふなびき）　魁人（かいと）　村田（むらた）　大輔（だいすけ）
金丸（かねまる）　侑賢（ゆうけん）
NTTコミュニケーションズ

はじめに

トヨタ自動車との協業の実証実験開始当初は車両からのデータは大きなセンタに集めて，センタ内で多数のサーバを並べて分散処理していました．しかし，それでは目標となるスケーラビリティ（3000万台）と処理時間（7秒）を達成することができなかったため，車両とセンタの中間にエッジを配置し，エッジで一部のデータ処理を実施するようにしました．通常エッジというとデバイスそのもの，コネクティッドカーでは車両にあるコンピュートリソースをイメージすることが多いと思いますが，本協業ではセンタ基盤と車両の中間にあり，地理的に分散する拠点上に配置されたコンピュートリソースをエッジと呼び検討しています．

エッジを利用する際には，対応するアプリケーションアーキテクチャの確立だけでなく，ネットワーク技術という観点では，分散する拠点とサーバに対応して，負荷分散を考慮してデータを適切に運んでいくことが課題でした．そのために，車両とアプリケーション群の間に，「複数のネットワーク機能を持たせた基盤システム」を含むアーキテクチャを策定し，課題への有効性を実験にて検証しました．本協業では，この基盤システムを，同じくエッジ拠点上に配置するアプリケーション群とは区別するために，ネットワークエッジと呼んでいます（**図1**）．

ネットワークエッジは，車両視点ではデータアップロードの際に，またセンタ側アプリケーション視点では，ダウンロード方向である車両通知におけるゲートウェイとしても働き，ネットワークやインフラの複雑さを隠蔽し，アプリケーション開発者が機能開発に集中できるようになることをめざしました．

対象としたユースケース

対応するユースケースを絞り込み過ぎないように，ネットワークエッジの検証では，基礎となるユースケースとして「車両の移動」と「広域切替」の2つを定めました（**図2**）．

1点目は「車両移動」に合わせて，接続先アプリケーション設備やサーバの切替を行うユースケースです．エッジでの処理は基本的に車両に近いエッジ，最寄りの拠点でデータ処理をして近隣の車両に対してフィードバックをするという，データの地産地消の概念に基づいており，車両が移動すると接続すべきエッジ拠点，さらに，その中のアプリケーション実行サーバも切り替えていくことが必要になります．それをネットワーク技術でサポート可能か検証しました．

2点目の「広域切替」は，拠点での障害発生や負荷分散をトリガーとし接続先アプリケーション設備の切替を行うユースケースです．エッジ拠点が分散してくると，エッジ拠点の故障・過負荷によって，隣接する拠点で処理を行いたいというニーズが出てくるため，ネットワークエッジとして故障を検知して切替えサポートが可能か検証しました．

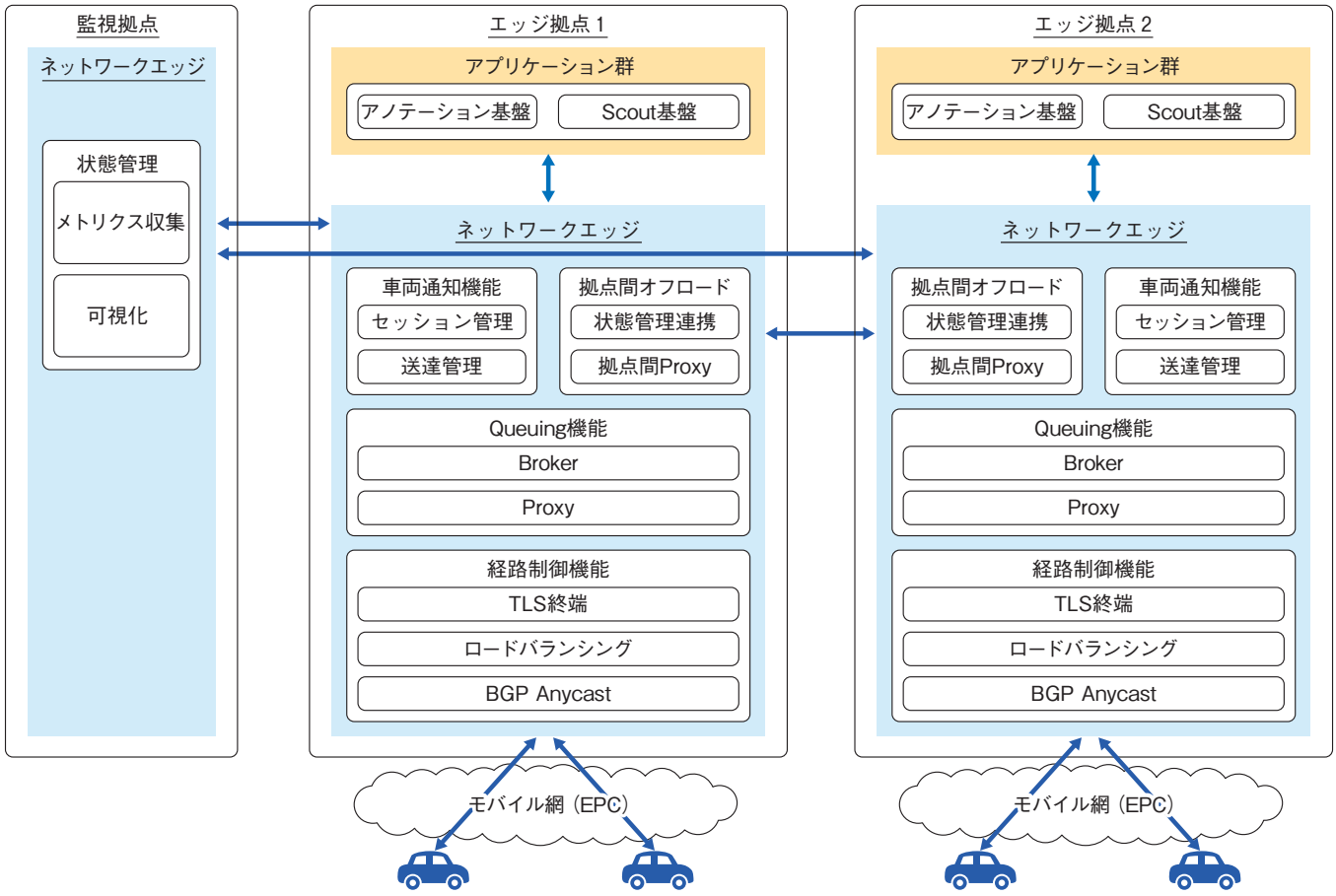


図 1　ネットワークエッジ概要

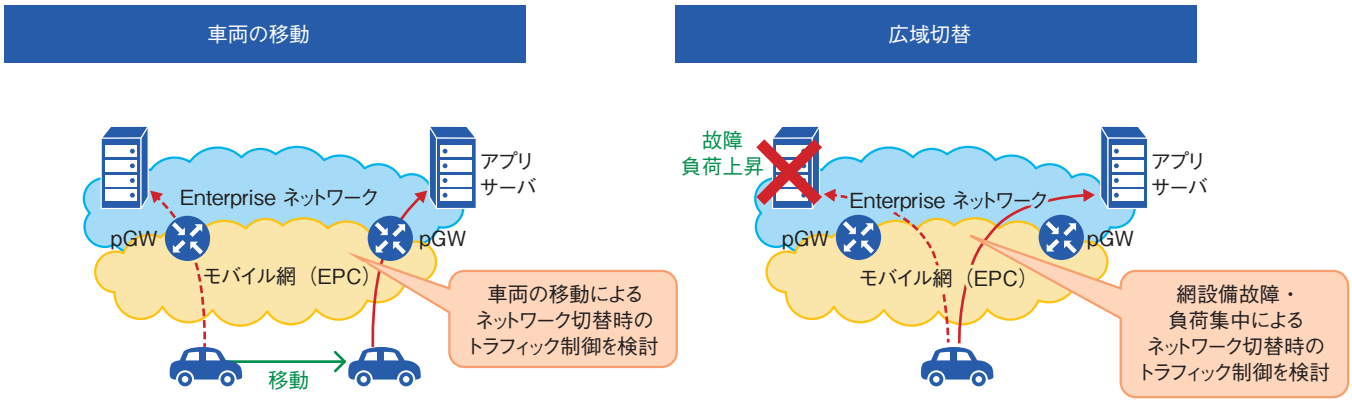


図 2　基礎となるユースケース

ネットワークエッジの機能と検証内容

ネットワークエッジに持たせた主な機能は，各データセンタ拠点・アプリケーションサーバへの経路制御と，メトリクスを活用したロードバランシング，広域分散メッセージキューの3つです．地理的な分散について除外すると，車両からのデータはモバイル網等の無線アクセス網を通ってネットワークエッジに到達します．そこで上記機

能による制御を経て，エッジ上のアプリケーション群，場合によっては直接センタ上のアプリケーション群にデータが送られます．

実証実験では，２つのユースケース確認のために東京と大阪のデータセンタを使って，複数のネットワークエッジ拠点が存在する環境を実装し，３つの機能の有効性を検証しました（**図３**）．また，車両との通信はセキュリティ上TLS（Transport Layer Security）を用いた暗号化通信を想定しており，ネットワークエッジでTLSを終端することがボトルネックになる可能性があるため，TLS終端の性能検証を実施しました．以降では，それぞれの検証内容について説明します．

経路制御

車両からアプリケーションサーバまでの経路制御の実現手段として「DNS方式」と「ロードバランサ（LB）方式」の２つを検討し，車両の移動，広域切替（設備故障）による挙動と，それぞれの基本機能と性能を確認しました．

① DNS方式：最寄りのDNSサーバまではBGP Anycastで誘導され，DNSサーバが最適な拠点・アプリケーションサーバを選択し車両に通知します．

② LB方式：最寄りのLBサーバまではBGP Anycastで誘導され，LBにて車両からのリクエストを最適な拠点・アプリケーションサーバへ転送します．

LB方式では，常にLBを介してアプリケーションと通信するので，性能面で不利になる一方，より細かい制御ができるようになります．実験初期に２方式の比較試験をし，どちらもユースケース対応が可能であることが分かったため，後半はLB方式をベースに実験をしています．

メトリクスを活用したロードバランシング

複数の拠点，さらに拠点内にも複数のサーバが並んで分散して処理を実施するというアプリケーションを前提に，どの拠点・サーバで処理を行うか，メトリクス情報を基に判断して，前述した経路制御も用いながら負荷分散する検証を実施しました．

アプリケーションサーバからの応答時間や設備情報，インフラリソースのメトリクス等を取得することで，サーバ，拠点の障害やソフトウェアプロセス障害，過負荷を検知し，状況に応じて負荷分散することと，極端な性能低下を回避できるか検証しました．実験の中では，アプリケーション負荷がしきい値を超えたことを検知し，拠点１で処理していたものを，７割は拠点1，３割を拠点２にオフロードするように，指定した割合で広域に分散することも検証しました．

広域分散メッセージキュー

ここまで何度か拠点やノードの障害について触れましたが，障害対応が拠点切替だけだと，その間，車両からのデータ送信は失敗します．その場合，車両はデータを再送するか，場合に

実車走行検証は東京お台場エリア等で実施

図３　実験環境概要

よっては送信を諦めることになるのですが，それを防ぐことが本機能の目標です．

メッセージキューという言葉から連想されるとおり，一時的にデータを受け取るという機能を持ちます．各エッジ拠点にメッセージキューがある状態になりますが，その間で連携をして，処理のオフロードをする場合でもデータを必要な拠点にまで運びます．

また，移動に伴って，接続するエッジが切り替わっていくので，センタ側から車両に対して通知をする際に，現在どこに接続しているのかが問題になります．それも，この仕組みを使って解決をめざしました．アプリケーションからはいったんメッセージを受け取り，仮に車両が別のエッジに移ってしまった後でも，受け取れるようになった段階で確実に送るということを検証しました．

これらをApache Kafka等のソフトウェアだけで実行しようとすると，無駄に拠点間でデータのやり取りをすることになったり，送達管理ができなかったりという問題が生じます．それをうまく処理するために，基本的なメッセージキュー機能はオープンソースソフトウェアであるNATSを利用しつつ，独自開発したProxy等を組み合わせたものをつくって検証しています．また，アップロードとダウンロード（通知）で求められる特性が異なるため，前者は対象データを選別して送信する仕組みを，後者はメタデータを共有し拠点をまたいで論理的なキューを構成する仕組みとなっています．

TLS性能検証

車両からの通信はセキュリティの関係上，TLSを利用して送られてきます．アプリケーションはHTTP（Hyper Text Transfer Protocol）やMQTT（Message Queueing Telemetry Transport）を使っているので，HTTPSやMQTTSで通信します．経路制御でLB方式を利用する方針にしたため，L7のソフトウェアLBで大量のトランザクションをさばく必要があり，通常のチューニングだけではCPUボトルネックとなることが想定されました．そこで，TLS処理を別のハードウェアにオフロードし，性能向上とリソースの効率化を確認する検証を行いました．ハードウェアは標準AMD64サーバに搭載可能な，TLS Accelerator，SmartNICの2種類を用いて，検証を行いました．車両からのアップロードが中心のトラフィックでは，まだ十分な効果が確認できていないものの，数1000万台車両を対象とするコネクティッドカーシステムではリソースを効率的に利用することで必要なサーバ台数を最小に抑えることが重要になるため，今後も継続して検証したいと考えています．

今後の展望

今回の実証実験を通して，車両とアプリケーション群の間に，複数の機能群を持つネットワークエッジを配置するアーキテクチャを実装し，その有効性を確認することができました[1]．

これを基本形とし，各技術をさらに発展させるとともに，他技術の組合せも試行して，より高度な基盤の実現をめざします．例えば，メトリクスによるロードバランシングでのAI（人工知能）適用や，アプリケーションサーバ群の優先制御との連携等を考えています．インテリジェントなネットワーク基盤技術によって，高速移動する数1000万台車両のリアルタイム通信をサポートし，複雑なインフラ条件を気にすることなくアプリケーション開発に専念できるような世界を実現するため，継続して取り組んでいきます．

■参考文献

(1) https://group.ntt/jp/topics/2021/11/29/techdoc_rel_ntt_toyota.html

（上段左から）野地 亮介／亀井 貴行／船引 魁人
（下段左から）村田 大輔／金丸 侑賢

私たちは，大量のデータが流通する次世代のモビリティを支えるため，本実験のようにパケットだけではなく，アプリケーションが扱うメッセージ単位の制御にも取り組んでいます．

◆問い合わせ先
NTTコミュニケーションズ
ビジネスソリューション本部
スマートワールドビジネス部
スマートモビリティ推進室
E-mail　mobility-contact@ntt.com

高速時空間データ管理技術（Axispot®）

道路上の落下物を周辺車両に通知する「障害物検知ユースケース」や，道路のレーンごとの車両台数を把握する「渋滞検知ユースケース」を実現するには，大量のコネクティッドカーが一斉に送信するデータを蓄積しながら，ある時間に，ある空間（地域メッシュ，道路，駐車場など）に存在する自動車だけをリアルタイムに検索する必要があります．本稿では，この要件の達成に向けて取り組んでいる高速時空間データ管理技術（Axispot®）について述べます．

磯村（いそむら）　淳（あつし）　重松（しげまつ）　直子（なおこ）
上野（うえの）　磯生（いそお）　沖（おき）　宣宏（のぶひろ）
荒川（あらかわ）　豊（ゆたか）
NTT人間情報研究所

はじめに

実空間上のヒトやモノ，自然環境等に関するさまざまな情報の収集とクラウド上での一元管理を可能にするIoT（Internet of Things）技術は，ヒトや車などの「動的オブジェクト」を管理することが求められる次世代サービス（レーン単位での渋滞把握，密なルートを回避する経路探索，ドローンによる空中配送など）では必要不可欠となってきています．トヨタ自動車との協業においても「障害物検知ユースケース」という，道路上の障害物の情報を即座に周辺の車両に通知するサービスの実現に向けて，「大量に走行する車両からのリアルタイムデータ格納」および「ある時間・空間に存在する車両のリアルタイム検索」が必要不可欠でした．

NTT人間情報研究所では，これら次世代サービスの実現で必須となる，大量の動的オブジェクトが一斉送信する情報の蓄積と，蓄積した動的オブジェクトの中から，ある時刻にある特定の地域にいる動的オブジェクトをリアルタイムに検索する「高速時空間データ管理技術 Axispot®＊1 (1), (2)」に取り組んでいます（**図1**）．以降では，既存技術が直面している4つの技術課題を提示し，これら技術課題の解決に向けて提案するAxispot®の4つのコア技術を紹介します．また，これら技術による性能改善を評価し，最後に，本研究開発のさらなる発展に向けて現在取り組んでいる課題や，今後の展望を述べます．

技術課題

「時空間データベース」とは，緯度や経度といった空間情報と，時刻，期間といった時間情報の双方に関連付いたデータ群を効率的に蓄積・検索・抽出するためのデータベースです(3), (4)．空間情報を用いて時空間データベース

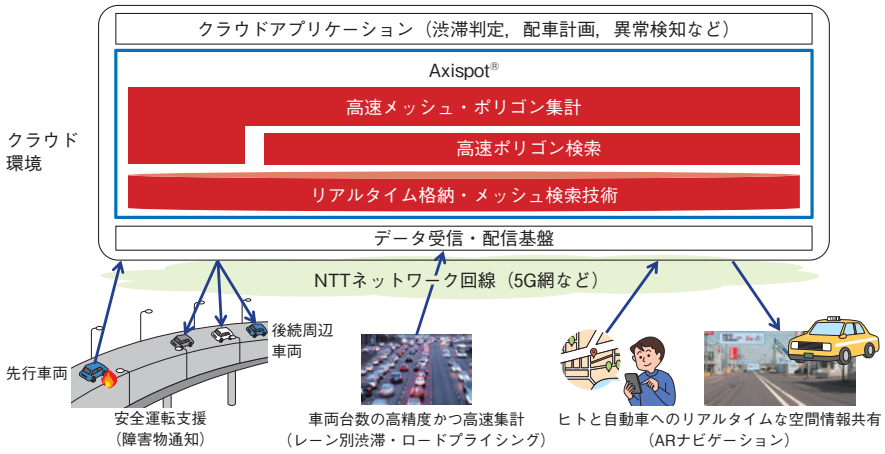


図1　Axispot®技術の利用イメージ

＊1　Axispot®：多次元の軸（Axis）からデータを高速に特定（Spot）する時空間データ管理技術（商標：https://www.j-platpat.inpit.go.jp/t0201）．

に対して検索を行う場合，ある特定の形状（道路，駐車場など）の範囲内に存在するオブジェクトのみを検索することを「ポリゴン検索」といいます．本協業の「障害物検知ユースケース」を実現するには，膨大な数の車両が全国で生成するデータを「時空間データベース」に格納し，さらに，特定の車両のみを「ポリゴン検索」により抽出する必要があります．しかし，本協業の性能目標を達成するには，次の4つの技術課題が発生します．

・課題①：一般的な時空間データベースでは，リレーショナルデータベース（RDB）などで汎用的に利用される検索木*2を応用したインデックスを用意します．しかし，検索木を用いる場合，データを格納・削除する際に検索木の更新が発生します．これにより，数1000万台という膨大な数の車両を取り扱う場合，データ格納・更新・削除の処理効率が著しく低下してしまい，リアルタイムで格納することが困難となります．

・課題②：大量のデータを扱う場合，データベースを複数のサーバで構成する分散データベースを用意します．この際，通常は各サーバが管理するデータを地域ごとに決定します．しかし，車両は地域・時間帯ごとに稼動している台数が異なるため，分散データベースを構成するサーバ間でデータ量が大きく偏ります．これにより，一部のサーバに負荷が集中することから処理性能が著しく低下し，リアルタイムでの格納・検索が困難となります．

・課題③：ポリゴン検索の計算性能は，対象とするポリゴンの「頂点数が多ければ多いほど」速度が低下します(5)．一方で，近年普及し始めている「高精度地図*3」が提供するポリゴンは高精細，つまり頂点数が多いという特徴があります．そのため，高精度地図を基につくられたポリゴンを活用したポリゴン検索の速度は遅く，リアルタイムでの検索が困難となります．

・課題④：データベースに集められた時空間データを基に，全国の各道路に存在する車両数を集計する場合，集計範囲内の地域メッシュやポリゴン数を「走行中の車両台数に応じて」計算機に割り当てる必要があります．この場合，多くの既存サービスでは，あらかじめ「地域メッシュ」や「ポリゴン数」を手動で割り当てます．しかし，先述したように，車両は地域・時間帯ごとに稼動している台数が異なるため，各計算機のジョブ*4の量が大きく偏り集計が非効率的になってしまいます．

提案技術

ここでは，前述した技術課題①～④の解決に向けてNTT人間情報研究所が提案する4つの技術について説明し，最後にAxispot®全体のアーキテクチャを紹介します．

■時空間インデックス技術

本技術は，ツリー構造を使わず，モートン曲線という空間充填曲線の特性を応用したインデックス方式です．**図2**の左側に示す2次元のモートン曲線は，世界地図に対して4分割を繰り返し，分割された領域に対して［0］，

*2　検索木：r-treeなどのツリー構造を持つデータ索引のためのインデックス技術．
*3　高精度地図：道路の各レーン単位の情報などを持つ高精細な地図データ．HD（High Definition）-mapとも呼ばれます．
*4　ジョブ：処理作業のまとまりのこと．

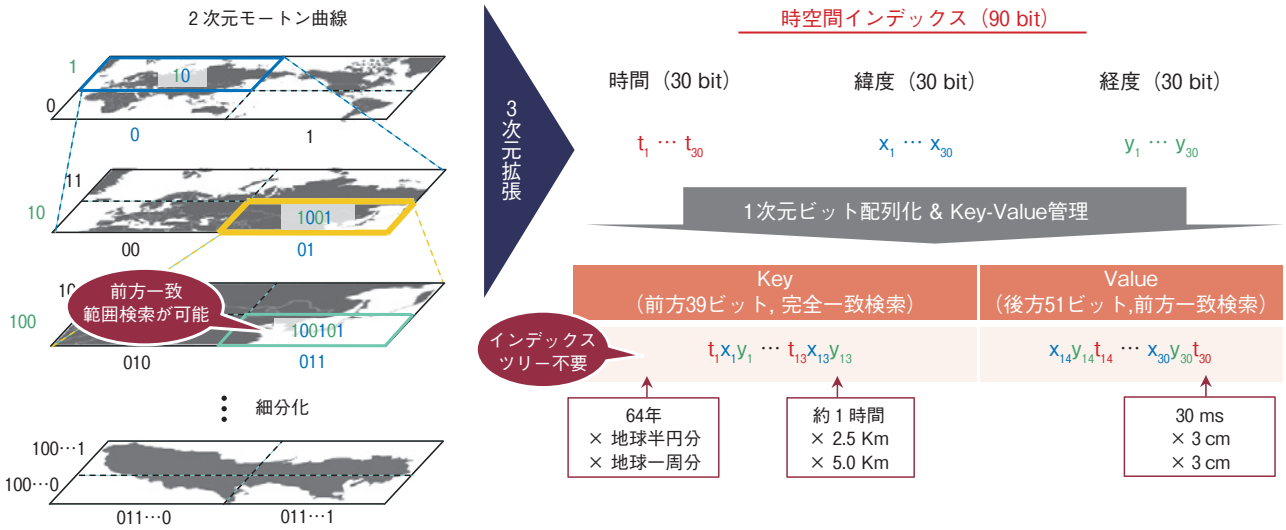


図2　時空間インデックス

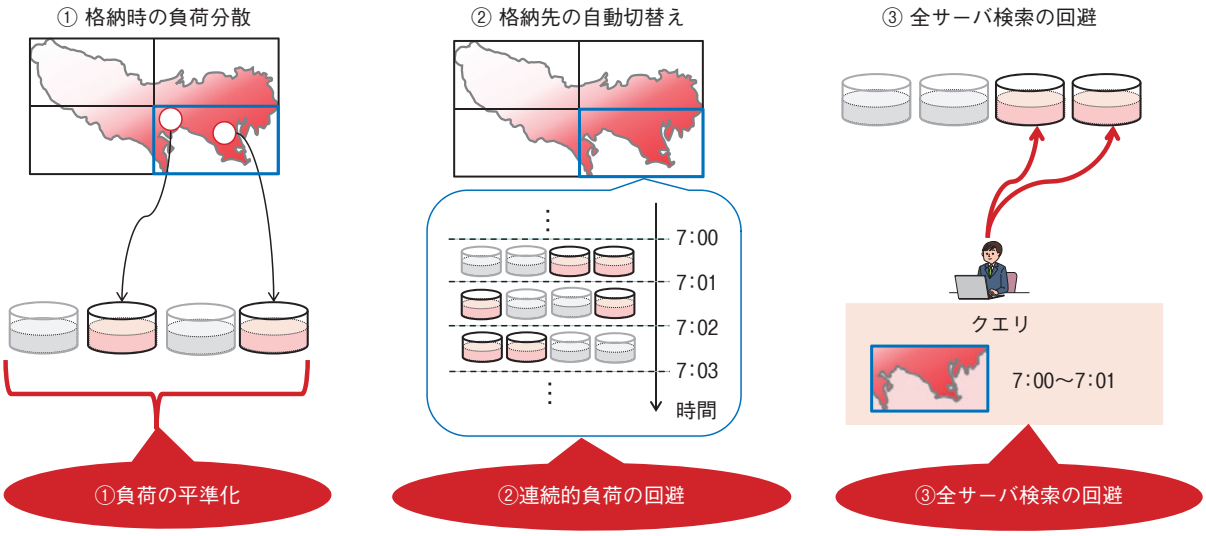


図 3　限定的ノード選択

［1］というビットを付与するような処理となります．この［0］と［1］のみで構成される１次元のビット配列が長くなるにつれて，空間的に狭い領域が表現されます．そして，このビット配列に対する前方一致検索により，空間の範囲検索が可能となります．例えば，［1001…］という前方ビットを検索すると，図２の世界地図における黄色枠内を検索することができます．私たちは，このような特性を持つモートン曲線に「時間」という次元を追加し，３次元のモートン曲線に拡張しました．さらに，生成されたビット配列をキーバリューストア（KVS）と呼ばれるデータベースの「Key」と「Value」に「前方ビット」「後方ビット」をそれぞれ図２の右側に示すように分割して格納することで，時空間の範囲検索を「Keyへの完全一致検索」により実現しました．この「時空間インデックス技術」により，ツリー構造を使わず高速なデータ格納を実現し，さらにリアルタイムでの時空間範囲検索を可能とします．

■限定的ノード選択技術

本技術は「場所と時刻に応じて，複数のサーバの組合せを決定し，そのうちどれか１つのサーバにデータを振り分ける」という新たなデータ分散方式です．このデータ分散方式により，**図3**に示す３つの効果が得られます．①地域に応じて特定の１つのサーバではなく複数のサーバが選択されることで負荷を平準化できます．②時間経過に伴い，選択される複数のサーバの組合せが変化するため連続的な負荷を回避できます．③検索時には「時間」と「空間」によりサーバの組合せを一意に特定できるので，すべてのサーバへの不要な検索を回避できます．この「限定的ノード選択技術」により，一部のサーバに「負荷集中」が発生してしまうことを回避し，高速な格納・検索を可能とします．

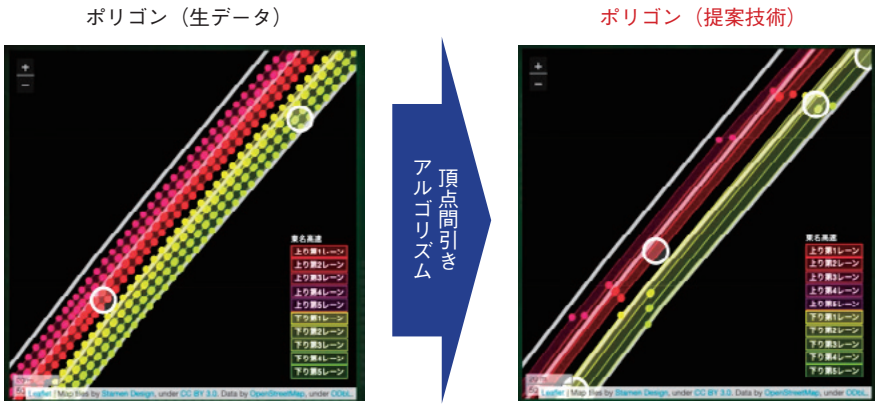


図 4　頂点間引きによる高速ポリゴン検索

■高速ポリゴン検索技術

本技術は「折れ線」の簡易化手法の１つであるDouglas-Peuckerアルゴリズム[6]を「ポリゴン形状」に適用することで，元のポリゴン形状を保持しながらポリゴンの頂点数を大幅に減らし，ポリゴン検索を高速化する方式です．**図4**のポリゴン（生データ）に対してDouglas-Peuckerアルゴリズムを適用することで，大幅に頂点数が削減されたポリゴン（提案技術）を生成します．この変換処理を適用した後，ポリゴンを効率的にデータベースで管理する「高速ポリゴン検索技術」により，高精度地図を基に作成された

ポリゴンを活用したポリゴン検索の速度が低下することを回避し，リアルタイムでの検索を可能とします．

■時空間データ高速集計技術

本技術は，分散処理基盤を活用することで，時空間データの集計対象範囲内のジョブを自動で各計算機に配分するという方式です．**図 5** に示すように，ある空間範囲に対して地域メッシュで集計処理を実行する場合，地域メッシュの位置は空間的にバラバラになりますが，各計算機が担当する「ジョブの量が均等になる」ように振り分けます．この「時空間データ高速集計技術」により，各計算機のジョブの量が大きく偏ることを回避し，集計に要するレスポンス時間を短縮することを可能とします．

Axispot®はこれら 4 つの技術を核としており，**図 6** に示すアーキテクチャで構成されています．図中に示す「時空間データベース」は時空間データを格納するためにRedis[7]やApache Ignite[8]などを利用することができ，「静的ポリゴンデータベース」はポリゴン情報を格納するためにPostgreSQL[9]などのオープンソースソフトウェアを利用することができます．

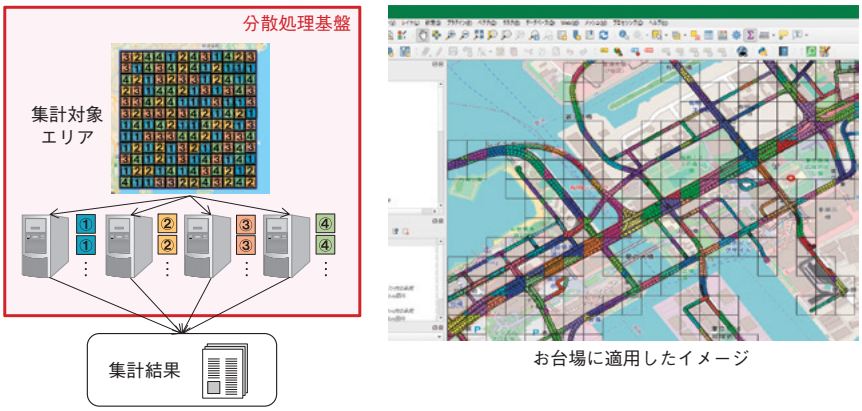


図 5　高速メッシュ集計

評　価

ここでは，同一のデータベースを利用した場合に，「時空間インデックス技術」「限定的ノード選択技術」を利

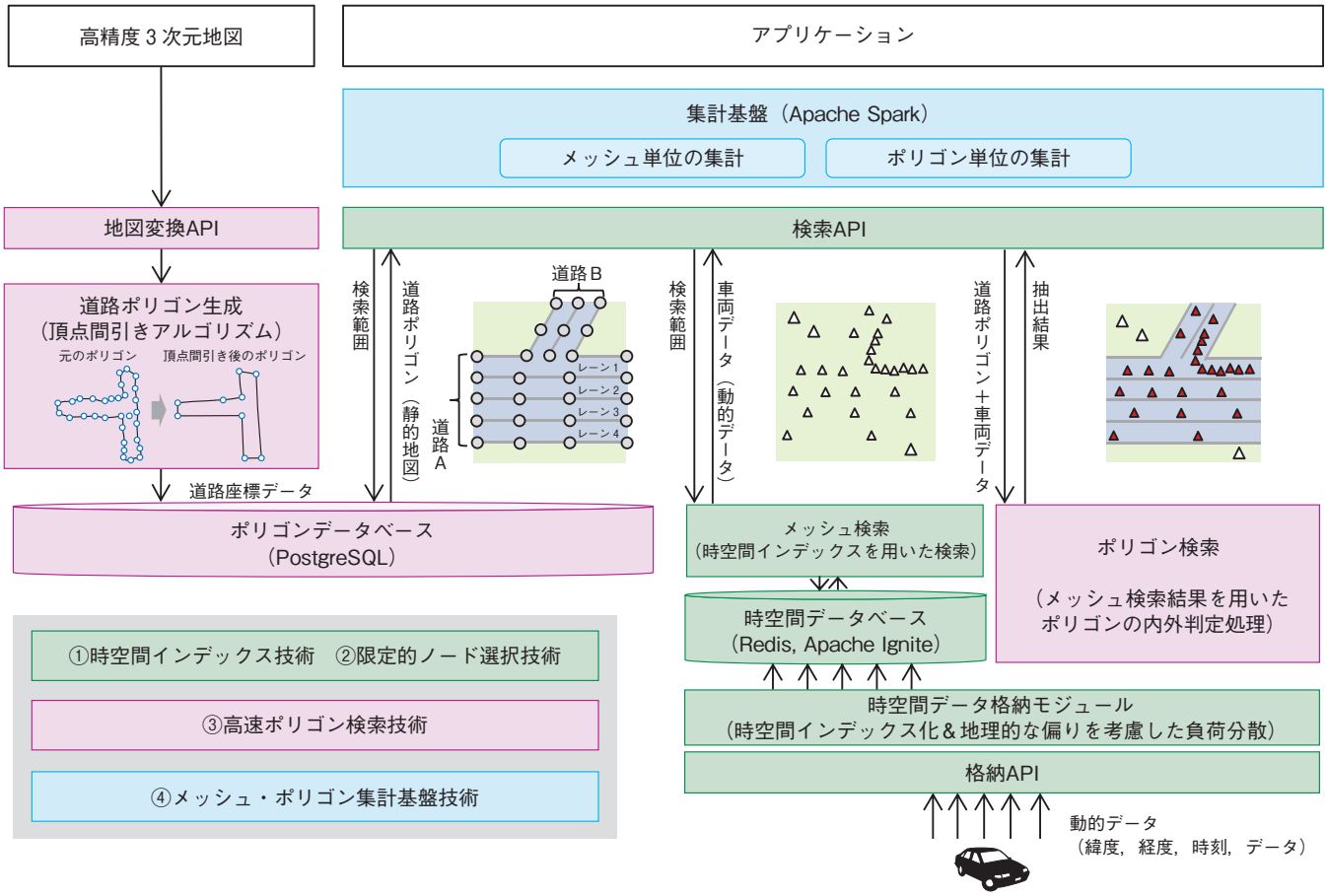


図 6　Axispot®アーキテクチャ

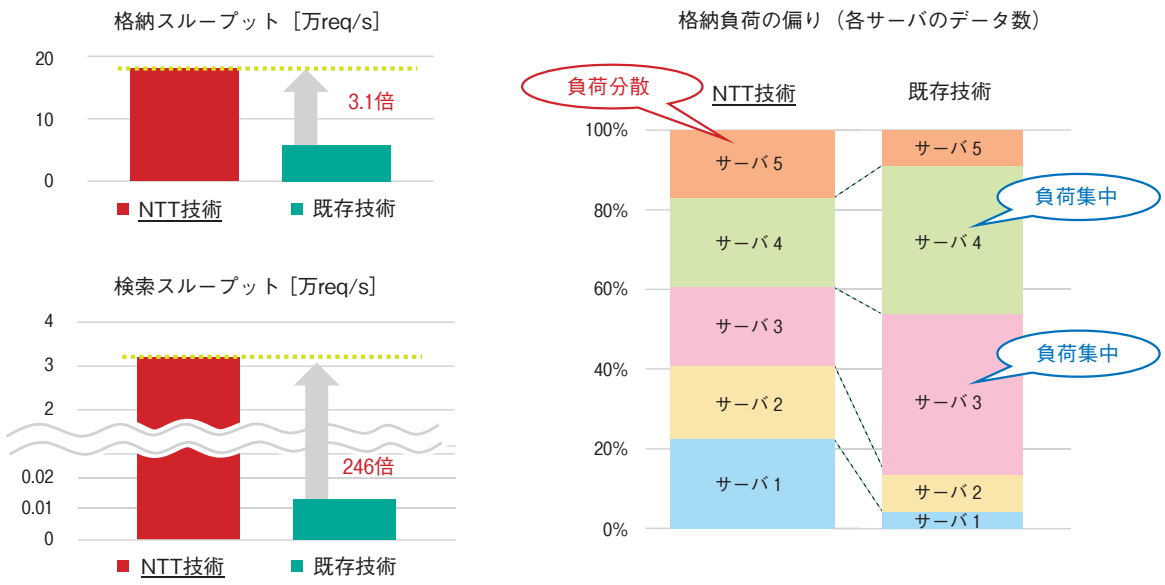


図7　評価結果

用した場合（提案技術）と利用しなかった場合（既存技術）の比較を示します．検証では，関東規模を常時走行する数100万台規模の車両のデータを収集し，さらに特定の空間・時間内に存在する車両のみを検索することを想定したデータセットを利用しました．**図7**（左）に示すように，格納性能は3.1倍に向上し，検索性能は246倍にまで向上することを確認しました．また，図7（右）に示すように，提案技術を利用した場合は分散データベースを構成する各サーバに均等にデータが割り振られることから，負荷集中を回避することを確認しました．本技術を協業の場で活用することで，リアルタイムでの車両データ格納・検索の実現に貢献することができました．

今後の展望

NTT人間情報研究所では，現実世界のあらゆる物体を仮想空間にリアルタイムでコピーする「デジタルツインコンピューティング[10]」という技術に取り組んでいます．これを実現するには，ヒト，車のみならずドローン，船舶，衛星などのあらゆる動的オブジェクトから一斉に送信されてくるデータをリアルタイムで格納・更新し，さらに都市（建物，道路など）・環境（河川など）といったあらゆる形状の中から必要なデータのみを検索することが不可欠です．そのため，現時点ではAxispot®で対応できない「高さ」方向の次元へのインデックスの拡張や，「3次元ポリゴン」を用いた検索に関する取り組みを検討しています．

■参考文献

(1) A. Isomura, I. Naito, Y. Iida, and T. Nakamura：“Axispot: A Distributed Spatial-Temporal Data Management System for Digital Twin of Moving Objects,” IEEE Software, Vol. 39, No. 2, pp. 33-38, 2022. DOI: 10.1109/MS.2021.3132899
(2) A. Isomura, K. Miyahara, I. Naito, and M. Hanadate：“Real-Time Spatial-Temporal Database for Geographic Polygon Data Using HD-Map,” 4th ICGDA, pp. 7-13, April 2021. https://doi.org/10.1145/3465222.3465230
(3) T. Abraham and J. F. Roddick：“Survey of Spatio-Temporal Databases,” GeoInformatica, Vol. 3, pp. 61-99, 1999. https://doi.org/10.1023/A:1009800916313
(4) N. Pant, M. Fouladgar, R. Elmasri, and K. Jitkajornwanich：“A Survey of Spatio-Temporal Database Research,” LNCS, Vol. 10752, pp. 115-126, 2018.
(5) I. E. Sutherland, R. F. Sproull, and R. A. Schumacker：“A characterization of ten hidden-surface algorithms,” ACM Computing Surveys, Vol. 6, No. 1, pp. 1-55, 1974.
(6) M. Visvalingam and J. D. Whyatt：“The Douglas-Peucker algorithm for line simplification: Re-evaluation through visualization,” Computer Graphics Forum, Vol. 9, No. 3, Sept. 1990. https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.1990.tb00398.x
(7) https://redis.io/
(8) https://ignite.apache.org/
(9) https://www.postgresql.org/
(10) https://group.ntt/jp/newsrelease/2020/11/13/201113c.html

（上段左から）磯村　淳／重松　直子／上野　磯生
（下段左から）沖　宣宏／荒川　豊

コネクティッドカーを含む世界中の「動くオブジェクト」のデータをよりリアルタイムに活用することが必須となる「デジタルツインコンピューティング」の実現に向けて，今後も時空間データ管理技術に取り組みます．

◆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センタ
E-mail　dtc-office-ml@hco.ntt.co.jp

車両データ選択的収集アルゴリズム

道路上にある障害物の状態変化を追跡調査する「障害物監視ユースケース」では，障害物の最新状況をとらえた車載カメラ画像を継続的に収集する必要があります．画像認識技術を活用すれば正確に画像選定できますが，車載の計算資源はごく限られており，クラウドに画像を転送するにも携帯網の通信コストがかかります．そこで，車両の位置や進行方位，カメラ画角といったメタ情報に基づいて各車載カメラの撮影範囲を推定し，必要な画像のみを選択的に収集する技術を考案しました．

高木（たかぎ）　雅（まさる）　松尾（まつお）　和哉（かずや）
中田（なかだ）　亮太（りょうた）　森（もり）　航哉（こうや）
NTT人間情報研究所

コネクティッドカーの可能性

道路交通分野におけるICT化の要として期待されているコネクティッドカーですが，実はセンシング基盤としても大きな可能性を秘めています．各種の高性能センサと通信モジュールを搭載し，電池切れの心配が事実上なく，街中を縦横無尽に走り回るコネクティッドカーは，移動式センサノードとして理想的な特徴を兼ね備えています．もし，数1000万台のコネクティッドカーから車載カメラ画像やLiDAR（Light Detection and Ranging）*点群データを収集できれば，街全体をくまなく，絶え間なくスキャンして街のデジタルツインを構築できるようになるでしょう．

想定ユースケース

しかし，数1000万台のコネクティッドカーで生成されるセンサデータの総量は10～100 Tbit/sと膨大であり，通信網，計算機，ストレージのいずれの観点でも全量収集は困難です．一方で，これらのセンサデータの中には，即座に収集すべきデータだけでなく，多少の収集遅延が許されるデータ，定期的な収集で十分なデータ，利用価値のないデータも含まれます．したがって，必要なセンサデータを取捨選択し，重要なセンサデータを優先的に収集することが重要となります．また，通信網や計算機の負荷状況に応じてセンサデータの収集ペースや収集タイミングを調整することで，負荷の時間変動を平準化し設備利用効率を高めることも可能です．

トヨタ自動車との協業においても，センサデータの選択的収集を必要とするユースケースはいくつかありましたが，本稿では「障害物監視ユースケース」に沿って技術課題と実装詳細，性能改善について紹介します．このユースケースでは，道路上の障害物が風に吹かれて移動したり，道路管理者によって撤去されたりすることを想定し，障害物の近傍を通過した車両から車載カメラ画像を継続的に収集することで最新状況を把握します（**図1**）．

画像認識によるアプローチ

コネクティッドカーで撮影された大量の画像の中から，監視対象の障害物をとらえた画像を選出したいという要件に対しては，画像認識によるアプローチが一見すると順当に思えます．このアプローチでは大まかに2通りの構成が考えられますが，いずれも大きな課題を抱えています．

・構成①：コネクティッドカー内で処理

もっともシンプルな構成としては，コネクティッドカーに計算機を搭載して画像認識処理を行う方式が考えられます．しかし，この方式には自動車に特有の3つの課題があります．

第一に，真夏の炎天下における車内温度は80 ℃弱に達する場合[(1)]があり，計算機を安定稼動させるのは容易ではありません．第二に，乗用車の稼動率は平均5％といわれており，せっかく

＊ LiDAR：光を用いたリモートセンシング技術の一種で，各方向に照射したレーザ光の反射時間から対象物までの距離を計測する技術．

搭載した計算機も休眠時間ばかりではコストに見合いません．第三に，自動車と計算機では製品寿命が大きく異なるため，計算機が先に寿命を迎えるか性能面での陳腐化が進みます．これらの事情を勘案すると，コネクティッドカーに計算機を搭載することは現実的な選択肢とはいえません．

・構成②：データセンタ内で処理

コネクティッドカー基盤の存在を前提とした場合，すべての画像をいったんデータセンタに転送して，データセンタ内で画像認識処理を行う構成も考えられます．この構成では先に指摘した3つの課題を回避できますが，画像転送に用いる携帯電話網の通信コストが課題となります．また，数1000万台規模で同時通信を行うケースを想定すると，携帯電話網に掛かる負荷も無視できなくなります．たとえコネクティッドカー1台当り1 Mbit/sの通信トラフィックでも，1000万台では合計10 Tbit/sにも達します．これは我が国における現在の移動通信トラフィックの15倍という膨大な分量です[(2)]．

位置情報によるアプローチ

前述の課題に直面した私たちは，「障害物監視ユースケース」の要件を改めて吟味しました．収集された画像は後段の処理で細かく分析されるため，画像選定の時点で障害物の有無を高精度に判定する必要はありません．一方で，この画像分析処理は非常に高負荷であるため，分析する画像の個数はなるべく抑えたいという事情があります．また，監視対象とする障害物の位置情報は既知であり，これを手掛かりとして活用しない手はありません．

そこで私たちは，画像認識技術に頼ることなく収集すべき画像を選定する技術を考案しました．具体的には，周辺車両の位置情報や進行方位，車体サイズ，カメラ画角，カメラ解像度といったメタ情報に基づいて各車載カメラの撮影範囲を推定したうえで，障害物と各車両の位置関係を踏まえて，障害物をとらえたと推定される画像を選定します．この選定処理は以下の5つの工程から構成されています（**図2**）．

・工程①：車両情報データベースの整備

画像選定の際に重要な手掛かりとなる車両のメタ情報は，コネクティッドカーから定常的に収集しておき，高速時空間データベースAxispot®に格納しておきます．

・工程②：車両情報データベースの検索

障害物監視のリクエストが届いたら，障害物地点と現在時刻に対応する

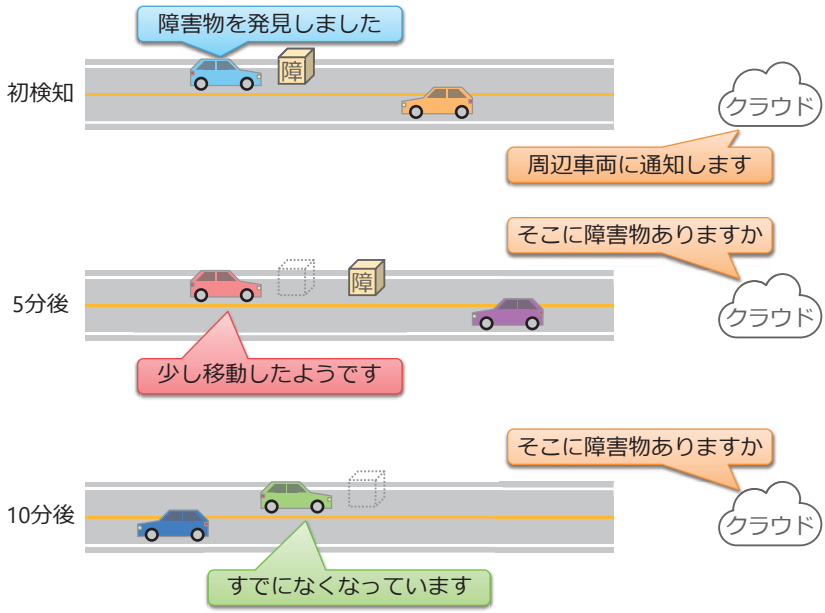


図1　障害物監視ユースケースの概要

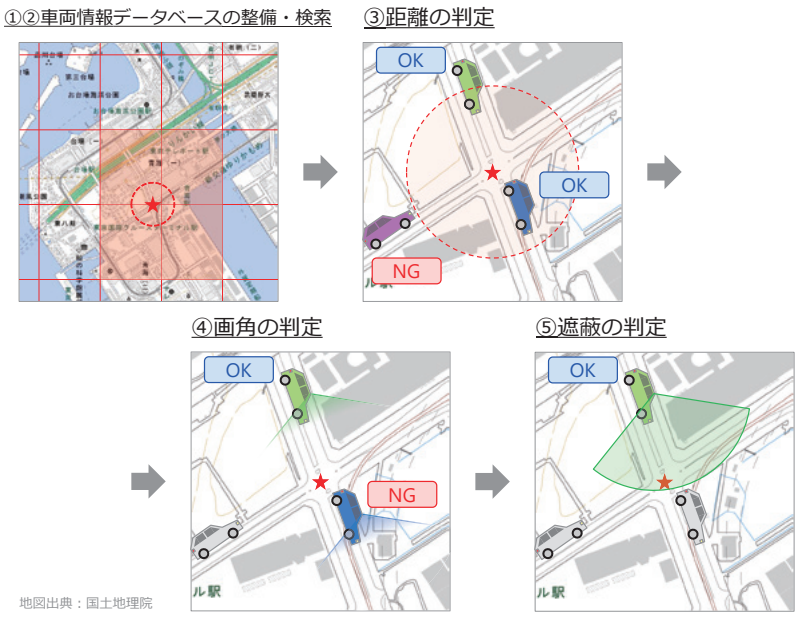


図2　メタ情報に基づく画像選定の流れ

時空間インデックスで車両情報データベースを検索し，ヒットした車両を候補車両とします．

・工程③：距離の判定

次に，各候補車両と障害物の間の距離を計算し，車載カメラの解像度から算定した有効射程距離より遠く離れた車両を候補から除外します．

・工程④：画角の判定

さらに，各候補車両から見た障害物の方向を計算し，車載カメラの画角内に障害物をとらえていないと推定される車両を候補から除外します．

・工程⑤：遮蔽の判定

最後に，周辺車両どうしや地物の位置関係を調べて，他の車両や地物に遮蔽されて障害物が見えないと推定される車両を候補から除外します．

遮蔽判定の計算量削減

これら５つの工程の中でもっとも複雑な計算処理を要するのが遮蔽判定です．後に紹介するように，遮蔽判定は処理時間の支配項となるため，実証実験期間中にアルゴリズムの大幅改良を実施しました．本稿では改良前と改良後のアルゴリズムを順に紹介します．

遮蔽判定のもっとも直感的な実装方式としては，各候補車両の視界範囲を計算して障害物地点と当たり判定を行う方法が考えられます．例えば，**図３**のように障害物の近傍に６台の車両が存在する場合，６台の車両それぞれについてカメラ画角と有効射程距離から扇形の視界範囲を描きます．ここから，他の５台の車両により遮蔽されている部分がないか，１つひとつ調べて視界範囲から差し引きます．この方式では，車両どうしが互いに影響を及ぼし合う視界範囲の遮蔽を総当たりで調べる必要があるため，車両数ｎに対して計算量は$O(n^2)$となります．障害物近傍の車両数が増加するに従って処理時間が急速に増大するため，監視対象の障害物周辺で渋滞により多数の車両が密集した状況では，処理時間が非常に長くなるおそれがあります．

そこで私たちは，計算量を抑えるためのアルゴリズム改良に挑戦しました．改良のポイントは「車載カメラの視界範囲を計算する」という固定観念を捨て去ったことです．ここでは「車両から障害物が見える」ならば「障害物から車両が見える」という逆転の発想に基づき，車両の視界範囲ではなく障害物の視界範囲を計算し，各車両と当たり判定を行います（**図４**）．この方式では各車両について１回ずつ遮蔽の有無を調べて視界範囲から差し引けばよく，総当たりでの計算処理が不要となるため，車両数ｎに対して計算量を$O(n)$に抑えられます．また，視界範囲を扇形の集合で近似することで，各車両との当たり判定も非常にシンプルに実装できます．

性能評価

ここでは，アルゴリズム改良前と改良後の各実装について，さまざまな車両配置パターンにおける処理時間を評価しました（**図５**）．車載カメラの有効射程距離を100 mと仮定し，障害物地点の半径100 m以内に位置する車両数を仮想的に変化させます．最悪ケースの評価を行ううえでは，車両数の上

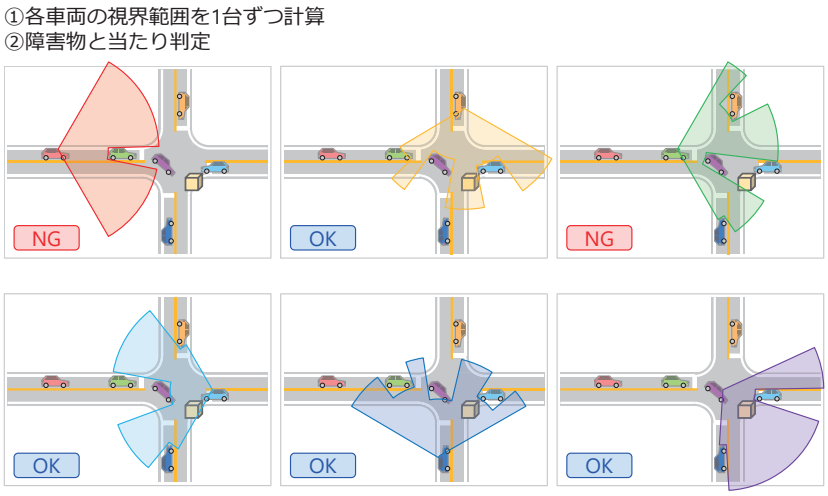


図３　遮蔽判定の実施例（アルゴリズム改良前）

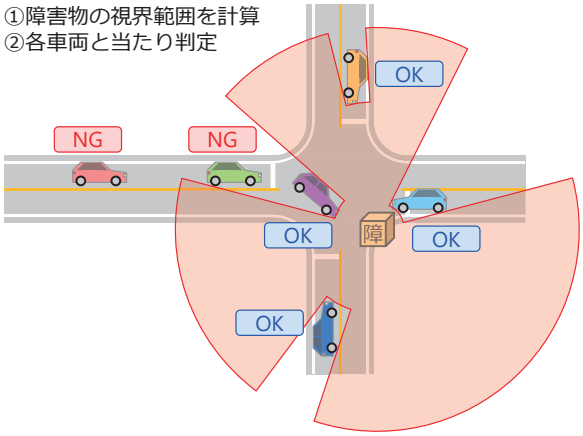


図４　遮蔽判定の実施例（アルゴリズム改良後）

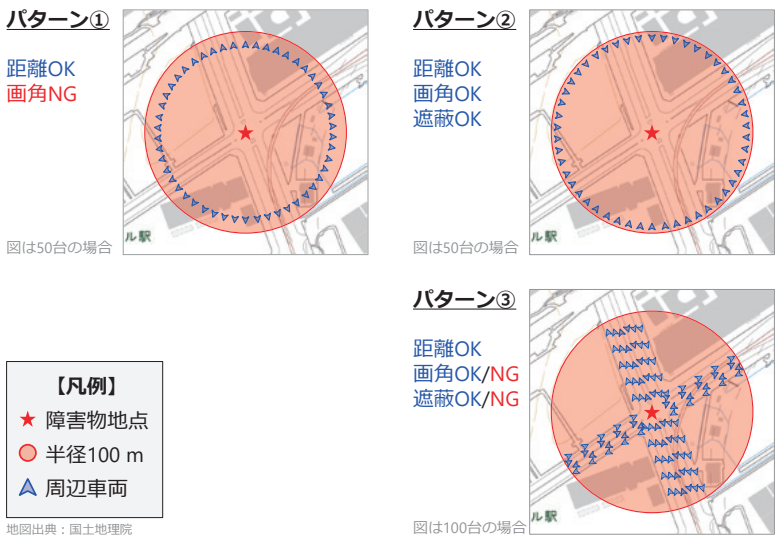


図 5　性能評価における車両配置パターン

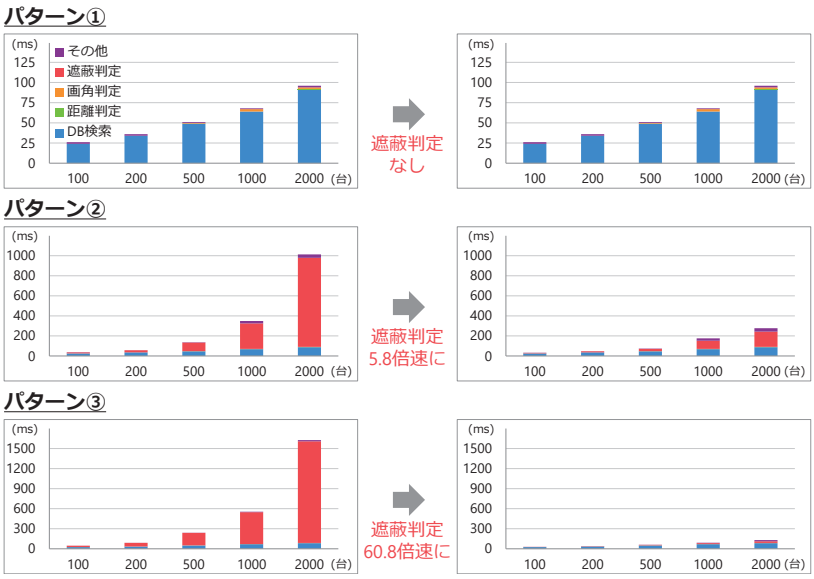


図 6　車両配置パターンと処理時間の関係

限設定が重要となりますが，ここでは駐車場並みの密度で車両が密集した状態を想定して上限を2000台としました．選定アルゴリズムの実装言語としてはJavaを採用し，改良前のみJTS Topology Suite[3]という幾何計算ライブラリを併用しました．

各車両配置パターンで車両数を変化させたときの処理時間を**図 6** に示します．アルゴリズム改良前は，車両数の２乗に比例するかたちで遮蔽判定の処理時間が急速に増大していましたが，アルゴリズム改良後は，車両台数に比例する水準に抑えられています．車両2000台が密集する最悪ケースにおける遮蔽判定の処理時間は25 msと，アルゴリズム改良前より60倍以上高速であることを確認できました．

今後の展望

今回の実証実験では，「障害物監視ユースケース」の要件に対して実装を最適化することで，幾何計算ライブラリを用いた汎用的な実装と比べて60倍以上高速な処理を実現できました．今後は，この成果をコネクティッドカー以外の用途にも応用できないか検討を進めていきます．

例えば，街のデジタルツイン構築では，一度センシングした領域についても定期的に再センシングして最新の状況を反映する必要があります．街の景色には変化の頻度が高い部分と低い部分があるため，街全体を均一に再センシングするより，要所要所をピンポイントで計画的に再センシングするほうが効率的です．このような場面では，本稿で紹介したアルゴリズムを活用することで，収集すべきデータの選定を効率化できます．さらに応用的な課題として，監視対象が面的な広がりを持つケースや，位置情報に誤差が含まれるケースに対応する手法についても検討を進めていきます．

■参考文献

(1) https://jaf.or.jp/common/safety-drive/car-learning/user-test/temperature/summer
(2) https://www.soumu.go.jp/main_content/000791761.pdf
(3) https://locationtech.github.io/jts/

（左から）高木　雅／松尾　和哉／中田　亮太／森　航哉

デジタルツインの社会実装においては，コネクティッドカーのような「つながるモノ」を駆使して，路上落下物のような「つながらないモノ」の情報をいかに収集するかが，今後ますます重要となると考えています．

◆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センタ
E-mail　dtc-office-ml@hco.ntt.co.jp

垂直分散コンピューティング技術

ある車両が検知した障害物の情報を周辺車両に高速に通知するために，障害物情報を取得する処理の一部をネットワークエッジにオフロードし，処理途中の中間結果を車両に通知することで，高速な障害物通知を実現しました．しかし，都市部では，大量のコネクティッドカーが一部のネットワークエッジに接続することによるリソース不足が発生し，結果として高速な通知を実現できなくなってしまいます．そこで，通知対象のコネクティッドカーの状態に応じて，処理を実行する計算機を動的に変更することで，大量のコネクティッドカーが一部のネットワークエッジに接続する環境においても，高速な障害物通知を実現しました．

松尾（まつお）　和哉（かずや）　高木（たかぎ）　雅（まさる）
中田（なかだ）　亮太（りょうた）　森（もり）　航哉（こうや）
NTT人間情報研究所

コネクティッドカー向けICT基盤の役割と課題

コネクティッドカー向けICT基盤の役割は，コネクティッドカーから車載カメラ映像やCAN（Controller Area Network）データを収集し，必要に応じて分析した結果を各車両へ送信することによって，クルマ1台のセンサデータでは把握できない情報をクルマが取得できるようにすることです．これによって，運転手は自分からは死角になっている場所の情報を把握できるため，交通事故を未然に防ぐことが可能になります．

一方で，コネクティッドカーが普及した世界においては，大量のコネクティッドカーからデータが集まってくるため，ICT基盤の処理負荷が非常に高くなることが考えられます．しかし，そのような状況においても，障害物の情報をはじめとする緊急性の高い情報が検知されれば，その情報を各車両へ高速に通知できなければなりません．

トヨタ自動車との協業では，データ処理結果をICT基盤からクルマへ通知するユースケースを複数想定して技術検証を行いましたが，本稿ではその中でも，より高速な通知が必要となる「障害物検知ユースケース」に沿って説明します．

本稿で紹介する垂直分散コンピューティングは，「アプリ垂直分散アーキテクチャ」と「処理ノード動的選択技術」の2つから構成されており，以降ではそれぞれの技術が解いた課題とその解決方法，および実証実験における検証結果について紹介します．

垂直分散コンピューティング

■アプリ垂直分散アーキテクチャ

(1)　従来のICT基盤における障害物検知・通知

トヨタ自動車との協業における従来のICT基盤は，ストリームデータ処理とバッチデータ処理を並列で処理することで，ストリーム処理の即時的な結果と，バッチ処理の詳細な結果の両方を取得できるラムダアーキテクチャ[(1),(2)]に従って構築されていました（**図1**）．また，障害物の検知から通知までを7

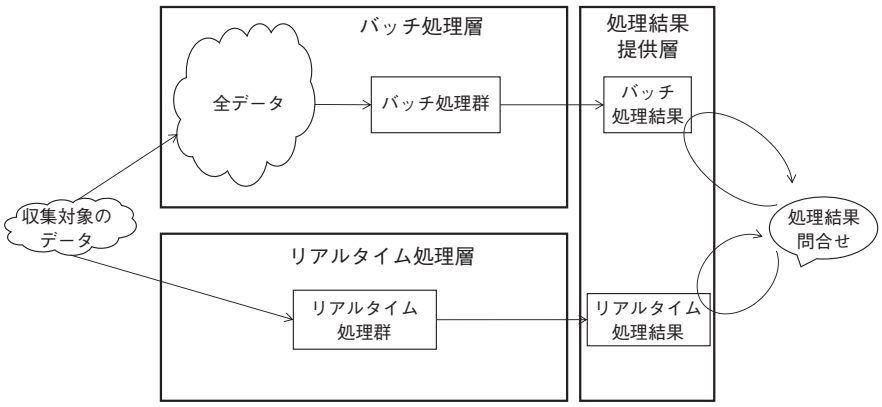


図1　ラムダアーキテクチャ

秒以内に実施するために，ストリームデータ処理として，車載カメラ映像の各フレーム（画像）から障害物の種別と位置を推定する画像データ処理を行っていました．しかし，ラムダアーキテクチャでは処理時間に関する要件は考慮されていないため，このアーキテクチャに従ってシステムを構築するだけでは，７秒以内に障害物検知・通知を実施するという要件を必ずしも満たすことはできず，実際15秒程度の処理時間を要していました．

⑵　アプリ垂直分散アーキテクチャの適用

そこで，ラムダアーキテクチャに処理時間のしきい値を設定できるようにした新たなアーキテクチャであるアプリ垂直分散アーキテクチャを提案しました（**図２**）．アプリ垂直分散アーキテクチャは，一連の処理から合計の処理時間がしきい値を超えないように処理順に処理群を抽出し，その処理群の結果をクライアント側で参照できるようにするアプリケーションアーキテクチャです．このアーキテクチャに従ってICT基盤を再構築することによって，物体認識と位置推定で構成される画像データ処理から，前者の処理が抽出され，障害物の位置情報を計算する前に障害物の種別のみをコネクティッドカーが参照できる構成となりました．この構成に基づいたICT基盤では，さらなる高速化をめざして，センタサーバよりコネクティッドカーに物理的に近い位置にあるネットワークエッジ*1に物体認識処理をオフロード*2し，ネットワークエッジから障害物の情報を通知できるようにしました．この構成における障害物検知・通知は以下のとおりの２段階になります（**図３**）．

①　初回通知：障害物の種別とその大まかな位置情報（当該障害物を撮影したコネクティッドカーの位置情報）を周辺車両へ通知

②　詳細通知：位置推定から得た障害物の位置とその種別を周辺車両

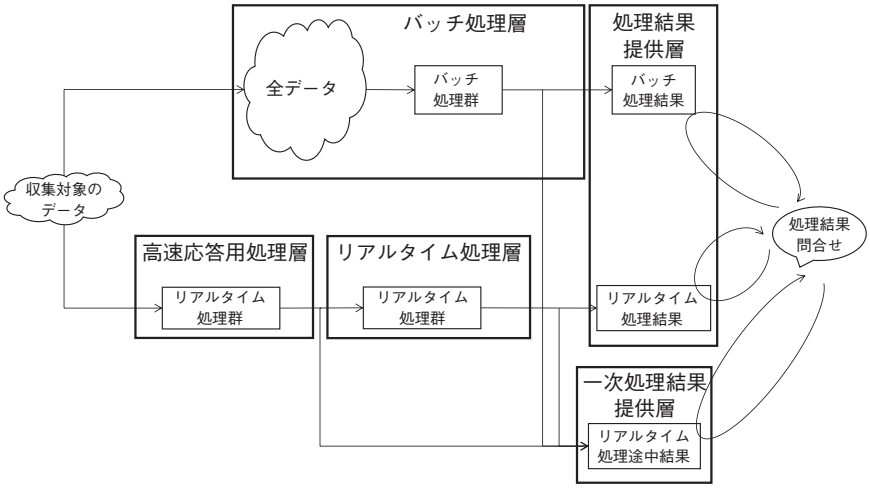


図２　アプリ垂直分散アーキテクチャ

*1　ネットワークエッジ：NTTの基地局や局舎に配置した計算機．
*2　オフロード：あるシステムの負荷を他の機器などが肩代わりして軽減する仕組み．

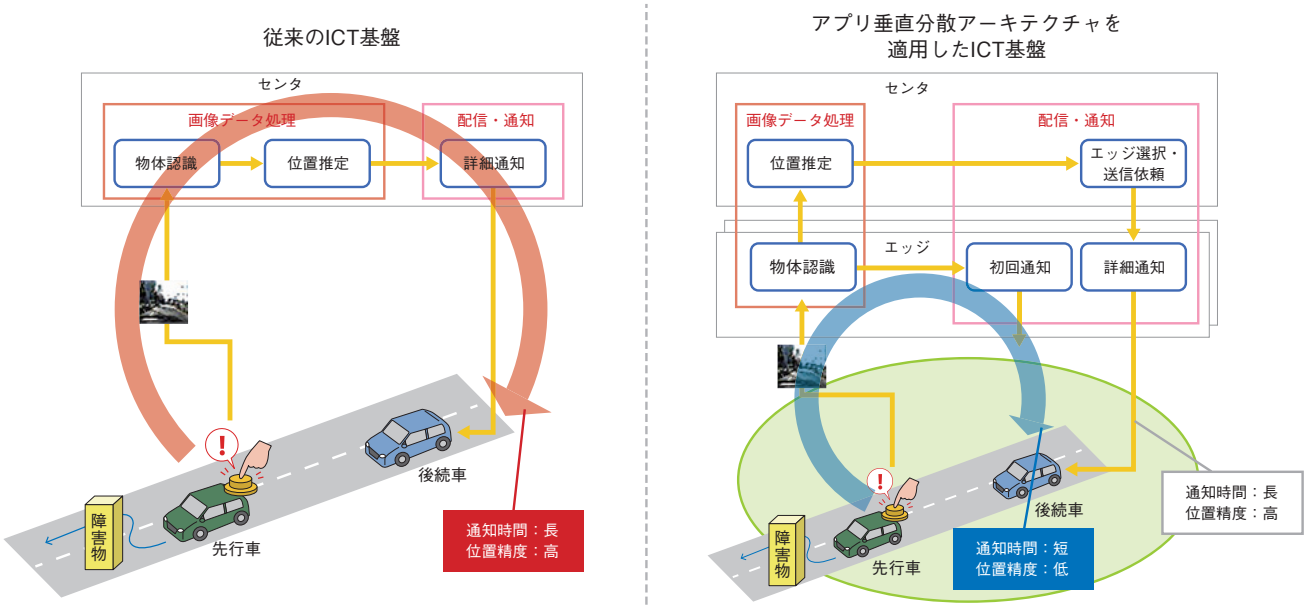


図３　アプリ垂直分散アーキテクチャ適用前後

へ通知

⑶　実証実験

実証実験では，障害物を撮影する車両と障害物情報が通知される車両を同じにして，障害物が車載カメラに写ってからその情報がICT基盤から通知されるまでに要した時間を計測しました．結果を**表1**に示します．表に示すとおり，初回通知は7秒以内に実施できています．一方で，前述のとおり，この初回通知では障害物の詳細な位置はまだ計算されておらず，その障害物を撮影した車両位置という，本来の障害物の位置から数m～10数m離れた大まかな位置しか分かりません．しかし，1秒で10 m以上移動してしまうクルマの世界において，精度を多少犠牲にしてでも，従来よりも10秒以上早く障害物の情報を通知できることは，安全運転支援の観点から非常に価値があることだと私たちは考えています．

■処理ノード動的選択技術

⑴　アプリ垂直分散アーキテクチャ適用後のICT基盤の問題

アプリ垂直分散アーキテクチャによって高速な通知が可能となりましたが，上記検証はネットワークエッジの計算リソースが枯渇しない範囲で計測したものでした．しかしコネクティッドカーが普及した世界における都市部では，大量のコネクティッドカーが一部のネットワークエッジに接続することが考えられるため，当該エッジでの画像処理（物体認識）が集中することでリソース不足が発生し，結果として高速な通知を実現できなくなってしまうことが考えられます．

このような一部の計算機への負荷集中を分散する技術として，システムとして許容可能な処理遅延や計算機の残りリソースを基に，最適な計算機に処理をオフロードする技術が，文献⑶をはじめ数多く提案されています．しかし，これらの従来技術を適用するだけでは，上記問題は解決しきれません．1秒で10 m以上移動してしまうクルマの世界では，その周辺状況は時々刻々と変化するため，その周辺状況によって許容できる処理遅延は異なると考えられます．例えば，見通しの悪い道路で障害物が発生した場合，事故発生のリスクが非常に高いため，周辺車両への高速な通知が必要です．一方，見通しの良い道路で障害物が発生した場合は，事故発生のリスクが低いため，高速な通知は必ずしも必要ありません．従来技術は前述のようなクライアントの状況を考慮していないため，従来技術を適用してICT基盤の負荷分散を行うと，高速な通知が必要な車両へ高速な通知ができない可能性や，高速通知が不必要な車両へ高速な通知をしてしまう可能性があります．

⑵　処理ノード動的選択技術の概要

そこで私たちは，従来の負荷分散技術に，通知対象車両の周辺状況を考慮する機能を加えた処理ノード動的選択技術を提案しました．処理ノード動的選択技術は，下記3つの処理から構成されます．

①　通知対象車両の周辺状況に基づくデータの処理優先度の判定（提案技術）

②　オフロード対象処理を実行する計算機の選択（従来技術）

③　当該処理のオフロード（従来技術）

処理①については，ユースケースごとにさまざまなアルゴリズムが考えられます．実証実験では障害物検知・通知ユースケース用のアルゴリズムを採用し，その効果を検証しました．

⑶　ICT基盤への処理ノード動的選択技術の適用

実証実験では「障害物が見えていない高速移動中の車両には高速な通知が必要である」と設定し，それに応じたアルゴリズムを採用しました．具体的には，車載カメラ映像を送信した車両付近のコネクティッドカーを通知対象車両として検索し，これらの車両に高速な通知が必要か否かを下記の2つの条件から判定します（**図4**）．

①　通知対象車両群の平均移動速度

表1　アプリ垂直分散アーキテクチャの実証実験結果

処理時間			
障害物検知～初回通知		障害物検知～詳細通知	
平均［s］	最速［s］	平均［s］	最速［s］
4.574	4.092	9.772	9.212

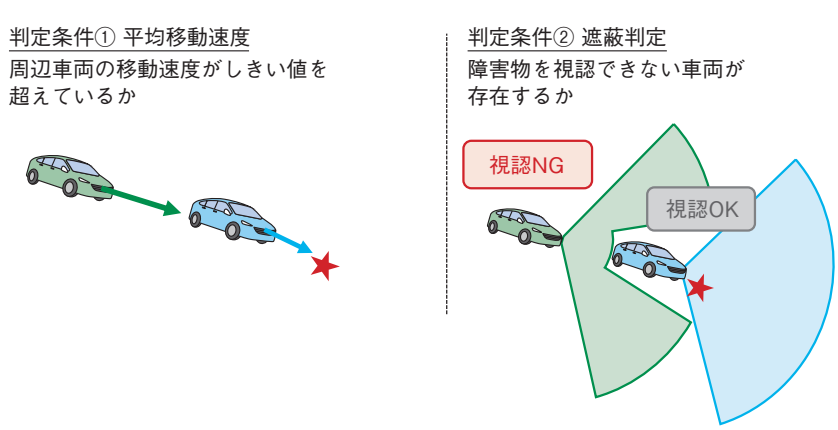


図4　高速な通知が必要な車両の有無の判定

がしきい値を超えているか否か

② 運転席から障害物（正確には，障害物検知の場合は障害物を撮影した車両の位置，一度検知した障害物の監視の場合，推定した障害物の位置）が見えているか否か

なお，判定条件②については，「車両データ選択的収集アルゴリズム」と同様のアルゴリズムで遮蔽判定を計算しています．この2つの判定結果の組合せで，高速な通知が必要な場合は処理優先度「高」，高速な通知が不必要な場合は処理優先度「低」，そのどちらでもない場合は処理優先度「中」として，受信した車載カメラ映像の処理優先度を**表2**に従って決定します．

続いて，上記のとおりに優先度を設定した画像処理（物体認識）をどの計算機で実行するかを決定します．処理ノード動的選択技術では，従来技術と同様にシステムを構成する各計算機の残りリソースを監視しており，その残りリソースと処理優先度を基に，**表3**の判断基準に基づいて処理を行う計算機を決定します．最後に，選択した計算機に処理をオフロードし，当該計算機で処理を実行します．

ICT基盤における計算機構成を基に，**図5**を用いてオフロード対象処理を実行する計算機の選択を例示します．図中の映像1～6の順番にネットワークエッジが車載カメラ映像を受信し，各映像に対する物体認識の優先度が図のとおりに設定されたとします．映像4を処理する物体認識4は，優先度「低」のため，センタサーバへオフロードします．物体認識5は優先度「中」のため，物体認識4のオフロードによりリソースが空いたネットワークエッジで実行します．これによってネットワークエッジの計算リソースがなくなったため，優先度「中」の物体認識6は，センタサーバにオフロードします．

(4) 実証実験

実証実験では，ネットワークエッジへ送信する車載カメラ映像の数が，画像処理時間に与える影響を確認しました．結果を**図6**に示します．横軸が1秒当りに受信した映像の数（優先度「高」となる映像を1秒当り1～3個，優先度「中」となる映像を1秒当り1～9個の間で変化）を示し，縦軸は計算リソースが潤沢に使える状況での処理時間からの増加分を示しています．この図から分かるとおり，処理ノード動的選択がないICT基盤では，毎秒3個以上の映像を受信すると，ネットワークエッジでの処理時間が増加する一方で，毎秒9個[*3]以上の映像を受

表2　車載カメラ映像の処理優先度設定

①平均移動速度	②遮蔽判定	優先度
高速	遮蔽あり	高
	遮蔽なし	中
低速	遮蔽あり	中
	遮蔽なし	低

表3　優先度に基づく計算機選択

優先度	処理する計算機
高	残りリソースのある最寄りのネットワークエッジ
中	残りリソースのある最寄りの計算機（ネットワークエッジ or センタサーバ）
低	センタサーバ

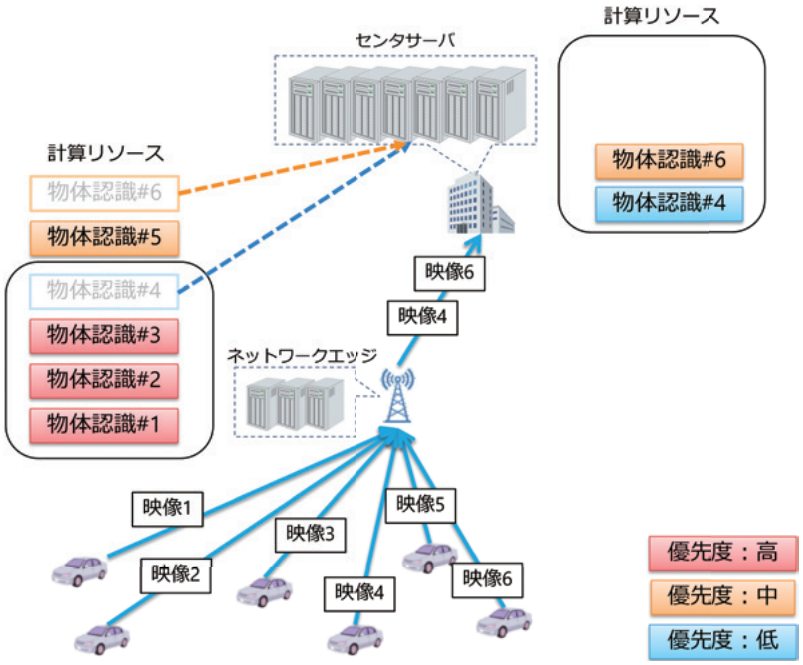


図5　処理ノード動的選択の例

*3　この負荷は，コネクティッドカーが普及した世界を想定するには非常に小さな値ですが，これはトヨタ自動車との協業では各技術の有効性を確認するために最小の計算機構成で実証実験を行っているためです．今後実用化に向けてより大規模な計算機構成でICT基盤を再現した際には，各技術の有効性を示しつつ，より大きな負荷を処理できるようになるでしょう．

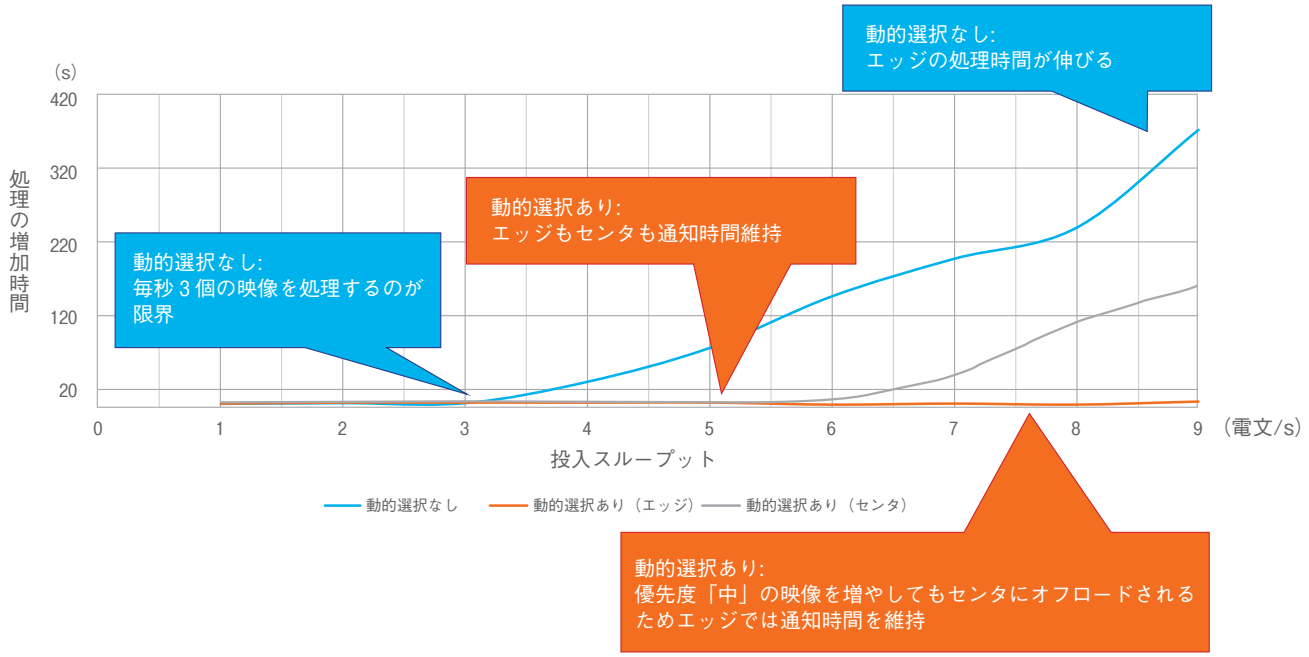


図6　処理ノード動的選択技術の実証実験結果

信するまでネットワークエッジでの処理時間を維持していることが分かります．これは，優先度が高い処理だけをネットワークエッジで処理しており，それ以外の処理をセンタサーバにオフロードしているためです．そのため，毎秒6個以上の映像を受信すると，センタサーバでの画像処理時間が増加しています．

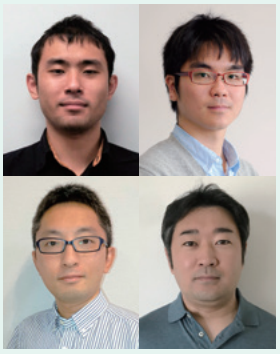
今後の展開

計算機は日々進歩しており，最近ではクルマ自身が車載カメラの映像を処理できるようになってきました．一方で，垂直分散コンピューティングでは，車載カメラ映像などを自身で直接処理できるコネクティッドカーは現状考慮していません．そこで今後は，ネットワークエッジ・センタサーバ側の計算リソースをさらに有効活用を目的として，コネクティッドカーに搭載されている計算リソースも利活用できる拡張を検討する予定です．

また，障害物検知・通知のユースケースでは，あるコネクティッドカーの車載カメラ映像からシステムが障害物を検知した際に，その障害物が別のクルマのデータからすでに見つけているものなのか，新たに見つかったものなのかを識別する必要があります．すでに見つけている障害物であれば，周辺車両にはすでにその情報が通知されているため，高速な通知が必要ないためです．このように複数の異なるセンサが検知した物体が同一のものか否かを判断する技術のことを同定判定と呼びますが，私たちはこの同定判定を実現する技術についても検討を進めています[4]．

■参考文献

(1) http://www.databasetube.com/database/big-data-lambda-architecture/.
(2) K. Dutta and M. Jayapal：“Big data analytics for real time systems,” Big data analytics seminar, pp.1-13, 2015.
(3) Y. Dai, D. Xu, S. Maharjan, and Y. Zhang：“Joint load balancing and offloading in vehicular edge computing and networks,” IEEE Internet of Things Journal, Vol.6, No.3, pp.4377-4387, June 2019.
(4) 松尾・高木・中田・森：“高精度ダイナミックマップ作成のための点群位置合わせを応用した動的物体検知・同定システムに関する検討,” 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション, Vol.2021, No.6, pp.1-8, 2021.



（上段左から）松尾　和哉/ 高木　　雅
（下段左から）中田　亮太/ 森　　航哉

垂直分散コンピューティングは，「高速なレスポンス」と「負荷分散」という観点から，クラウドに集中しがちなデータを地方に分散させ，データの地産地消化を実現するための第1歩の技術です．今後は，本技術の実環境への適用に向けた課題解決や技術の拡張に取り組んでいく予定です．

◆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センタ
E-mail　dtc-office-ml @ hco.ntt.co.jp

レーン別渋滞検知技術

自動運転やナビゲーション高度化を目的とした，高精度な地図情報に交通規制・渋滞等のさまざまな情報を重ねたダイナミックマップの構築が進められています．これらの実現にあたり，NTTでは，商業施設の駐車場への入庫待ちや右左折レーン車列の車両群など，レーン単位の渋滞車列を検知し情報提供することで，これまでにない高度なナビゲーションを実現できると考えました．本稿ではコネクティッドカーの収集可能な情報からレーン単位の渋滞車列を検知する技術について述べます．

森（もり）　皓平（こうへい）　横畑（よこはた）　夕貴（ゆき）
林（はやし）　亜紀（あき）　秦（はた）　崇洋（たかひろ）
神谷（かみや）　正人（まさと）
NTTスマートデータサイエンスセンタ

はじめに

近年，自動運転やナビゲーション高度化を目的とした，高精度な地図情報に交通規制や渋滞などのさまざまな情報を重ねたダイナミックマップ[1]の構築が進められています．これらの情報はリアルタイムにダイナミックマップ上にマッピングされることで，道路交通上の状態を把握することができ，交通流を最適化するナビゲーションなどのサービス実現が期待できます．しかし現実には交通規制や渋滞などの情報をリアルタイムかつ全国の道路を網羅的に検知する手段が必要です．例えばミリ波レーダ[2]やトラフィックカウンタ[3]により定点における通過車両の流量を計測し渋滞を検知することができますが，これらは渋滞が想定される個所に機器を設置する必要があり網羅性に欠けます．またスマートフォンなど，運転者の端末を利用し車両速度から網羅的に渋滞を検知する方法[4]も提案されていますが，これらは車線レベルの分解能を備えていません．しかし，現実の交通においては商業施設の駐車場の入場待ち車列や，高速道路出口の車列，交差点の右左折レーンの車列といった車線単位の車列がさまざまな場所で発生します．こうした車列に遭遇したドライバは，特に土地勘のない道路では目的地へ到達するために，これらの車列に並ぶ必要があるのか判断することが難しく，不必要にもかかわらず車列に並んでしまう場合や，本来は並ぶべき車列を通り過ぎることによって目的地へ遠回りしてしまう場合があります．

そこで私たちは，車線単位の車列（レーン別渋滞）や，その区間を検出することができれば，運転者の目的地に応じて並ぶべき車列と並ぶ必要のない車列を判断し，レーン別渋滞を回避しつつ目的地へ案内するレーンレベルナビゲーションなど，これまでにない高度な運転支援を提供することができると考えました．本稿では，一部のコネクティッドカーが得た映像データとその車速からレーン別渋滞を検知する技術[5]について述べます．

レーン別渋滞検知技術

■定義

一般道路における既存サービスで用いられている渋滞の定義[6]を参考に時速10 km 以下かつレーン単位の車列をレーン別渋滞と定義し，検知対象は同既存サービスにおける渋滞長定義を参考に，その10分の 1 以下である42 m 以上のものとしました．また本稿では，データを取得するコネクティッドカーを観測車両，観測車両が搭載した車載カメラで撮影した映像に映った観測車両以外の車両を他車両と呼称します．

■処理概要

レーン別渋滞に遭遇した際の道路状況イメージと車載カメラ映像を**図 1** に例示します．観測車両の撮影した車載カメラ映像から，観測車両が追い抜いた他車両や対向車線ですれ違った他車両の台数をカウントすることで，観測車両の車速と両台数・換算した他車両の密度からレーン別渋滞を検知することができます．レーン別渋滞を検知した場合は評価期間をずらして再度評

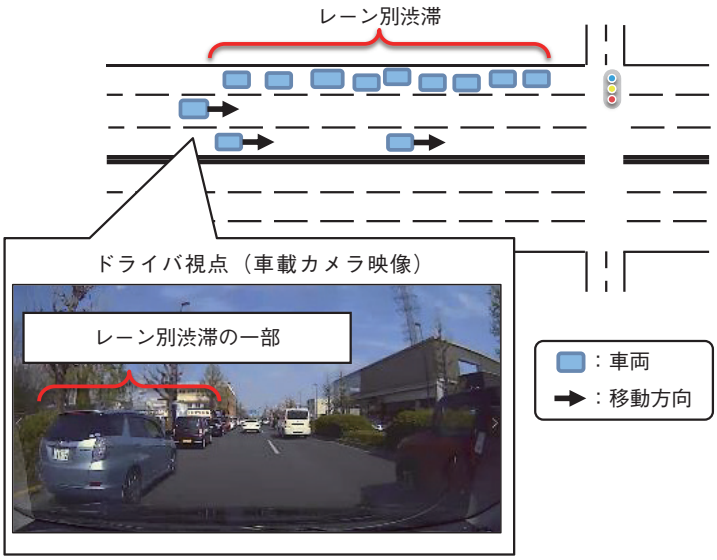


図 1　レーン別渋滞遭遇時のドライバ視点

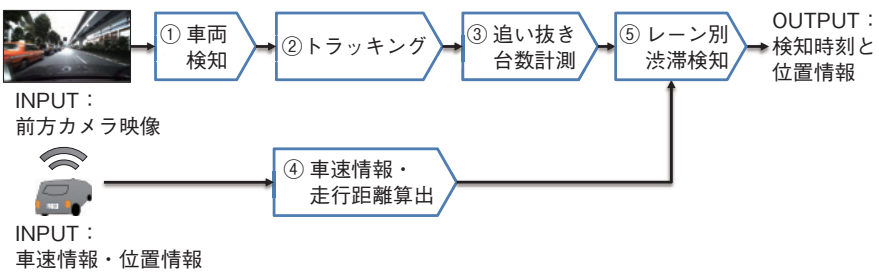


図 2　処理フロー

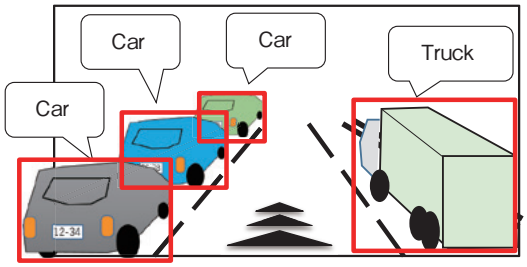


図 3　フレーム画像から車両を検知（Car/Truck/Bus）

価するという処理を繰り返してレーン別渋滞が続く区間を推定し先頭車両と末尾車両を特定可能です．

■処理フロー

前方カメラで観測車両の前方を撮影した映像を取得し，**図 2** に示す各処理を実施します．

① 車両検知

取得した映像をフレームごとの画像に分割し，物体検知技術[7]を用いて各フレーム画像に映り込んだ他車両を検知します．検知の結果は矩形（検知矩形）で表現され，対象の車種に応じてCar/Truck/Busの 3 種にラベル付けします（**図 3**）．

② トラッキング

観測車両と他車両の相対位置は変化するため，他車両のフレーム画像間の移動を追跡しナンバリングします．次に各フレーム画像で他車両に適当なナンバーを割り当て，現フレーム N の検出矩形 X とその f フレーム前（フレーム $N-f$）の検出矩形 Y の一致度を，2 つの集合の類似度を測る指標 Intersection over Union（IoU）

$$IoU = \frac{|X \cap Y|}{|X \cup Y|}, \qquad (1)$$

を用いて評価します．このときIoUがもっとも大きい，つまりもっとも共通する画素の多い検知矩形どうしを同一の他車両によるものと見なすことでトラッキングし軌跡を求めます．

③ 追い抜き台数計測

フレーム画像間で共通する判定線を設定します（**図 4**）．次にトラッキングで求めた他車両の軌跡について相対移動ベクトルとして表現し，この対移動ベクトルのうち道路消失点から画像外側に向けたものが判定線と交差した際に観測車両が他車両を追い抜いたとカウントします．

④ 車速情報・走行距離算出

取得した車速情報から観測車両の走行距離を算出します．

⑤ レーン別渋滞検知

評価期間ごとの追い抜いた車両の台数に関するしきい値が明確でないことから，現状では追い抜いた車両の密度（車両密度）を用います．少なくとも車間距離は通常どおり走行している場合と比較して短く詰まった状態にあるものと考えられるためです．

他車両を追い抜いた台数から，隣接レーンにおいて車両が占める距離のしきい値（占有距離しきい値 L_θ と呼称）を追い抜いた他車両 i の全長 l_i と車両 i の前方車間距離 τ_i として次のとおり求めます．

$$L_\theta = \sum_i (l_i + \tau_i), \qquad (2)$$

さまざまな全長の車両が存在しますが，簡単のため学習モデルにおいて判別する3クラスについてCarの全長 l_{car} = 4.8 m，Truck の全長 l_{truck} = 12.0 m，Busの全長 l_{bus} = 12.0 m を用いて算出します．車間距離 τ は“車両が詰まった状態”ではあるが急ブレーキが間に合う距離が妥当と考え，クラスによらず τ = 5.0 mとします．なお渋滞の定義の上限である時速10 km（秒速2.778 m）では停止距離（空送距離＋制動距離）が足り，混雑の定義の上限である時速20 kmでは不足する値です．反応時間は一般的な値とされる0.75秒，摩擦係数は乾いた路面を想定し0.7としました．空走距離：秒速 2.778 m×0.75 秒 =2.08 m制動距離：(10×10) ÷ (254×0.7) ≒0.56 m追い抜いた車両のクラス（Car/Truck/Bus）ごとに x, y, z とすると，

$$L_\theta = x l_{car} + y l_{truck} + z l_{bus} + (x + y + z)\tau, \qquad (3)$$

この占有距離が観測車両の走行距離 D よりも長い場合

$$L_\theta \geq D, \qquad (4)$$

は車間距離が定めたしきい値よりも狭い状態，つまりレーン別渋滞の状態であると判断します．

■その他工夫点

精度向上のため，車両検知における逆光や映り込みに起因した物体検知漏れ対策としてカルマンフィルタを用いて他車両の移動先を予測し補完する処理を追加しました．また対向車線の他車両とすれ違う場合を判別するため，各他車両に対しフロント（車両前部）・リア（車両後部）判定処理を実施し，観測車両に対してフロントを向けた車両が多い場合は「対向車線の他車両とすれ違った」と判別し先頭車両と末尾車両を入れ替える処理を実施します．

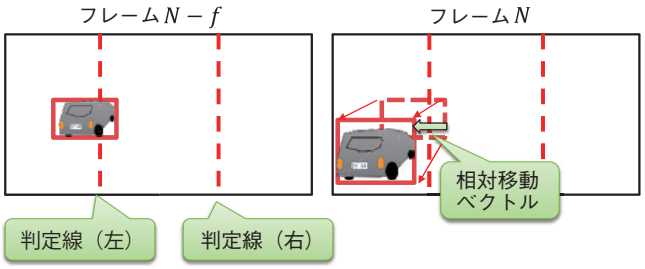


図4　判定線による追い抜き台数のカウント

図5　走行ルート

実証実験

■実験概要

東京都港区台場地区を走行した実験車両を観測車両として，レーン別渋滞検知の精度評価を実施しました．走行ルートは**図5**に示す赤実線と青点線の2種です．事前調査により，これら走行ルート上には自然発生したレーン別渋滞が高確率で存在することが判明しています．車内前方上部に設置したカメラを用いて1920×1080 pxの解像度で撮影した映像を10 fpsで保存し，位置情報はGPS を用いて緯度・経度を1秒間隔で取得しました．速度情報は位置情報の変化から換算し代用します．

■レーン別渋滞の検知精度評価

レーン別渋滞の存在を目視で確認した動画（48動画・各60秒）を対象に実施した精度評価について述べます．

(1)　目視確認内容

42 m以上の渋滞長のレーン別渋滞が検出対象となるようCar 3台＋Truck 1台等の他車両の組合せを連続して追い抜くシーンを目視で確認し抽出し正解データとしました．

表　レーン別渋滞の検知精度評価

N=98

		アプリケーション出力	
		レーン別渋滞	非レーン別渋滞
目視	レーン別渋滞	TP（True Positive）：70	FN（False Negative）：8
	非レーン別渋滞	FP（False Positive）：8	TN（True Negative）：12

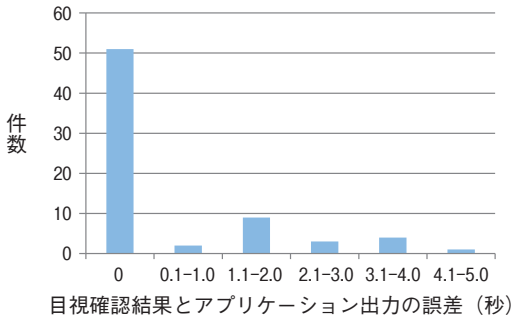


図 6　先頭車両の推定精度

⑵　精度評価内容

目視確認とアプリケーション出力の結果を比較した混同行列を**表**に示します．精度Precision（TP/(TP+FP)）は89.7%で，FPの主要因は「駐車場等の敷地内に停車している他車両の影響」が 3 件，FNの主要因は「対向車線のレーン別渋滞について，ガードレール等の陰に他車両が隠れてしまい物体検知ミスが発生した」が 4 件でした．またFP/FN双方に共通する要因として「物体検知漏れ」と「他車両の占有距離が固定値のため誤差が生じた」，「位置情報に誤差があり観測車両の移動距離が不正確」でした．

■先頭車両の推定精度評価

目視確認・アプリケーションの出力ともにレーン別渋滞だと判断したTP：70件のシーンについて追加評価を実施しました．目視確認とアプリケーションにおいて，観測車両が先頭車両を追い抜いたと判断したフレームを比較した誤差についてまとめた結果を**図 6** に示します．誤差の平均値は0.57秒，中央値は 0 秒，最大値は4.1秒という結果でした．各走行ルートは制限速度が時速50 kmのためCar1台を追い抜くのに要する時間は車間距離を考慮して約0.7秒となり，平均値0.57秒は許容範囲だと考えています．誤差が前後1.6秒以上となった14件について調査したところ「位置情報に誤差があり，観測車両の走行距離を誤認し処理を継続/中断」 9 件，「物体検知時のCarとTruckの誤認」 3 件が主な要因でした．

おわりに

単一のコネクティッドカーから収集可能な映像データと車速や位置情報からレーン別渋滞を検知し先頭・末尾車両を特定するレーン別渋滞検知技術を実現しました．また実証実験として，前方カメラ映像と位置情報から検知精度と先頭車両の推定精度を評価した結果を紹介しました．今後の課題は精度の向上と，レーン別渋滞の要因を特定する手法について検討していきます．

■参考文献

⑴　小山・柴田：“自動走行におけるダイナミックマップ整備，” システム制御情報学会解説記事，Vol.60, No.11, pp.463–468, 2016.
⑵　https://www.c-nexco-het.jp/tech/detail/0048.php
⑶　https://info.hitachi-ics.co.jp/product/gazoutraffics/
⑷　渡部・金澤・澤：“スマートフォンを活用したプローブ情報収集システムの開発，” 国土交通省技術研究会論文集，pp.221–226, 2013.
⑸　森・横畑・林・秦・尾花：“レーン別渋滞検知技術の提案とフィールド実験への適用評価，” 情報処理学会論文誌，Vol.63, No.1, pp. 163–171, 2022.
⑹　https://www.jartic.or.jp/s/attention/inquiry/#map 8
⑺　https://github.com/pjreddie/darknet

（上段左から）森　皓平／横畑　夕貴／林　亜紀
（下段左から）秦　崇洋／神谷　正人

今後普及が見込まれるコネクティッドカーは，道路交通上の状態を網羅的に計測する手段として有効です．今後はレーン別渋滞の検知精度向上にとどまらず，その他の事象も計測できるよう技術を拡充していく予定です．

◆問い合わせ先
NTTスマートデータサイエンスセンタ
TEL　03-6712-1954
FAX　03-6712-8372
E-mail　sdsc-mobi @ hco.ntt.co.jp

集計突発指標算出技術

林（はやし） 亜紀（あき）　横畑（よこはた） 夕貴（ゆき）
秦（はた） 崇洋（たかひろ）　森（もり） 皓平（こうへい）
神谷（かみや） 正人（まさと）
NTTスマートデータサイエンスセンタ

レーン別渋滞検知のユースケースにおいて，渋滞を検知する画像処理の計算量と通信量を削減するため，コネクティッドカーの台数を地図上に定めたメッシュごとに集計し，定常状態からの乖離度合いを定量化する「集計突発指標算出技術」を考案しました．本稿では，提案技術の概要や提供価値，今後の課題等を実証実験でのユースケース検証を踏まえて述べます．

レーン別渋滞検知における課題

NTTスマートデータサイエンスセンタでは，映像解析でレーン単位の渋滞（レーン別渋滞）を検知し，従来のサービスよりも高速・詳細に渋滞情報を通知することにより，高度な運転支援と交通流最適化をめざしています．レーン別渋滞の正確な発生位置と距離を特定するために，レーン別渋滞の隣接車線を走行するコネクティッドカーのドライブレコーダ映像をクラウドに収集して画像処理[(1)]を行います．この処理は映像データを収集する通信量と映像を解析する計算量が大きいという課題があります．そこで当センタでは，データ量の少ないCAN（Controller Area Network）データを用いて映像解析優先度の高い道路（メッシュ*）を少ない計算量で特定する「集計突発指標算出技術[(2)]」を考案し，収集する映像を厳選することでデータ収集の通信量と映像解析の計算量を抑制可能としました．

映像解析優先度の高い道路とは

交通量に変化が少ない場所や，交通渋滞が周期的に発生するなど交通量の予測が可能な場所における渋滞と比較して，予期せず突発的に発生するレーン別渋滞の方が新たな事故を誘発する可能性が高いため，高度な運転支援を提供する重要性が高いと考えました．

前者の渋滞とは，例えば朝夕のラッシュ時に混雑する幹線道路や，その右左折レーン，土日祝日に混雑する商業施設の入庫待ちなどです．これらの渋滞は，過去のデータに基づき予測可能であることに加え，渋滞が過去に発生した際の映像解析結果が蓄積されていると想定できるため，特にサーバの余剰リソースが少ない際には映像解析優先度が低いと考えます．

後者の突発的に発生するレーン別渋滞とは，例えば事故や故障などにより車線がふさがれ，交通容量が著しく低下して起こる渋滞，商業施設の新規開店などイベント起因で起こる渋滞や，コロナ禍によるドライブスルー特需など日常習慣の変化により起こる渋滞を指します．このような渋滞は過去のデータから予測困難であることから，映像解析により状況を把握する優先度が高いと考えます．突発的に発生するレーン別渋滞ほど優先度が高くなるように優先度付けを行うことにより，通信量と計算量を抑制します．

突発的な渋滞検出の課題と現状

突発的な渋滞を検出するための課題と現状を整理します．

まず，入手可能で，かつ計算量や通信量を抑えられる情報を入力データとする必要があります．提案技術ではコネクティッドカーからCANデータを収集し，メッシュ当りの走行車両台数情報を算出したものを入力データとします．このとき，コネクティッドカーの普及率が向上するまでは台数情報に関するデータの信頼性が低いこと，リアルタイム性を高めるため突発的な渋滞の検出に関する計算量を抑制する必

＊ メッシュ：地図上の特定の正方形領域．実証実験においては150 m四方の領域を想定．

要がある点が課題です．

次に，突発的な交通渋滞が発生した道路を特定するため，各時間帯における各メッシュの台数情報およびその時系列変化から定常的な台数情報（定常状態）を求めます．しかし定常状態は道路ごとに異なるという点以外にも，例えば曜日ごと，時間帯ごと，曜日と時間帯の組合せといったように周期的に変化する点も考慮が必要です．

集計突発指標算出技術について

CANデータを基にAxispot®[3]で集計したメッシュごとの台数情報を入力情報として，高速に突発的な渋滞が起きている場所を絞り込む技術として「集計突発指標算出技術」を考案しました．この技術では，定常状態と比較して台数情報が突発的に増加したタイミングを検出することが可能です．定常状態と比較した最新台数の増減の突発度合いを数値化し，「集計突発指標値（突発指標値）」と呼びます．

集計突発指標値計算の流れを**図1**に示します．提案技術では複数の周期性を考慮するために，全体，時間帯別，曜日別，曜日×時間帯別（これらを合わせて時間粒度と呼称）に集計した各メッシュの平均台数，台数の標準偏差，時間軸信頼度から各メッシュの定常状態（統計情報と呼称）を算出します．併せて，複数の時間粒度から求めた突発度合いのうち，どの時間粒度の結果を優先すべきかを決定するために時間軸信頼度を算出します．この時間軸信頼度は，コネクティッドカーの普及率が低く，車線数に対して過度に少ない台数情報しか集まっていない場合に低い値になるように設計されています．具体的には，しきい値以上の台数の集計値が得られた回数が十分であったかを基に算出します．最新の車両台数が入力されたときに，その台数が定常状態と比べて突発的に増えているかどうかを示す突発指標値を算出します．入力は最新の車両台数（メッシュ，時刻，台数）と，事前に算出した統計情報です．時間粒度別に最新の台数と統計情報を比較し，突発指標値SI_Tを計算します．ここで時間粒度別の突発指標値は図中にあるとおり，外れ値検定[4]でよく使われる方法で計算します．図中のC（t，m）は時刻tにおけるメッシュmを通過した車両台数，μ（T，t，m）は時間粒度Tにおける時刻t，メッシュmの台数の平均，σ（T，t，m）は同標準偏差です．SI_Tは最新の台数が平均台数よりも多ければ正の値，少なければ負の値をとります．また，分母の標準偏差が大きいほど小さい値をとります．台数のばらつきが少なく，いつも空いている場所に突発的に多くの車両が集まった際，指標値はもっとも大きい値になります．

次に，時間粒度別の突発指標値に時間軸信頼度を掛け合わせたものを，全時間粒度分足し合わせて最終的な出力となる突発指標値を算出します．この値が正の値の場合は，信頼度の高い時間粒度の多くで普段よりも台数が増えていることを示します．したがって，映像収集・処理を行うサーバの余剰リソースが十分にあれば図中の左側，中央のメッシュを採用し，余剰リソースがあまり多くない場合にはもっとも突発指標値が大きい左側のメッシュだけを採用するような活用が可能です．

従来，定常状態との乖離を見るため

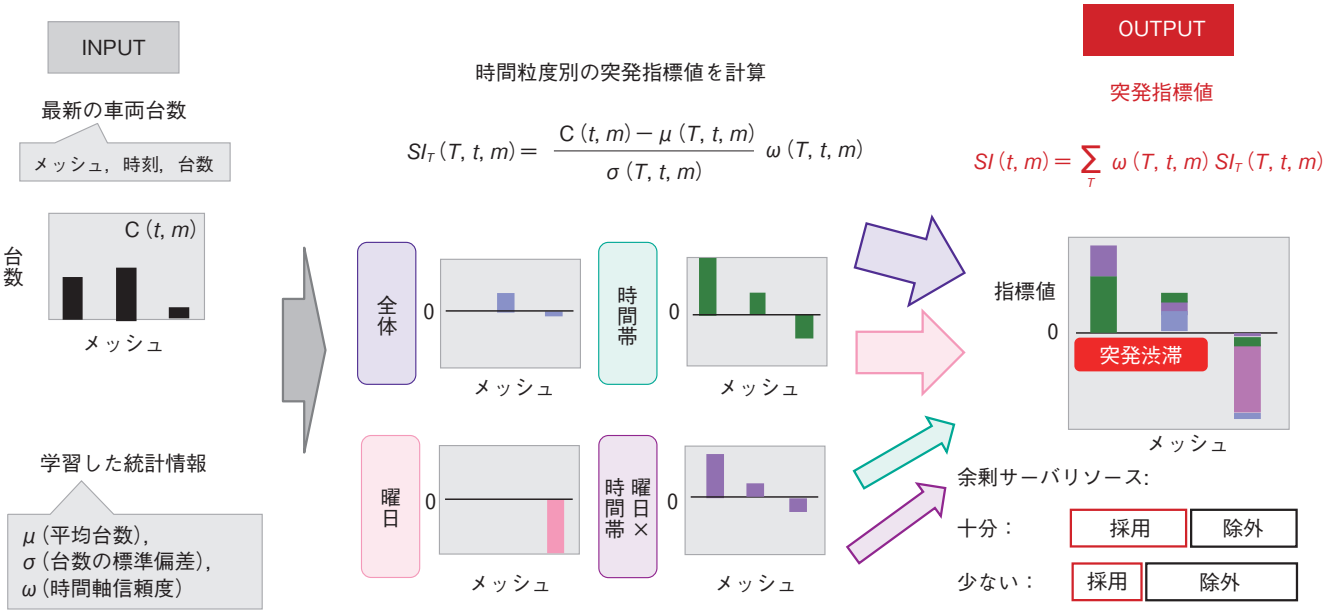


図1　突発指標値の計算方法

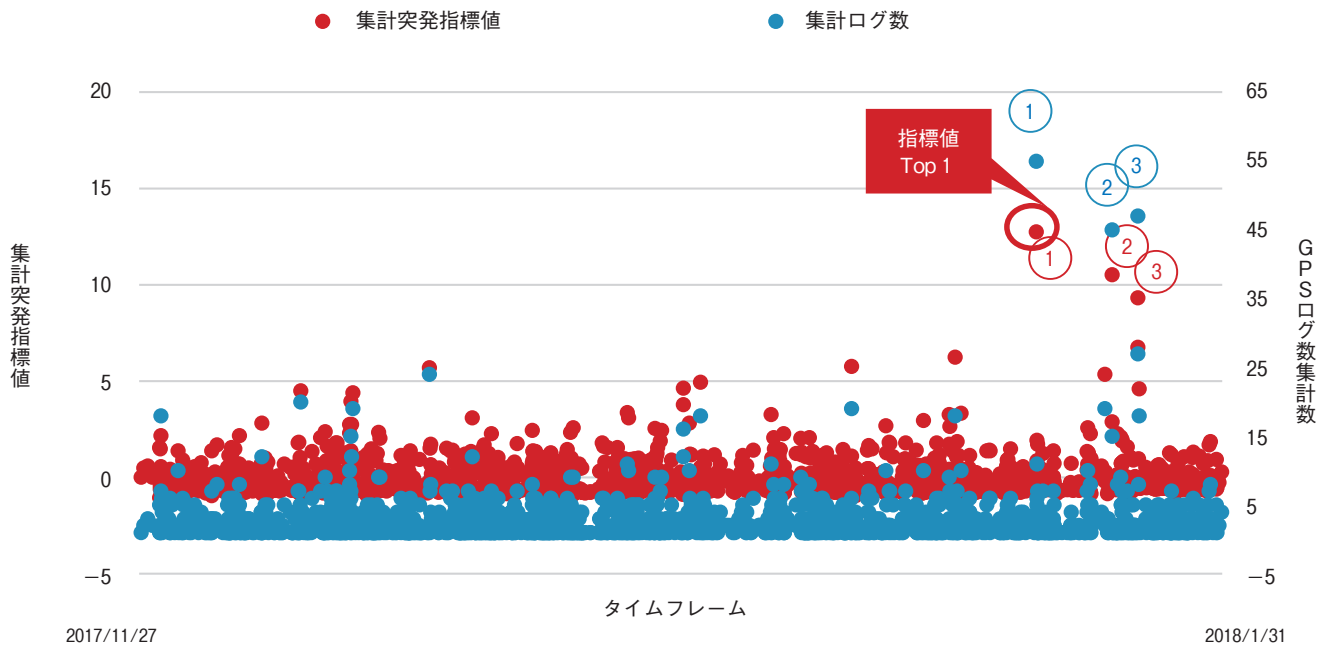


図 2　集計突発指標値の算出例

には，Auto Encoder[5]を用いるなど複雑なモデルを使って定常状態を学習する方法を採用することが一般的です．しかし，レーン別渋滞検知のユースケースでは映像を用いた渋滞検知の優先付けに要する計算量・計算時間をできる限り抑えるために，複数の集計時間粒度を用意し，集計粒度別に定常状態よりも台数が多いかどうかを数値化することにより，計算時間を最低限に抑えながらも，データの信頼性が低い場合の悪影響を最小限にとどめていることが特長です．

精度・性能評価

精度・性能を評価するため，10台分のタクシーで10秒ごとに取得したGPS（Global Positioning System）データを用いて，突発指標値を算出しました．コネクティッドカーが普及途中である現在において，実データで提案技術の評価を行うために，10分当りのGPSログ数の突発的な増加を見つける精度・性能の評価を行いました．渋滞が生じると，速度が落ち，単位時間当りのGPSログ数も多くなると考えられます．

使用したデータの概要は以下のとおりです．

・メッシュサイズ：110 m四方
・GPSログ数：275万7003
・メッシュ数：4万7146
・タイムフレーム数：9258
・集計数の全メッシュ合計：101万6024
・期間：2017/11/27-2018/01/31

もっとも高い突発指標値が出力された特定のメッシュにおける，集計突発指標の算出例を**図 2** に示します．赤色が集計突発指標値，青色がログ数です．青色のログ数が突発的に高い値を示した①の時点で，それまでと比べて急激にログ数が増加した際，提案技術による指標も赤色の①において高い値を示し，突発的な渋滞の検出に利用できることが分かります．その後，青色の②，③と繰り返し渋滞が発生した際には，提案技術の指標値②，③は減少を示します．このことから，繰り返し発生する同程度の渋滞は，この指標を利用すれば徐々に検知対象から外していくことができると分かります．

表　突発的な渋滞の採用率

集計のコスト削減効果（お台場）	集計のコスト削減効果（全体）	渋滞メッシュの抽出率（お台場）	突発的な渋滞の抽出率（お台場）	慢性的な渋滞の抽出率（お台場）
82.2%削減（1,187/1,444）	72.6%削減（344,019/473,723）	69.2%採用（9/13）	100%採用（7/7）	42.9%採用（3/7）

次に突発的な渋滞を突発指標が抽出できるかを評価しました．タクシーの映像から121個のレーン別渋滞を目視で検出，突発的かどうかラベリングし，突発的な渋滞を突発指標値で抽出できるか確認しました．タクシーの66日間のデータのうち，前半の33日間を学習データとし，後半の33日間に発生した渋滞14回のうち，突発的だった7回を抽出できているかを確認しました．結果を**表**に示します．突発指標値が0より大きい値を取った集計タイミングを

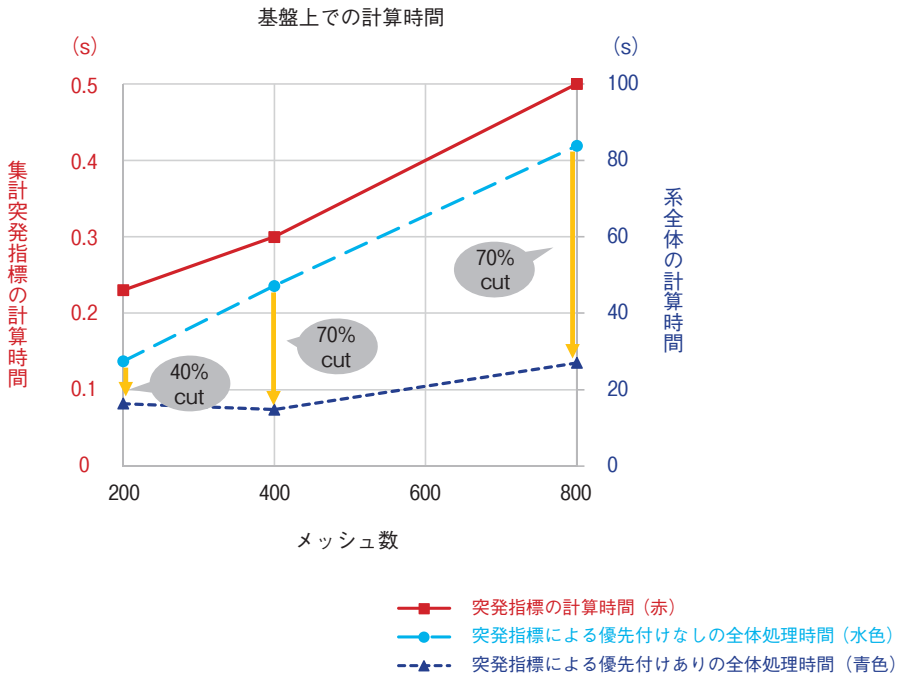


図 3　集計突発指標による基盤上での計算時間削減効果

突発渋滞発生タイミングとしたとき，実証実験を行ったお台場付近の集計のうち82.2%を削減しても，突発的な渋滞は100%抽出されました．一方で，今回のユースケースでは抽出対象としてふさわしくない，慢性的な渋滞は42.9%のみが抽出されました．

最後に，本特集でも紹介されている，実証実験に用いた基盤上に本技術を実装した場合の評価結果について述べます．**図 3** は集計突発指標による映像処理対象メッシュを80%削減した場合の計算時間の削減効果をメッシュ数別に示しています．メッシュ数が増えるほど計算時間効果の削減効果が多く，400メッシュ，800メッシュでは計算時間が70%抑えられることが分かりました．その一方で突発指標自体の計算にかかる時間は800メッシュの場合でも0.5秒と非常に高速であることが確認できました．

今後の展望

時系列データの突発的な増加を高速かつ少ない計算量で見つける集計突発指標算出技術を考案しました．今後は高速道路の渋滞情報を用いて，事故原因等による突発的な渋滞の検知や予測に応用していく予定です．

■参考文献

(1) 森・横畑・林・秦・尾花：“レーン別渋滞検知技術の提案とフィールド実験への適用評価，” 情報処理学会論文誌，Vol.63, No.1，pp.163–171，2022.

(2) A. Hayashi, Y. Yokohata, T. Hata, K. Mori, and K. Obana : “Prioritization of Lane-based Traffic Jam Detection for Automotive Navigation System utilizing Suddenness Index Calculation Method for Aggregated Values,” SICE2021, Tokyo, Japan, pp. 874-880, Sept. 2021,

(3) 花館・木村・沖・重松・上野・内藤・久保・宮原・磯村：“高速時空間データ管理技術「Axispot®」と 時空間データ高速検索技術，” NTT技術ジャーナル，Vol.31，No. 11，pp.18-22，2019.

(4) V. J. Hodge and J. Austin：“A Survey of Outlier Detection Methodologies,” Artificial Intelligence Review, Vol. 22, pp. 85-126, 2004.

(5) S. Nakatsuka, H. Aizawa, and K. Kato：“Defective products detection using adversarial AutoEncoder,” Proc. of IWAIT2019, Vol. 11049, Singapore, Jan. 2019.

（上段左から）林　亜紀/ 横畑　夕貴/ 森　皓平
（下段左から）秦　崇洋/ 神谷　正人

集計突発指標算出技術をレーン別渋滞検知技術と組み合わせて使うことで，よりタイムラグが少ないかたちで従来よりも詳細なレーン別の渋滞情報をユーザに届けることが可能になります．今後は渋滞の発見だけでなく，エネルギー消費が突発的に増える要因を発見して燃費改善に役立てるなど，コネクティッドカー協業への貢献をめざす予定です．

◆問い合わせ先
NTTスマートデータサイエンスセンタ
TEL　03-6712-1403
FAX　03-6712-8372
E-mail　sdsc-mobi @ hco.ntt.co.jp

挑戦する
研究者たち
CHALLENGERS

東中竜一郎

NTT人間情報研究所
NTTコミュニケーション科学基礎研究所
客員上席特別研究員

研究者は「やりたいことドリブンで何でも実行」．好奇心優先で，まずは何でもやってみる

スマートフォン上の音声エージェントやパーソナルロボットなどの対話ができるシステムの増加やディープラーニングの適用により，ここ数年で大きな進化を遂げた対話システム．人間とコンピュータが自然な対話インタラクションを行うための原理の解明をとおして，人間と分かり合い，知的協働を行う対話システムの実現をめざす東中竜一郎客員上席特別研究員，名古屋大学大学院情報学研究科教授に研究の進捗と研究者としての姿勢を伺いました．

共通基盤を追究し，人間とコンピュータが理解し合える世界を実現したい

約3年半ぶりのご登場ですね．現在，手掛けている研究から教えていただけますでしょうか．

前回，2018年はしゃべってコンシェルや自然対話システムを中心にお話しさせていただきましたが，この間に研究はさらに発展，拡張しています．前回と比較して，自然言語処理分野はディープラーニングによって急速に性能が向上し，できることがずいぶん増えました．例えば，自然言語処理モデルの1つであるBERT（Bidirectional Encoder Representations from Transformers）の登場は，ある種のパラダイムシフトを起こして言語処理の能力が飛躍的に向上しました．この数年間，こうしたディープラーニングに基づく自然言語処理技術の適用を進めています．

2019年には，「ロボットは東大に入れるか」プロジェクトにおいて，BERTに似た技術を用い，当時の最新技術によるAI（人工知能）が大学入試センター試験の英語筆記科目に挑戦した結果，185点（偏差値64.1）を獲得したことを報告しました．NTTからもプレスリリースを配信しました．

最近の成果「なりきりAIアマデウス紅莉栖」（**図1**）は，以前紹介した「あやせAI」と比べて対話における回答の精度が非常に上がっています．なりきりAIは，ユーザやファンに当該キャラクターの話し方等を記述してもらったものを学習データとしてキャラクターをつくるという非常にユニークな手法を取っています．約4万5000件のデータをいただき，ディープラーニングと組み合わせることで，とても精度の高いキャラクターをつくることができました．そして，2021年7月にTwitterのダイレクトメッセージ機能を使ってファンの方々とシステムとが対話できる機会を設けました．3日間という期間限定ではありましたが非常に好評で，中には会話を数百回もしてくださった方もいて，アンケートでは5段階中4.59の高い評価を得られました．このなりきりAIに関する論文は言語処理のトップ会議でも採録されたことから，学術的にも意義のある到達点になったと自負しています．ただ，キャラクターにそぐわない反応がみられたこともあり，この課題に対してユーザによるフィードバックを分析して改善をしている最中です．

コンピュータと人間の会話が進化しているのですね．会話を相互に理解し合えるレベルまで到達しているのでしょうか．

残念ながら，まだそのレベルにはありません．コンピュータと人間が理解し合ってコミュニケーションを図るには，共通基盤（common ground）を構築できるシステムが必要です．共通基盤とは，対話している者どうしが理解し合っている内容のことです．共通基盤が構築できるようになれば，理解を積み上げていくことができるため，システムと人間のコミュニケーションは飛躍的に進化し，対話システムと人間による協働が可能になると思います．共通基盤は10年，20年前の教科書にも載っている古くからある概念ですが，工学的に実現したり，システムに搭載したりすることはできていません．しかし，共通基盤を構築できなければ対話システムは先細りし，次世代のシステムは成り立たないと考え，これをテーマに追究していくことにしました．

共通基盤は心の中にあるものなので目に見えません．これが，共通基盤の研究を難しくしていました．そこで，共通基盤が構築されるプロセスを見える形にしようと，2名の作業者がそれぞれ自分の図形配置画面のみを見て，互いにテキストチャットにより対話をしながら図形配置を共同で決定していく，共同図形配置課題を設定し，この課題を行う人間どうしの対話データを大規模に収録しました[1]．この際，作業中の図形配置を常に記録し，図形配置間距離（任意の2図形間で定義されるベクトルの差の距離の総和）を測ることで共通基盤を定量化しました．すなわち，対話の各時点での共通基盤の構築度合いを可視化できるようにしたのです．このデータを分析することで，共通基盤の構築過程がいくつかのクラスタに分類されることが分かりました．この研究は言語処理学会年次大会にて発表し優秀賞を受賞しました（**図2**）．加えて，このデータを分析する過程で，共通基盤の構築には「名づけ」が重要な役割を果たすことも分かってきました．人間は，図形に名前を付け

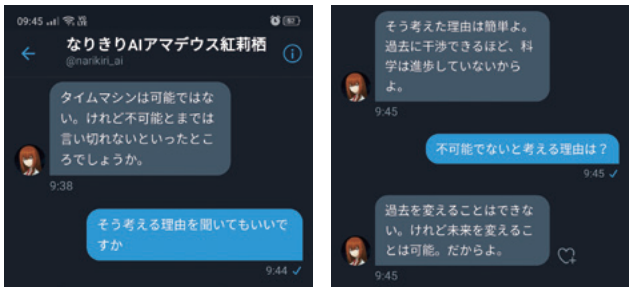


図1　なりきりAIアマデウス紅莉栖

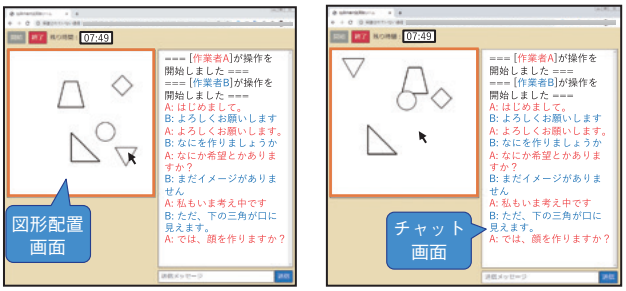


図2　共同図形配置課題

て，その認識を相手とすり合わせていくことで，共通基盤を構築しているようです[2]．

このほか，モダリティ（テキスト，音声，映像などの情報のチャネル）や社会的関係性が共通基盤の構築過程に与える影響を明らかにするために，テキストチャットで行われた共同図形配置課題の研究を拡張し，新たに音声や映像を用いたコーパス（自然言語等のデータを大規模に集積したもの）を構築・分析しています．その結果，音声のみの場合と音声および映像の場合を比較すると，映像が存在するほうが共通基盤構築を行いやすいことが分かりました．また，初対面条件よりも知り合い条件のほうが共通基盤構築を行いやすいことが分かりました．これは当たり前の結果だと思うかもしれません．ただ，条件によって共通基盤構築の過程にはそれぞれ違いがあり，この違いが重要な知見につながっていくのではないかと思っています．今後はモダリティ・社会的関係性が共通基盤構築に与える影響を分析していくことで，コンピュータと人間の間でスムーズな共通基盤構築ができる対話ロボットをつくりたいと考えています．

共通基盤の構築については，共通図形配置課題以外にも，タングラム（正方形を分割したピースを用いるパズル）の形について，対話をしながら名前を付けていくタングラム命名課題などに取り組んでおり，さまざまな角度から共通基盤にアプローチしていきたいと考えています．

先駆的存在として一気呵成に領域を広げていきたい

共通基盤の研究は盛んに行われているのでしょうか．

言語哲学的分野において，人間どうしがいかにして共通基盤を実現しているかを検討している研究者はいますが，工学的なアプローチは少なく，世界的にみればこの領域の研究者は数えるほどしかいません．私もアンテナを張って文献を見ているのですが，現状の関連研究はそれほど多くはありません．

そこで，AIと人間が共同作業できる未来に向けて，共通基盤構築の研究を，信念をもって一気呵成に進めています．共同研究も推進しており，例えば，先述のタングラム命名課題は静岡大学との共同研究です．認知科学を専門とする竹内勇剛先生と共同で進めています．また，先ほど紹介した「名づけ」の研究は，電気通信大学の南泰浩先生と一緒に手掛けています．南先生は音声処理のほかに，幼児の言語発達を研究されていますから，工学と言語発達を組み合わせて追究することができています．さらに，モダリティと社会的関係性については，慶應義塾大学との共同研究ですが，ソーシャル・ロボティクスの専門家である高汐一紀先生とともに挑んでいます．このように，さまざまな専門領域との掛け算をしながら研究を広げています．

共同研究も盛んに行うなど学術的にも社会的にも意義のある活動を展開しているのですね．

「これまで避けてきたところ」をしっかりやっていることに学術的意義があると思っています．対話システムに関する研究をする際，文字として見える，現象として表れている交わされる言葉のやり取りを分析するのは比較的簡単です．しかし，相手がその言葉を発するときに何を考えているかを分析するのは非常に難しく，評価もしづらいのです．この部分を可視化して研究の俎上に載せたいと取り組んだのが共同図形配置課題の研究です．研究も進展しており，商品の配置等をAIと一緒に考え，決めていけるようなシステムが実現する日は近いという手ごたえがあります．

現在，対話システムの研究領域はある種「踊り場」にあると思います．ディープラーニングにできることはまだ限定されていて，AIと会話ができるとはいってもそれはまだ短時間です．昨日のコミュニケーションを忘れてしまうようなシステムでは，AIとの知的協働は成立しません．長期的なコミュニケーションにより，その人のライフタイムにずっと寄り添うことができるように，AIを私たち人間にとってのパートナーに値する存在まで押し上げたいですね．

私は共通基盤を追究することで10年，20年後の人間社会

をより良いものにすることができると考えています．拙著『AIの雑談力』（角川新書）でも語っていますが，人間とコンピュータが双方向の関係性を築いて，お互いの理解を高め合える世界をつくっていけたらと思います．

専門領域を超えることを厭わない

今の時代の研究者に求められる資質について教えてください．

私がNTTに入社した2001年と比較して，今はクラウドソーシング等を利用して比較的安価に多くの実験ができるようになりました．研究者は恵まれた環境にいると思います．一方で，GAFA等の膨大な資源とヒューマンリソースを抱えている会社がどんどんと研究開発を進めて，新しいモノを世に送り出しています．研究環境が良くなることで，研究開発のテンポが速くなると同時に競争も激化しています．

こうした時代を生き抜くために，研究者には常に新しいことに挑むことが求められます．さらには社会へのインパクトや貢献も常に視野に入れて研究を進めることが必要です．そのために，自らの専門領域を越えることを厭わないことが大切だと考えています．他の領域の知見を持って臨まないと解けない問題も多くなっていますし，もはや「言語処理一筋」等と専門領域のみにこだわる時代ではありません．さらに多角的かつ，広い視野をも求められているでしょう．システムを構築する際には法整備なども念頭に置き，社会やユーザ等を複合的に検討しなければ，素晴らしい研究成果としてシステムを開発しても，それを普及させることはできません．

実は，対話システムは入社当時の私が望んでいたテーマではありません．言葉が好きでしたから翻訳を追究したかったのですが，配属された先のテーマが対話で，やってみたら面白くて20年も経ってしまいました．こんな経験から何事もやってみようの精神で取り組んでいます． 基本的に，依頼は断らないスタンスです．

若い研究者の皆さんに一言お願いします．

研究者は「やりたいことドリブンで何でも実行すること」だと思っています．上席特別研究員は，やりたいことをしっかりと持って取り組んでいる姿を見せることも役割の１つで，重要だと思っています．

新しいものに興味を持つこと，そして，自らの専門領域を超え多角的で広い視野を持つこと，食わず嫌いはせずに何事もやってみることが大事です．まずは，好奇心を優先して何でもやってみることから始めてみてはいかがでしょうか．若いころは１つの失敗ですべてが終わったと思ってしまうことがあります．私もNTT入社直後は，３年くらいでトップ会議に論文を通さなければ追い出されるのではないかという意識がとても強くありました．幸いにして指導者にも恵まれて何とかトップ会議に論文を通すことができましたが，それでも失敗はとても怖かったし，研究者失格の烙印を押されるかもしれないと思いました．

しかし，失敗を糧に次の展開へ進むこともできるので，安心して失敗してほしいと思います．勤続年数を分母，失敗を分子と考えれば，若いうちは分母が小さいですから，失敗のダメージはつらいかもしれませんが，分母が大きくなるにつれて失敗の受け止め方も変わってきます．

また，会社組織に属している以上，会社の方針や上司の指示に従わなくてはならないときもありますが，任務に注力するために自分のやりたいことを捨て去るのではなく，同じようなテーマを持つ研究者とコネクションを持つ，仲間とつながりを持つのは重要です．私の場合は学会のコミュニティにおけるつながりが，おおいに助けになりました．若いころから組織だけではなく，社外とも関係を築いていくとよいのではないでしょうか．

■参考文献

⑴ 光田・東中・大賀・杵渕：“共同図形配置課題における対話の共通基盤構築過程の分析，”言語処理学会第27回年次大会発表論文集，pp.1697-1701, 2021.
⑵ 齋藤・光田・東中・南：“対話での共通基盤構築過程における名付けの分析，”言語処理学会第28回年次大会発表論文集，pp.38-42, 2022.

挑戦する
研究開発者たち
CHALLENGERS

安藤智浩

NTTドコモ
移動機開発部　XRサービス開発
担当部長

つくったモノは使っていただいてナンボ．「これ，どう?」と，問い続けていきたい

5G（第5世代移動通信システム）時代における新たな付加価値の提供をめざし，XR領域での事業拡大に向けた取り組みを強化するNTTドコモ．ブランドスローガンを「あなたと世界を変えていく．」に変更し，スマートライフ事業の新規領域であるXR分野をさらに拡大，進化させています．リアルとデジタルがシームレスにつながるさまざまな体験を提供しようと奮闘する，XRサービス開発の安藤智浩担当部長に研究開発の概要と事業に寄せる熱意を伺いました．

“ポストスマホ”を彩るXRサービスを推進

現在手掛けている研究開発の概要を教えていただけますでしょうか．

XR（Cross Reality）サービスの開発を担当しています．XRとはVR（Virtual Reality），AR（Augmented Reality），MR（Mixed Reality）などの仮想世界，あるいは仮想世界と現実世界の組合せを，あたかも本物であるかのようにユーザの五感を刺激するようにつくり出し，現実・仮想世界に“入り込む”ことができる先端技術の総称で，さまざまな領域での活用が期待されています．XRがつくり出すリアルとバーチャルが融合する世界には，時間，空間，そしてフィジカルな制限がありません．さらに，居場所は制限されることはありませんし，欲しい能力も手に入れることができます．昨今メタバースというキーワードでさまざまなところで取り上げられていますが，NTTドコモでは，メタバースがブームとなるかなり前から，このXRが新たな生活インフラ，“ポストスマートフォン”として日常・非日常を問わず，さまざまなシーンでシームレスに利用される世界を実現すべく，仮想世界に“入り込む”VR，現実に仮想空間を“重ねる”“融合する”AR/MRに

関する技術開発に取り組んできました．

メタバースはどんどん身近になっているのですね．どのようなサービスに取り組んでいるのでしょうか．

ドコモでは，Magic Leap社に2019年に出資して，日本で唯一，MRデバイスであるMagic Leap 1を取り扱っています．それ以外にもさまざまな取り組みを行っており，NTT XRサイト（https://group.ntt/jp/nttxr/）に各種取り組みがまとまっていますので，是非ご覧ください．

これらに加え，現在，注力しているのがVirtual Event Platform（VEP）です．これは，バーチャル展示ソリューションで，2021年10月「NTT Communications Digital Forum 2021」，11月「NTT R&Dフォーラム2021」，2022年1月「docomo Open House'22」において，さまざまなデバイスを利用したバーチャル展示の体験をVEPにより自分のアバターを使って，NTTドコモの技術やソリューションを活用したさまざまなコンテンツの没入体験を楽しんでいただけるようにしました（**図1～3**）．そして，バーチャル展示ブースでは「ドコモAIエージェントAPI®」を活用したAIアバターによるガイド・FAQで応対し，オンラインのオープンハウスをお楽しみいただきました．

図1　docomo Open House '22でのVEP

図2　NTT R&Dフォーラム2021でのVEP

わずか半年の準備期間でVEPによるイベントを実現

これまでとは違うdocomo Open Houseの開催はやはり新型コロナウイルスの感染拡大が起因でしょうか．

確かにきっかけにはなりました．docomo Open Houseは毎年，年の初め1，2月に大きな会場を借りてR＆Dの成果等を紹介し，多くのお客さまにご来場いただいていました．ところが，2020年，ご存じのとおり新型コ

図3　NTT Communications Digital Forum 2021でのVEP

ロナウイルスのパンデミックによって日本でも緊急事態宣言が発出される等，現実世界で人を集めたイベントを実施すること自体が難しくなりました．そんな中「2021年のリアル開催は難しいのではないか」「バーチャルで何かできないだろうか」と社内でも声が上がっていました．

こうして迎えた2020年６月，VRを使ったコミュニケーションシステムの試作を行っていた私たちに，バーチャルによるdocomo Open House 2021の話が舞い込んできました．

一般的に，Webサイトや動画で技術を紹介するものはすでに提供されており，体験したことのある方もいらっしゃると思います．VEPではさらなる没入感のあるイベント体験をめざして，①顔写真１枚からオリジナルアバターを生成してイベント参加，②グループを組むことによる仮想３D空間のコミュニケーション（アバター同期，音声通話，テキストチャット等）およびアテンド機能の提供，③8KVR/VolumetricVideo/モーションキャプチャ等の技術を活用した新体感の視聴体験提供等の機能を提供するプラットフォームを開発することでバーチャル展示会開催に対応していくことにしました．

ベースとなる試作システムはあるとはいえ，半年の準備期間でどこまでできるのか，正直なところ自信はありませんでした．しかし，docomo Open Houseは万単位のお客さまにご来場いただける大きなイベントで，せっかくのチャンスだからと考え，準備期間は約半年という厳しい制約の中でアクセルを踏み，何とか開催にこぎつけることができました．

ものすごいスピードと推進力，実行力ですね．

今思い返すと，半年という短時間の間にできたのは奇跡のようにも感じます．何より，こうしたイベントは期日が決まっていますから，遅れるわけにはいきません．さらに，私たちだけで完結するものではなく，出展される方々によるコンテンツの準備をはじめ多くの方々がかかわるため，プロジェクトマネジメントの難しさもあります．したがって，開催期日よりも早い段階で，関係者に情報提供することで早めの準備をしてもらうことや，より完成度を高くするためのリハーサルへのご協力も仰がなければなりません．

実現できたのは一致団結した成果で，出展者や開発協力されたベンダ，NTTドコモの事務局，そしてプロジェクトメンバ等100名を超える皆さんのおかげだと思っており，大変感謝しています．

さて，今後に向けては誰がどこを訪問したかのログ等を収集・解析する機能や不特定多数が同じ空間に参加できる機能を開発し，さらに多くの方に使っていただけるプラットフォームにしていきたいと考えています．

また，NTTコミュニケーションズの法人営業とも連携を進めており，VEPを１日でも早くお客さまの元へお届けできるよう努力しています．

つくった機能は使っていただいてナンボ

研究開発者として課題を探すとき，意識していることをお聞かせください．

私たちの仕事が世の中にどんなインパクトを与えるかを常に意識しながら取り組んでいます．今の世の中は変化のスピードが速く，インターネットで誰でも瞬時に情報を入手できることからさらにそのスピードは加速しており，自分が考えたときには誰かがすでに手掛けていることもあります．アンテナを高くして，迅速かつ的確に情報収集を進める中で，常にお客さまの視点を意識することで，こうした変化に振り回されることのないように取り組んでいます．

私は自分をターゲット・ユーザに据えて，何に取り組むべきかを考えてきました．自分が使いたいと思えないようなものを，他人に使ってもらうなんてあり得ないと思うか

らです．こうした考えは入社５年目ごろ，ｉモードの携帯電話の商品企画を担当するようになってからです．携帯電話が世の中に普及していく中で，まさにお客さまが欲しいと思えるような端末でなければ，この流れに取り残されてしまうのは明白です．自身も携帯電話の１ユーザであり，ターゲット・ユーザを自分に据えて，開発者としてではなく利用者として一般的な感覚に近づけていくことで，社会とのズレが生じないよう心掛けてきました．

こういった姿勢により，さまざまなサービス・機能を世の中に出すことができました．FOMA時代には文字だけではなく，自分の気持ちを十分に伝えられたらという発想からｉモードのデコメールを開発しました．また，地震等を知らせるエリアメールの機能も担当しましたが，検討当初はユーザが認識していない中で勝手に通知音がなると驚かせてしまうから，という理由でデフォルトは通知オフの設定だったのですが，いざという時に通知されないのではせっかくの機能も意味を成しませんので，デフォルト設定をオンに変更しました．私はお客さまの目線で使っていただけるモノをつくること，そしてつくった機能は使っていただいてナンボだと思っており，その考えは今も大切にしています．

最近では，NTTドコモのAndroid端末にプリインストールで搭載していたメディアプレイヤーのアプリ開発を担当しましたが，スマートフォンではサービスとプレイヤーがセットになって提供されているケースが多く，プレイヤー単体アプリであるメディアプレイヤーアプリはあまり使われなくなっていました．そこで，コアとなる再生部分の技術だけを切り出してライブラリ化し，さまざまなサービスに提供するかたちに変更し，今ではdTVをはじめとするさまざまなサービスに使われるようになりました．自分たちの技術がどうしたらお客さまに使っていただけるのか，お客さまの立場で再検討し，提供形態を変えるという発想の転換からこの実績のある技術の再生につなげることができました．

こうした経験を活かし，インターネットからの情報収集や，さまざまな方々との交流等を通して，今後も一般的な利用者の感覚は追究していきたいと思っています．ただ，コロナ禍にあって人と直接会うのは難しくなりましたが，一方で，オンラインで簡単につながって，これまでよりも物理的な距離を感じさせないような新たな交流もできるようになりました．今後はオンラインとオフラインのハイブリッドで，ちょうどいい配分を模索しようと思っています．

研究開発者とはどんな存在でしょうか．最後に後進にもエールを送ってください．

研究開発者は皆に夢を与える存在だと思います．誰かがつくり出したものに対して良い，悪いと評論するのは簡単ですが，研究開発者として自ら何かをつくり出して「これ，どう？」と世の中に問い続けていきたいですね．

これまでの道のりを振り返って，私はやりたいことをテーマにしてきたと思います．若い方々にも同様にやりたいことをテーマにしてほしいと思います．そのためには，やりたいと思える，その気持ちを持ち続けるための努力が必要です．例えば，いろいろなことを調べたり，趣味を追求したりと，こだわりを持って取り組むことです．そうするうちに「実現したい」という熱い思いが湧いてきます．その湧いてくる何かを見つけほしいですし，私もそんな思いを応援していきたいのです．

幸いにも私自身，さまざまなことに取り組ませていただいて，世の中にいくつかインパクトを与えることができたと自負しています．それでも，さらに大きく世界を変えられることがあるのではないだろうかとも思っています．社会においてもNTTドコモの存在感を高めて，できればグローバルで主役に躍り出るような取り組みをしていきたいと考えています．

明日のトップランナー

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

金子卓弘 特別研究員

二次元画像から三次元情報を推定
AR-GANで「三次元世界を理解する」コンピュータの実現へ

ヒトは写真を見れば，これまでに培った経験や知識などから奥行きなどを推定することができますが，コンピュータにとっては容易なことではありません．今回は，無作為に収集した一般的な画像から三次元情報を学習可能な深層学習モデルを構築した金子卓弘特別研究員にお話をお聞きしました．

◆PROFILE：2014年東京大学大学院修士課程修了．同年，日本電信電話株式会社に入社，NTTコミュニケーション科学基礎研究所に所属．2020年東京大学大学院博士課程修了．博士（情報理工学）．2020年よりNTTコミュニケーション科学基礎研究所特別研究員．画像生成，音声合成，音声変換を対象としたコンピュータビジョン，信号処理，機械学習，深層学習の研究に従事．日本機械学会畠山賞，ICPR Best Student Paper Award，音声研究会研究奨励賞，東京大学大学院研究科長賞等を各受賞．
詳細はこちら：https://www.kecl.ntt.co.jp/people/kaneko.takuhiro/

AR-GANによる奥行きとボケ効果の学習

◆「一般的な画像から奥行きとボケ効果を学習する」とはどのような研究なのでしょうか．

私たちの生活している三次元世界をそのまま記録することは困難です．そのため三次元情報の代わりに写真などの二次元画像を記録・保存することがよく行われています．

ヒトは写真を見れば，これまでの経験や知識などから奥行きなどの三次元情報を推定することができますが，コンピュータにはそうした経験や知識がないため，写真から三次元情報を推定することは簡単なことではありません．今後，ロボットが私たちの生活をサポートするような場面を考えたとき，コンピュータが三次元情報を理解することは必要不可欠となります．コンピュータにとってもっとも学習しやすい方法は，学習データとして二次元画像と三次元情報のペアを大量に与えることです．正解が分かっているので学習も容易といえます．しかし，この方法では測距センサや2つのカメラを搭載したステレオカメラなどの特殊な機器が必要となり，コストもかかります．

そのため，本研究では普通のカメラで撮影した身近な画像や，Web上で見かけるようなごく一般的な画像から三次元情報を学習可能な深層学習モデルを構築しました．撮影した写真を見ると，対象物にはピントが合っていて，背景はボケていることが多いと思います．この「ボケ効果」を手掛かりとして，三次元情報，なかでも特に奥行き情報や，どんなボケ効果が付いているかなどを学習します．言い換えれば，三次元情報をカメラを通して二次元画像に射影する問題を順問題とすると，本研究は，いろいろな情報が欠落している二次元画像のみから三次元情報を推定するという逆問題，いわゆる「不良設定問題」を解こうという取り組みです．

◆具体的にはどのような仕組みで学習が行われているのでしょうか．

本研究はGAN（Generative Adversarial Network：敵対的生成ネットワーク）と呼ばれる技術に基づいています．GANは正解があらかじめ決められていない，いわゆる「教師なし学習」の一種で，生成器と識別器の2つのニューラルネットワークで構成されています．生成器は乱数を使用していわば「偽物の画像」を生成する働きを持ちます．一方，識別器は「本物の画像」と生成器が生成した「偽物の画像」の2種類を使用し，本物か偽物かを見分ける働きを持ちます．生成器はなんとか識別器をだまそうとし，識別器はなんとか正確に識別しようと敵対するため，競争しながら学習を進められ，結果として生成器はリアリティのある画像を生成できるようになるという仕組みです．

GANは二次元の画像を生成することに特化した技術ですので，三次元世界との結びつきは持ちません．そこで，GANにカメラの光学的な性質を組み込んだ「AR-GAN（Aperture Rendering GAN）」を提案しました．「Aperture」は日本語で

はカメラの「絞り」にあたります．カメラが三次元世界を二次元画像に射影する際の絞りによる光学的な制約を組み込むことで，生成器は二次元画像，奥行き情報，ボケ効果の３つを関連付けながら学習することができます．

図はAR-GANの生成器における処理の流れを示したものです．「画像生成器」はGANにも含まれるもので，乱数が与えられると画像を生成します．一方，奥行き生成器は画像と対になる奥行き情報を生成するもので，AR-GAN独自のものです．続いて生成されたこれらの一対のデータを使用してカメラの絞りを模擬した機構を実現します．光線場は25枚の画像で構成されており，カメラの絞りの中にどのような画像が映っているかを表しています．中央には絞りの中心を通って入ってきた光による画像を表しています．中央から右にずれたところには絞りの右部から対象物を見た画像，上にずれたところには絞りの上部から対象物を見た画像が表示されます．

この機構は顔を上下左右に動かしながら目の前にある対象物を見るときをイメージしていただくと分かりやすいかもしれません．ピントが合っている対象物は顔を動かしても同じ位置にあり動かないため鮮明に写りますが，それより遠くにあるものは顔を動かすと大きく動きます．そのためこれらの画像を足し合わせるとボケのある画像が生成されるわけです．このようにしてカメラの絞りの違いによる写り方の違いを表現する機構となっています．

◆現在までの研究の進捗と課題について教えてください．

現在は花画像，鳥画像，ヒトの顔の画像などが実際に生成できるようになっています．学習には数日かかりますが，学習が完了していれば数秒程度で本物の画像と区別ができないようなレベルのボケのある画像を生成することができます．現時点では対象の種類を絞れば生成できそうだ，という感触を持っています．

課題としては，画像の種類により学習しやすいものと学習しにくいものがあることがあげられます．例えばヒトの顔画像の場合，パーツの形状や位置がある程度決まっているため学習しやすく，学習しにくいものとしてはさまざまな視点や距離で撮影した動物の画像などバリエーションの多いものがあげられます．

また，画像サイズが大きくなればなるほど，より細部まで表現する必要があるため，処理時間が増加し，また，学習も難しくなります．今後適用範囲を広げていくにあたり，いろいろな課題が出てくるのではないかと思います．やはり不良設定問題特有の難しさを感じますね．

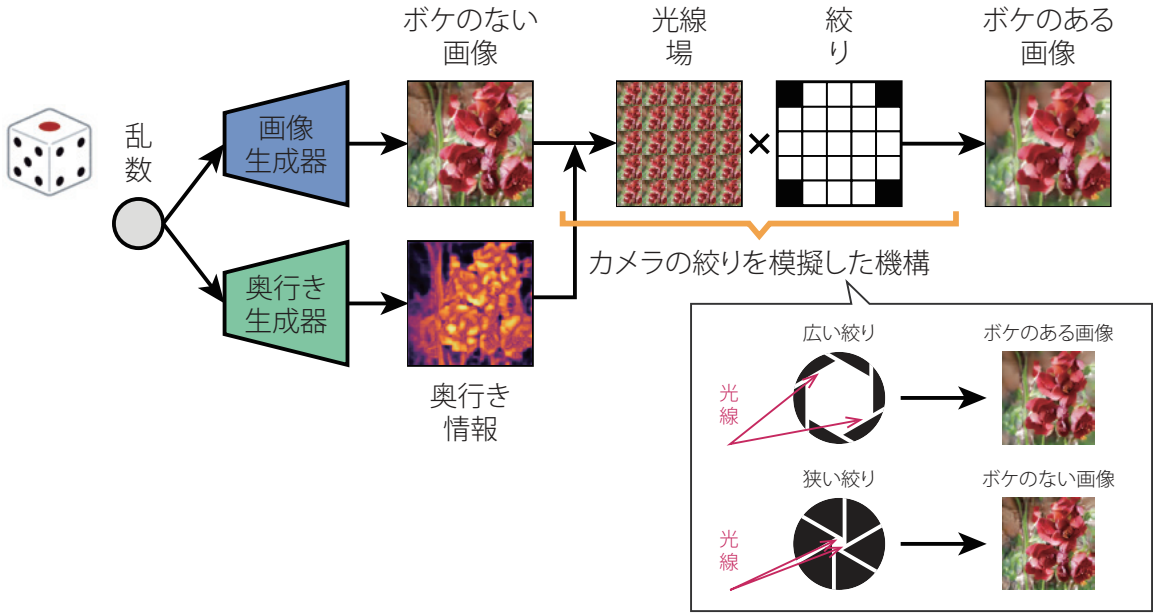


図　AR-GANの生成器における処理の流れ

三次元世界を理解するコンピュータを実現

◆本技術により，将来どのようなことが可能となるのでしょうか．

私たち研究者のミッションとして，「ヒトと親和性の高いコンピュータの実現」があります．そのために三次元情報の理解は必要不可欠だと思いますが，より幅広い分野に応用するためにはデータ収集コストが障壁になりそうです．その点で，データ収集に優れた本研究は有益ではないでしょうか．将来的には三次元世界を自由に動き回れるロボットを実現したり，仮想空間上に違和感のない三次元世界を構築したり，仮想空間で三次元物体を制作するツールを開発したりなどの活用が見込めます．

また，二次元画像さえ集めればそれにフィットしたモデルを構築できるということも利点です．例えば高名な写真家が撮影した写真を集めれば，その写真家特有のボケ効果を学習したモデルを構築できます．現在はSNSなど画像を使ったコミュニケーションが活発に行われています．ボケ効果を手軽に利用できるようになれば，より「映える」写真も簡単につくれるようになるかもしれません．

特にロボティクス分野，コンテンツ生成分野，エンタテインメント分野の３分野に対してはかなり有用だと思います．

◆今後の展開，他分野とのコラボレーションについて教えてください．

基礎研究なので，現時点では実用化に向けた具体的な目標を設定することは難しいですが，今後も高精度化，高解像度化などで性能を向上させていくということは考えています．今回はカメラの絞りでしたが，物理的な制約を入れることでより信頼性の高いコンピュータが創り出せるという点は面白いですね．

（今回はリモートにてインタビューを実施しました）

IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想の主要技術分野の1つに，多様な産業やモノとヒトのデジタルツインを自在に掛け合わせて演算を行う「デジタルツインコンピューティング（DTC）」があります．実世界と仮想世界とを融合させるにはコンピュータが実世界をしっかりと理解できることが必要となりますので，そういった分野にも寄与できるかなと考えています．

私が手掛けるメディア生成技術という分野については，技術の成熟に伴ってさまざまな分野との融合が重要度を増していると感じています．現在はコンピュータビジョンや機械学習などのコンピュータ科学と，光学などの物理学を組み合わせた研究をしていますが，今後は画像作成に関してはコンピュータグラフィックス分野，写真撮影に関してはフォトニクス分野など，異分野の方との交流や異分野の導入にも力を入れていきたいと思います．

◆若手研究者，および将来のビジネスパートナー様に向けてメッセージをお願いいたします．

NTT研究所では基礎研究から応用まで広範囲に研究しており，特に，私の所属するNTTコミュニケーション科学基礎研究所では，ヒトとヒト，ヒトと機械のコミュニケーションをいかに良くしていくかという研究を行っています．これまでは基礎研究にとどまることも多かったのですが，最近では基礎研究と応用研究の距離が縮まってきており，現実的な問題を考えながら研究に取り組む側面が増加していると感じています．国際会議で発表された技術がアプリケーションに搭載されたり，Web上のサービスとして展開されたりというケースも増えてきました．数式をいじって終わりではなく，例えば実際に声を変換するソリューションを創り出すなど，アウトプットが見えるかたちとなる点は面白いのではないでしょうか．

個人での研究には限界があります．当研究所では大学との共同研究やインターンシップ生の受入れなども活発に行っていますので，特に何かをつくりたい，何かを変えたいと思っている学生の皆さんや若手研究者の皆さんとは今後も積極的にコラボレーションしていきたいな，と思っています．

ビジネスパートナーの皆さんに関しても，研究者発信で面白いものができたから是非サービスに結び付けてほしいとお願いすることもありますし，逆に実問題に造詣が深いサービス分野の方からフィードバックをいただいて研究のアイデアを得ることもありますので，今後も活発に交流していきたいと考えています．

株式会社地域創生Coデザイン研究所

https://codips.jp/

地域創生Coデザイン研究所

持続可能な地域社会への変革をめざして持続可能な地域創生活動を支援

地域創生Coデザイン研究所は，地域課題解決に向け，複数の地域課題を連携させた重層的な課題解決のシナリオを構築し，コンサルティングやデジタルデータの利活用などの提供を通じて地域社会の持続可能かつ自立的な成長を促すことで，社会的価値であるウェルビーイング向上と事業としての経済的価値の創出をめざしている．その思いを木上秀則所長に伺った．

地域創生Coデザイン研究所　木上秀則所長

地域社会の持続可能かつ自立的な成長を促すことで，ウェルビーイング向上と経済的価値をめざす

◆設立の背景と目的，事業概要について教えてください．

NTT西日本の営業エリア＊1である西日本各地の多くの自治体の首長や地元財界の皆様は，短期散発的な施策だけでは解決ができないような深刻な社会課題に対して中長期で総合的に何をすべきかを悩んでおり，またそれを民間も含めたパートナーシップにより広く連携して解決に導くことに日々苦心されていると感じています．NTT西日本グループは，これらの社会的な要請にこたえていくため，地域のデジタル化やスマート化に資するサービスラインアップである「スマート10x」＊2を充実させていくとともに，地域の皆様との共創による社会課題解決をより強力に推進していくために，NTT西日本グループの中期事業ビジョンの重点テーマとして，「地域創生推進活動（ビタミン活動：ビタ活）」を展開しています．

そして，ビタ活を専門的かつ具体的に支援していくため，消費者・住民目線の本質的な社会的価値であるウェルビーイングと事業としての経済的価値の両輪を高めていく仕掛けとして，①地域創生Coデザイン研究所（Coデザ研）を2021年7月1日に設立し，②ケイパビリティを強化する地域創生推進コンソーシアム＊3の発足，③地域創生のための専用資金＊4の確保をセットとして活動を開始しました．

Coデザ研は，西日本エリアのすべての地域においてビタ活のさらなる加速を図るとともに，NTT西日本グループの各社・各部，パートナー企業・研究機関の知見やツールを総動員し，自治体や地元企業・組織，その連携体など地域社会が主体となるいわゆる地域創生活動の支援やコンサルティングサービスを提供しています．あらかじめ用意されたサービスや特定のソリューションを提供するといった従前のアプローチとは異なり，コンサルティングやデジタルデータ利活用などを通じて地域社会の持続可能かつ自立的な成長を促していきます．

◆地域創生，地域活性化といった言葉をよく見かけますが，Coデザ研の活動の特長を教えてください．

地域創生活動の多くの場合は，自治体などが中心となり地域の課題解決のためのソリューションがテーマ別に提供・運用されるパターンです．ここで対象となる課題に

＊1　NTT西日本管内の全30府県をさします（富山県，石川県，福井県，岐阜県，静岡県，愛知県，三重県，滋賀県，京都府，大阪府，兵庫県，奈良県，和歌山県，鳥取県，島根県，岡山県，広島県，山口県，徳島県，香川県，愛媛県，高知県，福岡県，佐賀県，長崎県，熊本県，大分県，宮崎県，鹿児島県，沖縄県）．

＊2　スマート10x：地域のデジタル化やスマート化に資するNTT西日本グループ各社のサービスラインアップの総称．https://www.ntt-west.co.jp/business/smart10x/

＊3　地域創生推進コンソーシアム：地域社会・住民のウェルビーイング向上への貢献を目的として，NTT西日本，パソナグループ，事業構想大学院大学，NTT社会情報研究所，Coデザ研にて2021年7月に「地域創生推進コンソーシアム協定」を締結（なお，本コンソーシアムは，民法上の組合の組成を意図するものではありません）．

＊4　地域創生のための専用資金：金額規模100億円，活用期間5年間（2021年度～2025年度），活用目的はCoデザ研の活動資金の拠出（設立資金）および地域民民・公民共創の活動資金の拠出（地域パートナーとの共同事業会社設立資金など）．

対しては，個別専門的にサポートする民間事業者も多く存在しますが，得意分野や自社商材起点での活動に傾斜する傾向があるのではと思います．また，自治体の予算や政府の補助金に依存することが多く，期間や金額の制限によって活動が影響されることになったり，運用フェーズにおいても中心人物の属人的な活動に依存したりしている例も少なくないかもしれません．

一般的に，プロジェクトを持続的に，かつ有意に推進していくためには，課題探索～シナリオ構想～実行計画策定～シナリオ検証～社会実装のサイクルがうまく機能して，エコシステムとして循環していくことが大事だといわれていますが，これは地域創生においても同様です．例えば，課題探索ひとつとっても，行政視点や企業視点だけでなく，真に住民や地元企業の視点で課題設定できているかなど疑問に感じるところもあります．よそ者による机上の議論でなく，その地域の方々，さらに，少数意見の中にも大事なことがあり，それに目を向けているかという点も重要になります．また，進行するさまざまな課題に対して，長期的かつ複数の課題を連携させた重層的なシナリオを軸に，打ち手をそろえることも大切だと思っています．

これは，まさにCoデザ研がめざしているところであり，地域住民をはじめとした参画者１人ひとりがエコシステムを構成する一員となり，自分事として課題探索から社会実装まで関与してエコシステムを循環させる結果として，ウェルビーイングを享受でき，持続可能な活動となり得ると考えます．

地元のパートナーが主人公．自立的・継続的活動をサポート

◆具体的にどのように活動しているのでしょうか．また，具体的事例紹介をお願いします．

NTT西日本エリア30府県*[1]で地域のビタ活を推進しているリード役は，全県に配置しているNTT西日本の各支店長であり，地元の視点でそこに腰を据えて取り組める素地があると思っています．私たちは，NTT西日本の30支店長が取り組む多くの事例から培った経験・知見をベースに，地元の多くのパートナーの皆様との地元協議の場などを通した，課題探索から始まる課題解決のサイクルを，トータルでサポートさせていただきます．また，社会課題解決に役立つ「スマート10x」をはじめとする，最新のICTサービスを提供できる体制をNTT西日本グループとして整えると同時に，私たちだけでは不足する事業構想力，地域への人材の提供，住民目線での課題探索の知見・ノウハウを「地域創生推進コンソーシアム」の仕組みを活用することで，より効果的な活動ができる体制を構築しています．また，2022年３月には「全国リビングラボネットワーク会議」*[5]の共同主催者にもなり，福岡県大牟田市での先行事例を，Coデザ研のめざす社会像の実現につなげていく活動も行っています．

具体的事例としては，九州での林業DX（デジタルトランスフォーメーション）を軸とした自然資本循環の取り組み，市街地活性化に向けた公共交通網の再構築，四国での地元への人材回帰や地場企業への定着支援などがあります．ほかにも，地場農産物の安定栽培やブランド化，食品残渣を活かした資源循環型社会創造，エネルギー資源に関する課題解決や企業横断的な人材マッチングプラットフォーム事業などにも取り組んでいるところです．

◆今後の展望についてお聞かせください．

多くの取り組みを類型化して知見として蓄積できる部分も大いにあると感じます．これらの事例は実は多くの地域に共通する解決策となり得るものであり，広く地域横断で展開するアプローチを確立していくことでこの取り組みを加速したいと考えています．また，地域に根差した共創拠点を複数設置し，より地元の文化や風土，歴史を尊重した課題解決に取り組む環境を整えていく予定です．また，地域で主体となり活動される皆様に対し，私たちが得た経験や知見を広く提供し，その活動を支援することをめざして，「地域創生Coデザインカレッジ（仮称）」*[6]を創設します．そして，この施策を通じて，地域で活動される皆様相互間の情報交流のお役に立てるような仕組みもつくっていきたいと考えています．

NTT西日本グループのサービス，有形無形の資産，先進技術やスキル，信頼や組織力など豊富な経営資源を最大限活用しながら，Coデザ研自身の課題解決力をさらに磨き，地域におけるウェルビーイング向上をめざし，より一層努力していきたいと思います．

＊5　全国リビングラボネットワーク会議：日本各地で協働・共創に取り組む関係者が一堂に会し，協働・共創の仕組みであるリビングラボについての知見交流やネットワーキングの機会として2018年よりこれまでに４回開催．

＊6　地域創生Coデザインカレッジ（仮称）：地域の課題感を持つ地域主体者（自治体職員，商工会議所，NPOなど）に対して，地域創生推進コンソーシアム各社のノウハウを提供し，地域創生の①実践力研鑽（共学），②実践・活性化（共創），③つながり（共鳴）を実現するための学びの場．今秋開講予定（プレオープン講座を夏開講に向け準備中）．

パートナーが主役でウェルビーイングを追求

主任研究員
チーフCoクリエイター
半田 兼一さん

◆担当されている業務について教えてください．

Coデザ研の役割の１つとして，NTT西日本の各支店が進めるビタ活のさらなる推進をサポートすることが挙げられますが，そのためにはCoデザ研自身に地域創生に関するノウハウを蓄積し，展開していく仕掛けが必要です．その仕組み構築の一環として，Coデザ研自身が直接地域に入り，共創活動をノウハウとして体系化することを実践しています．各支店が顔となって地域に展開していたこれまでの活動とは異なり，Coデザ研が顔となり地域で活動を進めるものです．

共創活動の最初のフェーズである「課題探索」の入り口として，地域の居住者，自治体，企業などとの対話を行うのですが，NTTという名称を見た瞬間に，何かを提供してくれることを期待され，地域の一員ではなく，業者とお客さまという主従関係になってしまい，そこから先に話が進まなくなってしまいます．共創活動を進めていくためには，すべてのステークホルダーとパートナーの関係を築き，対話しながら課題を探索することは必須であり，こうした入り口の壁を乗り越えて，共創パートナーになるためのノウハウ・知見を支店に提供するとともに自らも蓄積しています．また，多様な地域課題を解くには，個々の課題に対処するだけではなく，それらを連鎖的に解決していくシナリオとしてまとめたうえで俯瞰的にアプローチしていく必要があると考えています．そして，シナリオの具現化にあたり必要となるソリューション・サービスとして，「スマート10x」を適用していくことになりますが，一方的にサービスを当て込んでいくのではなく，地域からはこういったサービスが必要だという住民目線をスマート10xにフィードバックしていき，地域と一体となり具現化を進めていくことが重要です．

具体的には，４カ月ほど前から兵庫県北部の鳥取県との県境にある新温泉町に足しげく通いながら活動を始めました．新温泉町はワーケーション施策を軸に地域外の人や企業をつなぐ活動を展開されていますが，施策が終わるとその後の関係性が継続されないという課題意識を持たれており，Coデザ研の活動を理解していただけたところが出発点で，長期的なお付き合いをめざしています．町は南北に長く，海に面した北部と山側の南部の間では，コミュニティの成り立ちや産業の違いから探索される課題の傾向も異なっている中，シナリオをまとめています．

◆ご苦労されている点や課題を伺えますか．

地域創生というと，どうしても自治体の予算や国の補助金活用，ビジネスとしての収益性などの経済的価値に目がいきがちになります．地域創生活動の継続性を考えるうえでは，こうした経済的価値も重要ではあります．ただ，その部分にばかり目がいくと，取り組みやすい課題のみを取り上げ，一過性のソリューションを提供することに終わるケースも生じがちです．私たちがめざしているのは，経済的価値もさることながら，それと同等かそれ以上に「ウェルビーイング」を継続的に追求していくことです．

そのためには関係者それぞれが，パートナーとしてお互いに尊重し合い，自分事として責任感を持って継続的に活動に取り組んでいくことは必須です．初期段階では，どうしても誰かがやってくれるという意識が強いため，パートナーの関係を築くことに時間と労力を要します．こうした意識を変えていくにあたって，まずは自分たちが変わらなければならないと考え，NTTグループの営業でよく使う「お客さま」という言葉から「パートナー」に呼称を変え，パートナーと対面で対話を繰り返す，といったトライ＆エラーにより少しずつ変えてきているところです．そして，フラっとパートナーのところに立ち寄って，お互いに悩みや課題などを話し合えるような関係になることをめざしています．こうして得た経験や知見を蓄積していくことで，継続的な活動の展開はもとより，他地域や次の活動に活かしていくことができると考えています．

◆今後の展望について教えてください．

パートナーとの対話で，１人ひとりの顔が見えた状態で課題感を聞いて，それにどう対応していくのか，パートナーがそれにどうかかわるのか，というところまで踏み込んだ関係性が構築されつつあります．次のステップとして，こうした意見を私たちがシナリオとしてまとめ上げ，パートナーそれぞれの役割を明確にしながら，具体的なアクションに落としていき，それが継続的に繰り返される仕組みづくりを行います．

活動を通じて，いろいろな分野で思いを持って活動をされている方々の存在が見えてきていますが，地域創生を継続的に進めるためにはこうした地域の主体者を増やしていく必要があります．そこで，地域の開かれた場として地域の主体者を含む住民と，自治体，企業といったパートナー

の方がつながり，共創できるような場をつくりたいと思っています．小さなまちというと，こうした取り組みがなくとも皆がすでにつながっているように錯覚します．しかし，実際には地域内の特定の狭いコミュニティ内でしかつながれていないということも見えてきました．こうした地域に開かれた場をつくることで，地域内での多様なコミュニケーション・つながりの活性化，さらには地域に思いを持つ方々の価値観や行動が地域全体に連鎖・伝播することで，まち全体が躍動することを実現したいと考えています．

Coデザ研がめざす新しい地域創生のアプローチ

未来の社会システム探索チーム
ポリフォニックパートナー
松浦 克太さん

◆社会変革を実現する共創のあり方を考える「全国リビングラボネットワーク会議」を主催

Coデザ研は，2022年3月14日に開催された「第4回リビングラボネットワーク会議」というフォーラムを東京大学，一般社団法人大牟田未来共創センターと共同で主催しました．リビングラボは，生活空間の中で生活者の価値からサービスや政策・コミュニティなどを考える共創の仕組みです．日本でも経済産業省，厚生労働省などが事業に活用し，2025年大阪・関西万博のコンセプトになるなど注目されており，自治体主導，大学主導，企業主導のものを合わせて60以上のリビングラボがあります[1]．そして，このような盛り上がりの中，活動に取り組んでいるさまざまな人たちが一堂に会する場である「全国リビングラボネットワーク会議」を開催しました．今回は「社会変革を実現するリビングラボ」をテーマとし，局所的な問題解決のための共創に閉じるのではなく，多くの問題の根本的な課題を統合的にとらえ，その変革のために共創を位置付けるという視点での先進的な事例紹介と示唆的な対話が行われました．そこでは，素朴な共創やサービス検証だけに閉じている従来のリビングラボを乗り越える知見が共有されており，アンケート結果からも，企業や自治体のサービス企画・開発にとって有益な機会であることが分かりました．

◆社会の構造や人々の力に着目する先進的な地域創生のアプローチ

大牟田市は人口約11万人の地方都市ですが，高齢化率が37%を超えており，26～27%の日本平均に対して20年先をいっているといわれています．そこで，大牟田市を日本の社会システムの縮図ととらえ，そこで発生する社会課題等を未来予測して，産業，教育のあり方や高齢化対策等を実践的に取り組んでいます．

2016年からNTT研究所とNTT西日本グループが地域の人々との活動を始めており，その一環として，2019年には民間から地域全体のことを主体的に考えて実践する一般社団法人大牟田未来共創センターが設立されました．そして，従来の社会課題解決が局所的な問題解決になりがちであり，そこから抜け出さないと現場の疲弊が募ってくるという課題感を持っていた大牟田のメンバーと協働し，その状況を乗り越える新しいアプローチとして社会の構造を変革することも見据えた共創アプローチを実践しています．

その中でも肝となるのが，市民や企業・自治体に所属する人々が共に持てる力を活かせる状況をつくることであり，その具体例となる「わくわく人生サロン[2]」という実験的な取り組みを通じて，その体験的な価値を地域で共有してきました．このような場や機会が，地域で共創するための拠点に備わっていることによって，社会的孤立が解消され，市民がおのずと動き出し，担い手の創出につながる循環が生まれます．これが，Coデザ研がめざす新しい地域創生のアプローチです．

■参考文献

(1) 木村：“リビングラボの可能性と日本における構造的課題（調査資料2020-6）,” 国立国会図書館調査及び立法考査局，2021.
(2) 山内：“大牟田市がインスパイアする［ケア×暮らし×人間］「わたし」が温まる（!?）わくわく人生サロン,” 精神看護，Vol.23，No.3，pp.244-249，2020.

運転データを用いた空調機故障予見技術の開発

NTTファシリティーズでは，データを活用した業務効率化の取り組みの1つとして，これまでに蓄積した空調機運転データおよび故障データ等から，ビッグデータ分析やAI（人工知能）などを活用して空調機故障予見ロジックを作成し，予見精度を評価しています．ここでは，当社の空調機故障予見技術の開発に関する取り組みを紹介します．

通信ビルにおける空調機

通信ビルは非常に重要な社会インフラであり，提供するサービスが途絶すると社会に大きな影響を及ぼします．近年，通信を支えるICT機器の発熱量が増加してきているため，室内温度を適切に維持する空調機が故障で停止してしまうと，室内温度が上昇し，サービス停止のリスクが発生します．そこで，サービス維持のため，空調機の故障を未然に防ぐ保全作業が重要となります．

空調機の保全方法

空調機を健全な状態に維持するためには，故障する前に部品交換などのメンテナンスを行う「予防保全」（**図1**(a)）と，機械が故障した後に迅速に対応を行う「事後保全」（図1(b)）の考え方があります．両者を比較した場合，予防保全は部品交換に伴う空調機の停止時間が短くなるため室温上昇のリスクが低いことがメリットですが，一定時間ごとに部品交換を実施するため，まだ使用可能な部品を交換する回数が多くなってしまいます．一方，事後保全の場合は故障発生から修理完了まで長時間空調機が停止するため，室温上昇のリスクが高いことがデメリットですが，メンテナンスコストは故障発生件数に応じるため，一般的には低く抑えることができます．予防保全のメリットである「サービス断のリスク低減」と事後保全のメリットである「部品交換費用の最小化」を両立させることが事業者にとって理想的な保全だと考えられています．

理想的な保全として注目を集めているのが，「状態基準保全」（図1(c)）です．稼動している機器に対して「まだ使用可能であるものの基準時間に達した」としてメンテナンスを行うのではなく，故障診断により交換が必要と判断されたときのみメンテナンスを実施するという考え方です．状態基準保全の考え方自体は1970年代にすでに広まってい

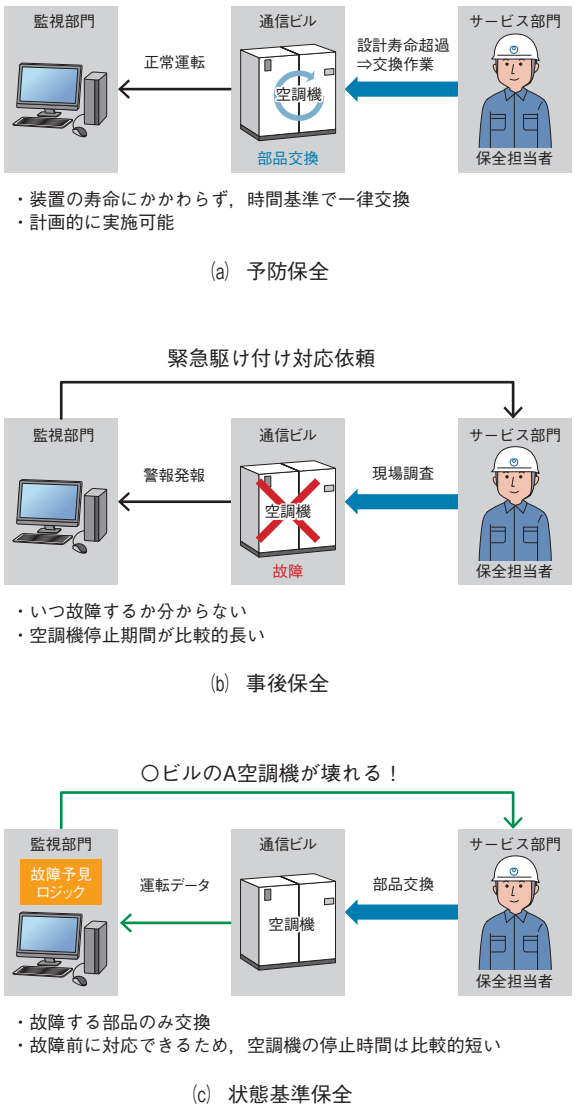


図1　空調機の保全方法

ましたが，故障診断に用いるデータ収集用センサの設置費用やデータ分析用コンピュータが高価だったことから一般化には至りませんでした．しかし，近年のICTの進展とIoT（Internet of Things）化の潮流に伴うセンサ技術の発達によって，データ分析を駆使した合理的な保全が可能となってきています．

状態基準保全により故障を予見し，稼動している空調機の故障時期を知ることができれば，故障する装置の部品のみを交換することが可能となり，予防保全のデメリットであった「まだ使用できる部品を事前に交換する無駄」をなくすことができます．また，故障前に部品を交換する，故障後の状態を予測して周囲にある空調機の設定温度を変更する，送風機を設置するといった対策を行うことで，事後保全のデメリットである「修理完了までの空調機停止による室温上昇リスク」を低減することができます．さらに保全担当者の突発的な故障対応の負担も削減することが可能になります．

故障予見技術の特徴

空調機から出力される各種の運転データは，外気温度や冷房負荷によってその数値が大きく変動します．簡単な例としては，外気温が上がれば空調機の冷房負荷が上がるので，電流値やモータの回転数などの数値も高くなります．こうした数値の変動が正常な制御によるものなのか，あるいは故障の前兆を示しているのかを切り分けるために，故障の判定指標として用いるデータの選択が重要となります．

空調機と比較して，モータ単体などは軸受けの摩耗が徐々に進むため，振動や軸受けの温度などの値が描くカーブはなだらかで，故障予見しきい値*1から故障しきい値*2への状態変化も急激ではありません．しかし，空調機はモータだけではなく，圧縮機や膨張弁，ファン等の多くの部品で構成され，相互に影響を及ぼし合っています．さらに外気温度や冷房負荷によっても運転データが大きく変動することから，故障予見の難易度が高い装置といえます（**図2**）．また，故障モードによって故障予見しきい値から故障しきい値までの経過時間に大きな差があることも考慮しなければなりません（**図3**）．

当社は，空調機のこのような特徴に対し，実際に故障した装置の故障前の運転データを分析し，故障判定に用いる指標の挙動を把握することによって故障予見ロジックを作成していますが，現段階では100%正確に予見できる状態には至っていません．

故障予見技術に必要な運転データ

当社は，全国にある通信ビル約1万棟に設置された多種多様な装置の監視・保全業務を24時間・365日途絶えるこ

*1　故障予見しきい値：予見ロジックで導き出された装置停止に至る可能性がある注意しきい値．
*2　故障しきい値：装置が故障し，停止するしきい値．

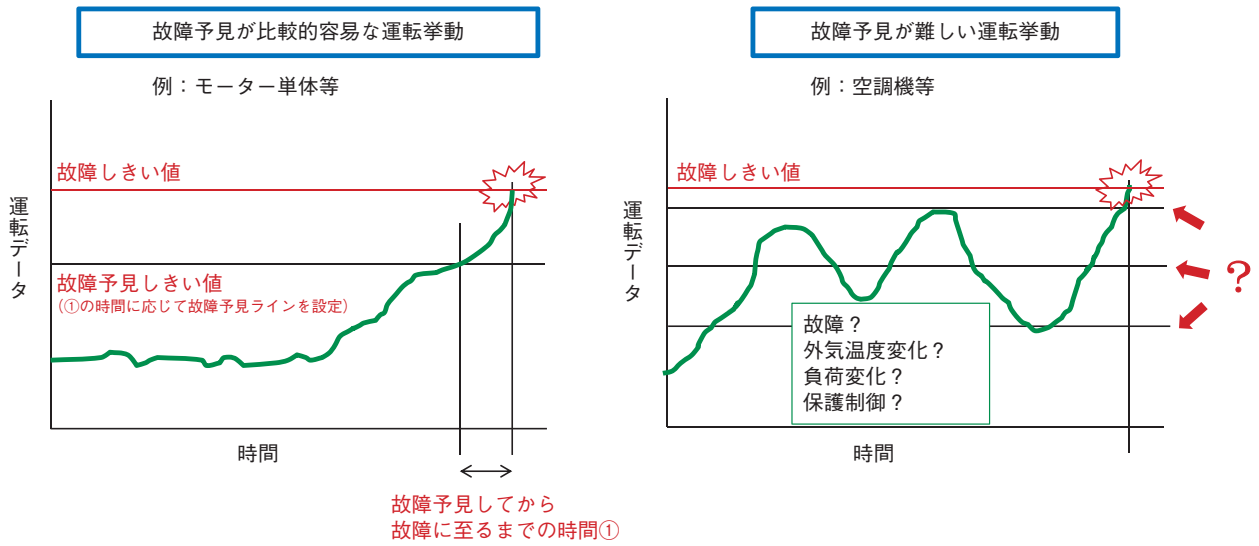


図2　空調装置運転状態の変化

となく行っています．そしてこれらの装置が出力する運転データを遠隔で監視しています．当社が監視している空調機においては，制御に必要な圧縮機の冷媒圧力，冷媒温度，室内空気温度，ファンの回転数，外気温度，電流値などを計測するセンサが備わっており，これらのセンサのデータは遠隔から取得することができます．

当社が現在取り組んでいる故障予見技術は，空調機に内蔵されているセンサから得られるデータを用いるため，故障予見用の新たなセンサを追加する必要がありません．そのため，これまでに蓄積した運転データと故障データを有効に活用して，ビッグデータ分析やAI（人工知能）などを用いて予見ロジックを作成し，実稼動している空調機の運転データに予見ロジックを適用し，故障予見の結果と実際の故障を比較することで故障予見精度を評価しています（**図4**）．

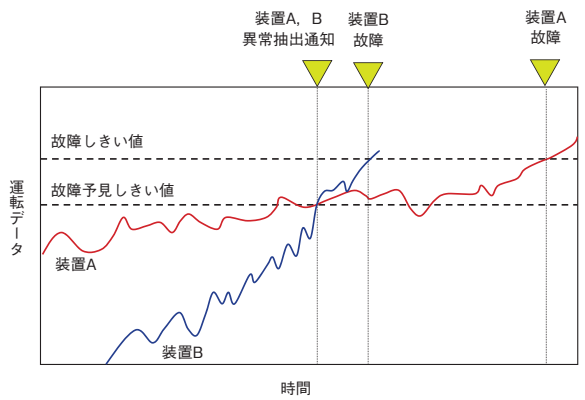


図3　故障モードの違い

空調機故障予見の実現には，故障した空調機の挙動を把握するため，実運用下の運転データを収集・蓄積する仕組みが必要です．さらに故障装置の運転データをもれなく取得するため，データ取得対象装置台数が多く，かつ個々の装置のデータ収集間隔が短いことが理想となります．一方で，理想を求めた場合に，データ蓄積ストレージ容量やサーバの処理負荷などが増加します．これらの経済性も考慮したうえで，当社が監視している空調機数万台に対して，故障予見可能となるデータ収集対象台数と収集間隔を決定しています．

故障予見の運用

故障予見は「何を」「どのくらいの確率」で予見できるかが重要となります．故障予見の理想は，「故障する装置をもれなく予見できること」と「予見した装置が必ず故障すること」です．しかし，これらはトレードオフの関係にあり，両方を満足することは現状では難しく，どちらかを優先する必要があります．

故障する装置をもれなく予見できることを優先する場合，故障予見しきい値を低く設定し，わずかな故障の兆候も見逃さないようにする必要があります．その場合，空調機の故障停止による室温上昇リスクは回避できますが，予見精度が低いと実際には故障しない装置まで故障予見で検出してしまう可能性があり，無駄な部品交換が発生するリスクがあります．一方，予見した装置が必ず故障することを優

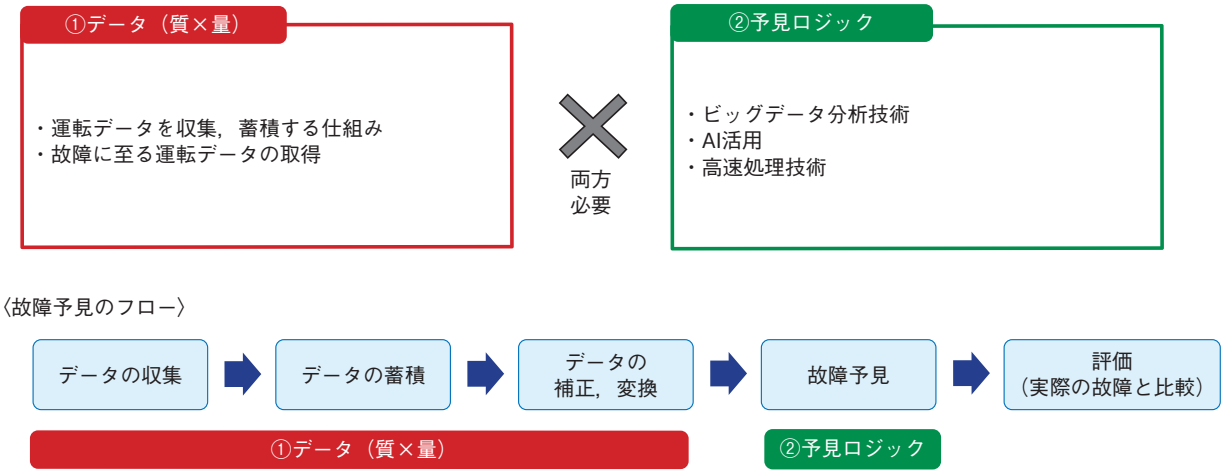


図4　故障予見技術確立に必要なもの

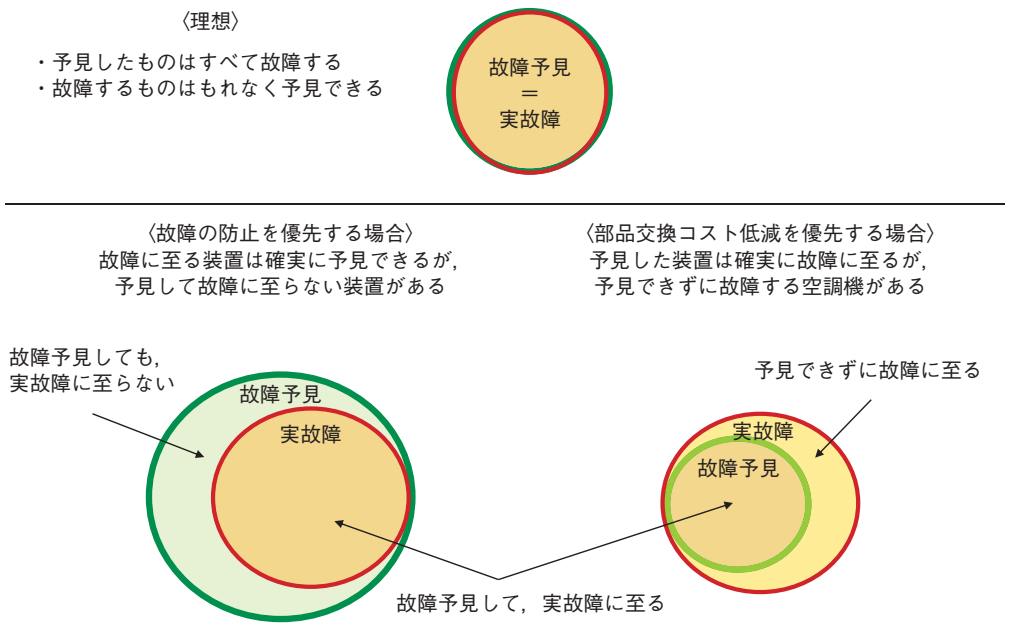


図５　故障予見の運用

先する場合，故障予見しきい値を高く設定し，間違いなく故障に至る空調機のみを見つける必要があります．その場合，まだ使用できる部品を交換する無駄は削減できますが，予見精度が低いと予見できずに故障に至る装置がでてしまい，室温上昇に至るリスクがあります（**図５**）．

故障予見の精度向上が重要であることはいうまでもないことです．「故障する装置をもれなく予見できること」と「予見した装置が必ず故障すること」を共に100％予見することは困難ですが，どちらかを優先することで，享受したいメリットに向けた予見精度を100％に近づけることは可能です．一定のリスクを許容する必要はありますが，現状よりはリスクを低減できると考えています．

また，故障予見の運用に関連する他の要素として，「故障をいつ予見できるか」も重要です．実故障の１時間前に故障を予見するのと，実故障の数日前に故障を予見するのとでは，事前の対応内容に大きな違いがあるからです．１時間前に故障を予見できた場合，遠隔制御で近傍の空調機の設定を変更し，故障による室温上昇リスクを抑えることはできますが，部品交換を実施するには時間が足りません．一方，数日前に故障を予見できた場合，交換部品の手配や保全担当者の稼働調整が無理なく実施でき，故障して空調機が停止する前に交換作業を完了できます．そのため室温上昇は部品交換時に空調機を停止させるわずかな時間のみとなり，室温上昇リスクを低減できます．

先に述べたように，故障予見による運用方法は，「故障する装置をもれなく予見できること」と「予見した装置が必ず故障すること」の優先度とともに，予見後故障までの時間も考慮したうえで策定していく必要があります．

今後の展望

当社は，デジタルデータを駆使した業務効率化推進の１つとして，空調機の故障予見技術に取り組んでいます．空調機がいつ故障するかを知ることができれば，予防保全のメリットである「サービス品質の維持」と事後保全のメリットである「故障した部品のみ交換すること」の両立が可能となります．ただし，現状では100％の予見は困難です．残存リスクの低減には，故障予見技術の精度向上はもちろんのこと，リスクをカバーする運用方法の確立も重要だと考えています．故障予見技術と運用方法を組み合わせた新しい仕組みを確立することで，当社の保全業務のさらなる高度化を実現していきたいと考えています．

◆問い合わせ先
NTT ファシリティーズ
研究開発部　ファシリティ部門　環境ソリューション担当
TEL　03-5669-0750
FAX　03-5669-1650
E-mail　takuya.shirakawa.hw@ntt-f.co.jp