

## 2.5.6 デジタル社会基盤

### （1）研究開発領域の定義

センサーやスマートフォンなどのIoT機器を用いて人やモノの状況把握・行動推定のためのさまざまな情報をセンシングできるようになってきており、複数のセンシング情報を組み合わせ、それらの経時的な変化などを収集・分析することで、自動運転や街のエネルギー削減、防災・減災など街のスマート化や、健康管理、高齢者見守り、未病改善など人の健康や医療・介護に資することを可能にするものである。

Society 5.0はこのようなサイバーとフィジカル世界の融合した社会を目指しており、それを支えるデジタル社会基盤としては、社会を網羅的に計算可能化する技術の確立が必要である。すなわち、ダイナミックな社会の情報が自律分散的に集まるデータ収集基盤と、データを安全に共有してさまざまな主体がさまざまな目的で計算可能とするデータ共有基盤、および計算結果を用いて社会と人のウェルビーイングを向上させる技術の確立が必要である。

さらに非機能的要件としては、ディペンダビリティを向上させる技術や、IoT情報基盤構築技術、ゼロエナジーIoTネットワーク技術の創出も重要である。本領域は異なる要素技術を含む複合領域であり、具体的な研究開発課題は多岐にわたる。

### （2）キーワード

超スマート社会（Society 5.0）、デジタル変革（Digital Transformation：DX）、ウェルビーイング、スマート&コネクティッド・コミュニティ、デジタルツイン、センシング、アフェクティブコンピューティング、状況把握/行動推定、データ流通、サイバー・フィジカル・システム（Cyber-Physical System：CPS）、ゼロエナジーIoTネットワーク、エッジAI

### （3）研究開発領域の概要

#### 〔本領域の意義〕

自動運転のICT基盤も含め、日本政府が標榜している超スマート社会（Society 5.0）を実現するためには、人やモノの状況把握・行動推定を行うための高度なリアルタイムセンシング技術を多数組み合わせることのできるIoT情報基盤が必要であり、文部科学省の令和3年度の戦略的創造研究推進事業の戦略目標においても「Society 5.0時代の安心・安全・信頼を支える基盤ソフトウェア技術」の推進がうたわれている。街のスマート化には、人やクルマなどのモビリティを正確に把握する技術が必須であり、渋滞緩和や物流、防災・減災などのためには、収集したモビリティデータをベースにしたシミュレーション技術とAI技術との連携や広範囲なエッジサーバーを連携させたエッジAI（EdgeAI）技術などが重要となる。また、メタバースの進展・普及に伴い、当該街区の3Dマップを構築して、気象情報や河川・下水道の排水能力などをもとにしたシミュレーションやデジタルツインを構成することが可能になるが、そこではデータ通信およびデータ保管コストの削減や学習モデルの更新を容易かつ効率的に行うために連合学習（Federated Learning<sup>1</sup>）などを用いた分散強化学習を行う必要も生じる。一方、人の健康や医療・介護に資する技術を構築するには、各個人のバイタル情報の収集のみならず、それらの人々の活動状況や電子健康記録（Electric Health Record, EHR）などの医療情報との連携が必須である。近年の人の状況把握・行動推定技術は物理的な人の動きや活動状況のみならず、その人の心理状況やストレスなどもかなりの精度で推定できるようになってきている。それらの技術をさらに進展させることにより、真に人の医療や健康、介護に資する技術が生まれようとしており、デジ

1 学習用のデータを分散されたノード群（ユーザに近いEdgeやIoT機器群）で保持し、適当なタイミング毎にエッジ群間で学習成果を交換しながらより高度なAIに作り変えていく仕組み

タルセラピューティクス（デジタル治療）の技術開発も世界的に進んでいる。これらの情報を収集・利活用するためには、対象領域や街でエッジコンピューティング<sup>1), 2)</sup> ベースの情報基盤を構築し、その上でさまざまなAI機能や統計的な分析機能を活用し、メタバースなどの仕組みを用いて街の状況や個人の健康状態などを視覚的に見える化することが重要となる。

空間から収集するデータを活用して人の生活を円滑化するという考え方は、各地の「スマートシティー化」で社会に実装されつつあり、センサーを用いたデータ収集やデータの蓄積に関する取り組みが先行している。道路の混雑状況や人・車両の位置、河川の水位など、空間内の多様な事象に関するデータを、行政と民間企業の双方を含むさまざまな主体が収集・蓄積し、一部はインターネット上で閲覧可能となっている。この状況はいわゆる Society5.0 へ至る極めて初歩的な段階にすぎない。データを獲得した主体がそれを自ら消費する、サイロ化した形態が現状であり、多様なデータを分野横断的、主体横断的に計算して新たな価値を生み出す段階には至っていない。収集されるデータについても、時間と空間の双方で極めて疎な状態であり、社会のさまざまな側面を計算、予測可能な段階には至っていない。さらに各地の「スマートシティー」では、収集されたデータが蓄積されてはいるものの、それをリアルタイムに計算して人の個性や感情をダイナミックに理解しながら、社会に作用する情報をフィードバックする段階に至っていない。これらの状況に鑑み、人や社会が安心してその機能に依存できるデジタル社会基盤技術確立し、横断的に社会のさまざまな側面を計算、予測可能とし、次世代社会への進化を実現することが重要である。

5G（第5世代移動通信システム）の技術開発や米中の覇権争いは、高速・広帯域・多数接続の携帯通信網の開発という側面のみならず、その上で構築される都市のスマート化の情報基盤が国家の成長や安全・国防に大きな影響を与えるという点で注目されている。中国のように国家が国民の行動履歴情報などを比較的容易に収集可能な国の都市のスマート化と、欧米や日本において収集可能なデータに基づく（プライバシー保護に配慮したデータのみを用いた）都市のスマート化の手法に大きなギャップが生じている。トヨタ自動車が開発中のウーベンシティー構想（Woven City Concept）など日本的なスマートシティーの実現に資する情報基盤構築という観点からも、個人情報保護しつつ、対象街区の人やモノの状況把握・行動推定のためのセンシング情報をエッジコンピューティングベースで分散収集し、それらのデータを協調運用するための都市情報基盤の構築が日米欧などで喫緊の研究課題となっている。

一方、社会のさまざまな箇所でIoT機器を利用するためにその都度コンセントを増設したり電池を定期的に交換して電力を供給したりするという方法はあまり現実的でない。IoT機器の運用に必要な電力を可能な限りゼロに近づけるゼロエネルギーIoTデバイスの開発やアンビエント・バックスキャッター（Ambient Backscatter）通信などを用いたエネルギーハーベスト型のセンシング技術の開発、効率的な無線給電技術、ゼロエネルギーIoTネットワーク構築技術なども重要な研究課題である。

このように、本研究開発領域は社会のデジタル変革やスマート社会の構築には必須の研究開発領域である。

### 【研究開発の動向】

デジタル社会基盤を構成し得る要素技術の研究が進んでいる。1990年代後半より無線センサーネットワークに関する研究が進んだ<sup>3)</sup> ことから、これに関連して実空間からデータを獲得するさまざまな手法が提案されてきた。これには無線センサーネットワークの他に、参加型センシング、モバイルセンシング、オートモーティブセンシングなどが含まれる。2015年頃より電波を用いた新たなセンサーの研究開発が着手されている。また2000年頃より大規模データベースやストリーム処理、AIを含めた大規模データ処理の研究開発<sup>4)</sup> が進み、これが実社会の可視化や予測などに応用されつつある。リアルタイムな可視化やデータ収集主体を横断した大規模データ処理、あるいは大規模データの中で特定の個人に特化したデータ処理が今後の課題となりつつある。データ流通の観点では、大量のセンサーデータを送受信する通信プロトコルとその基盤に関する提案が続いている。特に2010年頃から Publish-Subscribe 型プロトコルである MQTT（Message Queueing Telemetry Transport）や XMPP（Extensible Messaging and Presence Protocol）、およびその派生

## 2.5

俯瞰区分と研究開発領域  
コンピューティングアーキテクチャー

系をセンサーデータに応用した研究開発が進みつつある<sup>5)</sup>。これらと並行し、Human Computer Interaction (HCI) 分野では、Persuasive ComputingやAffective Computingに関する研究を通じて、人に作用するコンピューティングに関する研究が進められてきた。現在は、行動経済学の知見が加わって、人の能力や個性、あるいは感情をコンピューターが理解し、それに応じて挙動を変化させるプログラムの研究開発が着手されつつある。総合的には、社会からのデータ収集と蓄積、蓄積データの処理に関する研究が先行し、データを活用した人の行動変容や社会の様相変容、それらを通じたウェルビーイング向上に帰結する人間側の研究開発が遅れている。

日本のSociety 5.0のもとにもなったCPS (Cyber-Physical System) 研究<sup>6)</sup>は2007年8月に発表された米国大統領科学技術諮問委員会 (PCAST, President's Council of Advisors on Science and Technology) の報告書を受けてNSF (National Science Foundation) のCISE (Computer and Information Science and Engineering) など立ち上がった研究プロジェクトであり、その後社会システムや環境エネルギーの効率化を目的としたSmart & Connected Communities (S&CC) 研究に進化し現在に至っている。S&CC研究やその後に立ち上がったPlatforms for Advanced Wireless Research (PAWR) 研究では、高度な無線通信技術に基づく都市の情報基盤構築技術や、人やモノの状況把握・行動推定技術を用いたスマート社会の構築技術など、スマート社会の構築のための情報技術の創出と情報基盤構築が重要な研究課題となっている。

調査会社のIDC Japanの予測によると、世界のIoTデバイスの普及台数が2025年には416億台に達し、年間で生成するIoTデータの総量が79兆4000億GBに達するとの予測があり、広範囲な都市空間から生成されるIoTデータをすべてクラウドで一元管理するのが難しくなっている。また、近年の5Gやローカル5G技術の進展に伴い、高帯域 (10-20Gbps)、低遅延 (1ms)、多数接続 (100万ノード/km<sup>2</sup>) の携帯網が街中のみならず、工場や大学、農場などにも敷設可能になり、利用者に近い場所にエッジサーバーを配置し、多数のエッジサーバーが低遅延でユーザーとインタラクションを行うエッジコンピューティングに基づく情報基盤が必須になってきている。米国AT&Tやドイツテレコムなどの通信キャリアも5Gのネットワークのエッジでさまざまなサービスを提供できるよう、エッジ側でクラウドサービスを利用できるネットワーク環境を構築し、各エッジが近隣エッジ群やクラウドと自律的に連携する分散AIや分散協調システムの構築が進んでいる。

また、近年無線給電などの技術も組み合わせてゼロエネルギーIoTデバイスやそれらのネットワークを構築するための研究開発が世界中で行われており、日本でもこれらの技術開発の推進をうたう「Society 5.0社会を支えるゼロエネルギーIoTネットワーク研究拠点」が日本学術会議の第24期学術大型研究計画に選定されている<sup>7)</sup>。

### 【論文や特許の動向】

本領域においては、論文数は順調に増加している。特許は件数、Patent Asset Indexシェアともに順調に増加している。

論文数では欧州がますます優位にある。中国は多少シェアを伸ばし、米国はその地位が低下しつつある。日本も論文の総数は増加しているが、シェアはある程度低下気味である。

特許については特許ファミリー件数シェア、Patent Asset Indexシェアともに中国が圧倒的な強みを持っている。日本は優位な立場にあったが、件数、競争力ともに低下している。

### (4) 注目動向

#### 【新展開・技術トピックス】

これまでの研究によってさまざまな技術がデジタル社会基盤の新たな展開を生み出しつつある。これは国際的に共通した流れであり、これからも世界で同様の潮流が継続すると考えられる。



その一つはいわゆるAIであり、特に深層学習のコモディティー化によって、それが社会に染み出す技術の創出が見られる。エッジや端末の側で深層学習モデルを駆動してタスクを実行するエッジAI<sup>8)</sup>は、それを用いてネットワークの周辺領域での知的センシングを可能としつつある。画像や音声を含む信号を端末内で知的に処理して結果だけを送信する技術は、今後それに高速化や実時間化が伴えば、画像などに含まれる個人情報情報を漏えいさせずに必要な処理を行うことができ、ある種の秘匿計算と考えることができる。

エッジコンピューティング分野の研究課題としては、欧州電気通信標準化機構（ETSI, European Telecommunications Standards Institute）が2014年から標準化を進めているMEC（Multi-access Edge Computing）ベースの情報基盤の実装技術がある。MECは当初は携帯網でのエッジコンピューティング情報基盤という意味で、Mobile Edge Computingと呼ばれていたが、固定網やWi-Fiなど多様なアクセス網に対象を広げるという意味から2017年にMulti-access Edge Computingと呼ばれるようになった。複数の通信網を利用して、高速で多数の端末にエッジ側でサービスを提供しつつ、対象領域全体での自律的な負荷分散やリアルタイム性の確保、ロバストなシステム構築などの手法が研究されている。近年はEdgeAIやFederated Learningのように、クラウドサーバーでの集中型のAIアルゴリズムの実行ではなく、ユーザーに近いEdgeやIoT機器群でのAIの実装技術や、分散された各エッジで学習を行い、適当なタイミングごとにエッジ群間で学習成果を交換しながらより高度なAIに作り変えていくという研究が注目されている。

また、車両やスマートフォンをエッジデバイスとして社会全体のデータを獲得するためには、より多くの参加者を得るためのインセンティブ設計や、無数の個人が生成するデータの真正性保証技術が新たに重要となる。例えば、都市や交通機関、車から得られるデータを有効に利活用するためには、それらがまっとうなセンサーから得られていること、改ざんなどが行われていないことなどが保証されなければならない。また、データを生成する個人は特定のサービスから独立であることから、複数のサービスにまたがってデータを収集する場合には、非中央集権型識別子（DIDs）を用いた個人の識別が重要となり、2022年7月にW3C勧告となった。

データ流通基盤についても新たな流れが生まれつつある。世界のIoTデバイス数が2020年に300億に達し<sup>9)</sup>、今後も増加し続けることが容易に想定されることから、これらのデバイスが生み出すデータをリアルタイムかつ広域に共有できる技術が望まれる。REST<sup>2)</sup>やPublish-Subscribe<sup>3)</sup>を用いた単純なプラットフォームを単に面的に拡大するだけでは、それらからのデータを収容することはできても柔軟に共有することは不可能である。従って、データ需要者の視点で大量のデータストリームを選択的に受信可能とする新たなプラットフォームに関する研究開発が始まりつつある。

このようなデータ流通基盤を通じてやりとりされるデータストリームは、これを企業間取引の対象とすることで、無限のデータを財とした経済の活性化が期待できる。データセットではなくデータストリームを取引可能とすることは、複数のストリームから新たなデータを工業的に生産するために必須と考えられ、超スマート社会の基礎となり得る。特にこの分野ではブロックチェーン技術の活用が試行されている。

そうして生産されるデータを人が消費する、と考えると、人そのものを理解する技術が重要であり、近年研究開発が盛んである。表情や声から感情を読み取る技術が確立されつつあるのに加え、人の性格や感情、能力、くせなどに基づく処理の最適化技術の研究が進みつつある。これを用いて人の行動を無意識的に変化させるマインドレスコンピューティングを含め、それを用いて情報を人に作用させて社会のウェルビーイングを結果的に向上させる技術と、その倫理に関する研究が重要となりつつある。国内では、2022年4月に情報処理学会にIoT行動変容学研究グループ<sup>10)</sup>が設置され、活発な議論が行われている。

2 Representational State Transfer WebAPIのためのアーキテクチャスタイルの一つ。高速、軽量であり、IoTに適している。  
3 非同期のメッセージングのための考え方。送信者は受信者を意識せずにメッセージを送信し、受信者は自分に必要なメッセージを受信する。送信者と受信者の結合度が低いことIoTに適している。

デジタルデータを中心とした経済の観点で、直近のキーワードとして「Web3」が挙げられる。Web3に関してはさまざまな定義が試みられているが、ここではHTTPを介してデジタル情報財に基づく経済活動が行われる空間を意味すると考える。デジタルデータを財として成立させるためには、その財の真贋判定とともに、所有権の証明が可能でなければならない。ブロックチェーンとその上のNFT<sup>4</sup>はその手法の例である。これまでの、いわゆるWeb2.0の世界では、物財と結び付いた経済活動が行われていたのに対して、Web3では経済活動がデジタルで完結している点が特徴である。Web3の成立に際して、技術的には、デジタルデータの自由な複製可能性を無効とする技術が必須である。経済学的には、物財に価格が付くのは、その財が有限であることに起因する。無限に存在し、自由に入手可能である財は、無料もしくは限りなくそれに近い価格となる。デジタルデータはインターネット上で容易に流通し、かつ複製も容易であることから、そのままでは自由に入手可能な財と考えられ、経済活動の対象とはなりにくい。そこで複製を無効とする技術、あるいは複製前の初版を証明する技術が、デジタルデータを価格の付く情報財とする上で必要となる。さらに所有権を証明するNFTや、その取引に用いられる仮想通貨が、現状では広く受け入れられつつある。

インターネット上に構築される3次元仮想空間である、いわゆるメタバースがWeb3と関連して拡大しつつある。20世紀末からMMORPG (Massively Multiplayer Online Role-Playing Game) として存在するものではあるが、特に米国Facebook社の社名変更に端を発して、その概念が急速に浸透しつつある。今後、3次元仮想空間が人間の活動場所としてより一般的に用いられるとなると、さまざまな社会的問題が生じると考えられ、それに対応する技術が必要となっている。まず、仮想空間内で用いられるアバターの真正性保証が重要となる。アバターは、そのユーザーの仮想空間内での存在を示すものである。従って、なりすましを排除する技術が必要である。また、多数の独立した仮想空間が生成される未来を考えると、人間は物理空間とそれらの仮想空間の相対的な概念である「メタ空間」に生存することとなる。このとき、メタ空間内のさまざまな存在を識別する名前空間や、異なる仮想空間に存在するアバター同士の関係、例えばそれらが同一の物理的人間に関連付いているといったことを識別する技術など、個別空間をまたがった計算を可能とする技術が必要となる。さらに、物理空間を即時的に仮想空間内にキャプチャーする技術や、その中で、過去や未来を行き来してさまざまな事象をシミュレーションする技術が有望となる。物理空間では不可能な体験を、仮想空間内で可能とするシミュレーションは、未来に起こり得ることを疑似体験し、そこから現在の物理空間へバックキャストして、より良い社会の創造につなげられる。このように、仮想空間であることの利点を生かした技術が、今後の研究開発において重要となる。

現実世界のスマート化については、近年世界中でさまざまなスマート社会構築プロジェクトや行政データのオープン化が進行している。PAWR (Platforms for Advanced Wireless Research) 研究では、NSFと企業連合がそれぞれ50億円ずつ拠出して、米国ソルトレイク市やニューヨーク市などでスマート社会構築実証実験と都市情報基盤構築が進んでいる。また、ニューヨーク市では、1,600以上のデータが「NYC Open Data」として市民に公開され行政の効率化などに活用されるとともに、公衆Wi-Fiスポット「LinkNYC」<sup>11)</sup>の設置を通して、観光や地域の問題解決に役立てようとしている。また、シカゴやコロンバス、サンフランシスコなどの都市でも交通機関の利便性向上、環境改善、街の見守り、行政情報の公開 (「DataSF」<sup>12)</sup> など) による行政サービスの効率化などが図られている。このような動きはカナダのトロント、英国のマンチェスター、ブリストル、デンマークのコペンハーゲン、オランダのアムステルダム、中国の杭州、ドバイなどの都市や、エストニア、シンガポールでは国を挙げて実施しており、行政データのオープン化などを介して、街のエネルギー効率化や交通渋滞の緩和、環境改善、防犯・減災に資する技術の開発を進めている。

一方で、COVID-19の感染拡大により、社会の働き方や生活環境が大きく変化し、それに伴い「スマート社会」に求められる機能も大きく変化してきている。従来の人やモノの状況把握・行動推定技術は、

4 Non Fungible Token 非代替性トークン 偽造が不可能な証明書であり、取引履歴に基づいて所有権の管理が行える。

COVID-19感染拡大防止や3密を避けた安全・安心な生活環境の構築にも利活用可能な技術として世界中で技術開発が進んでいる。また、コロナウイルスの構造解析やウイルスの付着場所の発見、感染拡大地域の予測などを目的として、AIとシミュレーション技術の連携も進んでいる。防災や減災を目的としたスマート社会構築技術も、社会や集団の3密状況の把握や改善、COVID-19の感染拡大防止に資する技術として利活用されている。国内外のさまざまな学会誌でCOVID-19に関連する特集号が企画され<sup>13)</sup>、日本の内閣官房などでもさまざまな取り組みが実施されている<sup>14)、15)</sup>。なお、コロナ禍での社会変革に向けたデジタル基盤強化やデジタル変革の推進に関しては、2020年9月に日本学術会議から提言が発出されている。

アンビエント・バックスキャッター (Ambient Backscatter) 通信<sup>16)</sup> は2013年にワシントン大学の Shyam Gollakota 博士らが開発した技術で、環境に存在する無線電波にゆらぎを与え、そのゆらぎの成分のみを抽出して通信を行うことで、従来の無線通信に比べ1/1000以下のエネルギーで無線通信できるのが特徴であり、後方散乱方式を用いた超低消費電力通信を可能にした Printed WiFi システムや CSI (Channel State Information) を用いた行動認識技術など、エナジーハーベストなセンシング技術の普及に役立つ技術である。

### [注目すべき国内外のプロジェクト]

EUでは2010年過ぎより全域で、街のスマート化に関する複数のプロジェクトが進んでおり、2021年までの間に Horizon 2020 プログラムを通じて数百億ユーロの資金が街の次世代化に投じられ、Horizon 2020 研究に続く Horizon Europe 研究では、2021年から7年間で941億ユーロの投資が行われる予定である<sup>17)、18)</sup>。Health care systems、Cybersecurity、Advanced Computing and Big Data、Space including earth observationなどの技術開発がうたわれており、米国のS&CC研究やわが国の Society 5.0 研究などと同じように、スマート社会構築がICT分野の重要課題となっている。Horizon 2020やHorizon Europeでは、異なるIoT情報基盤間のインターオペラビリティやセキュリティの確保が重要視され、Inter-IoT、BIG IoT、AGILE、sybIoT、TagItSmart!、VICINITY、bloTopeなどの研究プロジェクト<sup>19)</sup> が実施されている。また、プライバシーを考慮した Federated Learning などのプロジェクト (FeatureCloud)<sup>20)</sup> も推進されている。その中でもサンタンデール (スペイン) の SmartSantander はIoT由来データを活用した研究開発として先駆的である。欧州ではさらに Cisco や NOKIA などの民間企業が主導するスマートシティ構築も行われており、バルセロナ (スペイン) やブリストル (英国) がそれに当たる。また、同様の試みはヘレンベルグ (ドイツ)<sup>21)</sup> やニューカッスル (英国) 等でも進められており、防災や交通、環境などさまざまな観点から都市を設計する上で、その都市をまるごと計算可能とするものである。

米国では、NSF が (1) Smart & Connected Communities (S&CC) 研究、(2) Cyber-Physical Systems (CPS) 研究、(3) Platforms for Advanced Wireless Research (PAWR) 研究、(4) Smart Health and Biomedical Research in the Era of Artificial Intelligence and Advanced Data Science (SCH) 研究、(5) AI Institutes Partnerships for Innovation (PFI) 研究、などの重点研究課題を推進しており、高度な無線通信技術に基づく都市の情報基盤構築技術や、人やモノの状況把握・行動推定技術を用いたスマート社会の構築技術、人の健康・医療・介護に資するセンシング技術の創出、クラウドソーシングを活用した社会システムの構築など、スマート社会の構築のための情報技術の創出と情報基盤構築が重要な研究課題となっている。しかしながら、Google がトロント (カナダ) で街区のスマート化を試みたものの、市民の理解が十分に得られずに失敗に終わっていることには注意しなければならない。

これに対して中国では、さまざまな企業が国民から取得した、個人情報を含むデータが研究に供され、交通量予測や車両の経路予測などのさまざまな先駆的な研究開発が進みつつある。これに加えて国主導で「天網工程」と呼ばれる監視カメラネットワークが全土に導入され、AIを用いた人物のリアルタイム識別システムを構築している<sup>22)</sup>。現在およそ2億台以上のカメラが接続されていると言われており、AIによる解析結果は警察官が装着するスマートグラスに表示される、と言われている。これを支える研究開発は中国国内で実施さ



れていると考えられるものの、中国政府は「天網工程」の存在を公式には認めていないことから、詳細は一般には参照不能である。また、Huaweiなどが実施する5Gをベースにしたスマートシティ関連技術は、ドイツのデュースブルク市や欧州のいくつかの都市に展開されようとしており、米国との5Gを巡る覇権争いの焦点となった。これは通信速度や帯域の高性能化といった5Gの高速大容量通信技術に対する技術競争というより、高度な通信基盤をベースにした都市情報基盤構築に対する覇権争いである。政治経済的に大きな影響を持つ社会のさまざまなデータを誰が保持・管理するかという意味で重要である。

シンガポールでは「Virtual Singapore」<sup>23)</sup>として国全体のデジタルツイン化のプロジェクトが進みつつある。実空間のスタティックな3次元マップに、交通量や大気汚染物質濃度などライブで取得し得るダイナミックなデータを重畳して、社会の計算可能化を試みている点が先駆的である。

わが国では主に情報通信研究機構（NICT）を中心として、IoTを活用した社会のスマート化に関するプロジェクトが複数進行しており、注目すべきである。会津若松では、民間企業が主導するスマートシティ構築の取り組みが進んでおり、ここにどれだけの先端技術を取り込めるかという点が注目される。また、デジタル庁が中心となって「デジタル田園都市国家構想」を推進するために、デジタル技術を活用した地域課題解決や魅力向上に向けて地方公共団体の取り組みが支援されており、その成果が注目される。

## (5) 科学技術的課題

デジタル社会基盤はさまざまな要素技術の複合であり、それが最も社会に露出しつつあるドメインは自動運転車であろう。今後、車いすの自動化や白杖のスマート化、あるいは歩行者の流れに基づく信号制御のスマート化などが想定される中で、それらの基盤となる空間モデルを大規模かつシームレスに構築することが必須となる。ここでは単に静的な3次元空間モデルではなく、リアルタイムに空間情報がアップデートされるとともに、空間内を動く人やモノ、空間内で起きる事象など、さまざまな情報をダイナミックに組み込んでいくことが望ましい。これを実現するための諸技術の研究開発を多角的に推進し、成果を有機的に統合、実践することが重要となる。結果として構築される空間モデルとそれを提供するシステムを基礎として人の生活が成立するとき、そのシステムのディペンダビリティを向上させる技術が極めて重要となる。デジタル社会基盤に求められる性能や信頼性などの非機能要件を明らかにし、それに対応する技術の研究開発が求められる。さらに、さまざまな要素技術研究を実データ、実社会に適用する研究開発も重要である。既存の研究用データセットに閉じた研究開発だけでなく、実社会に開いた研究開発を推進することが、結果的にデジタル社会基盤の拡張につながる。

スマート社会の構築技術としてはエッジコンピューティングに基づく研究開発が重要であり、そのための研究課題については当該分野のトップ0.1%論文として多数の研究者に読まれているサーベイ論文<sup>1), 2)</sup>などで述べられている。文献[1]では(1)スマートホームやスマートシティで利活用可能なedgeOS（都市OSと書かれる文献もある）の開発やそれに基づく情報基盤開発、(2)位置や時間依存のアプリケーション開発基盤、(3)分散AI技術（Federated Learning、エッジAI、分散強化学習などを含む）の実現などを見据えた近隣エッジサーバー同士、あるいは、エッジサーバー群とクラウドサーバー間の自律的な連携、(4)絶え間なく流れ続ける情報流のリアルタイム処理、(5)街や対象領域の多数のモバイルユーザーのモビリティ推定やユーザー管理基盤、(6)IoT情報基盤におけるプライバシー保護やセキュリティ対策、(7)エネルギーベストなIoT情報基盤などが挙げられ、文献[2]ではさらに(8)自律分散型のエッジサーバー管理、(9)人を含めた分散協調システム（Humans in the CPS Loopと同じ概念）、(10)エッジコンピューティングのためのミドルウェア、(11)スケーラビリティの確保、などもうたわれている。

また、スマート社会構築にはAI技術、特にエッジ間連携をベースにした分散AI技術（Federated Learning、エッジAI、分散強化学習など）の技術開発が重要であり、それらを実行するためのIoT情報基盤構築技術やIoT機器の普及促進に役立つゼロエネルギーIoTネットワーク技術の創出なども重要な研究課題に

なっている。社会のデジタル変革を考える上で、これらの新たな技術と既存情報基盤との融合が望まれる。

## （6）その他の課題

Society 5.0（超スマート社会）では、社会の実空間（フィジカル空間）からさまざまな情報をセンシングし、それらを情報空間（サイバー空間）で蓄積・分析し、その結果をフィジカル空間に返して、人やモノの行動変容を誘導する Cyber-Physical System（CPS）の考えに基づき、さまざまな産業や社会生活におけるイノベーションの創出を目指している。一方で、米国のGAFAや中国のBATなどのIT巨大企業に多くのデータが寡占され、独占的に利活用されているという懸念も高まっており、個人のデータは個人の意思で管理できるようにし、寡占されているようなデータを他の管理者にも容易に移動できるようにして、利活用の可能性を拡大できるような仕組み作りが世界的に進んできている。世界各国の個人情報保護法制の中でも、特にヨーロッパでは、EUの一般データ保護規則（General Data Protection Regulation（GDPR））<sup>24）</sup>が2016年4月に採択され、2年間の移行期間の後、2018年5月より欧州経済領域（EEA：EU加盟28カ国+アイスランド、リヒテンシュタイン、ノルウェー）で全面施行されている。GDPRでは、自らの情報に関して、知らされる権利、アクセスする権利、訂正してもらう権利、消去してもらう権利（忘れられる権利）、処理を制限する権利、データポータビリティの権利、異議を申し立てる権利、自動意思決定とプロファイリングに服さない権利、が定められている。データポータビリティ権は、管理者に提供した個人データを受け取る権利と、ある管理者から別の管理者へ個人データを送信する権利からなり、削除してもらう権利（忘れられる権利）も含めて、個人データのコントローラビリティを高める措置となっている。米国と中国の間で問題となっている5Gなどの覇権問題も含め、民主主義国家として個人情報保護の流れに沿った個人情報の収集・活用の仕組みを考え、データのオーナーシップを前提としたデータ利活用方法を世界に先駆けて示していくことが重要と考えられる。

実空間からのセンシング技術が、特にAIを用いた画像からの情報取得技術によって進歩しつつあるが、同時に個人に関連する情報も容易に取得可能となっている。画像を扱う場合には人や車両が含まれるのに加え、音声にも人の声が含まれる。これに対してわが国においては、地方自治体は独自に個人情報保護に関する条例を制定しており、今後はこれが実空間からの情報獲得の障壁となる可能性がある。一方、欧州連合が定めたGDPRは、欧州に国籍を持つ人物の情報を計算機に格納する際に、従う必要が生じる。現在は技術が制度に追いついていない状況にあり、さまざまなセンシング技術の適法性を高めるための技術開発という視点も必要である。

社会の側には、デジタル社会基盤となり得る技術の導入に消極的な行政や企業が多くある。行政はこれまでの業務形態を数十年間継続してきており、新たな技術によってこれが変化することが新たな負担を生じると捉えられがちである。新たな技術を受け入れて、業務を新しくしていくことの価値や、それによって社会が変遷していくことの理解、およびその正しい道筋を理解する人材の育成が急務である。

既存業務の効率化にとどまらず、全く新しい価値をデジタル社会基盤によって作り出す、産学連携や分野連携も重要である。特に経済の観点では、これまでの物財主体の経済に加えて、都市や人間の活動から得られる無限のデジタル情報財に基づく経済をいち早く起動する必要がある。このために、実空間から取得するデータや、AI等により生成するデータ、あるいは人が生み出すデータを取引することの効果を定量的に示す必要がある。

2021年9月にデジタル庁が創設され、社会の「デジタル変革」への期待が高まっている。また、先に述べた通り、社会変革に向けたデジタル基盤強化やデジタル変革の推進に対して、日本学術会議から提言も发出されている<sup>7）</sup>。デジタル変革に向けた道のりは大きく分けると3段階あり、第1段階（デジタル化）でアナログ情報のデジタル化が図られ、第2段階（データ連携）で複数のシステムをつなぎ、ビジネスプロセスやビジネスモデルのデジタル化が図られている。コロナ禍で行政のデジタル化の遅れなども指摘されているが、第2段階のデジタル化まではある程度進んでいくと考えられる。一方で、第2段階までのデジタル化は企業や行政、組織などの閉じた世界でのデジタル化であり、さまざまな組織のデータや情報システムを連携させ、社会の変



革につながる新たなサービスやビジネスの創出、企業活動の高度化までは至っていない。デジタル化の第3段階（デジタル変革）では、AI、IoT、ビッグデータの利活用を通して、社会全体でデジタル情報の高度な使い方を創出していくことが求められており、ここで取り上げた分散AI技術（Federated Learning、エッジAI、分散強化学習など）やIoT情報基盤構築技術、ゼロエネルギーIoTネットワーク技術の創出が社会全体のデジタル変革や超スマート社会構築に大きく寄与するものと考えられる。

社会のデジタル化はさまざまな効率化や無駄の排除、新たな産業の育成や、国際競争力の強化から見て非常に重要である。しかし、わが国はデバイスから装置、システム、ソフトウェア、サービスに至るまで、その多くを海外に依存している。もちろん一国ですべてを賄うことはどの国においても不可能であるが、そのサプライチェーンのどこか重要なポイントを握ることが、経済安全保障上極めて重要である。IoTやエッジコンピューティングなど、フィジカルな部分ではまだ競争力を有している段階で、世界標準となる技術を有するようにならなければならない。

(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    | ○  | →    | ・ 研究開発テーマが欧米の後追いになっている。一方、AIや5G, Society 5.0関連技術については研究が推進されている。<br>・ 論文数は増加しているが、シェアはある程度低下気味である。                                      |
|        | 応用研究・開発 | ○  | ↘    | ・ 国内各地でICTを活用した社会のスマート化を目指すプロジェクトが萌芽しつつある。ただし民間ベースでの取り組みとしてトヨタのWoven Cityやいくつかの都市のスマート化などが進んでいる。<br>・ 特許において優位な立場にあったが、件数、競争力ともに低下している。 |
| 米国     | 基礎研究    | ◎  | ↗    | ・ GAFAを代表とする民間企業ベースでAIに関する研究開発をリードしている。都市のスマート化や健康医療応用も活発に研究されている。                                                                      |
|        | 応用研究・開発 | ○  | →    | ・ 実際に官民連携で都市のスマート化を推進しているが、特定の企業に特化しない地域や社会の基盤という観点での応用研究では立ち遅れている。                                                                     |
| 欧州     | 基礎研究    | ◎  | →    | ・ 人を中心としたデジタル社会基盤やセンシングの観点では先進的な取り組みが見られ、都市のスマート化や健康医療応用も活発に研究されている。                                                                    |
|        | 応用研究・開発 | ○  | →    | ・ Horizon2020およびHorizon Europeによる巨額投資で一部の都市ではデジタル社会基盤の整備が進んでいる。一方、GDPRの制定で、個人データ保護に強い制約がある。                                             |
| 中国     | 基礎研究    | ◎  | ↗    | ・ AIや5G 関連研究に多額の国費をつぎ込んでいる。特に、国民に関するデータを用いて社会の分析や予測に関する研究が進んでいる。                                                                        |
|        | 応用研究・開発 | ◎  | ↗    | ・ 国全体で監視カメラとAIのネットワークを整備し応用が進んでいる。スマートシティ関連技術を欧州などに輸出しようとしているが、個人情報保護や国の安全保障の問題などがある。                                                   |
| 韓国     | 基礎研究    | △  | →    | ・ 5Gの研究などが進んでいるが、他の分野では特筆すべき点が見られない。                                                                                                    |
|        | 応用研究・開発 | ○  | →    | ・ 仁川など一部の都市ではデジタル社会基盤による都市のスマート化の取り組みが見られる。                                                                                             |
| その他の地域 | 基礎研究    | ○  | →    | ・ インドなどで都市のスマート化に関する研究が進んでいる                                                                                                            |
|        | 応用研究・開発 | ○  | →    | ・ 欧州（オランダ、デンマーク、エストニア）、ドバイなどで都市のスマート化が進んでいるが、研究は輸入技術を用いたものも多い。シンガポールでは、国全体をデジタルツイン化するプロジェクトにより技術の応用が進んでいる。                              |

## (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

## 参考文献

- 1) Weisong Shi, et al., “Edge Computing: Vision and Challenges,” *IEEE Internet of Things Journal* 3, no. 5 (2016) : 637-646., <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198>.
- 2) Pedro Garcia Lopez, et al., “Edge-centric Computing: Vision and Challenges,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 45, no. 5 (2015) : 37-42., <https://doi.org/10.1145/2831347.2831354>.
- 3) Jennifer Yick, Biswanath Mukherjee and Dipak Ghosal, “Wireless sensor network survey,” *Computer Networks* 52, no. 12 (2008) : 2292-2330., <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2008.04.002>.
- 4) Min Chen, Shiwen Mao and Yunhao Liu, “Big Data: A Survey,” *Mobile Networks and Applications* 19 (2014) : 171-209., <https://doi.org/10.1007/s11036-013-0489-0>.
- 5) Ala Al-Fuqaha, et al., “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 17, no. 4 (2015) : 2347-2376., <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>.
- 6) Cyber-Physical Systems Virtual Organization, “CPS-VO: Projects,” <https://cps-vo.org/projects>, (2023年2月6日アクセス) .
- 7) 日本学術会議 第二部大規模感染症予防・制圧体制検討分科会, 情報学委員会ユビキタス状況認識社会基盤分科会「提言:感染症対策と社会変革に向けたICT基盤強化とデジタル変革の推進(令和2年(2020年)9月15日)」日本学術会議, <https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-t298-3.pdf>, (2023年2月6日アクセス) .
- 8) Massimo Merenda, Carlo Porcaro and Demetrio Iero, “Edge Machine Learning for AI-Enabled IoT Devices: A Review,” *Sensors* 20, no. 9 (2020) : 2533., <https://doi.org/10.3390/s20092533>.
- 9) 総務省「情報通信白書令和2年版」情報通信統計データベース, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/r02.html>, (2023年2月6日アクセス) .
- 10) 情報処理学会IoT行動変容学研究グループ, <http://www.sig-bti.jp/index.html>, (2023年2月6日アクセス) .
- 11) LinkNYC, <https://www.link.nyc>, (2023年2月6日アクセス) .
- 12) City and County of San Francisco, “DataSF’s,” <https://datasf.org>, (2023年2月6日アクセス) .
- 13) Zubair Fadlullah, et al., “Smart IoT Solutions for Combating the COVID-19 Pandemic,” *IEEE Internet of Things Magazine* 3, no. 3 (2020) : 10-11., <https://doi.org/10.1109/MIOT.2020.9241464>.
- 14) 内閣官房新型コロナウイルス等感染症対策推進室「新型コロナウイルス感染症対策」<https://corona.go.jp>, (2023年2月6日アクセス) .

## 2.5

俯瞰区分と研究開発領域  
コンピュータ・インターネット・AI・IoT・ロボティクス

- 15) 内閣官房新型コロナウイルス等感染症対策推進室「COVID-19 AI・シミュレーションプロジェクトについて：AI等技術を活用したシミュレーション」<https://www.covid19-ai.jp/ja-jp/about/>, (2023年2月6日アクセス)。
- 16) Vincent Liu, “Ambient Backscatter: Wireless Communication Out of Thin Air,” University of Washington, <http://abc.cs.washington.edu>, (2023年2月6日アクセス)。
- 17) 内閣府「科学技術政策担当大臣等政務三役と総合科学技術・イノベーション会議有識者議員との会合（令和元年度）：資料2-2 AIとロボットの共進化によるフロンティアの開拓（令和元年10月24日）」<https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/yusikisha/20191024/siryo2-2.pdf>, (2023年2月6日アクセス)。
- 18) IoT-European Platforms Initiative (IoT-EPI), “Projects: Archives,” <https://iot-epi.eu/project/>, (2023年2月6日アクセス)。
- 19) Human-Centered AI Lab, “EU Project FeatureCloud (Federated Machine Learning),” <https://human-centered.ai/project/project-feature-cloud-federated-machine-learning/>, (2023年2月6日アクセス)。
- 20) Community Research and Development Information Service (CORDIS), “Machine learning to augment shared knowledge in federated privacy-preserving scenarios,” European Commission, <https://cordis.europa.eu/project/id/824988>, (2023年2月6日アクセス)。
- 21) Fabian Dembski, et al., “Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: The Case Study of Herrenberg, Germany,” *Sustainability* 12, no. 6 (2020) : 2307., <https://doi.org/10.3390/su12062307>.
- 22) 柏村祐「天網の衝撃：あなたの行動は監視されている」第一生命経済研究所, <https://www.dlri.co.jp/report/ld/2019/wt1905b.html>, (2023年2月6日アクセス)。
- 23) M. Ignatius, et al., “Virtual Singapore integration with energy simulation and canopy modelling for climate assessment,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 294 (2019) : 012018., <https://doi.org/10.1088/1755-1315/294/1/012018>.
- 24) General Data Protection Regulation (GDPR), <https://gdpr-info.eu/>, (2023年2月6日アクセス)。