

## 2.5.5 IoTアーキテクチャー

### (1) 研究開発領域の定義

本研究開発領域で取り扱う技術は、膨大な数のセンサーや端末がネットワークに接続されるIoT時代において、実世界と情報世界を高度に融合するコンピューティング環境を実現するための技術である。

実世界を構成するモノ・ヒト・コトの状況を認識するセンサー技術、それらに作用や情報を与えるアクチュエーション技術、デバイスそのものの構成法、認識処理方式、作用や表示方式等の情報通信技術をはじめとして、長期稼働を実現するための電力供給技術、必要に応じて機器や端末が自律的に移動する技術、ビッグデータ分析を可能にする機械学習/AI技術、データに含まれるパーソナルデータのセキュアな取り扱いのためのセキュリティ技術が含まれている。

ここでは、実世界との境界（エッジ）にあってSociety 5.0を実現する情報流の源でありかつ作用点としての観点から関連する技術、動向と課題を俯瞰する。

### (2) キーワード

エッジコンピューティング、フォグコンピューティング、スマートエッジ、5G/Beyond 5G、ストリームコンピューティング、Internet of Things、エネルギーハーベスト、VR/AR/メタバース、生体情報、パーソナルデータ/個人情報保護/活用、ウェルビーイングコンピューティング、行動変容、アクチュエーション、ヒューマンAI協調

### (3) 研究開発領域の概要

#### [本領域の意義]

膨大な数のモノがネットワークに接続されるようになると<sup>1)</sup>、現在のクラウドコンピューティングはネットワークに起因する遅延、さまざまなデバイスへの対応、地域性・局所性への対応などの観点で必ずしも最適な解とはならなくなる。モノがクラウドに接続される形態に加えて、生成される情報の時空間的な流通価値に応じてエッジ側に機能追加することも必要となる。

例えば、スマートグリッドにおける高速デマンドレスポンス<sup>2)</sup>では、数秒オーダーの速度で需要側に設置された膨大な数のスマートメーターからデータを収集して、需給調整を行うことが必要となる。コネクテッドカーやV2Xをベースとするスマートモビリティの実現<sup>3)</sup>でも時空間的な情報の流通価値を考慮しなければならない。エッジ側とクラウド側とが連携しながら処理を行う仕組みが必要となる。さらにエッジ側で高度なAI処理が可能なデバイスが普及し始め、実世界認識と前処理はエッジで行い、ビッグデータ分析のみクラウド側で処理するといった分業や、階層的な分散処理が現実的になり始めている。さらにそこにはAIと人間の協調関係をどのように導入すべきかといった課題もある。

実世界と接し、そこからさまざまな状況を認識し情報を取得するセンシング、実世界に作用を与えるアクチュエーションといった技術、実世界に接するエッジでのAIに代表される高度な認識を担うスマートコンピューティング技術、エッジで得られた情報が構成するビッグデータを大量の計算機資源で制御・分析するクラウド技術、そしてエッジとクラウドをつなげるさまざまな情報通信技術と分散処理技術が本領域には含まれる。IoTアーキテクチャーは、これらの広範な技術を統合した上に成り立ち、実世界と情報空間の間に位置し、利用者にとって最も身近に感じられる重要な位置付けにある。

#### [研究開発の動向]

コンピューティング分野は、時代とともに何度もパラダイムシフトを繰り返してきた。1960年代にはユーティリティーコンピューティングという概念が生まれ<sup>4)</sup>、その後、クラスターコンピューティング、さらに1990年代に入ると、ユビキタスコンピューティングの考え方が登場し、ヒューマンセントリックでコンテクストアウエ

アなサービスが創出された。また、インターネット上の多くの計算資源を結び付け、一つの複合したコンピュータシステムとしてサービスを提供するグリッドコンピューティングも登場した。2000年代に入ってから、大規模データセンターを背景としたクラウドコンピューティングが世界を席卷した。2000年代後半からモバイルクラウドコンピューティングが唱えられ始め、スマートなエッジコンピューティング<sup>5)</sup>へと発展している。

これらの変遷の背景には、エンドユーザーの要求とハードウェアの進化がある。スマートなエッジコンピューティングが登場した背景も、エンドユーザーの要求の変化とデバイスの高性能化にある。クラウドコンピューティングでは通信遅延が大きく、デバイスの移動への対応が不十分、コンテキストウェアネス対応が困難などといった課題や、エッジからクラウドへ流通する情報に含まれる個人情報をいかに保護するかといった課題を抱えていた。

## 通信技術

5Gの「大容量」という特長を活かすミリ波サービスが始まっているが、28GHz帯基地局設置のノウハウが不足していることと、設置のためのコストの増大により、しばらくは他の特長である「低遅延」と「多数接続」を活かすことになるが、これらは元々遅延の大きいクラウド処理よりもエッジでの情報流通と実時間処理での活用こそが本命である。産業界においてもスマートエッジコンピューティング分野での動きが活発になりつつある。5Gの持つ「低遅延」、「大容量」、「多数接続」という特長を活かして、アプリケーションの応答性の改善や、ユーザーエクスペリエンスの向上などが期待されている。

Bluetooth 4.0で採用されたBLE (Bluetooth Low Energy) は新型コロナ感染防止など近距離プレゼンス認識で注目を戻し、Bluetooth 5.0ではメッシュネットワーク機能が取り入れられ多数端末管理機能の充実が期待される。また、Bluetooth機器のアンテナへの入射角度を認識するAngle of Arrival (AoA) 方式の測位技術が規格化され<sup>6)</sup>、屋内空間などでの利用が期待されている。920MHz帯を活用するLPWA (Low Power Wide Area) と呼ばれるノイズレベルのサブGHz帯の無線信号を低ビットレート、超低消費電力でサポートする広域無線網はソニーのELTRESのような高信頼性を実現し、今後のダウンリンクへの展開も注目されている<sup>7)</sup>。

## センシング技術

センシング機器はMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いた小型化、省電力化が進み、さらにデジタルセンサー機器に専用プロセッサを追加することによるスマート化がますます推進されている。いわゆるニューラルネットワーク処理エンジンを用いた高度な実世界認識技術がエッジでのセンサーにより獲得された生のデータ量を目的とする情報にまで認識・分析して抽象度を上げ、大幅に圧縮する。その場でカメラ映像から人のみを抽出し、匿名化処理を施してプライバシーに配慮する試みも実用化段階にきている<sup>8)</sup>。

一方で高齢化の進展や新型コロナウイルス感染拡大といった状況で、生体情報センサーの注目度が急激に上がっている。体温、脈拍、心電の他、パルスオキシメーター (動脈血酸素飽和度) などをウェアラブル機器が装備するようになっている。中国では感染封じ込めのため、市中に設置したセンサーやロボットで自動的に発熱者の追跡もなされたという。

自動運転車用センサーとしては高価であったLiDARの低廉化、その代用としての画像認識機器の進歩、ミリ波レーダーの活用などが注目されている。また、クルマとモノの通信であるV2Xが4G LTEや5Gを利用したCellular V2X (C-V2X) へと進展しており、米国フォード社は2022年から開始予定としている。このC-V2Xにより、クルマと歩行者のスマートフォンとの通信サービス (V2P (Vehicle-to-Pedestrian)) が実現され、歩行者事故防止への貢献が期待される。

近年のスマートフォンでは、UWB (Ultra-Wide Band) およびWi-Fi RTT (Round Trip Time) による精密で正確な測距・測位技術が注目され<sup>9)</sup>、特に赤外線を用いたLiDARとUWBとは携帯端末への搭載が普

及しつつある。UWBはこれまで各社で独自に実装されていたが、UWBは通信のみならず高精度な測距が可能なセンシング機能を持ち、2021年にIEEEにより規格化がなされた<sup>10)</sup>。Apple社のU1チップ、AirTagでの導入を契機に各社での実装が期待されている。これらの実世界認識センサー機器の進歩により、自動運転のみならずAR/メタバース関連サービスなどでの活用はもとより、スマートモビリティに類するビークルやロボットなどでも応用が期待される。

### 機械学習・AI技術

AIプロセッサは、Google、NVIDIA、Intelの他にも2020年以来Green500でトップを3度獲得しているPFNのMN-Core<sup>11)</sup>をはじめ、スタートアップ各社によって百花繚乱である。クラウド・エッジともにターゲットとされて開発されているが、論文として公刊されているTPUを除いて技術的詳細は公開されていない。機械学習にはモデル生成の学習フェーズと、生成されたモデルによる識別フェーズがあるが、クラウド用途はモデル生成を競いスケラビリティと浮動小数点演算が重視され、エッジでは識別器のみを効率よく動かすことが主眼とされている。特に携帯端末におけるAIハードウェア技術では、カメラによる撮影画像やメディア再生を高度化、高品質化するのに大きく寄与した。例えばカメラにおいては、これまでは高品質な撮像素子の進歩に期待されていた部分が複数の専用撮像素子/LiDARおよびレンズにより撮影し、AIハードウェアにより高度に合成する手法(Computational Photography)に変わったといってもよい。

携帯端末におけるAI・機械学習ソフトウェアではこれらのAIハードウェアを開発者に透明に活用させる仕組みが確立した。iOSのCoreMLやGoogleのTensorFlowとその携帯端末版であるTensorFlow Liteを内蔵するML KitがmBaaS(mobile Backend as a Service)であるFirebaseの一部として実装されている。そこでは、モデルサイズを極限まで縮小し、オンデバイスでのスタンドアロン実行がテキスト、顔、ランドマーク、バーコードといった一般的モデルで実現されている。また、画像・動画のみならず音声のリアルタイムでの文字起こしも実現されている。

AIがどれほど優秀になっても、人とAIはどちらかが完全に責任を取る形ではなく、互いに主導権を移譲し合いながら業務を遂行するための技術が必要となる。排他的に移譲するのか、協調的な業務遂行が可能か、といったことを踏まえて移譲を安全に実現する技術<sup>12)</sup>が注目されている。

### 電力供給技術

エッジにおける小型端末に必須の要素である電力供給をいかに実装するかは常に課題である。大容量二次電池では全固体電池技術によるさらなる高性能化が期待され、一気に電気自動車への適用が加速している。より小型のIoT機器では電気二重層コンデンサー(Electric double-layer capacitor, EDLC)やリチウムイオンキャパシターなどの高効率キャパシターの実用化のための開発、IoT機器に特化したエネルギーハーベスターの開発に注目が集まっている。電池駆動のBLEタグを屋内照明でのハーベスターにより駆動するものは既に一般化している。環境発電技術では光発電以外に、レクテナによる電磁波や近距離での無線給電技術、音や振動による発電の研究も実用間近である。

一方で無線給電技術として、給電ステーションなどの特定の位置ではなく、部屋の中全体といったより広い空間での位置に縛られない無線給電や、広範囲の面給電装置に対して効率的な給電ルーティングと無線給電スポットの任意箇所での生成が実現されており、遍在するIoT機器へのより自由度の高い給電可能性が広がっている<sup>13)</sup>。

### アクチュエーション技術

実世界に影響を与える作用を実現するものであり、携帯端末での情報の提示、街中でのデジタルサイネージなどで使われる。タッチデバイスに導入される力覚生成機器はウェアラブル機器、特にヒアラブル機器(ワイヤレスイヤホンなどの機器で、スマートフォンに接続して音声インターフェースとして利用する)のインター

フェースとしても多用されるようになってきており、今後は広範囲に力覚を用いたUIが適用されていくと思われる。

一方で、自律移動ロボットも種類が増えUAV/UGV (Unmanned Aerial/Ground Vehicle) も低価格化、普及が始まっている。UAVはまだ規制が厳しく無人での自動運転は実用にはなっていないが、都市空間の極小エリアでの気象予報技術との連携が注目されている<sup>14)</sup>。UGVは私有地内等でのカート、コンピューター用途での活用、物流倉庫等での荷物カート、一般歩道でのデリバリーカートなどが実用化されつつある。高度化したスマートなエッジデバイスはその最たるものが自動運転車であるが、適用される技術がIoT分野からロボティクス分野との融合を起こしつつあり、次世代移動支援技術開発コンソーシアムによるAIスーツケースは「盲導犬」の役割を担うLiDAR付きスーツケースであり、まさにその例だといえる<sup>15)</sup>。また、従来の剛体のロボット技術だけでなく、人間や他の生物のように柔らかいボディーを持ったソフトロボットの研究開発や社会応用が注目されている<sup>16)</sup>。JST ERATO川原万有情報網プロジェクトでは、イモムシ型ソフトロボットにおける這行制御の理論と応用実証が行われ、新たな産業用途への利用が期待されている<sup>17)</sup>。

#### (4) 注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

スマートなエッジコンピューティング分野の特徴は、プレーヤーの多様化である。元々は、シスコがフォグコンピューティングを2012年に提唱<sup>18)</sup>したように、IT企業がフォグ/エッジコンピューティングを主導してきた。これに対して、昨今は、通信事業者や製造業などからフォグ/エッジコンピューティングに参入するプレーヤーが増えてきている。通信事業者ではMobile Edge Computing (MEC)、製造業においてはGEのIndustrial IoT Consortium<sup>19)</sup>、ファナックのField System、三菱電機のEdge Crossなどの活動がある。また、一方でフォグコンピューティングの研究開発をうたうものは見られなくなっている。これは、エッジとクラウドの間である「フォグ」を担う事業者の欠如が原因だと考えられる。

このような流れの中で求められるものは、多種多様なアプリケーションの要件を理解することに加えて、これらの要件を抽象化してスマートエッジコンピューティングの設計につなげていくことである。現在は、個別のアプリケーションに特化したスマートエッジコンピューティングにとどまっている。特化型スマートエッジコンピューティングの開発を通して要件を一つ一つ積み重ねていながら、抽象化につなげ、汎用的なスマートエッジコンピューティング基盤の構築につなげていくことが望まれる。

また、IoTデータを単一システム内、あるいは、複数のシステム間をまたいで流通させるためのメタデータの記述や流通プロトコルが重要である。インターネットがTCP/IPによって発展したようにIoTシステムのさらなる発展には、汎用的な流通プロトコル (MQTT、CoAP、HTTP REST、SOX、SPAQL) の確立が重要な課題である。

センシングの注目動向としてはスマートフォンに搭載されるセンサーとして、LiDAR、UWB、Wi-Fi RTT、多眼カメラデバイスが挙げられる。LiDARはAppleのFaceIDから導入されたがAR/VR応用が期待される中、カメラ撮影画像の認識、AI 現像での実用化が広がっている。UWBは正確な測距センサーとして機能するが、応用には測位ではなく測距の技術であることからSOM (自己組織化マップ) 技術などの基盤が必要となろう。また、マーカーとして機能するコンパニオンデバイスが必要とされる。Wi-Fi RTTはWi-Fi 基地局への導入から始まっているが、今後は端末間でも正確な測距が可能なハードウェアが導入されていくと思われる。多眼カメラデバイスはAI 技術による写真撮影のHDR (High Dynamic Range) など高度修正機能としてのみ利用されているが、いずれは立体視された空間認識結果を活用するAR/VRアプリケーション等、メタバース応用サービスでのLiDARの補完的な役割を担うであろう。一方で、グリップ検出の圧力センサー、ミリ波レーダーによるジェスチャーセンサー (Google Pixel4のSoli) は応用が依然として追いついていない状況である。

モビリティの大きな動向としては、無人タクシーや物流の先導追従運転など自動運転の社会への導入が始まり、ポスト自動運転の世界を考えた動きが始まっていることであろう。トヨタのe-Paletteを始めとするモ

ビルティをプラットフォーム化する動き<sup>20)</sup>に加えて、富士裾野市でのWoven City構想<sup>21)</sup>はインテリジェントビークル社会実現のためのデータセントリック手法として位置付けられる。自動運転技術の熟成のためのデータ収集という側面と、そこで暮らす人々のパーソナルデータの活用という側面も持つ。またMaaS (Mobility as a Service) を実現しようとする社会実証が各地で始まっているが、鉄道・地下鉄・タクシーの連携のみでの試みが多く、自治体主導でMaaSレベル4 (政策の統合) の実現を目指そうとしているものは少ない。一方で自動運転技術については政府主導でレベル4 (限定エリアでの無人運転) を実現する動きがある。これは遠隔での運行管理センターを前提とする計画であり、そのためのAIと人間の協調を支援する技術開発が必要となる。

個人情報データは保護すべき対象とされるが、それを安心して活用できる基盤として情報銀行という仕組みが立ち上がりつつある。個人がその健康データや購買データを信託し、非識別化加工を実施した上で、活用するサービス企業とやりとりし、銀行預金の利息のようにその一部の利益が個人情報提供者に戻ってくる仕組みである。情報銀行はこれらの個人情報を中心集積的に管理する仕組みであるが、一方ではPLR (Personal Life Repository) に基づいた個人の医療・介護記録を自身で管理し、流通の制御を個人に委ねる分散PDS (Decentralized Personal Data Store) の仕組みの実証も始まっている<sup>22)</sup>。高齢化が進む社会でのパーソナルデータ活用の推進の意味でも注目すべき試みである。

自動車保険の分野でもセンシングを活用した新たなサービスが開発されている。あいおいニッセイ同和損害保険は、トヨタ自動車のテレマティクスサービス「T-Connect」のナビから、スマートフォン等を通じて取得した車両運行情報を、走行距離に基づいた保険料の算出や安全運転アドバイスなどのサービスに活用している<sup>23)</sup>。名古屋大学とSOMPOホールディングズによる運行記録からの重要なイベントの抽出とそのテキスト化による自動運转向けデジタルリスクアセスメント技術<sup>24)</sup>は自動運転時代を見据えて注目すべき開発とみられる。

### [注目すべき国内外のプロジェクト]

ZEB (Zero Energy Building) の取り組みの中でも、IT/IoT/AI技術を活用して実証環境を自社内に構築している三菱電機のZEB関連技術実証棟「SUSTIE」<sup>25)</sup>では省エネ性に優れた居住・執務空間の実現が期待される。

また、CES2020で発表されたWoven City構想では、超スマートシティとしての工場・モビリティにとどまらず、観光、健康、医療、農林業といった広範な分野での貢献が期待されている。

携帯電話ネットワークの状況としては、5G以降の技術開発での中国に対抗する計画として2025年大阪・関西万博での披露を目指してBeyond 5G/6Gのプロジェクトが起きている。開発目的として5Gが目指してきた高速性、低遅延、多端末のレベルをさらに引き上げるとともに、DX (Digital Transformation) を後押し、さらにはコロナ禍を通して進展した社会のオンライン化をさらに加速する目的もある。さまざまなネットワークの透明で自律的な連携を視野に入れ、HAPS (High Altitude Platform Station) や衛星を含んだハイブリッドでの拡張性や超低消費電力の実現などを目的としている。米国Appleが発表した衛星経由の緊急通報サービスやクララコムがCES2023で発表した衛星通信を使った双方向メッセージ通信サービスなど、地上系通信サービスと非地上系サービスの一体化をBeyond 5G/6Gに向けて加速している。このようなサービスが開拓され、単に地上系通信インフラ技術のみの研究開発では不十分とみられている。

位置情報を活用したマーケティングとサービス施策の促進のために世界中に26のチャプターを持つLocation Based Marketing Associationが設立され、日本支部<sup>26)</sup>でも位置情報サービス提供のスタートアップ、地理情報計測企業、マーケティングリサーチ企業などが参加している。位置情報はその表現が直接的なものでなく、デバイス情報を利用することが多いため、個人情報保護の観点からその利活用のガイドラインの確立においてカメラ情報よりも遅れていたが、会員会社らの努力により時代に合わせた運用が今後提案されていくことが期待されている。

米国では2020年2月の大統領令により、PNT（Position Navigation Timing）に関連するインフラの脆弱性対策、冗長性の整備が義務付けられており<sup>27)</sup>、さらに2019年のFCC命令では緊急呼（E911）での発信者位置情報への3D情報の追加<sup>28)</sup>もあって、屋内外位置情報や高精度時刻情報のためのインフラ整備事業が興りつつある。特に、通信キャリアは端末の機能追加が必要になるため、それに必要となる技術を持つ会社との提携が始まっている。地上基地局を整備して3次元測位および屋内外測位をサービス提供するNextNav社は大型融資を実現し、AT&Tからのサービス提供も開始している<sup>29)</sup>。

また、IoT機器の普及とともに、IoT機器への不正ログインやソフトウェアの脆弱性を利用したサイバー攻撃が増加しており、各国でIoT機器のセキュリティー認証制度（セキュアラベリング）の議論が活発となっている。シンガポールでは、国主導でセキュリティーラベリングが実施され、わが国においては、民間主導でIoT機器に対する共通ラベリングと車載機器、決済端末、スマートホームなどの製品ごとの固有な要件に対応したラベリングが実施されている。一方、米国においては、サイバーセキュリティーの向上を目指した2021年5月の大統領令を受け、NIST（National Institute of Standards and Technology）が中心になってドローンなどのソフトウェアも含めて、一般消費者向けIoT機器ソフトウェアのラベリングシステムを検討している。

## （5）科学技術的課題

エッジコンピューティングは、利用できる計算機資源が時々刻々変化する環境であり、フォグ、クラウドとなるに従い、資源の可用性は安定してくる。その度合いに適応して稼働するために、フォールトトレランスの実現に必要な動的スケジューリングやプロセス・コンテナのマイグレーションが必要となる。現在、そこまでのソフトウェア環境をエッジに装備することはできていないが、いずれ高速で移動するインテリジェントカーを計算機資源として活用するための開発が必要となる。

エッジコンピューティングの進展は、エッジで利用できるデバイスの発展がいくらあっても、何らかのフォグ、もしくはクラウドでの処理との連携が必要である。特に、現在のAI技術に代表される機械学習・深層学習の学習フェーズはクラウドでの処理が必須となる。大量の計算資源を必要とする学習フェーズでは、分散化をいかに効率よく実現するか、さらには多くの生のデータが含む個人情報をどのように保護するかが課題となっている。Federated LearningやPrivacy-Preserved Learningでは分散化や暗号化、多段の特徴量生成などが試されているが、データの完全性が欠如するため学習効率とのトレードオフが問題とされている。またフォグおよびクラウドでは複数かつ異種の事業者によりデータをマッチングさせたサービスの展開が期待されており、それらをセキュアに実現するための秘密計算技術や連合学習技術についてもさらなる研究開発が必要となる。

一方、識別処理に関しては、何をどの精度で識別するかが、ベースとするモデルで処理性能（メモリーサイズや処理時間）に影響が出るので、エッジで単体のオールマイティーの能力を有する識別器を用意するのは現実的ではない。そこで、識別対象を限定した識別器をエッジにおいて同時に複数でハイブリッドに活用するAI技術の「センサーフュージョン」の実現が期待されている。

エッジコンピューティングで利用されるIoTデバイスは、オープンな環境下での利用が多く、特に、ここ数年TCP/IPポート23（Telnet）をターゲットに不正ログインをし、マルウェアに感染させ、これら機器を踏み台にした大規模サイバー攻撃（DDoS攻撃）によりインターネットに障害が生じるなど深刻な被害が発生している。また、IoTデバイス向けの軽量暗号や機器認証が課題である。攻撃を受けた上でもそれに耐性を持つことのできるセキュアOSや冗長性を機器、アルゴリズム、接続方式など多面的に実現していくことや、基本となるWi-FiやBluetoothの国際規格へのセキュリティーを加味した管理運用のための機能の策定が期待されている。

### (6) その他の課題

After/With コロナ時代に対応した、位置情報を始めとする個人情報活用の新たなスタンダードが必要とされている。特に、緊急時と平常時といった2段階ではない複数段階のBCP（事業継続計画 Business Continuity Plan）レベルの定義とそのレベルの自動識別、識別されたレベルに対応したデータ品質と処理の実現が要求される。

5Gにおいて日本が出遅れた大きな理由の一つは、標準化活動への人材投入意識の圧倒的な欠如にある。特に若い世代の人材投入が世界的な標準化事業に対してほとんどなされておらず、その一方で中国の若い世代の投入は目覚ましいものがある。この状況が続く限り、世界的な標準化事業における日本のプレゼンスは今後の改善が全く見込めない。

アーキテクチャー設計は技術開発項目に含まれることになるが、学術的成果として認められづらいこともあり、なかなかアーキテクチャー議論にリソースを割くことができない状況になっている。そのため、研究開発プロジェクトにおいては、意識的にアーキテクチャー議論を推進する仕組みがあることが望ましい。抽象化して議論する場を提供することが、わが国のアーキテクチャー人材の育成にもつながる。例えば、クラウド技術の民間活用に比べて、エッジコンピューティングの利用に関してはデファクトスタンダードが存在せず、アドホックに利用できる安価なソリューション自体も存在しない。これはアーキテクチャーの標準化がなされていないことに起因する。スマートシティ・スーパーシティ構想においても、いわゆる「都市OS」という考え方はその意味でも重要な意味合いを持っている。

### (7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↘	・研究費、人材の減少が長く響く。 ・標準化への資材・人材投資の不足。
	応用研究・開発	○	↘	・選択と集中される分野が既に主導権を取れないものばかり。コロナ禍でDXの遅れの顕在化。
米国	基礎研究	◎	→	・明らかな米中2強時代の始まり。 ・好調なGAFANAなど応用サービスの企業からの基礎への投資が目覚ましい。
	応用研究・開発	◎	→	・GAFANAのGDPRへの対応に辛うじて成功。 ・引き続き、GAFANAに対抗できる存在が、BATH以外に見られない。
欧州	基礎研究	○	→	・目覚ましい動きは見られない。 ・イギリスのベンチャーは依然堅調。
	応用研究・開発	○	↘	・スマートシティなど「場」造りは進むも、コロナ禍に加えウクライナ危機により研究的な進展や独自サービスの動きは見えない。
中国	基礎研究	◎	↗	・5G/AI/バイオいずれも圧倒的な世界的特許の数。研究開発への国家予算の規模が桁違い。
	応用研究・開発	◎	↗	・米国の制裁を受けてもたじろがない、独立した独自サービスの充実と、それを十分に支えてけん引するマーケット。
韓国	基礎研究	△	→	・ディスプレイ技術以降の独自研究成果を見るまでには至らない。
	応用研究・開発	○	→	・家電系、モバイルに加え半導体製造業も存在感を見せ、引き続き堅調。
その他の国・地域	基礎研究	○	→	・インド、台湾のIT、フィンランドの各種スタートアップ、イスラエルなどの軍事関連技術の台頭。
	応用研究・開発	○	→	・エストニア、フィンランドなど、電子政府、MaaSでの台頭。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・IoTセンシングデバイス（ナノテク・材料分野 2.3.4）

参考文献

- 1) 総務省「情報通信白書平成30年版：IoTデバイスの急速な普及」<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h30/html/nd111200.html>, (2023年2月6日アクセス) .
- 2) 経済産業省 資源エネルギー庁「ダイヤモンドリスponsについて（2017年4月20日）」経済産業省, [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/denryoku\\_gas/seido\\_kento/pdf/004\\_s01\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/004_s01_00.pdf), (2023年2月6日アクセス) .
- 3) 特許庁審査第四部調査室「クルマとモノをつなげるV2X通信技術、業界の枠超えた研究開発が重要」日経XTECH, <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00053/00036/>, (2023年2月6日アクセス) .
- 4) Simson Garfinkel, “The Cloud Imperative,” MIT Technology Review, <https://www.technologyreview.com/s/425623/the-cloud-imperative/>, (2023年2月6日アクセス) .
- 5) 山口弘純, 安本慶一「エッジコンピューティング環境における知的分散データ処理の実現」『電子情報通信学会論文誌B』J101-B 巻5号 (2018) : 298-309.
- 6) Bluetooth SIG, Inc. 「BLUETOOTHについて学ぶ：方向性の発見：高精度な屋内位置情報サービス」<https://www.bluetooth.com/ja-jp/learn-about-bluetooth/recent-enhancements/direction-finding/>, (2023年2月6日アクセス) .
- 7) 阪田史郎「経営者のためのIoT技術入門「LPWA」(5)：成長期を迎えたLPWAの将来と課題」JBpress Digital Innovation Review, <https://jbpress.ismedia.jp/articles/-/52839>, (2023年2月6日アクセス) .
- 8) 東京急行電鉄株式会社「駅構内カメラ画像配信“駅視－vision（エキシビジョン）”の実証実験を開始します」<https://www.tokyu.co.jp/company/news/list/Pid=2392.html>, (2023年2月6日アクセス) .
- 9) Frederike Dümbgen, et al., “Multi-Modal Probabilistic Indoor Localization on a Smartphone,” in 2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN) (IEEE, 2019), 1-8., <https://doi.org/10.1109/IPIN.2019.8911765>.
- 10) Petr Sedlacek, Martin Slanina and Pavel Masek, “An Overview of the IEEE 802.15.4z Standard its Comparison and to the Existing UWB Standards,” in 2019 29th International -Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA) (IEEE, 2019), 1-6., <https://doi.org/10.1109/RADIOELEK.2019.8733537>.
- 11) 株式会社 Preferred Networks「MN-Core™ Series: Deep Learning Accelerator」<https://projects.preferred.jp/mn-core/>, (2023年2月6日アクセス) .



- 12) 泉田啓, トレス リカルデス ルイス アンヘル, 村松歩武「協調タスクを行うマルチ・エージェント分散制御の制御器の存在確認方法と最適制御に関する研究」『システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集』64巻(2020):657-664.
- 13) Takuya Sasatani, Alanson P. Sample and Yoshihiro Kawahara, “Room-scale magnetoquasistatic wireless power transfer using a cavity-based multimode resonator,” Nature Electronics 4 (2021) : 689-697., <https://doi.org/10.1038/s41928-021-00636-3>.
- 14) 森康彰「ドローン向け気象情報提供機能の研究開発」Japan Drone 2018, 3rd (ジャパンドローン2018 | 第3回), [https://ssl.japan-drone.com/conference/index\\_other.html](https://ssl.japan-drone.com/conference/index_other.html), (2023年2月6日アクセス) .
- 15) 一般社団法人次世代移動支援技術開発コンソーシアム (AIスーツケース・コンソーシアム), <https://caamp.jp>, (2023年2月6日アクセス) .
- 16) 飯田史也, 新山龍馬, 國吉康夫「身体性知能の実現に向けたソフトロボティクス設計原理」『計測と制御』58巻10号(2019):791-797., <https://doi.org/10.11499/sicejl.58.791>.
- 17) 国立研究開発法人科学技術振興機構「ERATO川原万有情報網プロジェクト」<https://www.jst.go.jp/erato/kawahara/>, (2023年2月6日アクセス) .
- 18) シスコシステムズ合同会社「フォグコンピューティング」, [https://www.cisco.com/c/dam/m/ja\\_jp/offers/164/never-better/core-networking/computing-solutions.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/m/ja_jp/offers/164/never-better/core-networking/computing-solutions.pdf), (2023年2月7日アクセス).
- 19) Industry IoT Consortium, <https://www.iiconsortium.org>, (2023年2月6日アクセス) .
- 20) トヨタ自動車株式会社「トヨタ自動車、モビリティサービス専用EV“e-Palette Concept”をCESで発表」<https://newsroom.toyota.co.jp/jp/corporate/20508200.html>, (2023年2月6日アクセス) .
- 21) トヨタ自動車株式会社「トヨタ、「コネクティッド・シティ」プロジェクトをCESで発表」<https://global.toyota/jp/newsroom/corporate/31170943.html>, (2023年2月6日アクセス) .
- 22) 近藤寿成「東京大学、医療・介護記録を自身で管理する仕組みを試験運用」日経XTECH, <https://xtech.nikkei.com/dm/atcl/news/15/090400176/?ST=health>, (2023年2月6日アクセス) .
- 23) e燃費「あいおいニッセイ同和損保、走行距離連動の保険を4月から販売…トヨタ T-Connect活用」<https://e-nenpi.com/article/detail/243935>, (2023年2月6日アクセス) .
- 24) 損害保険ジャパン株式会社, 株式会社ティアフォー, アイサンテクノロジー株式会社「「国内初」レベル4自動運転サービス向け「自動運転システム提供者専用保険」の開発」損害保険ジャパン株式会社, [https://www.sompo-japan.co.jp/-/media/SJNK/files/news/2021/20220204\\_1.pdf?la=ja-JP](https://www.sompo-japan.co.jp/-/media/SJNK/files/news/2021/20220204_1.pdf?la=ja-JP), (2023年2月6日アクセス) .
- 25) 三菱電機株式会社「ZEB関連技術実証棟「SUSTIE」竣工のお知らせ：省エネ性に優れた快適な居住空間の実現に貢献」<https://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2020/1001-a.html>, (2023年2月6日アクセス) .
- 26) 一般社団法人LBMA Japan, <https://www.lbmajapan.com>, (2023年2月6日アクセス) .
- 27) TechCrunch Japan「トランプ政権が新大統領令でGPSの防衛目指す」, <https://techcrunch.com/2020/02/13/trump-administration-aims-to-protect-gps-with-new-exec-order/>.
- 28) Federal Communications Commission (FCC), “Wireless E911 Location Accuracy Requirements, October 29, 2019,” <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DOC-360516A1.pdf>, (2023年2月6日アクセス) .
- 29) 片岡義明「スマホ位置情報の精度が向上、“高さ”特定可能に。日本で10月より「垂直測位サービス」提供開始～MetCom」INTERNET Watch, <https://internet.watch.impress.co.jp/docs/column/chizu3/1441013.html>, (2023年2月6日アクセス) .