

9. デジタルツイン

9.1. 都市におけるデジタルツインの役割と可能性

デジタルツインとは、現実世界の物理的な対象やプロセスを、デジタル空間上に正確に再現した仮想モデルを指す。スマートシティにおいてデジタルツインは、都市運営の効率化や住民サービスの向上を実現するための重要な要素となる。たとえば、都市全体の交通の流れやエネルギー消費、環境データをリアルタイムで監視・シミュレーションすることで、渋滞の軽減やエネルギーや環境の最適化が可能である。また、災害時にはシミュレーションを活用して迅速な対応を計画することができ、住民の安全性を高めることにも寄与する。

さらに、都市の設計段階でデジタルツインを活用することで、計画の精度を向上させ、無駄なコストを削減することが可能である。将来的には、デジタルツインを活用した高度な AI 分析によって、都市全体の課題を予測し、先手を打った施策が実現できるだろう。

デジタルツインの導入により、スマートシティはより高度に進化し、多くの分野で新しい価値を創出することが期待される。この技術の発展には、公共・民間の連携が欠かせず、持続可能な都市づくりへの道を切り開く鍵となるだろう。

また、都市データだけでなく、自動車や気象などのデータも一体化したデジタルエンジニアリングが進展し、センサデータも取り込むことやゲーミング技術を取り込むなど、リアルタイム・デジタルツインにも注目が集まっている。

9.2. デジタルツインに影響する技術

デジタルツインを実現するためには、さまざまな先進技術の融合が必要である。以下にその主な技術を示す。

9.2.1. 3D モデリングとシミュレーション

都市の物理的な構造やインフラを正確に再現するためには、高度な 3D モデリング技術が必要である。建物、道路、公園などの要素を高精度でデジタル化することで、都市全体の俯瞰的な視点が得られ、シミュレーションでの都市計画の確認ができ、センサデータなどによりリアルタイムの変化も反映可能になる。

9.2.2. AR/VR

拡張現実（AR）や仮想現実（VR）は、デジタルツインを視覚的に体験するための強力なツールである。都市計画者や住民は、仮想空間上で計画の効果を確認できるため、意思決定が容易になる。また、住民への情報提供や観光体験の向上にも寄与する。

9.2.3. 乗り物に搭載されたセンサ

自動車や公共交通機関に搭載されたセンサは、交通量や走行経路、車両の状態などのリアルタイムデータを収集する。これにより、交通渋滞の予測や最適なルート案内が可能になり、都市交通の効率化が進む。

9.2.4. インフラに設置されたセンサ

道路や橋、建物といったインフラに設置された IoT センサは、構造の状態や気象条件などをリアルタイムで監視する。これにより、インフラの劣化を早期に発見し、保守管理の効率化が可能である。

9.2.5. スマートフォンなどによる検索履歴や人口密度データ

スマートフォンから得られる位置情報や検索履歴は、人口の移動パターンや混雑状況を把握するのに役立つ。これらのデータを活用することで、都市サービスの最適化や商業施設の配置計画が可能になる。

9.2.6. センサ高度化、省エネルギー化、バッテリーやネットワークの高性能化

センサや無線通信モジュールの性能向上、小型化、省エネルギー化が進み、電池などで 1 年以上稼働するセンサが実現している。安価なセンサ用ネットワークと組み合わせることで、都市部以外でもデータ収集が容易になる。

9.3. デジタルツインが生み出すビジネスの可能性

デジタルツインの活用により、新たなビジネスチャンスが生まれる可能性がある。以下にその例を示す。

9.3.1. スマートシティソリューションの提供

都市全体の運営効率を向上させるためのソリューションを提供する企業が増えるだろう。これには、交通管理システム、エネルギー効率化サービス、防災シミュレーションツールなどが含まれる。

9.3.2. 不動産・都市計画関連サービス

デジタルツインを活用した仮想モデルにより、建設プロジェクトの計画やリスク評価が正確かつ迅速に行えるようになる。不動産開発やリノベーションの際の意思決定プロセスを大幅に改善することが期待される。

9.3.3. 建設機械との連携

建設機械で取得できる位置情報とデジタルツインの都市情報を組み合わせることで、切削等で、図面に従った正確な工事を実施することが可能になる。また工事結果をリアルタイムで図面に反映することができる。

9.3.4. 自律移動の支援

自動運転車、自動配送車やドローン、ロボットなどが、スマートシティの中を自律的に移動する場合、カメラやセンサの情報と都市情報を合わせて使用することで、安全性を高めることができる。

9.3.5. データビジネス

デジタルツインを通じて得られる膨大なデータは、マーケティングやサービス設計に活用できる。たとえば、人口密度や行動パターンを分析して、新しいサービスや製品をターゲット層に適切に届けることが可能である。

9.3.6. エンターテインメントと観光

デジタルツインを用いた AR/VR 技術は、観光地やイベントの新しい体験を提供する可能性がある。例えば、歴史的な建造物や街並みを仮想空間で再現し、訪問者にユニークな体験を提供することができる。ゲーミフィケーションとの活用も行われている。

9.3.7. 教育および研究

都市のデジタルツインは、教育や研究機関にとっても有益である。学生は都市運営のシミュレーションを通じて実践的な知識を得ることができ、研究者はリアルなデータを用いて新しい理論を検証することができる。

9.4. デジタルツイン国際標準化動向

2018 年頃から主要な国際標準化機関でデジタルツインに関する標準化議論が開始されている。以下に、主要な国際標準化機関でのデジタルツイン関連の標準化動向を示す。

9.4.1. 国際標準化機構（ISO）

国際標準化機構(ISO)の技術委員会 TC184/SC4 (Industrial Data)では、製造業向けデジタルツインフレームワークの国際標準を策定し ISO 23247 シリーズとして発行されている。この国際標準シリーズでは対象を製造業に限定したデジタルツインのフレームワークとして基本原則、参照アーキテクチャ、製造関連要素のデジタル表現、情報交換モデルを定義している。

- ISO 23247-1:2021 : Digital twin framework for manufacturing
— Part 1: Overview and general principles
- ISO 23247-2:2021 : Digital twin framework for manufacturing
— Part 2: Reference architecture
- ISO 23247-3:2021 : Digital twin framework for manufacturing
— Part 3: Digital representation of manufacturing elements
- ISO 23247-4:2021 : Digital twin framework for manufacturing
— Part 4: Information exchange

9.4.2. 国際標準化機構・国際電気標準会議合同技術委員会（ISO/IEC JTC1）

ISOと国際電気標準化会議（IEC）は、JTC1と呼ばれる合同技術委員会を設置して情報技術に関する標準化議論を行っている。ISO/IEC JTC1 配下の専門委員会 SC41 は Internet of Things (IoT)を標準化対象としてきたが、2020 年にデジタルツインを標準化対象に追加することが合意され、そのタイトルが「IoT とデジタルツイン」に変更された。SC41 には、デジタルツイン標準化を議論する Working Group 6(WG6)および海洋・水中分野でのデジタルツインを議論する WG7 が設置された。これまでに、用語定義、事例集、コンセプトに関するドキュメントが発行されているほか、モデル化ガイドライン、忠実度評価、データ抽出と取引、データ空間接続ガイドライン、成熟度モデル、参照アーキテクチャに関する国際標準化議論が進められている。

9.4.3. 国際電気通信連合 国際電気通信標準化局（ITU-T）

国際電気通信連合 国際電気通信標準化局（ITU-T）では、IoT およびスマートシティを標準化対象とする第 20 研究委員会(Study Group 20, SG20)が 2015 年に ITU-T 配下に設置された。2019 年以降、スマートシティにおけるデジタルツイン導入に関する標準化提案が見られるようになり、提案件数は増加傾向にある。2024 年 10 月に開催された ITU-T 総会(WTSA-24)では、ITU-T SG20 の標準化対象としてデジタルツインを明記することが合意され、そのタイトルが「IoT、デジタルツインおよびスマートシティ」へと変更された。今後、スマートシティにおけるデジタルツイン導入に関する国際標準化議論が活発化することが予想される。ITU-T SG20 におけるスマートシティ領域でのデジタルツイン国際標準化動向を次項で解説する。

9.5. スマートシティ領域でのデジタルツイン国際標準化 (ITU-T SG20)

前節の通り ITU-T SG20 ではスマートシティ領域でのデジタルツインの国際標準化議論が行われている。本項では、これまでに ITU-T SG20 で策定されたデジタルツインの国際標準、および策定中の国際標準について解説する。

9.5.1. ITU-T SG20 で策定されているデジタルツインの国際標準化

これまでに ITU-T SG20 で議論されてきたスマートシティ領域でのデジタルツインの国際標準は、大きく 3 つのカテゴリーに分類できる。

- ・ 都市サービスに依存しないデジタルツインの機能要件や参照アーキテクチャの定義
- ・ 都市サービスごとのデジタルツインの機能要件
- ・ デジタルツイン間の連携

以下に、3 つのカテゴリーごとの国際標準化動向を解説する。

9.5.1.1. 都市サービスに依存しないデジタルツインの機能要件や参照アーキテクチャの定義

スマートシティにおけるデジタルツインの概要等、個別の都市サービスに依存しない機能や参照アーキテクチャの定義が進められている。勧告 ITU-T Y.4600（スマートシティにおけるデジタルツインの要件と機能）では、スマートシティにおいてデジタルツインを導入する際に要求される機能が定義されている。図 9.5-1 が示す通り、スマートシティにおいてデジタルツインを導入する際には、データ収集層（Data acquisition layer）、データモデリングとシミュレーション層（Modeling and simulation layer）、最適化とプレゼンテーション層（Optimization and presentation layer）の 3 つの層からなる機能群が要求される。これらの機能により、様々な都市データを収集し、モデル化し、最適化・見える化を実現し、自治体等のユーザが取るべき最適な都市戦略を選択できるようになるとしている。

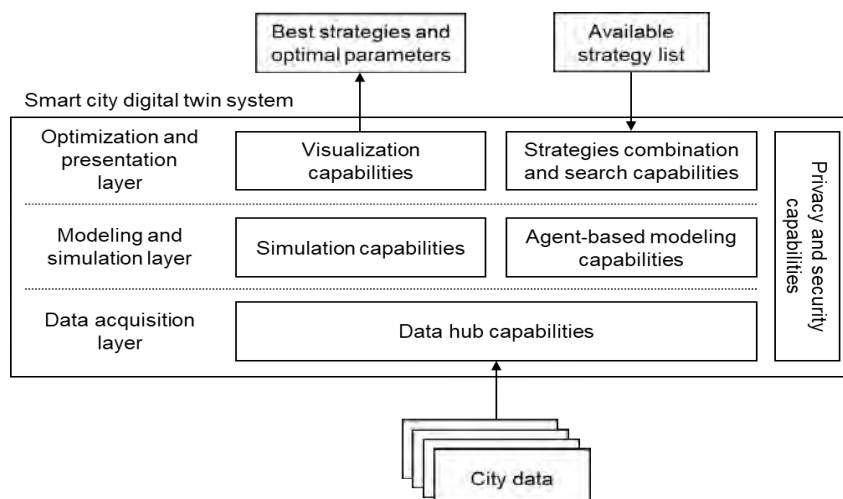


図 9.5-1 : スマートシティでのデジタルツイン導入に際して要求される機能群（出典：ITU-T Y.4600）

スマートシティにおいてデジタルツインを導入するにあたり、「いかにツイン(双子)の状態を維持するか」が課題となる。刻々と変化する都市の情報をデジタル空間上で絶えずアップデートすることにより、最新情報を維持し続ける必要がある。これを実現するためのアプローチの一つとして、その都市に暮らす住民の協力を得ることが考えられる。協力した住民に対してインセンティブを与えることにより情報のアップデートを促す仕組みとなる。情報アップデートや住民へのインセンティブを管理するために必要となる機能の国際標準化議論が、2024年7月からITU-T SG20で始まっている。この国際標準化議論は日本（早稲田大学）のリードにより進められている。

9.5.1.2. 都市サービスごとのデジタルツインの機能要件

スマートシティでは様々な都市サービスが考えられている。それぞれの都市サービスにてデジタルツインを活用する場合、都市サービスごとに必要となる機能が異なるケースがある。ITU-T SG20でのデジタルツイン国際標準化の2つ目のカテゴリーとして、都市サービスごとのデジタルツインの機能要件定義がある。

例えば、ITU-T Y.4601では消防領域でのデジタルツイン導入に際して必要となる機能が定義されている。実際の都市に火災を起こして最適な消火活動を訓練することは出来ないため、デジタル空間上での大規模かつ高精度なシミュレーションが求められる。ITU-T Y.4601では、火災現場のモデリング、見える化、消火シミュレーション、予知等を実現するシステムの構成要素である図9.5-2に示す消防領域特有のデバイス（設置されたセンサ、消防士が持ち運ぶセンサ等）、ネットワーク、プラットフォーム、アプリケーションに要求される機能を定義している。

上記消防領域の他、ITU-T SG20では2024年11月現在で、表9.5-1に示す都市サービスに関するデジタルツインの国際標準化が進められている。

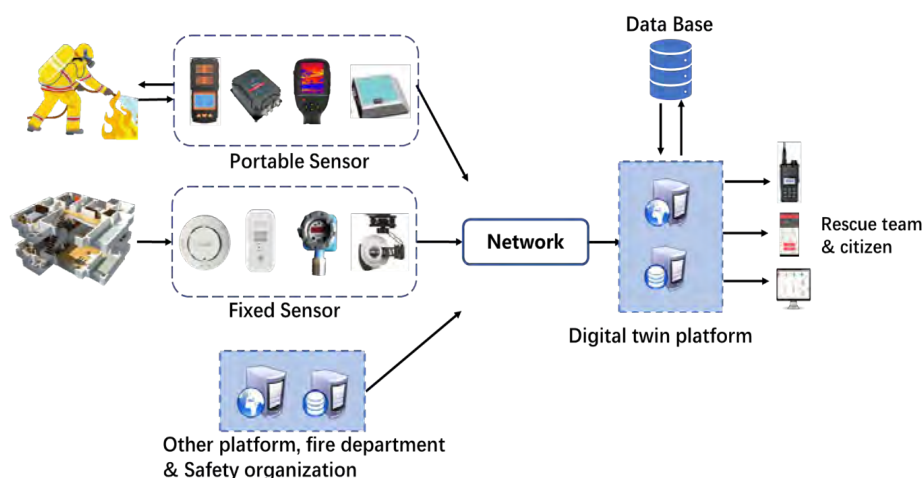


図 9.5-2 消防領域でのデジタルツイン実現のためのシステム構成（出典：ITU-T Y.4601）

表 9.5-1 都市サービスごとのデジタルツイン国際標準化

勧告番号	作業状況	タイトル	概要
Y.4601	完了	Requirements and capability framework of a digital twin for smart firefighting	消防業務でのデジタルツイン活用における要件、機能を定義
Y.4225	完了	Requirements and capability framework of intelligent transport system	ITS（高度交通システム）でのデジタルツイン活用における要件、機能を定義
Y.dt-IWCS	作業中	Requirements and capability framework of digital twin for intelligent water conservancy system	水利（ダムの管理）でのデジタルツイン活用における要件、機能を定義
Y.dt-SComCam	作業中	Common requirements and capability framework of digital twin for smart complex and campus	複合施設（商業施設、会議場等）や大学キャンパスの管理でのデジタルツイン活用における要件、機能を定義
Y.dt-PAF	作業中	Requirements and capabilities of a digital twin for pedestrian accessibility facilities for persons with disabilities	障がい者向け歩行支援施設でのデジタルツイン活用における要件、機能を定義
Y.DTS-arch	作業中	Architecture of the digital twin system in power grid	パワーグリッドでのデジタルツイン活用のためのアーキテクチャの定義

9.5.1.3. デジタルツイン間の連携

様々な都市サービスにてデジタルツインの導入が進んだ後の構想についても ITU-T SG20 での国際標準化では議論されている。デジタル空間上に構築された複数の都市サービス（例えば消防と交通等）がデジタル空間上で連携して、あたかも新しいデジタルツインシステムとして振る舞うことが広まっていくことが予想され、それを実現するために必要となる機能 (ITU-T Y.4224)、参照アーキテクチャ (ITU-T Y.4489)、情報交換モデル (ITU-T Y.4605) が国際標準として定義された。図 9.5-3 が示すように、ITU-T ではこのようなデジタルツインシステムのデジタル空間上での連携を「デジタルツインフェデレーション」と呼び、連携したデジタルツインにより初めて実現される新しいサービスの都市への提供が期待されている。デジタルツインフェデレーションを実現するシステムでは、図 9.5-4 に示すように個々のデジタルツインシステムが「Registry」に登録され、登録されたデジタルツインシステム同士が「Communication Adaptor」による仲介により連携を可能にする。これにより、一つのデジタルツインシステム (Digital Twin A) と別のデジタルツインシステム (Digital Twin C) の管理下にあるそれぞれのデータを活用した新しいデジタルツインシステム (Federated Digital Twin A) が実現される。

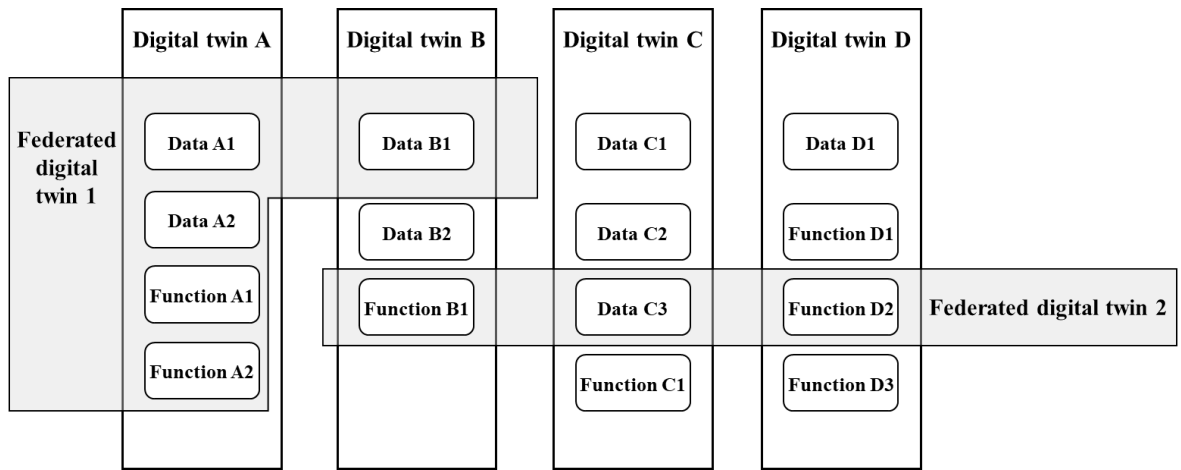


図 9.5-3 デジタルツインフェデレーションの概念図⁹¹

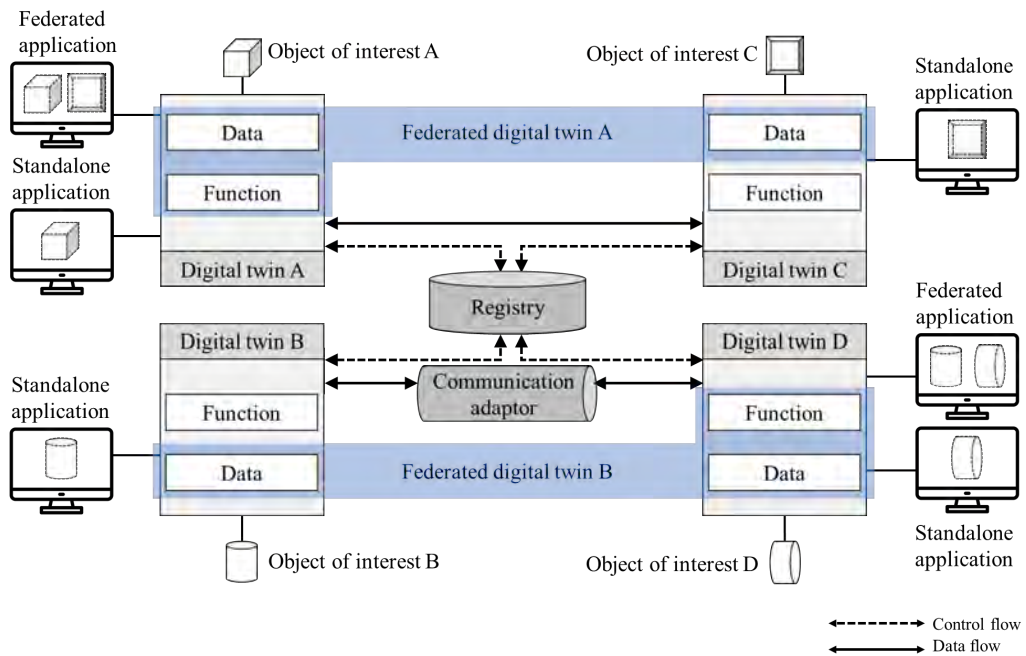


図 9.5-4 デジタルツインフェデレーションのシステム構成⁹²

⁹¹ 出典：ITU-T Y.4224

⁹² 出典：ITU-T Y.4489

9.6. 国際標準化から見えるスマートシティ領域でのデジタルツインの進化

ここまでで紹介した国際標準化動向から見てくるスマートシティにおけるデジタルツイン活用の進化として以下のものが考えられる。

9.6.1. デジタル空間先行型のスマートシティサービスの開発

前述の通り、様々な都市サービスでデジタルツイン導入が進むと、それらのデジタル空間上で連携(フェデレーション)が促進されることが予想される。実世界側ではこれまで検討されにくかった都市サービス間での連携がデジタル空間上で進む可能性が考えられる。デジタル空間上での連携促進により、実世界側での検討では考えられなかったより高度な都市サービスが提供できるようになることも期待される。

また、様々な連携検討がデジタル空間上で行われると、実世界をデジタル空間に表現するという従来型の(実世界先行型の)デジタルツインから、デジタル空間上での検討を先に行いその結果としての新しい都市サービスが実世界に還元される「デジタル空間先行型のデジタルツイン」が広まることが予想される。実世界への還元がない「デジタル空間上で完結する都市サービス」もスマートシティ向けメタバース (Citiverse) として、欧州では議論が開始されている⁹³。メタバースについても国際標準化議論が開始されている。ITU-Tは2022年12月に Focus Group on metaverse を設置し、本格的な標準化作業の前段階の議論を開始し、2024年6月にその活動を完了させた。この活動の成果の多くは、マルチメディア技術の標準化を担当する ITU-T SG21(2024年10月に開催された ITU-T 総会(WTSA-24)において SG9 と SG16 との統合が合意されたことにより発足した新しい SG)に移管されたが、都市に関連するものはスマートシティの標準化を担当する ITU-T SG20に移管された。ITU-T SG20に移管された案件として、メタバースにおけるデジタルツイン活用のための実世界とデジタル空間の統合に関する要件定義と参照アーキテクチャに関する標準化作業がある。

9.6.2. デジタル空間のデータ更新の高度化

スマートシティにおいてデジタルツインを導入するにあたり、「いかにツイン(双子)の状況を維持するか」が課題となる。一度デジタルツインシステムを構築した後に、メンテナンスされないと実世界とデジタル空間との間に乖離が生じる。システム構築時にはツインであった関係が、時間の経過とともに崩れてしまうことになる。前述の通り国際標準化の議論では、住民にインセンティブを与えて情報アップデートの協力を得る形でのデジタルツインの維持について議論が開始されている。今後、他のアプローチによるデジタルツインの維持も含めて、デジタルツインにおけるツイン関係の維持に関する国際標準化推進とその実現が期待される。これにより、スマートシティにおけるデジタルツイン活用が促進されると考える。

⁹³ 参考：<https://standict.eu/landscape-analysis-report/standardisation-landscape-citiverse>