\Orchestrating a brighter world NEC

Beyond 5G ホワイトペーパー 2.0版

概要 3
1. 2030年前後の将来社会 4
1.1 はじめに 4
1.2 社会におけるコミュニケーションの歴史 5
1.3 誰もが人間性を十分に発揮できる持続可能な社会へ 6
1.4 「人間・空間・時間」を超える“テレX社会” 7
2. 社会インフラ基盤としてのBeyond 5G 11
2.1 テレコミュニケーションと通信技術の進化 11
2.2 Beyond 5Gのスコープ 12
2.3 Beyond 5Gによる新しいテレコミュニケーション 14
2.4 社会インフラ基盤としてのBeyond 5Gの役割 16
3. 技術進化の方向性 17
3.1 Beyond 5Gの2つの側面 17
3.2 ネットワークとAIの共進化 18
3.3 技術進化の方向性 18
4. 重点技術領域 19
4.1 無線/光通信 19
4.1.1 高速大容量化/小型低消費電力化 19
4.1.2 カバレッジ拡大 21
4.1.3 無線/光センシング 22
4.2 運用自動化/最適化 23
4.2.1 サービスやアプリケーションに即したEnd-to-endネットワークの最適化 23
4.2.2 運用管理自動化レベルの向上 23
4.2.3 AI技術の活用と進化 24
4.3 分散データ処理 25
4.3.1 通信とAIアルゴリズムの共進化 25
4.3.2 デジタルツインの構築 26
4.3.3 確率ロボティクス 27
4.4 セキュリティ 28
4.4.1 通信インフラのセキュリティ 28
4.4.2 データ処理基盤のセキュリティ 29
5. まとめ 30
5.1 Beyond 5G時代の姿とネットワークへの要請 30
5.2 NECの取り組みと提供価値 30

© NEC Corporation 2023

\Orchestrating a brighter world NEC

概要

本ホワイトペーパーは、2030年前後の将来社会に向けて、通信とそれを取り巻く技術が今後どのように進化するか、それに対してNECがどのような役割を担うかについて現時点の議論をまとめ、広くみなさまと共有させていただくものです。

現在、5Gサービスが開始され利活用拡大への期待が高まっています。また、新型コロナウィルス感染症（COVID-19）の出現は対面から非接触へと生活や社会へ大きな変化を促し、これまで以上に通信技術の果たす役割が深化するきっかけとなりました。そのような中でNECは『誰もが人間性を十分に発揮できる持続可能な社会の実現』に向けた価値創造を掲げています。たとえば、実世界と仮想世界とをシームレスに行き来することで、人と人とが、あるいは人とAIとがリアルな実在感をもって共感しあうなど、新たなコミュニケーション体験が実現し、物理的制約から解放されることで、いわば超能力を得たように「人間・空間・時間」を超え、生活者の求める多様な価値観に沿う暮らし方が可能な社会の到来を考えています。

このような未来を支える新たなコミュニケーションを実現するために、プライバシーを確保した上で、実世界で起きるさまざまな事象や生活の営み、それが意味するコンテキストや人々の感情など、今まではデータ化されていなかったあらゆるものからデータを取り出し、生活者の安全性を確保した上で、有機的に活用・流通する枠組みや、リアルタイムに遠隔から実世界を認識・制御する技術を実現します。そのためには、通信の高性能化にとどまらず、実世界から発生する巨大なデータをリアルタイムに解析・アーカイブして活用する必要があります。

そこで私たちはBeyond 5Gを、5G無線技術の性能が飛躍的に進化する側面に加え、さまざまな巨大データをリアルタイムに処理し活用する技術・製品群と通信インフラが融合する社会システムが実装された社会像として位置づけます。その上で、このようなBeyond 5G時代の社会を実現するために今後注力すべき技術領域について概説します。

NECは上記技術を核としつつ「顔認証」に代表される世界トップクラスの技術、ネットワークから産業向けICTソリューションにいたる幅広い機器やソフトウェア、システム構築・運用やそのノウハウの提供、そしてネットワークを軸に人やモノが生み出すデータを産業の枠を越えてつなぐ「NEC Smart Connectivity」などのサービスを通じて、産官学のパートナーやお客さまとの共創による“オープンな協働“をさらに加速します。

こうした新たな取り組みを通じて、Beyond 5Gを中心にリデザインされる社会像における『安全・安心・公平・効率』という価値の創出を目指し、次世代の社会システムを模索し続けることで、SDGsの実現に向けた持続可能な社会の構築に貢献してまいります。

今後とも、みなさま方との議論を継続し、本ホワイトペーパーで記載した2030年頃の社会像について考察を深めながら、一人ひとりが輝く未来に向けて歩みを進めてまいります。

© NEC Corporation 2023

1. 2030年前後の将来社会

1.1 はじめに

急速に発展するAIやIoTをはじめとするデジタルテクノロジーを用いて、社会や経済、産業を変革する「デジタルトランスフォーメーション（以下DX）」が加速しています。このDXによる事業プロセスやビジネスモデルの変革には、5G（第5世代移動通信システム）[1]などの通信技術が重要な役割を果たしています。5Gの特長である超高速・大容量、超低遅延・高信頼、多数同時接続、さらにローカル5G[2]の安全性、安定性、柔軟性という特長を活かしたサービスとユースケースの模索が始まり、企業や地域の課題解決に向けた多様なソリューションが検討されています。NECは5G／ローカル5Gを活用し、通信事業者および広範な領域のパートナーのみなさまと共創活動をすでに多方面で進めています。ネットワークを軸に、人やモノが生み出すデータを産業の枠を越えてつなぐ「NEC Smart Connectivity」サービスを中心として、DXにとどまらぬお客さまとの新たなビジネスモデルの創造や、都市の在り方を一新する「スーパーシティ」を支える次世代の都市経営基盤の実現などを推進しています。さて、この先には一体どのような社会が実現されるのでしょうか。

本ホワイトペーパーでは5G時代と、2030年頃と予想されているBeyond 5G[3]時代の発展形態を広く想定し、目指す社会像について現時点での考察を解説していきます。課題先進国としての日本が、世界に先駆けて直面した人口減少や地方創生、社会インフラの老朽化および災害対策の問題など、SDGsのように多くの国家が協力しながら取り組むグローバルな現在の課題が2030年頃にはどのような状態であるのか、現在から延伸するそれらの諸課題に対し、ネットワーク事業を核としてNECはどのように取り組むべきでしょうか。

その解を見つけるために、NECはお客さまをはじめ、新たな社会価値の創出を目指し協働する産学のパートナーさま、国や自治体などステークホルダーのみなさまとの『オープンな共創関係』を深め、一丸となって新たな社会システムのデザインに取り組んでいます。『安全・安心・公平・効率』というNECが掲げる社会価値の創出を通じて実現する、誰もが人間性を十分に発揮できる持続可能な社会へ、どのように歩みを進めようとしているのでしょうか。 Beyond 5G時代において、NECが重要と考える技術基盤や開発要素の紹介とともにお伝えしていきます。

1 5G（5th Generation）： 1G、2G、3G、4Gに続く国際電気通信連合が定める規定IMT-2020を満足する無線通信システム。国際電気通信連合 無線通信部門では、高速・大容量 、低遅延、多数同時接続の3つを定義している。

2 ローカル5G： 携帯通信事業者が展開する5Gサービスとは別に、企業や自治体等が局所的なネットワーク内という条件で構築できる無線通信システム。Wi-Fiでは対応できない大規模な工場内や屋外の通信もカバーでき、通信トラブルの影響を受けにくく、安全性、安定性、柔軟性という特長がある。

3 Beyond 5G： 5Gの次の世代については、現在明確な定義はまだ存在せず、Beyond 5Gや、ポスト5G、6Gなどと呼ばれているが、本ホワイトペーパーでは5Gより先の世代という意味にてBeyond 5Gと表記する。

© NEC Corporation 2023

\Orchestrating a brighter world NEC

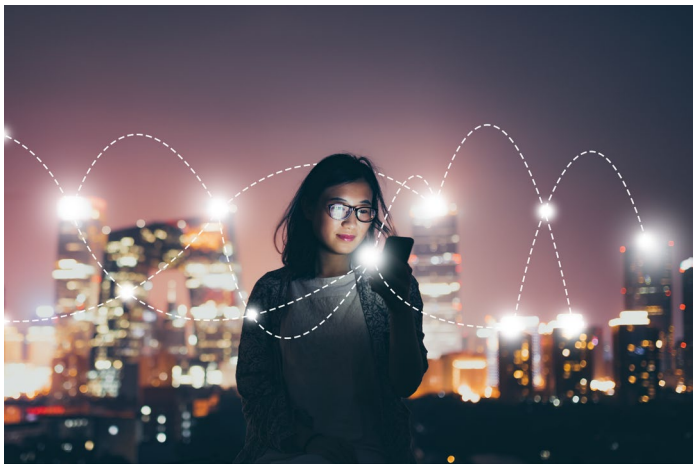
1.2 社会におけるコミュニケーションの歴史

2030年前後の将来社会を語る前に、通信技術が発展してきた源となるコミュニケーションについて考えてみます。人類が誕生したころの地球上には、人類よりも体の大きさや力で勝っていた多種多様な生物が棲息していましたが、人類は世界中のいたるところに移り住み人口を増やしてきました。その理由の一つとして、高度なコミュニケーション能力が挙げられます。たとえ他の生物に比べ力で劣っていたとしても、高度な言語と情報伝達方法により集団で協力して、さらに高度な生き方を実現できてきたからこそ、今の人類の発展があると考えられます。

このような人と人とのコミュニケーションをより発展させるために、通信技術が誕生しました。初めのうちは、のろしや看板といった目に見える範囲での視覚情報を活用して情報を伝達していましたが、有線通信が誕生することにより目には見えない遠くにいる人と会話ができる固定電話が開発され、音を使って文字が伝送できるファクシミリが登場します。有線通信では固定電話がある特定の場所でしか通話ができませんでしたが、いろいろな場所を移動しながらでも通話ができる無線通信技術を使った携帯電話が発明されます。これにより、さまざまな人と、さまざまな場所で、時間に関係なく通話ができるようになりましたが、通信技術の発展はここで止まりません。通話をするための音や音声情報から、文字や画像、映像を伝達できるまで通信容量が拡大し、SNSを使った情報発信が誰でも容易にできるようになります。いまや、3次元映像の仮想空間上にアバターと呼ばれる自分の分身が入り込み、アバターを介してコミュニケーションができるメタバースが注目を集めています。

これに合わせ、バーチャル空間でも独自の変化が生まれています。ホームページをはじめとするWeb1.0の時代から、SNSを活用し誰でも簡単に双方向のコミュニケーションが実現できるWeb2.0に発展し、GAFAMに代表されるプラットフォーマーが台頭することにより中央集権的な構造に変化していきました。ここからさらにWeb3[4]の時代になり、中央集権型から分散型の構造へと進化し、DAO[5]のような自律分散的なコミュニティが生まれ始めています。一方、このような社会やコミュニティの変化が起こる中で、社会の分断も発生するようになります。新型コロナウィルス感染症（COVID-19）の発生により、リモート環境で仕事や生活をすることも増え、人と人との関係が希薄になってきている可能性があります。また、フィルターバブルやフェイクニュースなどの広がりにより、得られる情報が限られ、情報の信頼性の判断が難しくなる課題も出てきています。

コミュニケーションに加え、社会の協調と分断の歴史を振り返ってきましたが、この先にある2030年前後の将来社会はどのようになっているのでしょうか。



4　Web3：第1世代の電子メールとWebサイトを中心としたWeb1.0、第2世代の スマートフォンとSNSに特長づけられるWeb2.0に続く、分散化された個と個が直接つながる次世代のインターネット。

5　DAO（Decentralized Autonomous Organization）：分散型自律組織。中央集権的な存在に支配されることなく、誰でも参加可能な組織であり、取引が自動的にブロックチェーン上に記録され、透明性と公平性に富む。

1.3 誰もが人間性を十分に発揮できる持続可能な社会へ

デジタル技術が浸透した世界は、性別・年齢・人種・障がいの有無などの垣根がなくなります。物理的・時間的な距離を超え誰とでも繋がり、さまざまな価値観を反映した個人に最適化された暮らしや、多様な働き方が当たり前になります。仕事を通じた自己表現をはじめ、時空間・言語・世代を超えた豊かなコミュニケーション、知恵の共有と共感を実現した「インクルーシブな社会[6]」が到来するのです。そのような社会では、たとえば長期入院を迫られた子供や高齢者が、あたかも家族がそばにいるかのように対話でき社会的孤立が癒されるなど、今まで以上に多くの方が心理的な充足感を持てる日常が実現します。

また、自然災害リスクへの対応、地方や洋上などによる再生可能エネルギーの利活用促進、過疎化や集約化にともなう生活インフラ、自然、文化の維持といった社会の要請により、社会機能はこれまでの都市集中型だけでなく、分散型の社会へと変化していきます。これにともない交通システムや、水・エネルギー供給システム、それらを運用・維持するためのICT設備などのインフラも機能が変化していきます。

その実現のための例として、全地球規模で収集された膨大な社会活動データや、人工衛星・宇宙ステーションより得られた地球観測データと、AIによる地球温暖化・異常気象・森林破壊・海洋汚染・地殻変動など世界規模での事象認識が、政策や企業の事業活動へ継続的にインプットされます。また、地震・津波・浸水・土砂崩落・林野火災などの災害の予兆を捉え、空飛ぶクルマをはじめとして、空や地中、海中へ3次元に広がった交通システムへの対応を促します。想定される被害地域では、3D化(AR/VR)技術により現実空間へ浸水エリアを表示し、分散化されたクラウド型遠隔医療システムが特定地域へ自律的にリソースを集中させ救援に備えます。道路や電力などのインフラは、宇宙から地中、海中まで張り巡らされたセンサおよび住民から得られるデータと、AIを活用することにより予防保全が実現されます。複数種類のインフラやインフラ保有者間のデータが共有されることで、個別最適から全体最適の管理となり、経済的合理性と強靭さを兼ね備えます。

このように、生活者は通信とその周辺技術が実現するBeyond 5Gによる社会インフラに支えられ、人間が本来持つ創造性をより発揮しやすくなります。これらを実現した、よりレジリエンスで持続可能な社会では、個人の生活と全体最適を両立させながらエネルギーや資源の消費が最小限に抑えられ、政府が表明した2050年までの温室効果ガスの排出実質ゼロとするカーボンニュートラルの目標にも貢献することでしょう。身のまわりの出来事から地球活動まで、ミクロからマクロにいたる事象をリアルタイムかつ多岐に理解することで、地球と人間の社会活動とのより良い調和を持続的に模索する枠組みが進化し、生活環境や多様な価値観を反映した暮らし方に向けて、都市やインフラがリデザインされます。それは、私たちが生態系の一員として地球と持続的な関係を築き、生物多様性を維持した共生する世界なのです。

このような「インクルーシブな社会」を支える、通信技術と周辺技術とはどのようなものなのでしょうか。次節では、3つの「超える」をキーワードに解説します。

6 インクルーシブな社会:「あらゆる人が孤立したり、排除されたりしないよう援護し、社会の構成員として包み、支え合う」という社会政策の理念を表す。

1.4 「人間・空間・時間」を超える“テレX社会”

“誰もが人間性を十分に発揮できる持続可能な社会”を目指す上で、コミュニケーションは社会を変える大きな力を備えています。テレフォンやテレビジョンは、“テレ”（遠くの）という接頭語が示すとおり、空間の制約を超えて活動するための大きな力になりました。未来には、テレポーテーションやテレキネシス、テレパシーなど、いわゆる超能力と呼ばれたものも、新しいコミュニケーションの形として実現されているかもしれません。これらの”テレ”能力は、空間的な制約だけでなく、理解したり共感したり、感動させたり物を動かしたりするような知覚/運動能力の制約も超える、人間能力の拡張（Human Augmentation）とも言えます。また、未来を描き予測をしたり、過去に遡って分析や判断ができるなど、時間的な制約も超えられる可能性も秘めています。

2030年以降の将来社会をこのように考えると、人間が生来持っている能力や可能性の限界を、Beyond 5Gが社会実装された「テレX」サービスによって超えていく社会とも言えます。たとえば、テレワークは単にオフィスワークを離れた場所でオンラインの対話を通じて行うものでなく、離れていても同じ場所にいる気配を感じながら、ノンバーバルを含めた深いコミュニケーションによって協働し、触った感覚や匂いなどの五感情報を共有する“テレX“な能力に支えられた働き方として、より多くの人や業種に適応されると考えられます。さらには、そのようなサービスがテレ家事、テレレジャー、テレ冒険などあらゆる生活シーンに広がることが想定されます。このような能力を獲得するのは人間だけではなく、ロボットや車あるいはAIが作り上げた実存しないキャラクターも、同じような能力を発揮して人と共存するようになるかもしれません。

つまりこれらは「人間を超える」「空間を超える」「時間を超える」ことができる未来と捉えられており（図1）、このような社会を実現するための新しいコミュニケーション像こそが、 Beyond 5Gの目標とするものだと考えています。

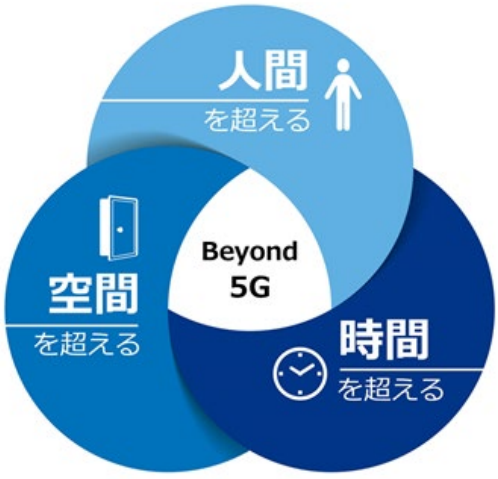


図1 「人間」「空間」「時間」を超える世界

「人間を超える」 人間の能力の限界や可能性が解放された社会

Beyond 5Gによりもたらされる未来、人間の能力の限界や可能性が解放された社会では、どのような生活体験が待っているのでしょうか。

たとえば、世界中の人々と友だちになりたいとか、世界中の文献を読みたいと思っていても、従来は言語の壁がありました。その壁も、今では一定のレベルまで払拭されましたが、今後は言語や感覚器官を用いることなく、リアルタイムのmind-to-mind[7]による対話が実現することでしょう。概念／文化翻訳とも融合することで、母国語や文化的背景などの制約に捉われず、高度なダイバーシティが実現された社会においては相互理解・共感が深まり、集団内の暗黙知を含めた知恵が共有されるような社会が実現するかもしれません。

対象は人にとどまらず、ペットや動物、ロボットや車ともシームレスな意思疎通が実現され、生活者の求める多様な価値観に沿うワクワクする暮らしが、個々人にコーディネイトされた人間中心の社会の実現にひと役買うことになるでしょう。

一方で、バーチャル空間におけるコミュニケーションの拡大では、プライバシー保護に対する不安が高まり、より安全・安心なコミュニケーションが求められるようになっていきます。このような安全・安心な環境の中で、相互理解を促すコミュニケーションによって、人々の間に深い共鳴感が醸成され、それらが社会課題の解決にも大きな役割を果たしていく社会となることが期待されます。

また、観光やスポーツ観戦／コンサート鑑賞などオンサイトの活動は3D化(AR/VR)技術やサイバーフィジカルシステムの社会実装、質感や肌触り・味覚・匂いなどの五感を再現したinternet of sensesの出現と、超高速・大容量、超低遅延・高信頼、多数同時接続といった5Gの特性がさらに進化した通信インフラの恩恵により、空間の制約を超えて瞬時に移動するテレポーテーション能力の獲得に繋がります。たとえば、家族が揃って何かのイベントを体験する際に、夫婦は自宅からホログラムを介して楽しみ、外出が困難な祖母はロボットを介して感触や感情を共有し、またデジタルネイティブな子供たちはアバターロボットを操作したり、メタバース上でリアルと同等の感動体験をしたりすることができるようになると考えられます。アバターロボットやデジタルツインが日常になった世界では、人間のさまざまな制約を超えて身体感覚を拡張し、誰もが容易に繋がることによって五感・感情・雰囲気まで伝わり感動を共有し合えるようになるかもしれません。

7　mind-to-mind通信：人の身体能力や知覚、認知能力をセンサによって人の動きそのものをサイバー空間から別の場所にいる人に伝えたり、テレパシーのように、言葉や身ぶりによらず人の心を他人に伝えること。

「空間を超える」 宇宙空間から海上、リアルとバーチャルを越えて

Beyond 5Gの時代は、今までサービスが届いていなかったフロンティア領域が大きな舞台になってくると考えられ、宇宙空間や海上を含む地球上の隅々へサービスが広がります。宇宙では、宇宙ステーションや月面基地、火星基地も含まれるようになり、そのような世界のさらにその先には、都市や地球そのものがテレイグジスタンス[8]されます。火星基地に居住する人々が、サイバーフィジカルシステムを通じて東京やニューヨーク、シドニーなどの都市で過ごすといった、今まで以上にリアル空間と仮想空間との融合や一体化が進み、その社会システムの上にさまざまなサービスが誕生することが想定されます。

その世界では、遠くにいる人あるいはAIが作り上げた実在しないキャラクターと、リアルな実在感をもって共感しあうことができるようになるでしょう。したがって、人はコミュニケーション・認知の新たな形式を通じて、物理的な制約から解放され、その場にいなくてもよりその場に存在するような感覚で働いたり、学んだり、楽しんだりすることができます。自宅に居ながらにして、職場や学校に存在するような生活体験が得られたり、南極を旅行したあと火星から地球を見たりと、空間だけでなく時間的にもエネルギー的にも、格段に効率的な活動ができるようになるのです。物理的な移動の必要性が減ることでCO_2排出削減にもつながり、その結果として海面上昇やそれにともなう居住地の消滅などが防げているかもしれません。

さらには、実在しないさまざまな仮想世界を作り出し、その中で実世界さながらの活動をすることで、人は新しい自分の可能性にチャレンジできるようになるでしょう。 宇宙・海上・空中など、これまで通信が困難だった場所まで、高周波数帯の無線通信がカバーできるようになるため、あらゆる場所で同じサービスを享受できるというよりも、場所や環境、要件に応じて最適化されたサービスを、システムの全体最適を保ちながら体験できるようになることが望まれます。

8　テレイグジスタンス： 遠隔地にいるロボットを自分のアバター（分身）として、現地にいるかのように、物を見たり、感じたり、動かしたりする技術。

「時間を超える」 未来を知り、過去に遡ることができる世界

全地球規模でリアルタイムに収集された膨大なデータと、張り巡らされたネットワーク、AI、XRをはじめとする周辺技術の進歩により、今まで以上に正確な未来を予測し、複雑な課題を解決できるようになるでしょう。常に0.5秒先の未来を予測し映し出すメガネをかければ、不慮の事故を劇的に減らすことができます。また、気象や海流などのデータ活用が進み、半年～1年後の農水産物の収穫高と地域ごとのニーズの過不足などを正確に予測する「未来からの警告」により、代替え食品会社や植物工場へ生産オーダーを調整することで、食料問題や飢餓問題への解決の糸口が見えてくるかもしれません。

膨大なデータを過去に遡り、人々の感情も含めた経験を分析し得られた未来へのシナリオは政策や企業の意思決定に、より大きな影響を及ぼすでしょう。

たとえば、IoT により収集される膨大なセンシングデータを、確率的デジタルツインで未来予測する近未来スマートシティでは、ランダムで予測不能な行動を取る人間と精緻に動くロボットが共存しても、事故が起きることなく安全・安心な日常生活が担保されるようになります。進化したデジタルツインを活用して、常に0.5秒先の状態を予測することにより、植物工場の生育状態を事前に把握し、自動車工場での想定外の事故を防ぎ、機器の故障を未然に判断するなど、安全かつ生産性の高い自動制御された製造現場を実現します。医療現場では、診断や検査の範疇を超えた想定外の事態に見舞われても、デジタルツインの未来予測により状態悪化の可能性を事前に分析していくことで、不測の事態を回避することに貢献できるでしょう。このように、自然現象や現実社会の不確実性により生ずる想定外の事象を、デジタルツインにより確率的に予測することで、危機や事故を回避し安全な社会を実現することができます。

さてこれまで3つの視点で、NECが考える2030年頃の社会像を述べてきました。そう遠くない未来に、Beyond 5Gとそれを取り巻く技術によって「人間・空間・時間」を超えることができるようになるでしょう。

そのとき、世界は“誰もが人間性を十分に発揮する持続可能な社会”に、また一歩近づくことになるのです。

2.社会インフラ基盤としてのBeyond 5G

2.1 テレコミュニケーションと通信技術の進化

1章で述べたように、2030年頃の将来社会に向けて、新しいテレコミュニケーションを実現していく必要があります。以下では、図2を用いてテレコミュニケーションの進化と、それを支える技術の進化について述べていきます。

4G/LTE[9]時代は、人によるテレコミュニケーションを中心として、スマートフォンなどを用いた高速データ通信が利用されていました。電話による1対1の音声通話から、複数者による同時映像通信が可能となり、またSNSで全世界の人と日々の出来事を共有したり、共感を伝えられたりするようになりました。5G時代の今日、人だけではなく今まで通信ができなかったモノ(IoT端末)にも通信が広がっています。超高速・大容量、超低遅延・高信頼、多数同時接続な通信インフラに支えられて、新たな価値の創造はもちろん、暮らしやビジネスをより良く変えていくDXが拡大します。

Beyond 5Gは、1章で述べた新しいテレコミュニケーションを実現していきます。人間・空間・時間を超えていくため、人の外面だけでなく内面や、身のまわりから地球全体まで、空間中に存在するあらゆるモノをAIによって分析・理解して瞬時にデジタルデータ化し、過去のデータ、リアルタイムなデータ、そして未来の予測データを自由に活用できるようになります。5G時代のIoTと比べ、はるかに多くのデジタルデータを生み出すことになり、あたかもカンブリア大爆発の時代に生物が眼を獲得することによって、飛躍的に進化したような社会の変化が期待されます。そこでBeyond 5Gは、これまで以上に人々の豊かな生活と社会の実現のための、エッセンシャルインフラ[10]としての役割を担うようになります。

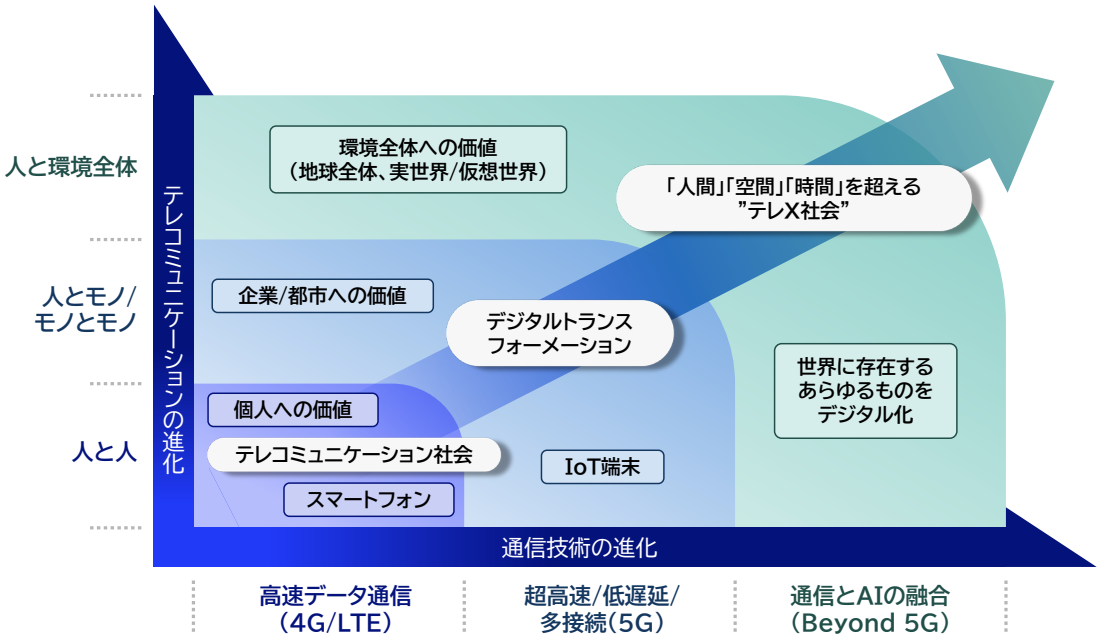


図2 テレコミュニケーションと通信技術の進化

9 4G/LTE: 第4世代移動通信システム。LTEとは、Long Term Evolution(ロングタームエボリューション)の略称で、3Gを高速化する通信規格のひとつで4Gに含まれる扱いとなるため、4G/LTEと、並列して表記されることが多い。

10 エッセンシャルインフラ: 社会生活を維持する上で不可欠なインフラのこと。

© NEC Corporation 2023

\Orchestrating a brighter world NEC

2.2 Beyond 5Gのスコープ

Beyond 5Gについては、多くの組織・企業・大学などがホワイトペーパーを発行し学会で講演を行うなど、さまざまな形で発表が行われています。たとえば、総務省が2020年6月に発表したBeyond 5G推進戦略[11]では次の7項目がBeyond 5Gの特長として述べられています。

- 5Gの10倍から100倍の超高速・大容量
- 5Gの1/10の超低遅延
- 5Gの10倍の超多数同時接続
- 現在の1/100の超低消費電力
- 超安全・信頼性(セキュリティ、耐障害性)
- 自律性(ゼロタッチオペレーション、最適化)
- 拡張性(衛星やHAPSなどによる超カバレッジ)

このような、5Gの延長線上としての”超”のつく性能向上は、これまで述べてきた将来社会を実現するうえで必要不可欠です。加えてモバイルネットワーク単体として捉えるのではなく、有線やクラウド、インターネット、放送、プライベートネットワークなどを含めたトータルな基盤として捉え、さまざまなネットワークを「どのようにマネジメントして、複雑化する通信への要求条件を満たしていくのか?」という、社会インフラ的な視座が必要になると考えます。

このような基盤は、人間の内面や思考、3次元空間情報などを表す実世界の、あらゆる情報をリアルタイムに収集・分析してデジタルデータ化し、それらをAIで理解・処理して、実世界へリアルタイムにフィードバックすることで価値を提供するものです。そのためには、地球上のいつでもどこでも、必要に応じて大量のデータを収集し、運び、処理することが求められます。一方、間断なく膨大に発生する生のセンシングデータをAIで分析・理解するには、膨大な通信帯域と処理電力が必要になります。また、データの発生源やデータの処理結果に触れる人の地理的分散を考慮し、リアルタイムで処理しなければならないという問題があります。さらに、発生するデータのすべてをデータセンターなどに集めて処理すると、データ転送に多くのエネルギーが必要となり、同時に通信遅延の影響でリアルタイムな処理が困難になるという問題もあります。こうした問題には、必要な場所でデータを分散処理し、統合されたネットワークを使ってダイナミックに最適化し、通信遅延やエネルギー消費の解消に取り組む対策が有効です。また、カーボンニュートラル(CN)の重要性も高まっており、ネットワークの構築自体に関してだけではなく、さまざまなネットワークの活用を通じてCO_2削減に貢献することも重要です。

11 総務省 Beyond 5G推進戦略 -6Gへのロードマップ-
URL:https://www.soumu.go.jp/main_content/000696613.pdf

以上のような考えのもと、NECはBeyond 5Gを無線通信技術の進化による量的拡大としてのみ捉えるのではなく、ネットワークに分散コンピューティングやAIなどのデータ処理基盤を融合した、「社会インフラ基盤の進化」と位置づけています。NECはBeyond 5Gの技術的なスコープを、図3の下側に示された超高速広帯域通信や超カバレッジなどの無線通信技術と、上側に示されたAIによるリアルタイム認識/制御などのサービス/アプリケーションの基盤技術の、両面から捉えています。さらに、無線通信技術においては、ミリ波/THz波を活用した使いやすい超高速通信を実現し、地球規模にカバレッジを拡大するなど、どこでも無線通信技術を活用できる環境を実現します。こうした無線通信技術の進化は、サービス/アプリケーション基盤技術の進化を助長します。来たるべきBeyond 5Gの社会では、世界をまるごとリアルタイムにデジタルツイン化する技術や、ロボット行動計画、瞬時の未来予測などネットワークと協調するAI技術が、ともに進化していると考えています。

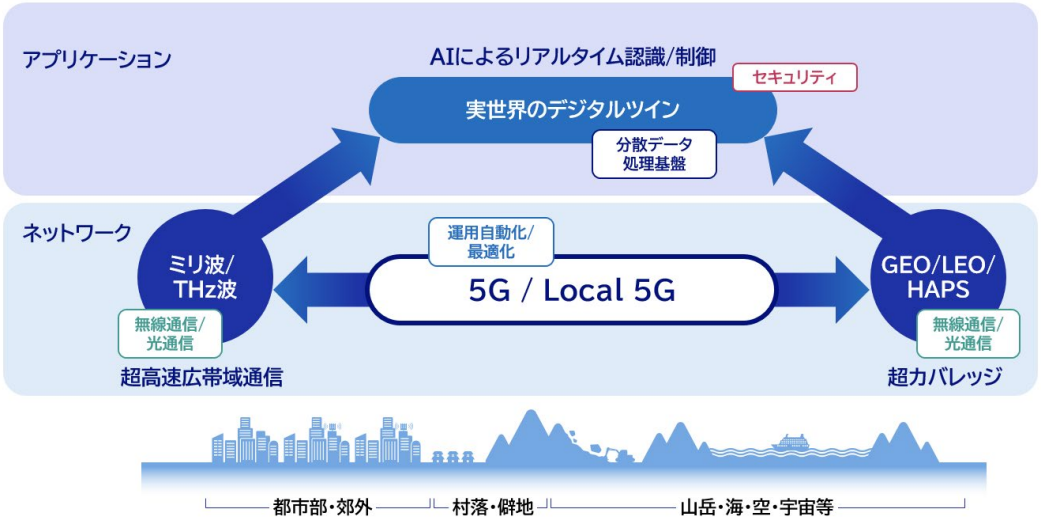


図3 Beyond 5Gのスコープ

2.3 Beyond 5Gによる新しいテレコミュニケーション

1. 時空間を超えた人と人、人とモノとの超現実感コミュニケーション

あらゆる世界のあらゆる情報をリアルタイムにデジタルデータ化し、ネットワークを介して瞬時に共有することで、人と人、人とモノとが時空間を超えたコミュニケーションを行います。そこでは、音声や映像など従来のメディア情報を圧倒的な精度で共有するだけでなく、たとえば以下のような情報を共有することで、現実感を超えるようなコミュニケーションができるようになります。

- 視覚、聴覚、触覚などの人間が感じる五感
- 自分や他人の意図や、その場のコンテキスト
- 実世界の3次元イメージや3次元構成・配置などの空間情報
- 機械の制御や人への意思伝達など

2. デジタルツインとサイバーフィジカルシステムの拡張

5G時代のIoTでは、IoT端末を通して取り出した情報によって現実世界を仮想世界に写し取る“デジタルツイン”が実現されようとしています。これは工場内の製造工程やスタジアム内の選手など、興味の対象を絞ったデジタルツインです。

一方、Beyond 5Gではセンシングの多様化や、その分析・理解技術の進歩とともに、建物や風景を含む3次元の空間や人の内面・思考など、いままでデータ化されていなかったあらゆるものからデータを取り出して活用します。これにより、実世界そのものすべてを、さらには実世界では顕在化していなかったもの、実世界の存在を改変したもの、実世界には存在せず仮想世界のみに存在するものまでをも、デジタルツインとして仮想世界に投影します(図4)。

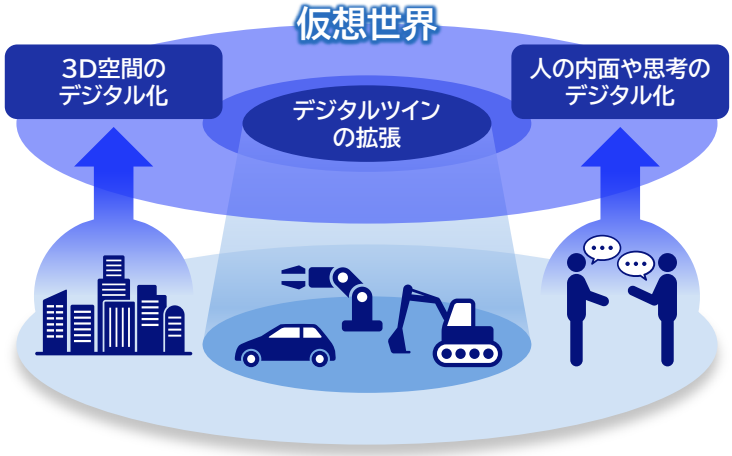


図4 デジタルツインの拡張と仮想世界の構築

Beyond 5Gでは、このように拡張したデジタルツインを仮想世界に写し取り、世界中で共有し、それらを通して実世界/仮想世界を最適化し、その結果を再び現実世界に反映させるといった、ループ(サイバーフィジカルシステム)が実現します(図5)。仮想空間において、人は宇宙や空を自由に飛び世界中を自由に行き来できるだけでなく、世界中の人々の想像性やアイデアが発揮され創造された架空の施設や空間、たとえば空に浮かぶショッピングモールで新しいショッピング体験をしたり、音楽や映像作品を世界中の人と一緒に楽しんだり、創り出したりする新しい世界が広がります。そこでは、AIが作り出した仮想的な都市の上でアバターとインタラクトするなど、現在私たちが見ている世界とは大きく異なる世界が登場するはずです。

© NEC Corporation 2023

\Orchestrating a brighter world NEC

図5 仮想世界を介したサイバーフィジカルシステム

3. 全地球上のあらゆる場所でシームレスにつながるカバレッジ

人間やロボットが活動するありとあらゆる空間において、かたときも絶えることなく、テレコミュニケーションが利用できるようになります(図6)。そのために、都市におけるミリ波やTHz波の不感地帯解消だけでなく、LEO(低軌道衛星)やGEO(静止軌道衛星)、HAPS(High Altitude Platform Station)などによる過疎地や海上などの環境における通信手段の確保、さらにはキャリア通信とローカル通信を組み合わせたカバレッジのカスタマイズなど、多様な手段を提供します。また、将来的にLEO/GEO/HAPSのコストが劇的に下がれば、人口密度が低い国や郊外エリアにおいても、モバイル通信の有力な代替となってくるでしょう。

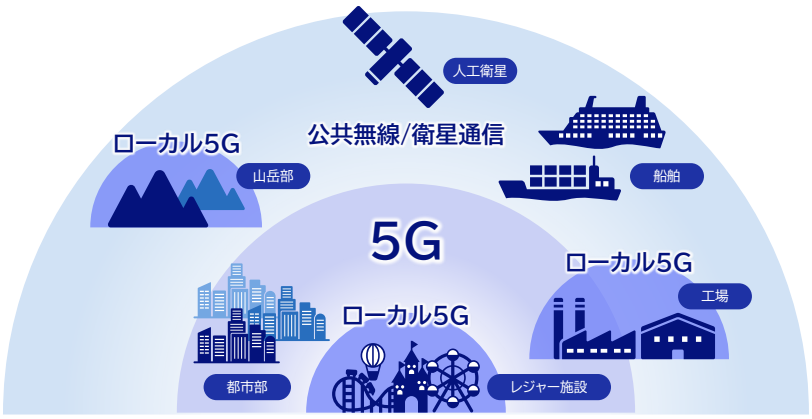


図6 あらゆる場所でシームレスにつながるカバレッジの確保

© NEC Corporation 2023

\Orchestrating a brighter world NEC

2.4 社会インフラ基盤としてのBeyond 5Gの役割

Beyond 5G、は第1世代から第5世代へと進化し続けてきた無線ネットワークの延長だけではなく、生活や社会のあらゆるシーンを支える最新の情報通信技術として浸透していくと考えています。DXのプラットフォームとして、さらに人々と社会を支える重要な社会インフラ基盤としての役割を担うようになり、実世界と仮想世界の人、モノ、コトのインタラクションのシームレス化に貢献していきます。また、あらゆる活動がデジタルを前提とする社会になる可能性があり、その実現には超高速・大容量、超低遅延かつ安全な通信インフラ基盤が、都市部だけでなく地方部も含めた日本全土への早期整備が望まれます。

Beyond 5Gを、早期に社会インフラ基盤として整備するためには、既存の通信キャリアだけでなく、新たなインフラ事業者も含め通信インフラの整備を加速する工夫が重要だと考えています。また、日本の社会全体のコスト効率性を考慮すると、ネットワークインフラのシェアリングも早期整備への実現手段として、重要な取り組みとなるでしょう。その他にも、LEO/GEO/HAPSなどの上空からサービスを提供するNTN(Non-Terrestrial Network)を活用することで、不感地帯や過疎地への通信カバレッジ整備にもつながります。NECは、社会インフラ基盤としてのBeyond 5Gを早期に整備すべく、幅広い事業者との連携も視野に入れながら進めることで、世界中の誰もがどこにいてもネットワークを介して、自由かつ安心してさまざまなサービスを利用できるデジタル格差のないインクルーシブな社会の実現を目指していきます。

3.技術進化の方向性

3.1 Beyond 5Gの2つの側面

NECは前章で述べたとおり、Beyond 5Gを5Gの量的拡大と、分散データ処理との2つの側面で捉えています。図7は、これらをシステムアーキテクチャーとして模式的に表しています。

5Gの量的拡大としては、5Gネットワークを構成する機器群(User Equipment(UE)、Radio Unit(RU)、Central Unit(CU)/Distributed Unit(DU)など)で超現実感や拡張したデジタルツインを再現するため、超高速・大容量、超低遅延、多数同時接続といった機器性能のさらなる向上が必要です。また、拡張したサイバーフィジカルシステムの安全安心を保証するため、超高信頼性やセキュリティも重要です。全地球上で空間を超えるための、超広域力バレッジや超低消費電力化も求められます。

一方、分散データ処理基盤としては、帯域や遅延を自由に制御できるネットワークと組み合わせて、センシング手段の多様化とそれらをリアルタイムに処理するコンピューティング環境が必要です。環境中のあらゆる情報をデジタルデータとして取り出すために、MECを活用したAIのリアルタイム分散処理や、デジタルツインデータの分散管理が重要になります。また、実世界から多くのデジタルデータを取り出すための手段として、ミリ波やTHz波の通信用電波をはじめ、通信用光ファイバを活用した空間のセンシング、対象物の測位なども合わせて重要になってきます。

制御プレーンやオーケストレーションにおいては、ネットワークと分散データ処理を融合し高度な最適化や自動化を進化させユーザの必要に応じてネットワークの性能や構成が変化できることも求められます。

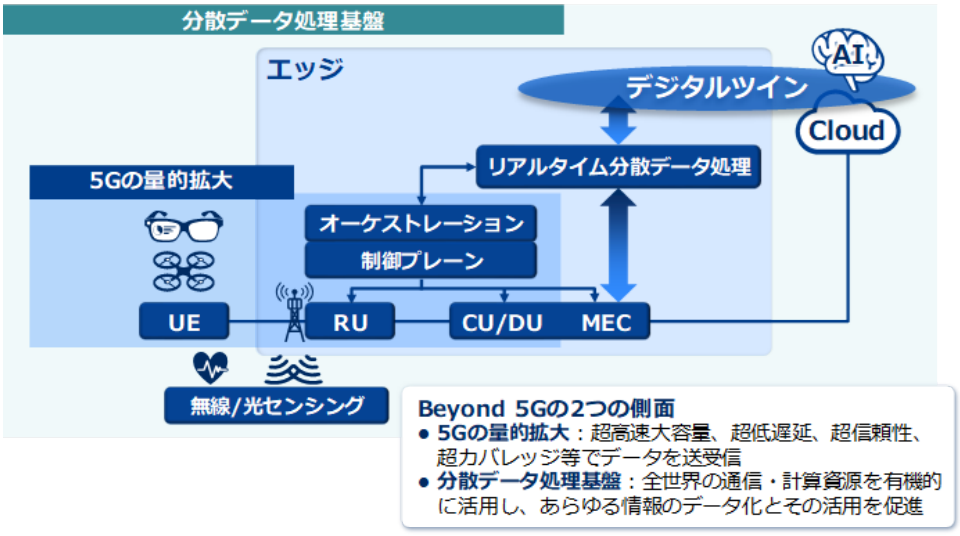


図7 Beyond 5Gの2つの側面

3.2 ネットワークとAIの共進化

無線通信技術とサービス/アプリケーション基盤技術は、それぞれ独立して進化するのではなく、お互いに高め合いながら進化していく、いわば“共進化”の関係になっていくと考えられます(図8)。実世界におけるデジタル化などのサービス/アプリケーション基盤技術は、超高速・大容量や超低遅延など高い通信性能を必要とし、それが無線通信技術の進化を促し、それとともに自らのAIアルゴリズムを進化させていきます。同様に、無線通信技術も高速大容量化など、求められる要件に従って進化していくと同時に、その進化によって新たなデジタル化技術やサービス/アプリケーションの利用を可能にします。ここでは、前者をネットワークとともに進化する(サービス/アプリケーションを実現する)AIとして“NW for AI”、後者はネットワーク技術を進化させるAI(アルゴリズム)として“AI for NW”と記載しています。NECではその両方の強みを活かした研究開発に今後とも注力していきます。

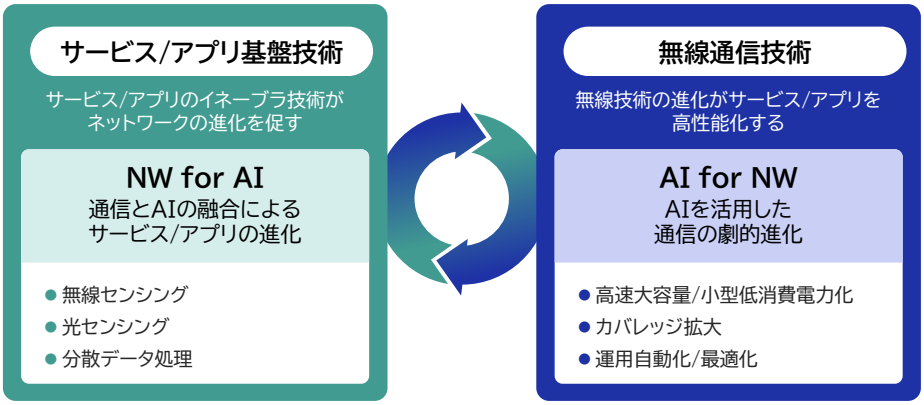


図8 ネットワークとAIの共進化

3.3 技術進化の方向性

以上で述べた技術進化の方向性を図9に示します。ここでは、横軸をテレコミュニケーションの進化、縦軸を無線通信技術からサービス/アプリケーション基盤技術への広がりとし、個々の技術要素を1)無線/光通信、2)運用自動化/最適化、3)分散データ処理、4)セキュリティの4領域で整理して示しています。これらの技術については、次章で具体的に説明します。

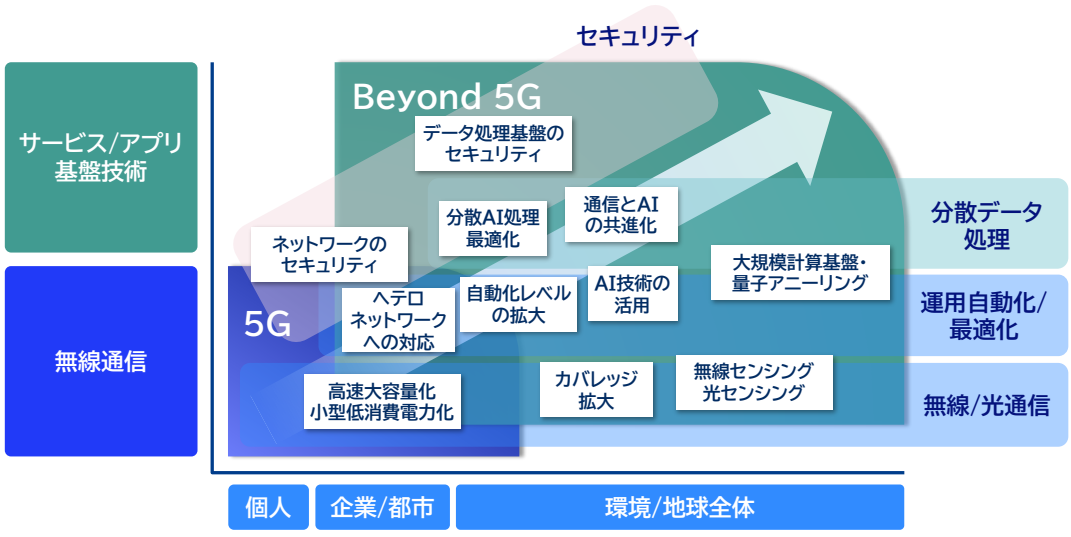


図9 技術進化の方向性

4.重点技術領域

4.1 無線/光通信

4.1.1 高速大容量化/小型低消費電力化

拡大し続ける通信需要に対応するため、5G以降も高速大容量化が継続して求められます。総務省Beyond 5G推進戦略では、5Gの10倍から100倍の超高速・大容量、および1/100の超低消費電力が求められています。

高速大容量化には、ミリ波帯やSub THz波帯といった高周波数帯の活用が必要であり、新しいアンテナ技術やパワーアンプ技術、ビームフォーミング技術、高周波数帯に適した伝送方式、伝搬モデルの開発などが必要になります。高周波数帯を用いてエリアを構築していくには、分散MIMOやRIS（Reconfigurable Intelligent Surface）による中継を利用した無線ネットワークのような、新しいネットワークトポロジーの採用も有効です。高周波数帯のデバイス技術としては、高速大容量化だけでなく、小型低消費電力化も大きな要件です。

その一方で、大容量通信が可能なエリアを経済的に拡大していくには、5Gと同様にミリ波帯より低い周波数帯も重要です。低い周波数帯では、ミリ波帯やSub THz波帯のように広帯域を確保することが難しいため、これまで以上に高効率な周波数利用が求められます。MIMO技術をさらに高度化し、5Gよりも多数の信号を同時伝送する技術を実現していくことも考えられます。さらに、実装面では、大規模化を続けるデジタル信号処理を、現実的に実装可能な演算量で実現することが肝要です。そのためには、従来のデジタル信号処理技術だけではなく、AIを活用した最適化や信号処理技術など新しい基本技術も求められます。光通信へのMIMO採用など、無線技術と光技術が接近しているため、デジタル信号処理は共通のコア技術としての活用も期待されます。さらに、これらのデジタル信号処理技術は、固定無線通信や自由空間光通信、モバイルFH/BH（Front-haul/Back-haul）、光海底通信など、さまざまな領域に適用され、通信網全体を高速化していくキー技術となります。

現在の5Gでは、通信機器にコモディティ化したハードウェアを活用する仮想化が進んでおり、この動きは今後さらに拡大し、さまざまな処理が汎用ハードウェアと多様なソフトウェアの組み合わせで実現されていくと想定されます。仮想化は、超高速・大容量や多数同時接続といった異なる要件、小型で安価なネットワークや大規模で高信頼なネットワークといった異なる目的にも、柔軟かつ迅速に対応する意味で重要です。さらに、多数の汎用ハードウェアを複数の基地局間で互いに融通して使用可能になれば、より経済的なインフラを構築できるようになります。

重点技術：広域分散MIMO/Radio over Fiber（RoF）

ミリ波やSub THz波はその高い直進性により、電波が障害物に遮蔽されると通信が途切れてしまうリスクがあります。その対策として、多数のアクセスポイント（AP）を分散配置し、APからユーザ端末への見通し通信を確保する分散MIMO[12]が有効です。Beyond 5Gの分散MIMOでは、集約基地局に接続されたAPを屋外では電柱、信号機、街路灯などに、屋内では壁や天井などに多数設置し、それら複数のAPが互いに連携して通信する広域分散MIMOの導入が期待されます。広域分散MIMOにより、ユーザ端末は複数のAPとの間で見通しパスを冗長に確保できるので、ミリ波/Sub THz波の通信安定性を高められます。その際、多数のAPを設置する場所を確保するために、APの小型化が重要になります。APの小型化には、従来の5GでRadio Unit（RU）が担っていたデジタル信号処理機能を、集約基地局に移した低レイヤ機能分割が適しています。このAPと集約基地局との間の通信には、無線信号を光ファイバ上で伝送するRadio over Fiber（RoF）伝送が必要です。その際、汎用的な光通信デバイスを活用したRoF伝送[13,14]を用いれば、RoF伝送に関わるコストを低減でき、システム

12 「NEC、ミリ波周波数帯に分散MIMOを適用し、実際のオフィス環境下で3倍の同時接続数・伝送容量を実現」、URL: https://jpn.nec.com/press/202101/20210125_01.html

13 Y. Kase, S. Hori, N. Oshima, K. Kunihiro, "Radio-over-Fiber System with 1-bit Outphasing Modulation for 5G/6G In-door Wireless Communication," IEICE Trans. Electron., Jul. 2023. DOI: 10.1587/transele.2022ECP5043

14 M. Tanio, N. Ishii and K. Muraoka, "Wideband Delta-Sigma Radio-over-Fiber Embedding a Pulse-Distortion Model for Beyond 5G," 2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall), 2022, pp. 1-5.

が導入しやすくなります。多数のAPを密に配置することで、高周波数帯における通信安定性の向上が期待できますが、その一方でAP間の干渉が増加してしまう可能性があります。そのような場合、複数のAPが協調して無線信号を送受信し干渉を低減する技術[15]も、合わせて検討していく必要があります。さらに、ユーザ端末が移動しAPからの電波が障害物に遮蔽された場合には、高周波数帯に特有の急な通信品質の劣化により、通信の切断が発生してしまう可能性もあります。その場合、通信品質の劣化を予測することで、無線信号を送信する最適なAPを動的に選択する技術[16]が有効です。このように、分散MIMOを支える複数の要素技術を組み合わせていくことで、高周波数帯であっても安定した高速大容量通信を実現するシステムを経済的に構築できると考えられます。

重点技術：Sub THzデバイス

Beyond 5Gで求められる100Gbps級の超高速・大容量通信の実現には、10GHz以上の広い周波数帯域を確保できるSub THz帯(100-300GHz)を用いた無線通信が有望です。Sub THz通信の応用領域を拡大するには、アクティブフェイズドアレーアンテナ(APAA：Active Phased Array Antenna)[17]を用いたビームフォーミングが有効です。これにより、大きな距離減衰や高い直進性などSub THz波の欠点を補い、通信距離の延伸や移動体への追従が可能となります。Sub THz帯APAAを実現するには、波長と同程度のミリメートル級の間隔で多数のアンテナ素子を配置することに加え、移相器やアンプ、アンテナをいかに低損失に接続するかなどが課題になります。そのため、ビームフォーミング機能を高密度に集積する半導体デバイス集積回路技術と、アンテナと半導体ICを一体に形成する高周波モジュール実装技術が重要になります。半導体デバイスは、集積性に優れるシリコン系半導体と、高周波特性に優れる化合物半導体、あるいはそれらのハイブリッド構成など、用途に応じて選択する必要があります。Sub THz帯では、アンテナ素子よりも半導体ICチップの方が大きなサイズになるため、半導体ICパッケージ内にアンテナ素子を形成するアンテナインパッケージや、半導体基板上にアンテナ素子を形成するアンテナオンチップなど、新しい実装技術が必要になります。また、実用化には低消費電力や放熱も重要です。さらに、Sub THzの広帯域を活用するには、高周波アナログデバイスの性能向上だけでなく、ADC（Analog-to-Digital Converter)/DAC（Digital-to- Analog Converter)やデジタル信号処理技術の進化も不可欠です。これらの技術革新を組み合わせることにより、100Gbps級の超高速・大容量通信が可能になります。

重点技術：RIS（Reconfigurable Intelligent Surface）

プラチナバンド(700MHz帯から900MHz帯)は、ビル影や窓から部屋の奥まで電波が届くのに対して、Beyond 5Gや6Gではミリ波などの直進性が高い電波を多く使うこととなり、電波の届かない場所ができます。そのような場所を減らすためには、無線基地局やアンテナ増設、リピータ導入などの対策がありますが、もう一つ期待されているものがRISと呼ばれる電波の反射板です。ビル壁や教室、工場の天井などにRISを設置することで、電波が届かなかったところにも届くようになります。パッシブ型のRISはほとんど電力を消費せず、また現在では反射角度を動的に変更できるものが研究開発されています[18]。

2021年9月、RIS関連の主要なユースケースやアーキテクチャの詳細、およびチャネルモデルを定義するために、新規ETSI ISGの活動が開始されました。その成果は、今後の3GPP リリース19ワークショップに入力として使用され、RISノードはリリース19内の研究項目に含めるかどうかが議論される予定です。

---

15 J. Shikida, K. Muraoka, T. Takeuchi and N. Ishii, "Inter-Access Point Coordinated User and Beam Selection for mmWave Distributed MIMO Systems," 2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall), 2022, pp. 1-5.

16 「世界初、28GHz帯で遮蔽を気にせず繋がり続ける分散MIMOの実証実験に成功」、URL: https://jpn.nec.com/press/202210/20221031_03.html

17 岡田、パン、白根、大島、國弘、「5G/Beyond 5Gを実現するミリ波フェイズドアレー無線機技術」、電子情報通信学会誌、Vol.105 No.8 pp.706-712、2022年8月号。

18 https://www.neclab.eu/about-us/press-releases/detail/nec-laboratories-europe-achieves-breakthrough-in-smart-surface-technology-for-5g-and-beyond-wireless-connectivity

重点技術：Nuberu（アクセラレータのシェアリングによる無線基地局の仮想化）

O-RAN技術は、オープン性を提供しインテリジェント制御を可能にして、RAN仮想化（vRAN）を実現しています。しかし、vRANでは信頼性を高めるために、高価でエネルギー消費の大きな専用ハードウェアアクセラレータを使うことが一般的です。費用対効果の高いvRAN構築のために、計算リソースを共有すると無線信号を処理するのに必要とされる待ち時間の変動から、従来の基地局における信頼性が脅かされます。

NECではこの課題を解決するために、共有プラットフォームにおいて計算変動耐性がある、新しい方式Nuberuを開発しました[19]。Nuberuの特長は、計算期限が間に合わない可能性があることを、機械学習による予測機能により事前に知ることができる点です。Nuberuを使用することで、基地局の信頼性を犠牲にすることなく、高価なアクセラレータをシェアリングすることによって、RANにおける前例のない多重化利得の提供が可能になります。

4.1.2 カバレッジ拡大

地球上のさまざまな場所で高速通信を実現するには、人口密集地域を中心に活用されている比較的低周波数帯（Sub6）の無線技術だけでなく、カバレッジの拡大とカーボンニュートラル（CN）に向けたCO_2削減を推進するさまざまな技術も必要となります。

都市内では、直進性が強く減衰が大きいミリ波/THz波のカバレッジ不足、および通信の不安定性に対処することと、アンテナ数の増加による投資コスト・リスクの増大に対応するため、前節で述べた分散MIMO技術やRoF技術に加えて、高度な基地局の置局設計や無線通信制御が必要です。

また、郊外から過疎地、海上、空中まで幅広く経済的にカバレッジを広げるには、LEO/GEOやHAPSなどの非地上系ネットワーク（NTN）を、プライベートに敷設されたネットワークと連携させた通信手段を確保する必要があります。

2010年代末に、複数の比較的小型な衛星を組み合わせて、グローバルカバレッジを提供する衛星コンステレーション構想が、StarlinkやOnewebなど複数のプロジェクトで実証されました。その結果、ファイバが敷設されていない地域でモバイルバックホールを提供するには、衛星だけではなく、衛星と通信する数多くの地上局（ユーザ側のエントランス端末やインフラ側のゲートウェイ）が必要なことが判明しました。環境の観点で考えると、地上局の増加や地上ネットワーク上での情報伝送の増加は、地上で消費されるエネルギーつまりCO_2のさらなる増加につながります。そのため、事業採算性の確保とCO_2削減を両立させるためには、衛星の打ち上げや製造コストの低減のみならず、より少ない地上局数で地上系ネットワークを宇宙領域で補完してカバレッジを拡大する、より一層の技術開発が必要であることがわかってきました。たとえば、地上局数を減らすために有効な衛星間通信技術やモバイルダイレクトアクセス技術、さらに地上系のD2D（Device-to-Device）や V2X（Vehicular-to-Everything）といった端末間のネットワークとの組み合わせなどです。一方で、洋上などの自然エネルギーで発電された電力を、余すところなく効率よく利用することもCO_2削減につながります。ネットワーク全体の消費電力を削減するという点では、データ処理機能自体をこういった自然エネルギー発電の余剰があるところに、必要に応じて瞬時に移動させることが可能なネットワーク制御技術が必要となります。

また、5G以降の移動通信システムより高い周波数の利用や、周波数の拡大はさらに進化することが予想されるため、これまでのように衛星通信と移動通信システムで利用周波数帯を分離することが困難になるとみられます。これを解決するには、周波数の利用効率をさらに高めたり、周波数を共用したりする技術も不可欠です。それに加えて、無線周波数は限りがあるので、高速化するためには光の利用も進むと考えられます。

さらには、ローカル5Gのようなプライベートネットワークが増え、土地利用者や地域の独特なニーズに合わせた通信インフラの構築など、モバイルネットワークとプライベートネットワークを組み合わせたカバレッジのカスタマイズなども必要になると考えられます。

また、山間部や海上などのカバレッジの向上は、CO_2を吸収する森林管理や海洋での海藻・海草の育成管理などの活動を支援するためにも有効となります。

19 Nuberu: reliable RAN virtualization in shared platforms
https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3447993.3483266

重点技術：衛星間光通信

地上局数を減らす有効な手段の1つは、衛星の見通し内にない地上系ネットワークのゲートウェイ地上局との間で、無線中継を実現することです。そのためには、衛星間通信技術が必要です。衛星間の回線容量が、サービスの快適さを左右するため大容量化が不可欠です。宇宙空間では光を遮るものがないため、無線よりも小型・大容量を実現し地上と宇宙の間の行き来を減らすことができれば、地上のファイバでは困難な数千～数万キロに及ぶ超長距離の低遅延伝送も可能になります。

また、空気のない宇宙では、光の増幅により生まれた熱を逃がすことが難しいため、これを解決する技術や、数千km離れた衛星が発する光をファイバに結合可能な精度で捕捉・追尾する技術が必要となります。

重点技術：モバイルダイレクトアクセス

地上局数を減らすもう1つ別の有効な手段としては、衛星で直接ユーザ装置（UE）の無線通信信号を送受信するモバイルダイレクトアクセスです。この通信方法は、距離による減衰量が非常に大きいため、送信のハイパワー化やアンテナ利得の向上が必要です。また、LEO衛星は地表面に対して高速（対地速度約7km毎秒）で移動しているため、遅延時間やドップラーシフトによる周波数偏移を補正しなければなりません。見通し内にある複数のUEと衛星局が直接通信するには、小型衛星に搭載可能な軽量かつ高利得なマルチビームアンテナ技術も不可欠です。

大容量化が進むと、衛星とゲートウェイ地上局とのリンクは、これまで以上に広帯域化が求められるため、高可用性・高性能無線リンクも重要な技術の1つになります。広帯域化には高周波化が不可欠ですが、超長距離の衛星通信では降雨などによる減衰への対策が求められます。

4.1.3 無線/光センシング

実世界をくまなくデジタル化するには、高精度かつ膨大なセンシングが必要です。大量のカメラで、私たちの行動範囲をくまなくカバーして必要なデジタルデータ化を行ったり、大量の無線デバイスを社会に配置して、あらゆるものをセンシングしたりする必要があるため、無線通信の超高速・大容量化と多数同時接続化は引き続き拡大すると予想されます。加えて、無線や光の通信技術を活用したセンシングにも、大きな期待が集まっています。

ミリ波/THz波など直進性の非常に強い通信用電波の活用は、アンテナ数の増大やビームの細分化・精緻制御と合わせて、追加の設備導入が不要なセンシング手段としても有望です。このような技術を活用して、GPSの届かない屋内で測位を行ったり、空間内の物体の位置や動きを把握したりすることで、デジタルツインを構築する際のさまざまな情報が得られます。

光通信の技術においても、通信用の光ファイバに加わる微小な振動を検出して、その周りの状況をセンシングすることができます。さらに、光通信用の送受信デバイスを活用したコヒーレント光センサによる空間のセンシングでは、物体までの距離を測定するだけでなく、ドップラー効果を用いた速度の測定も可能です。

4.2 運用自動化/最適化

4.2.1 サービスやアプリケーションに即したEnd-to-endネットワークの最適化

Beyond 5Gは、現在の延長上にあるモバイルネットワークの進化系ではなく、さまざまなネットワークを組み合わせたきわめて複合的で複雑なネットワークとなります。たとえば、

- ミリ波/THz波や分散MIMOなどによる超高密度小型基地局群
- O-RANなどオープンシステムにおける複雑なマルチベンダシステム
- ローカル5Gなどのプライベートなネットワーク
- 低軌道衛星/HAPSやアドホック通信などの超広域向けのシステム

など、ますます複雑化・ヘテロジニアス化していきます。そのようなシステムにおいては、各サービスやアプリケーションの要求に応じたEnd-to-endで高度な統合運用管理および性能最適化が求められます。さまざまな種類あるいはさまざまな管理者のネットワークを、統合されたネットワークとして最適化し、さらにスライシング技術により多種の異なるネットワークを切り出して、それぞれ別の目標で最適化するといった操作が簡単にできなければなりません。

そして、このような最適化により達成される価値は、ネットワークそのものの性能や、それを利用するユーザに関するもの、それを提供する運用者に関するものなど、さまざまなものが想定されます。たとえば、

- スループットや遅延、接続性などEnd-to-end性能指標の達成
- ミッションクリティカルなアプリケーションに特化した最適化
- 資源利用の効率化や低消費電力化
- 障害停止時間や障害影響範囲の最少化
- 未知の攻撃に対する被害の最少化
- 需要変動の不確定性に対応可能なシステム設計最適化/投資リスク最少化
- 受付制御や動的プライシングによる収益最大化

などです。これらの最適化の目標は、膨大な数のミリ波/THz波による高密度小型基地局の無線制御に対応し、それぞれの部分で異なる特性を持つヘテロネットワーク全体をEnd-to-endで保証することにあります。そのため、このような複雑で大規模な運用管理には、下記に述べるAI技術の活用を含め、今後ともさまざまな研究開発が必要です。

重点技術：アプリアウェア無線通信制御技術

高周波数帯（ミリ波/Sub THz波など）を含む無線通信を、個々のユーザニーズに応じて最適な形で使いこなし、ユーザ体感品質（Quality of Experience：QoE）やアプリケーション性能（作業速度や生産性など）を最大化するネットワーク制御技術です。高周波数帯の電波の直進性や、減衰に起因する激しい無線品質変動[20,21]に対して、変動を把握・予測[22]し、その変動に合わせて最適なネットワークの制御手段と制御量をリアルタイムに自動決定[23,24]することで、安定した高いQoEやアプリケーション性能を実現します。

4.2.2 運用管理自動化レベルの向上

ネットワークの運用管理では、複雑化する通信キャリアのシステムを少人数で安定運用する高度なインテリジェンスを提供したり、企業や自治体などローカルユーザが求めるシステムをターンキーで設計/構築/提供したり、クラウドセンターからの

20 A. Narayanan, et al., "Lumos5G: Mapping and Predicting Commercial mmWave 5G Throughput," ACM IMC 2020.
21 A. Narayanan, et al., "A First Look at Commercial 5G Performance on Smartphones," WWW 2020.
22 Anan Sawabe, Shinya Yasuda, Yusuke Shinohara, Takanori Iwai, Akihiro Nakao, "DCM: Delay as Component Model based on Hidden Striping Structure in Mobile Networks," IEEE CLOBECOM 2021.
23 Dheeraj Kotagiri, Anan Sawabe, Eiji Takahashi, Takanori Iwai, Takeo Onishi, Yoshiaki Nishikawa, "Context-based Mixed-Numerology Profile Selection for 5G and Beyond," IEEE CCNC 2022.
24 C. Zhang, et al., "Deep Learning in Mobile and Wireless Networking: A Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019.

高度な運用を無人化したりするなど、ニーズに応じて最適な形態で運用管理を提供する必要があります。そして、自動化レベルを向上させ、できる限り無人あるいは専門家の関与を減らした運用が望まれます。

TM-Forumでは、以下に挙げた6段階の自動化を議論しており、現状でもLevel 2-3ぐらいの自動化は達成できていると考えています。

- Level 0 - manual management
- Level 1 - assisted management
- Level 2 - partial autonomous network
- Level 3 - conditional autonomous network
- Level 4 - high autonomous network
- Level 5 - full autonomous network

しかし、Beyond 5Gでは上記のようにネットワークがきわめて複合的かつ複雑化するため、人間による運用では手に負えなくなる可能性があります。したがって、段階的かつ着実に自動化レベルを上げるだけでなく、人間の経験と勘から学ぶ必要のない、人間の関与を排除した完全な自動化が求められるでしょう。完全な自動化を目指すには、今後5～10年の中長期的なネットワークの進化を考慮するとともに、たとえばCOVID-19や大規模災害などのように想定外の規模で人々の行動変容が起きたり、ネットワーク障害が発生したりする不確実な事態などをも想定した、幅広い対応が必要になります。

4.2.3 AI技術の活用と進化

以上のような運用自動化/最適化の進化に向けて、AI技術の活用が大きく期待されています。ただし、自動化/最適化の対象範囲や目標が拡大し、より高いレベルの自動化が求められる状況では、ただ1つの「万能AI」がすべての問題を解けるわけではありません。目的の特性に応じて、ニューラルネットワーク（DNN: Deep Neural Network/CNN: Convolutional Neural Network/RNN: Recurrent Neural Network）などや強化学習/深層強化学習、ベイズ理論、遺伝的アルゴリズム/進化適応、グラフィカルモデル/マルコフモデルなど、さまざまな数学的ツールを組み合わせた研究開発の柔軟性が求められます。長期的には、組み合わせ最適化問題への量子アニーリングの活用など、非連続なイノベーションも期待できるかもしれません。

また、完全自動化とは、すなわち人の想定を超えた未知事象への対応まで自動化することを意味するため、既存データを学習させたAIや、特定の状況で強化したAIでは対応が困難です。将来は、生物の進化になぞらえた環境変化に進化適応するAIが必要になる可能性があります。

重点技術：インテントに基づく自律的なネットワークの設計・運用

本技術はネットワークの利用者や提供者が、それぞれの要求や制約を必要十分な詳細さで記述したインテント（意図）を元に、それを満たすネットワークをAIが自律的に設計して構築・維持する技術です[25,26]。AIは、性能・可用性・コストなどの条件を満たす設計案を多数生成しつつ、できる限り最適な解を高速に探索します。ネットワークを構成する部品のモデルを追加しAIに学習させることで、さまざまなネットワークを統合的に設計できるようになります。また、AIが設計を具体化する過程を参照することで、結果の妥当性を確認・微修正することもできます。

25 黒田貴之, 桑原拓也, 丸山貴志, 八鍬豊, 田辺和輝, 福田達也, 里田浩三, 大崎隆夫, “ICTシステムの設計に関する知識の機械学習による獲得”, 電子情報通信学会論文誌 B Vol.J104–B No.3 pp.140–151, 2021.

26 Takuya KUWAHARA, Takayuki KURODA, Takao OSAKI, Kozo SATODA, “An Intent-based System Configuration Design for IT/NW Services with Functional and Quantitative Constraints”, IEICE Transactions on Communications, Vol.E104-B, No.7, July 2021.

4.3 分散データ処理

分散データ処理基盤、あるいはそこで実行されるさまざまな認識AIやロボティクスなどは、一見Beyond 5Gの無線ネットワークから独立した技術領域とも捉えられますが、Beyond 5G時代においては、無線ネットワークあるいはEnd-to-endのネットワークと融合させ進化させていく必要があります。以下では、Beyond 5Gを実現する技術として、ネットワークと融合した分散データ処理基盤を実現するための通信とAIアルゴリズムの共進化について、また、その上で実現されるデジタルツインやロボティクスについて紹介します。

4.3.1 通信とAIアルゴリズムの共進化

分散データ処理基盤においては、アプリケーションやサービスのニーズ、あるいはネットワークや計算資源の状況に応じて、処理内容および処理レベル、処理される場所、割り当てる計算リソースなどのネットワークリソースを、その都度最適に制御する必要があります。そのためには、計算リソースとネットワークリソースを空き状況に応じて最適な場所で処理したり、要求する遅延条件をネットワーク遅延と計算処理遅延に最適な形で賦課したり、変動する電波環境や空きリソースの先読みを行いリスクに対して確率的に備えるなど、あらゆる要件や可能性を考慮した最適化が必要です。

さらに、上記のような処理リソースの最適化だけでなく、アルゴリズムレベルでの最適化も重要です。通信環境の分散性やダイナミックな状況に合わせて、性能を最大化できるようにAIアルゴリズムが進化し、さらにAIアルゴリズムの性能を最大化するべく、ネットワークのさまざまな制御が進化するといった、相互の進化が求められます。

たとえば、画像処理を含む認識では、その計算量の大きさから認識精度やフレームレート、通信帯域や処理遅延などに大きなトレードオフの関係があります。そのため、AIアルゴリズムの処理とネットワークでの分散処理の双方を適切に設計する、すなわちネットワークの状況に応じてAIアルゴリズムをダイナミックに最適化したり、AIアルゴリズムの性能を最大化するためにネットワークの制御を最適化するなど、これらを同時に実現する必要があります。また、AIアルゴリズムには一般的に学習フェーズと推論フェーズがあります。それぞれデータの発生や処理のパターンが大きく異なるため、どのように学習と推論のメカニズムを広域分散処理するのか、どのようにそれを収容する通信インフラを最適化するのかという、両者の間には大きな相関があります。AIアルゴリズムの性能(精度や処理時間)が、通信インフラの能力や構成と密接に関わるため、処理リソースの最適化だけを考えるのではなく、通信インフラの最適化とAIアルゴリズムの共進化が重要な研究開発の方向性となります。

重点技術:エッジ学習・推論プラットフォーム

エッジTPU[27]など小型・低消費電力のAIアクセラレータが登場したことにより、IoTやロボットシステムのエッジデバイス上でさまざまなAI処理が可能になりつつあります。エッジデバイス上のAI処理には、前述したリアルタイム最適化の観点に加え、こうした環境特有のアルゴリズムに対する考慮も必要です。たとえば、エッジデバイス上の推論結果を元に、クラウドへ送信する学習データを選別する学習データ収集技術[28]や、エッジデバイス上で学習した結果をクラウド上で集約して、1つのAIモデルを改善していくFederated Learning[29]などの開発が進められています。こうしたアルゴリズムを含んだシステムでは、計算処理/ネットワークリソースの消費パターンは推論処理とデータ送信を中心とする基本的な分散AI処理システムとは異なってきます。

---

27 “Coral,” https://coral.ai/

28 Sandeep Chinchali, Evgenya Pergament, Manabu Nakanoya, Eyal Cidon, Edward Zhang, Dinesh Bharadia, Marco Pavone, Sachin Katti, ”Sampling Training Data for Continual Learning Between Robots and the Cloud.” arXiv preprint arXiv:2012.06739 (2020).

29 Bonawitz, Keith, et al. ”Towards federated learning at scale: System design.” arXiv preprint arXiv:1902.01046 (2019).

4.3.2 デジタルツインの構築

Beyond 5G時代のデジタルツインは、センサをネットワークにつないでセンシングするだけではなく、空間全体をくまなく、高精細・高精度かつリアルタイムにデジタル化して表現できるようになります。このようなデジタルツインは、ビジョンとして述べた人間・空間・時間といった制約を超えられる社会の実現にとって、非常に基本的な要素です。たとえば人とロボットの共存を考えたとき、現時点では工場のように管理された環境でも人間の安全を確保するため、動線分離やエリア限定の措置を取るか、きわめて遅い速度でロボットを動かす必要があります。しかし、前述したデジタルツインを活用すれば、一般的な生活環境の中で人とロボットが安全かつ効率的に共存できるようになります。

しかし、現実世界の環境は、刻一刻と変化しており、AIの認識誤差やネットワークの遅延といったさまざまな不確定性/不確実性が存在します。たとえばAIアルゴリズムには処理時間と認識精度の間にトレードオフの関係がありますし、無線区間の遅延や信頼性には予測不可能な変動があります。これらは、デジタルツインを活用したさまざまな実世界におけるアプリケーションの安全性や確実性、作業効率などに対する大きなリスクとなります。そのため、システムの性能やアルゴリズムの精度が、常に一定に保たれているという強い仮定を置くことなく、前述した不確定性/不確実性をきちんと考慮に入れてデジタルツインを構築する必要があります。

重点技術：確率的デジタルツイン

確率的デジタルツインは、不確実性を許容する新しいデジタル化手法です[30]。現実世界の物体の位置や人の動作などの実世界の情報を、デジタルツインとして表現する際に、物体や人が「どこ」とか「何」や「誰」とかを確定的な情報として扱うのではなく、確率分布として扱います。つまり、誤差は絶対に存在するという前提に立ち、ベイズ的に空間の真の姿を推定する手法を開発して、それを元にデジタルツインを確率分布として表現します。そのための基盤技術として、深層学習を用いた認識技術だけではなく、不確かな情報からベイズ的に推定する認識手法[31]や、人間の認知機構に基づくマルチモーダルな認識手法[32]など、学際的な技術の活用も重要になります。

30 下西英之, 大下裕一, 小南大智, 関良我, 村田正幸, 吉田裕志, 野上耕介, 藤若雅也, 中野谷学, 金友大, “確率的デジタルツイン”, 信学技報 IEICE-2021-57, Sep. 2021.

31 S. Bitzer, J. Bruineberg, and S. J. Kiebel, “A Bayesian attractor model for perceptual decision making,” PLoS Computational Biology, vol. 11, no. 8, p. e1004442, 2015.

32 M. Aller and U. Noppeney, “To integrate or not to integrate: Temporal dynamics of hierarchical bayesian causal inference,” PLoS biology, vol. 17, no. 4, p. e3000210, 2019.

4.3.3 確率ロボティクス

生産性向上や作業支援を目的に、さまざまな分野でロボットが活躍していますが、その一方でまだまだロボットの導入が難しく、人手による大変な作業が継続している分野も数多く残っているのが実情です。今後、さらにロボットを実社会へ浸透させるには、人とロボットが安心して共存・協働できる安全性と、既存ロボットを凌駕する高い作業効率の両立が重要課題であると考えています。

そうした安全性と作業効率を実現するには、ロボットとその動作環境の不確実性が大きな技術的ハードルになります。実際に、ロボットが制御命令どおり寸分違わずに動作し、かつ環境にまったく外乱がともなわない理想的な系を仮定すると、ロボットをいかに高速に駆動させても、人やモノに衝突することなく目的の作業を確実にこなせるはずです。しかし、現実問題として、安全な速度でロボットを駆動させないと想定経路を逸脱したり、所定の位置で停止できず人やモノに衝突したりするリスクが生じてしまいます。すなわち、避けられない確率的な不確実性の中でロボット制御を確率的に捉え、いかに安全を確保しつつ高効率に制御するかという技術観点が重要になります。このような考えは「確率ロボティクス」[33]として、以前よりロボティクスにおける主要テーマに位置づけられています。

重点技術：リスクセンシティブ確率制御

前述の「確率的デジタルツイン」は、ロボット制御における確率的な不確実性を定量的に予測することができます。その予測結果に基づき、安全性と効率に対するリスクに敏感に反応できる、「リスクセンシティブ確率制御」[34]がキーテクノロジーになると考えています。リスクセンシティブ確率制御とは、元々は数理ファイナンスの分野で開発された技術で、価格変動という不確実性を含む金融市場の最大リスクである破産を回避しつつ、利益を上げることを目的とする手法です。このリスクセンシティブ確率制御の考え方は、ロボットのAIにも適用が検討されており[35]、今後ロボティクスの発展を下支えする技術になると予想されています。

33 S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, "Probabilistic Robotics," The MIT Press, Aug. 2005.

34 S. Yasuda, T. Kumagai and H. Yoshida, "Cooperative Transportation Robot System Using Risk-Sensitive Stochastic Control," 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.5981-5988, Sept. 2021.

35 G. Deletang, J.G.-Moya, M. Kunesch, T. Genewein, R. Brekelmans, S. Legg, P.A. Ortega, "Model-Free Risk-Sensitive Reinforcement Learning," Computing Research Repository, vol.abs/2111.02907, Nov. 2021.

© NEC Corporation 2023

\Orchestrating a brighter world NEC

4.4 セキュリティ

本ホワイトペーパーでは、Beyond 5Gのスコープを通信インフラと分散データ処理基盤とに分けて述べており、セキュリティについてもそれぞれ考える必要があります。

4.4.1 通信インフラのセキュリティ

通信インフラにおけるセキュリティでは、外からの攻撃に対して通信インフラの安定性を保持したり（DDoSなど攻撃の対処）、データの改ざんや漏洩を防いだり、なりすましや不正利用を防ぐなど、多様な観点での考慮が必要です。ここでは、今後のネットワークシステムのオープン化をはじめ、さまざまなシステムとの相互接続、ヘテロジニアスなネットワーク構成、さらには地政学的要因の影響拡大など環境変化にも着目し、通信インフラの信頼性をどのように確保できるかを1つの大きな課題として考えます。通信インフラは、キャリアネットワークやローカルネットワーク、衛星、アドホックネットワーク、ヘテロジニアスな通信インフラなど、多種多様な機器で構成されています。これらの機器は通常のサーバ機器のようにセキュリティ対策をきちんと施せる機器もあれば、小型の基地局やゲートウェイのように処理能力的に完全なセキュリティ対策を施すのが容易ではない機器もあります。さらに、これらのネットワークは管理ドメインごとに異なるポリシで管理されていたり、セキュリティレベルもさまざまだったりします。一方、通信自体はEnd-to-endで行われ、一般的にユーザはどのような機器の経路を通ったのか、どのような管理ドメインを経由したのかを、知ることも制御することもできないことが多く、ネットワークのどこかに1つでも脆弱な箇所があれば、通信のセキュリティは損なわれてしまいます。

そこで、ユーザはEnd-to-endの通信経路全体において、あるいは各管理ドメインの管理者は管理するネットワーク全体において、ネットワークを構成するすべての機器や搭載されたさまざまなソフトウェアが真正なものであるか、日々のアップデートでセキュリティリスクの高いものが紛れ込んでいないかなどを管理する必要があります。そのため、ハードウェアやソフトウェアの改ざん検知はサーバだけでなく、小型の機器まで含めスケーラブルに対応できる技術や、その検知結果を異なる管理ドメイン間でスケーラブルかつ安全に登録・参照できる技術などが、今後さらに重要になってくるでしょう。

重点技術：バックドア検査

バックドア検査技術は、通信機器などで動作するソフトウェアにおいて、認証回避や隠し機能などの不正機能を検出するものです[36]。ソースコードがなくても機器のバイナリコードをフロー分析し、セキュリティ上問題のある実行パスを検出することにより、バックドアである可能性をスコアとして提示します。本技術により、従来困難だったバックドアの混入リスクを客観的に把握でき、使用しているソフトウェアが安全であることを担保できます。

重点技術：セキュアシステム自動設計

利用者の要求を元に、それを満たすシステムやネットワークをAIが自動設計する技術を拡張し、特にセキュリティを考慮した自動設計を実現する技術です[37]。AIは、生成した設計案をセキュリティの観点で評価し、セキュアではない案を棄却するとともに、よりセキュアな案を優先して探索します。これにより、新規の脆弱性が発見された際にも、AIが自動的に再設計することで、システムは常にセキュアな状態に維持されます。

重点技術：サイバー攻撃リスク自動診断技術

システムへのサイバー攻撃リスクは、新たな脆弱性の発見などにより日々変化しています。セキュアなシステム運用には、継続的なリスク管理が不可欠です。サイバー攻撃リスク自動診断技術は、ルール化されたセキュリティエキスパートの分析ロジッ

36 https://jpn.nec.com/press/202110/20211027_01.html

37 Takayuki Kuroda, “Intent-based Network Service Operations with Models and AI/ML”, 2021 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC’21), DEC. 2, 2021.

クにより、最新の脆弱性情報を用いてシステムの潜在リスクを自動的に洗い出します[38,39,40,41]。資産ベース・事業被害ベースのリスク分析結果が、IPAによる制御システムのセキュリティリスク分析ガイドのシート形式、およびトポロジー上の攻撃経路図として出力されます。攻撃に使われる手法や脆弱性の種類に応じて、攻撃経路のリスク指標が自動算出され、優先的に対処すべき攻撃経路を判断することができます。また、攻撃経路の構造に基づいて効果的な対策箇所や対策種類を絞り込み、対策前と対策後の分析結果差分比較機能により、対策効果を簡単に事前評価できます。人手で行っていた従来のリスク診断に比べ、1/4以下の時間で作業者のスキルに依存しない網羅的な分析を実現します。

重点技術：軽量プログラム改ざん検知

サイバー攻撃の対象は、通信インフラを構成するさまざまな通信機器やIoT機器など、ネットワークに接続される多種多様な機器に及びます。これらの機器がマルウェアに感染したり、機器の制御プログラムが改ざんされると、攻撃の踏み台にされたり本来機能に影響を与え、最終的にはサービスやネットワークの停止を招く恐れがあります。NECの軽量プログラム改ざん検知技術は、許可されたプログラムが正常な状態で動作しているかを、プログラムの起動時に加え動作中にも検査し、未許可プログラムの起動やプログラムの改ざんを即座に検知することができます[42]。本技術は、メモリリソースが少なかったり、CPU性能が低いといったハードウェア制約を持つ機器にも導入可能な軽量性を備えています。検査処理の優先度制御を行うことで、リアルタイム性の確保が必要となる通信処理などを阻害せず、機器本来の動作に影響を与えません。

4.4.2 データ処理基盤のセキュリティ

データ処理基盤は、デジタルツインを直接扱う基盤です。デジタルツインが、実世界のソフトコピーとしてフィードバックされ実世界に影響を与えるため、セキュリティやトラスト、プライバシーの担保が強く求められます。このようなDXにともなう懸念に対し、プラットフォームには信頼性を担保する技術や、リスクの可視化、リスクへの自動対処をする技術が重要になると思われます。また、セキュリティやプライバシーを確保したままデータの利活用を促進するために、データを暗号化したまま検索したり、その特長を計算したりできる秘密計算や機械学習の技術なども、より重要になってくると考えられます。

重点技術：秘密計算

秘密計算は、データを暗号化したまま処理できる技術です[43,44]。マルウェアによる攻撃や、組織の内部犯行に対して情報漏洩を強力に防止し、さらに複数組織がそれぞれ保有する秘密情報を隠したままで利活用することができます。従来の秘密計算は性能に課題がありましたが、NECが複数サーバにデータを秘密分散したまま処理する方式を改良して、2016年に最高性能を達成しました。また、秘密計算を使った開発を容易にする技術を提供し、2019年にはゲノム研究者が開発した独自の解析アルゴリズムに、数日で秘密計算が適用できることを実証しました。

重点技術：高秘匿連合学習

連合学習は、組織間でデータを統合して分析を行う際に、各組織で生成されたAIモデルを統合し、各組織が有するデータの開示を不要にする手法として注目されています。しかし、各組織とモデル統合者のそれぞれでAIモデルのパラメータを分析するため、各組織の学習データを推測する攻撃による脅威が知られています。NECの高秘匿連合学習[45]は、モデル統合者への攻撃に対し、秘密計算によりAIモデルのパラメータを秘匿化することで学習データの推測を防ぎつつ、各組織が攻撃されてもAIの精度劣化を抑え、学習データの推測を防ぐ手法を提供します。

---

38 https://jpn.nec.com/cybersecurity/professionalservice/vulnerability_diagnosis/attack_route.html
39 “サイバー攻撃リスク分析と分析シート生成を自動化する技術を開発”、電子情報通信学会誌 vol.104, No.10, 2021年10月
40 “セキュリティデジタルツインによるサイバー攻撃リスク診断自動化”、計算工学 vol.26, No.2, 2021年4月
41 Masaki Inokuchi et al,“Design Procedure of Knowledge Base for Practical Attack Graph Generation,” ACM AsiaCCS, 2019
42 https://jpn.nec.com/iot/platform/security/lwtd/index.html
43 https://jpn.nec.com/rd/technologies/201805/index.html
44 https://jpn.nec.com/secure-computation/index.html
45 https://jpn.nec.com/rd/special/202103/index.html

5.まとめ

5.1 Beyond 5G時代の姿とネットワークへの要請

これからの時代は、社会の産業構造の変化やユーザニーズの多様化に呼応して、情報通信の進化が一段と加速し、プレーヤーの入れ替わりや各プレーヤーの役割も進化していくでしょう。あらゆる業種において、従来の業務内容や仕事の進め方、働き方全般が新常態へと変化していくことが求められます。

Beyond 5G は、生活や社会のあらゆるシーンを支える最新の情報通信技術として浸透し、DX のプラットフォームとして人々と社会を支える重要な役割を果たすようになり、実世界と仮想世界の人、モノ、コトのインタラクションのシームレス化に貢献していきます。人々は、快適なライフスタイルやワークスタイルの実現のために、これまで以上に通信技術を利活用するようになります。その際、ネットワークの敷設や運用、サービス提供に関しては、現在よりも選択肢が格段に広がって自由度が増し、エリアに関しても都市部や繁華街にとどまらず地方や過疎地などにおいても、サービスが必要な場所にネットワークが展開されるようになるでしょう。企業や団体などによる、自営あるいは閉域のネットワークの敷設/運用/利用が一般化し、それと合わせて配置され偏在する分散データ処理基盤を効率良く用いることにより、1 章で述べた将来社会の実現が期待されます。また、ローカル 5G のような個別要件や用途に応じたソリューションとの一体型提供、地域課題解決のための幅広いコミュニティユーザによるマルチユースなど、情報通信は新たな時代に向けてこれまでにない発展と進化のシナリオを経ていくことになるでしょう。

5.2 NECの取り組みと提供価値

複雑化するサービスやソリューションの提供に応えるためには、技術的な観点からの性能や要件の担保が必要なことに加え、ネットワークとアプリケーションやサービスが一体となり、システム全体の最適化を図りながら発展・進化させていくことが求められます。そこで NEC は、5G からの性能増強や量的拡大だけでなく、分散データ処理基盤を融合したイノベーションを起こしていきます。実世界のありとあらゆる状況・状態を、情報としてデジタルデータ化するために必要な、そして実世界に存在するあらゆるものを仮想世界側からも最適に操るために必要な、巨大な通信性能と計算性能をともに満たす通信インフラを実現し、誰もが人間性を十分に発揮できる持続可能な社会を目指していきます。

そのためには、従来のような単一の組織・企業・大学による取り組みだけでなく、複数のステークホルダーがそれぞれの立場や業種の枠を越えて緊密に連携し、新しく適切な役割を分担することが、持続可能な社会を支える重要な鍵の1つとなるでしょう。

NEC は、ネットワーク・IT からデータ・サービスまでの幅広い領域において、世界トップクラスの技術をバランスよく保有する数少ない企業です。情報通信技術という従来までの枠組を超え、Beyond 5G の実現に不可欠と考えられる 5G の量的拡大と分散データ処理に関し、研究開発の段階から一体的・統合的にアプローチしていきます。

また、NEC が保有する技術アセットに加え、システム構築や運用のノウハウも最大限に活用し、お客さま・パートナーのみなさまとの協働による研究開発や事業開発のオープンな取り組みを進めます。たとえば、産学共創活動では個々の技術の研究開発に加え、社会実装まで見据えたビジョン形成と社会コンセンサスの醸成までを、活動範囲としてカバーしていきます。そ

れらの活動は、大学や企業内の研究室の中にとどめず、実社会で稼働中の施設や大学キャンパスをリビングラボ [46]として活用しながら、技術面の実証に加えガバナンスや制度面の検証も行うことで、実用化や社会実装を前提とした社会受容性の高い研究開発を進めています。将来社会の縮図であるリビングラボを常設して運営することにより、さらに多くの企業や他大学、自治体などを呼び込んで協働し、2030 年代に向けたオープンイノベーションとエコシステムの形成を推進します。

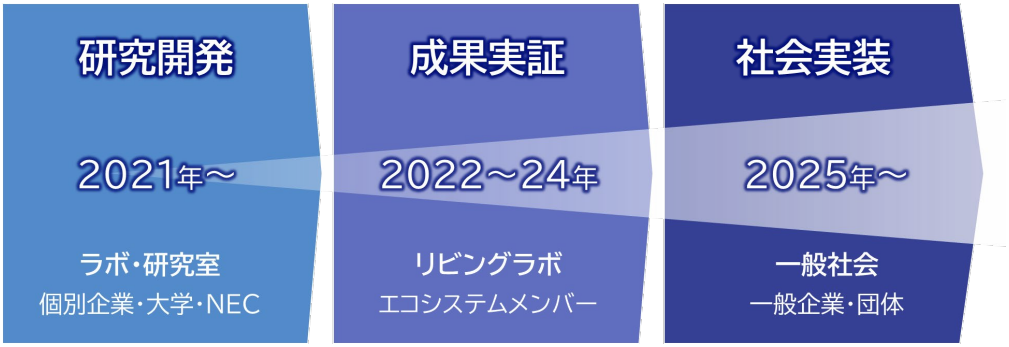


図10 Beyond 5G時代に向けて産学共創で目指す姿

Beyond 5G 時代における“できたらすごいを社会に創る”こと、その実現に向けてみなさまと一緒に取り組んでまいります。最先端技術を社会へ実装し、すべての人々に価値を体感してもらう、そのために NEC は挑戦し続けます。

46 大阪大学とNECによる「NEC Beyond 5G協働研究所」、確率的デジタルツインの社会実装に向けたリビングラボを設立 ～第一弾として実際の介護施設で実証を開始～、2023年3月2日、国立大学法人大阪大学、日本電気株式会社 https://jpn.nec.com/press/202303/20230302_01.html

※本書に掲載されている会社名、商品名、サービス等の名称は、各社の商標または登録商標です。
※本書に掲載されている内容は、変更される可能性があります。
発行：NEC　ネットワークサービスビジネスユニット
https://jpn.nec.com/nsp/5g/beyond5g/

2023年3月

© NEC Corporation 2023