

## 3-2 オーケストレータによるデジタルツイン連携の設計と実装

### 3-2 Design and Implementation of Orchestrator for Digital Twins

是津 耕司

ZETTSU Koji

Beyond 5G / 6G では、フィジカル空間とサイバー空間の様々な機能をドメインを超えて連携させた新たなサービスの創成が期待されている。デジタルツインは、フィジカル空間をサイバー空間上にデジタル化し分析・シミュレーションすることで、状況把握や意思決定を支援したり、フィジカル空間を最適化する。今日、多くの都市でデジタルツインの導入が進められており、環境や交通、エネルギーなど個々の分野に特化したデジタルツインを目的に応じて連携させ、分野横断的な機能やサービスを柔軟に実現できるようにすることで、個々のデジタルツインだけでは提供できないサービスを実現できるようになる。本稿では、スマートで持続可能な都市の実現に貢献するサービスの実現を目指し、Beyond5G / 6G アーキテクチャに基づくデジタルツイン連携について、我々の取組を紹介する。

In the Beyond 5G / 6G, new services are expected to be created by linking various functions of physical and cyber space across domains. A digital twin digitizes, analyzes, and simulates physical space in cyberspace to support situational awareness and decision-making, and to optimize physical space. Today, digital twins are being introduced in many cities, and by linking digital twins specialized in individual fields, such as environment, transportation, and energy, according to the purpose, and by enabling flexible realization of cross-domain functions and services. This will enable the realization of services that cannot be provided by individual digital twins alone. In this paper, we introduce our efforts on digital twin orchestration based on the Beyond5G / 6G architecture, aiming to realize services that contribute to the realization of smart and sustainable cities.

#### 1 まえがき

デジタルツインはフィジカル空間の実体(デバイス、オブジェクト、人間など)の仮想的な“双子”(モデル)をサイバー空間に作成し、モデリングやシミュレーション解析によって、その状態や振る舞いをシミュレーションし、反映させることを目的としている。デジタルツインは、物理的実体と周囲のデジタルツインからのリアルタイムな更新により、物理世界で何が起きているかを常に把握することができる。また、様々な IoT データの統合やビッグデータ解析、AIなどを駆使し、隠れたパターンや未知の相関関係などを発見することで、実体の状態や変化の記録、制御、監視や、シミュレーションによる解決策の検証、自己最適化が可能となる。

従来のデジタルツインでは、フィジカル空間をサイバー空間上にデジタル化し分析・シミュレーションすることで、状況把握や意思決定を支援することに重点

が置かれてきた。しかし、多様化・複雑化するスマートシティのような対象では、サイバー空間で分析・シミュレーションした結果をフィジカル空間へフィードバックし積極的に状況を最適化する“デジタルファースト”[1]のパラダイムが求められている。デジタルファーストのサービスを実現するには、環境や交通、エネルギーなど個々の分野に特化したデジタルツインを目的に応じて連携させ、分野横断的な機能やサービスを柔軟に実現できるようにすることが鍵となる。本稿では、総務省の Beyond 5G 推進戦略に基づき情報通信研究機構(NICT)が設計する Beyond 5G / 6G アーキテクチャ [2] に沿って、我々が進めているデジタルツイン連携の実現に向けた取組について説明する。

#### 2 デジタルツイン連携の課題

デジタルツインでは、(1)フィジカル空間の実体とサイバー空間のモデルの間及び(2)デジタルツインと周

圏の異なるデジタルツインとの間でコミュニケーションが行われる。デジタルツインの応用範囲が広がるにつれ、(1)のコミュニケーションから、複雑な相互作用を持つ(2)のコミュニケーションに発展し、さらに単一のドメインから複数のドメインをまたがるコミュニケーションへと拡大する。ドメインを超えたコミュニケーションの例として、都市デジタルツインがあげられる。今日、多くの都市でデジタルツインの導入が進められており、IoT センサを使って都市データを収集、監視し、シミュレーションによる意思決定や最適化を支援することで、都市計画、環境管理、交通制御、エネルギー管理など様々な課題の解決を促進する。

デジタルツイン間のコミュニケーションについては、これまで Internet of Federated Digital Twins [3] や、複雑ダイナミックシステムで構成される分散型デジタルツイン [4]、ブロックチェーンを用いたセキュアなデジタルツイン [5]、デジタルツイン間の通信機構 [6] などについて研究されてきた。一方、我々は、様々な領域のデジタルツイン間の情報共有や相互作用を促進するために、各デジタルツインが持つドメイン固有の目的や要件に特化したデータや機能を連携させ、個々のデジタルツインだけでは提供できないサービスを実現することを目指す。そのためには、以下のような課題を検討する必要がある。

- ①複数のデジタルツイン間で情報が誤って共有されると、正確な分析やシミュレーションができず、フィジカル空間に誤ったフィードバックをしてしまう危険性があるため、高い信頼性と耐障害性を兼ね備えた情報交換の仕組みが必要となる。ここでは、デジタルツインを識別・認証し、データの送受信を中継するとともに、データのフィルタリングやリアルタイム配信、送達保証などを行うことが求められる。
- ②フィジカル空間の実体とサイバー空間のモデルの間の相互作用を実現するには、双方の間にデータフローを確立し同期を保証する必要がある。従来のデジタルツインでは、実体を一意に識別しモデルとの間で一对一の同期を行う方法がとられてきたが、デジタルツイン連携では、異なるデジタルツインのモデル・実体の間における多対多の同期に拡張する必要がある。また、その際に、異なるデジタルツインのモデルから同一の実体に矛盾する情報が送られないようにする対策も必要となる。
- ③個々のデジタルツインが保持するプライベートデータやプライバシー情報の保護も重要な課題である。フィジカル空間の実体が生成する秘匿データを個々のデジタルツインで保持したまま、共通のサイバー空間モデルを更新するデジタルツイン

の連合体(フェデレーション)を構成できるようにすることで、異なるドメインにまたがる複雑な分析やシミュレーションを、安全かつスケーラブルに行うことが可能となる。

- ④異なるドメインのデジタルツイン間でコミュニケーションを行うには、データの形式から単位、言語、意味まで幅広い変換を行う必要がある。ルールやオントロジー、AI など様々なアプローチに基づく異なるレベルの変換を、デジタルツイン連携の目的に応じて提供する必要がある。

また、機能面だけでなく、デジタルツイン連携に伴う倫理的 (ethical) な課題についても検討が必要である。情報管理の Gemini 原則 [7] (National Digital Twin, UK) では、目的 (公共財、価値創造、インサイト)、信頼 (セキュリティ、開放性、品質)、機能 (フェデレーション、キュレーション、進化) の観点から情報管理に関する課題が挙げられており、上記の課題を解決する機能を設計・実装する際の指針となる。

## デジタルツイン連携の機能 アーキテクチャ

Beyond 5G / 6G では、フィジカル空間からサイバー空間に至るまで広範囲に渡る機能を適材適所で組み合わせる新たなサービスの創成を推進すべく、多様な機能群の受け皿となるオープンなプラットフォームを構築し、社会インフラとして持続的に成長できる仕組みを実現することを目指している。このビジョンに基づき、NICT では、Beyond 5G / 6G の機能アーキテクチャを設計し、ホワイトペーパーを公開している。中でも、オーケストレータは、Beyond 5G / 6G 機能アーキテクチャの重要なコンポーネントで、サービスからの要求を満たす適切な機能の組み合わせを発見し連携させる役割を担っている。オーケストレータにより、ドメインを超えたデジタルツインの連携が促進され、新しい付加価値サービスが実現される。例えば、図1は、オーケストレータにより、都市デジタルツインがモビリティデジタルツイン、環境デジタルツインや、エネルギーデジタルツインと連携することで、電力供給の最適化や、安全・快適な移動支援などを実現するイメージを示している。

我々は、このオーケストレータに基づくデジタルツイン連携の機能アーキテクチャを図2のように設計している。フェデレーション機能 (Federation、図2 (b)) は、前節の課題③に対応し、個々のデジタルツイン内で生成されたプライベートデータを保持しつつ、共通のモデルを更新するデジタルツインの連合体を構成するためのもので、共通モデルの配信・集約を行う

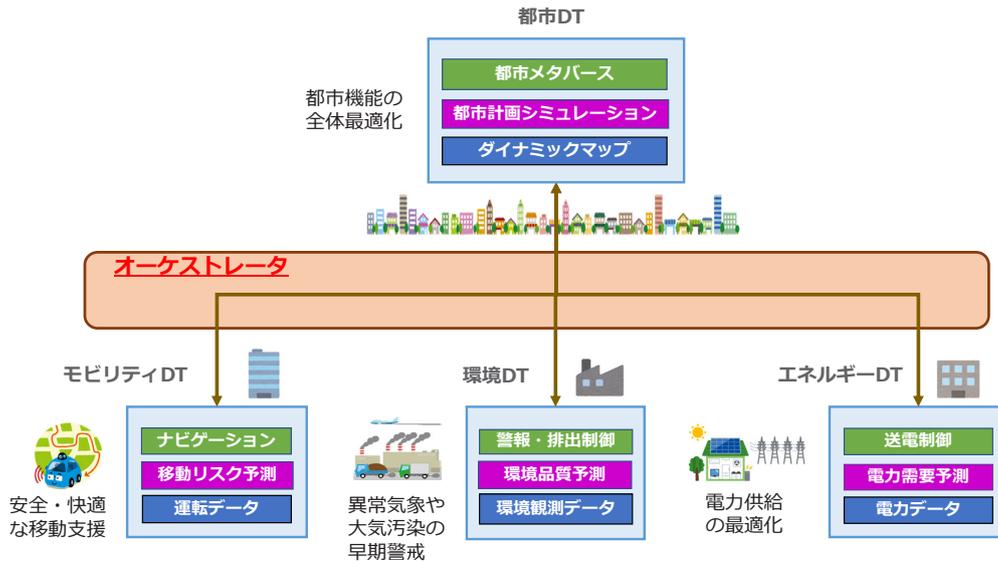
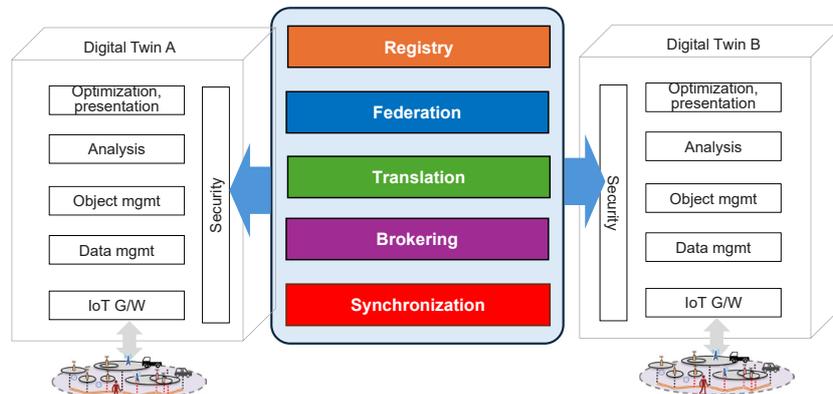
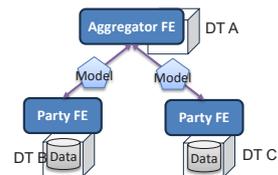


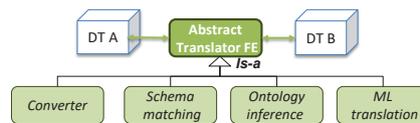
図1 オーケストレータによるデジタルツイン連携のイメージ (NICT ホワイトペーパー [2]より)



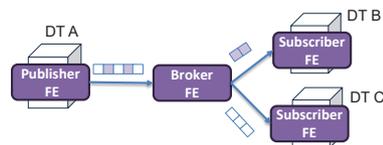
(a) Digital Twin Orchestrator Functions



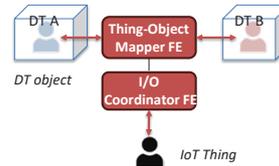
(b) Federation function



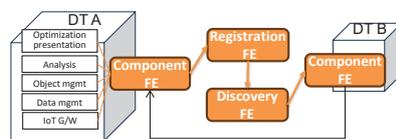
(c) Translation function



(d) Brokering function



(e) Synchronization function



(f) Registry function

(DT=Digital Twin)

図2 デジタルツイン連携のためのオーケストレータの機能アーキテクチャ

### 3 Beyond 5G に向けた概念実証 (Proof of Concept)

Aggregator、個々のデータを使ってモデルを更新する Party、連合体を構成するための Configuration の各機能要素 (functional entity, FE) から構成される。トランスレーション機能 (Translation、図 2(c)) は、課題④に対応し、異なるドメインのデジタルツイン間の通信の形式的・意味的変換を実現するためのもので、インタフェースを定義した抽象的な変換器 (Abstract Translator FE) を基に、ルールやオントロジー、AI などによる変換器を具象化することで、それらを組み合わせた多様な変換を実現できるようにしている。ブローカリング機能 (Brokering、図 2(d)) は、課題①に対応し、送信側 (Publisher FE) と受信側 (Subscriber FE) のデジタルツイン間の情報交換を仲介する Broker により、デジタルツインの識別と認証、データ送受信の中継、データフィルタリング、リアルタイム配信、配信保証を行う。シンクロナイゼーション機能 (Synchronization、図 2(e)) は、課題②に対応し、異なるデジタルツインの間で、フィジカル空間の実体とサイバー空間のモデルの対応付け (Thing-Object Mapper FE) と、それらの間での多対多の情報交換の同期や調停 (I/O Coordinator FE) を行う。さらに、レジストリ機能 (Registry、図 2(f)) は、これらの機能により連携させるデジタルツインのコンポーネント (Component FE) を、それらの属性情報に基づいて登録し (Registration FE) 発見できるようにする (Discovery FE)。

#### 4 デジタルツイン連携のユースケース

今日、環境とモビリティは多くのスマートシティにとって大きな課題である。ここでは、都市の環境を監視するスマート環境デジタルツインと、自動車の運転を支援するスマート運転デジタルツインを連携させ、環境に配慮したスマートで持続可能なモビリティ (Smart sustainable mobility, Green mobility) を実現するユースケースについて述べる。

スマート運転デジタルツインは、車載センサにより個々の自動車の走行環境を監視し、環境の変化に応じて運転操作や走行経路を誘導する。エコ運転支援は、自治体職員が使用するデジタルツイン連携アプリケーションであり、環境が悪化する地域でドライバーや自動運転車に対し環境に配慮した運転操作を推薦することで、都市全体の環境品質を向上させることを目的としている。スマート環境デジタルツインがシミュレーションした排出ガス規制計画に基づいて、スマート運転デジタルツインがナビゲーションシステムに排出ガス規制のための運転操作を指示する。さらに、自動車に取り付けられた環境センサを使って取得した環境

データを用いて、スマート環境デジタルツインの大気汚染予測を補強し、より効果的なエコ運転支援を実現する。

フェデレーション機能では、スマート環境デジタルツインの大気汚染予測モデルをスマート運転デジタルツインと共有し、個々の自動車が収集した環境データを用いた連合学習を行う。その際、トランスレーション機能を使って、車載環境センサのデータを、スマート環境デジタルツインの大気汚染予測モデルに入力可能な形式に変換する。また、ブローカリング機能を用いて、スマート環境デジタルツインが発行する排出ガス規制計画を、自治体が保有するエコ運転支援アプリケーションが購読し、規制エリア内を走行する車に対する規制命令を決定した上で、対象となる車のスマート運転デジタルツインに送信 (ルーティング) する (図 3)。

#### 5 デジタルツインオーケストレータ・フレームワークの実装

3 のデジタルツイン連携の機能アーキテクチャの機能要素をデジタルツインオーケストレータ・フレームワークとして定義し、各種デジタルツインプラットフォーム向けに実装する取組が進められている。このフレームワークが共通のインタフェースとして機能し、異なるデジタルツインプラットフォーム上に構築されたデジタルツインの間で連携が可能となる。

NICT では、データ連携分析基盤 xData プラットフォーム [8] と総合テストベッドにおいて、デジタルツインオーケストレータ・フレームワークの実装が進められている。その際、図 4 に示すように、デジタルツインプラットフォームの機能を活用しながら、デジタルツインオーケストレータの各機能をフレームワークに実装する。フェデレーション機能は、プラットフォームのデータ管理機能、機械学習機能、シミュレーション機能に対し、それぞれのモデルとその操作を分散環境で連合させる機能 (連合データベース [9]、連合学習 [10]、連合シミュレーション [11]) をフレームワーク側に実装する。トランスレーション機能は、Abstract Translator FE から必要に応じて派生させた各種の変換器 (形式変換用の Converter、ルール変換用の Rule Engine、OWL [9] によるオントロジー変換、機械翻訳や生成 AI による AI 変換など) をフレームワークに実装する。また、各変換器は、Abstract Translator FE を経由して、入出力データを管理するプラットフォーム側のオブジェクト管理 (Object status management [12]) やデータ管理 (DWH [14][15]、CEP [16]) にアクセスする。ブローカリング機能は、

エコ運転支援

1. フェデレーション機能に基づき、スマート環境デジタルツインの大気汚染予測モデルをスマート運転デジタルツインに配布しローカルに更新するとともに、更新モデルを集約し元のモデルを改善する。
2. スマート運転デジタルツインで大気汚染予測モデルを更新する際、**トランスレーション機能**を用いて、ローカルに収集したセンサデータを予測モデルに入力できる形に変換する。
3. アプリケーションは、**ブローキング機能**を用いて、スマート環境デジタルツインが作成する排出ガス規制計画を購読するとともに、排出ガス規制計画を受信すると対象地域を走行する車の排出ガス規制を決定し、それを購読しているスマート運転デジタルツインに発行する。
4. スマート運転デジタルツインは排出規制を受信し、車両のエコ運転機能を発動させる。

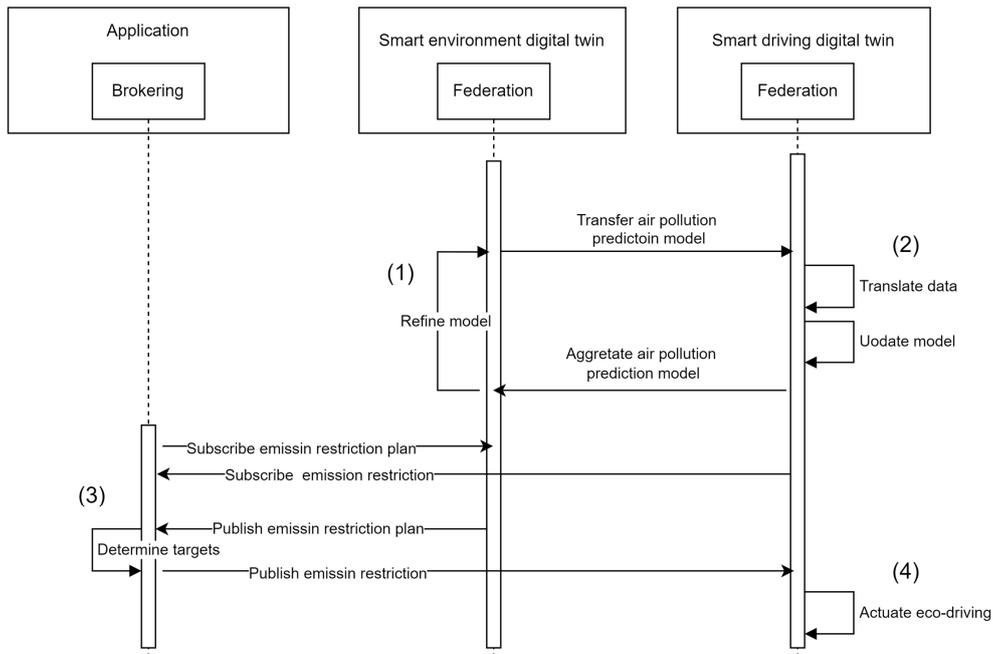


図3 デジタルツイン連携のユースケース例 (Smart Sustainable Mobility : エコ運転支援)

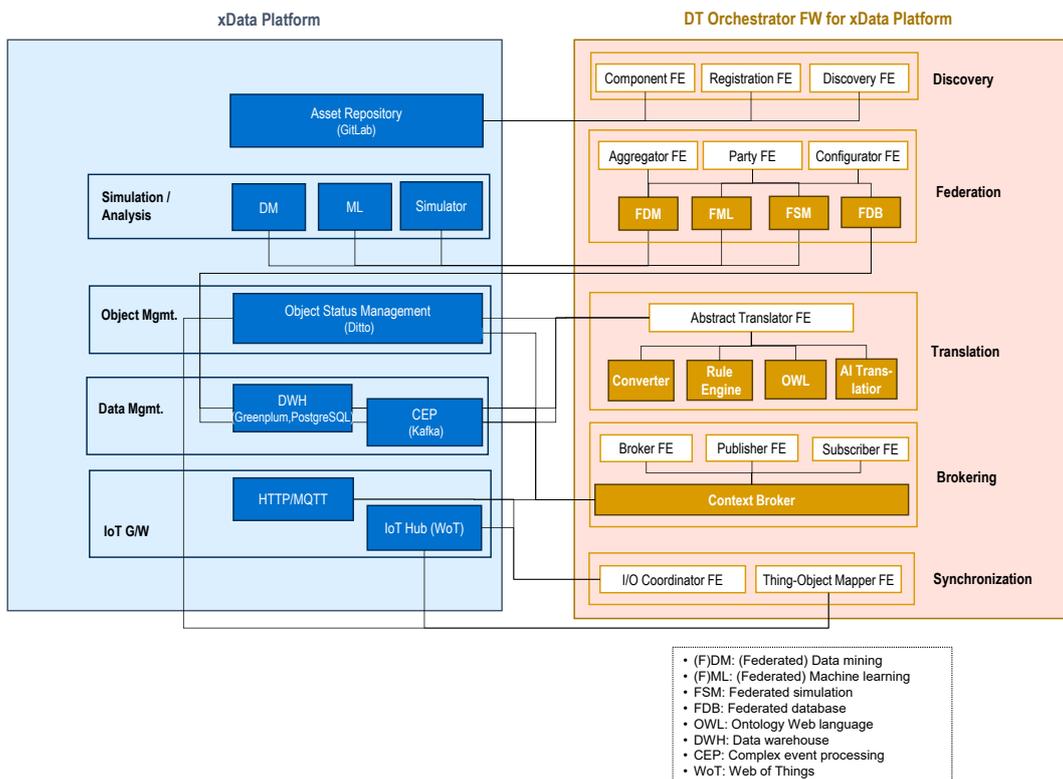


図4 デジタルツインオーケストレータ・フレームワークの実装例

### 3 Beyond 5G に向けた概念実証 (Proof of Concept)

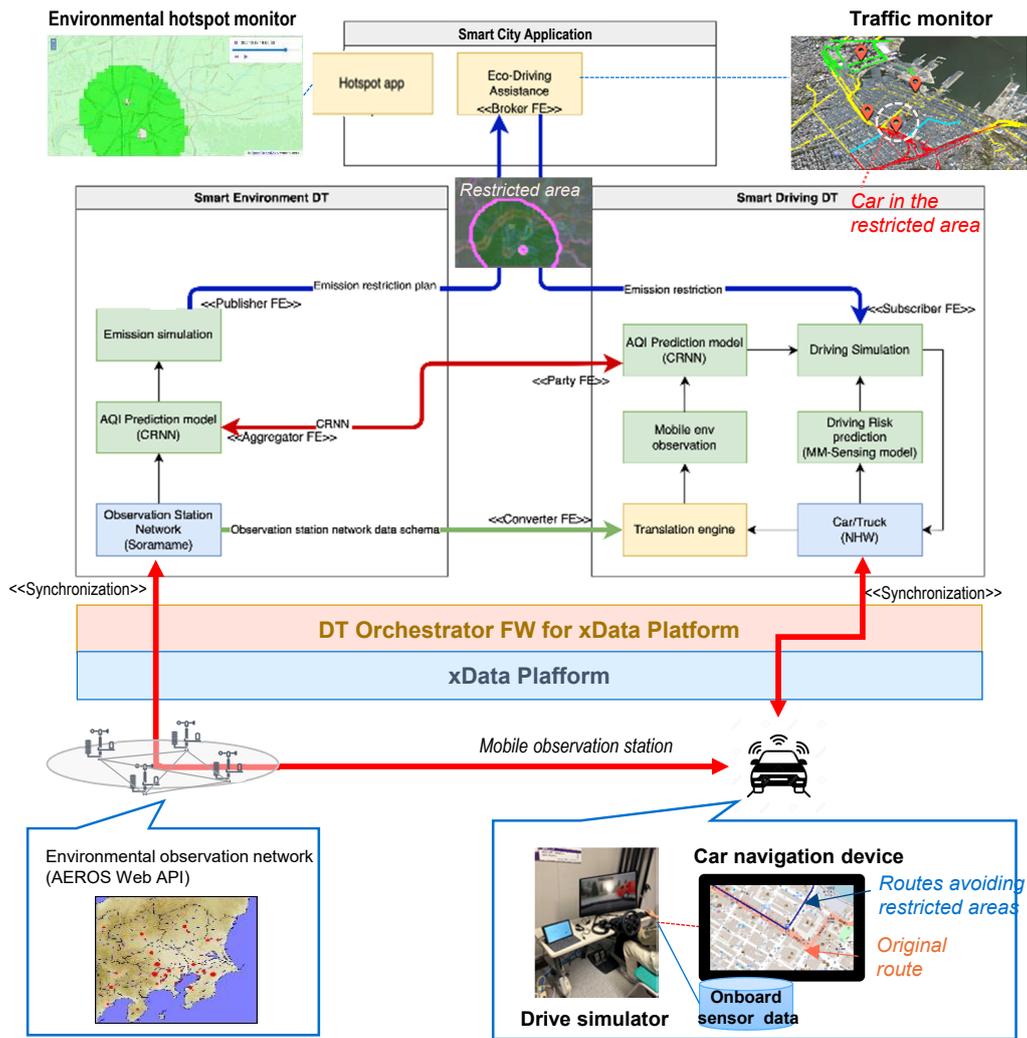


図5 Smart Sustainable Mobility (エコ運転支援) ユースケースの実装例

Publisher FE, Subscriber FE 及びそれらの間の情報交換を仲介する Broker FE を、Context Broker [17] に基づいてフレームワーク側の実装する。また、Context Broker からプラットフォーム側のデータ管理、オブジェクト管理及びデータ交換プロトコル (MQTT [18] や HTTP など) にアクセスし、実際の情報交換を実行する。シンクロナイゼーション機能は、プラットフォームの IoT ゲートウェイによる IoT 機器管理機能 (Web of Things, WoT [19]) とオブジェクト管理機能に基づきフレームワークの Thing-Object Mapper FE を実装するとともに、IoT ゲートウェイによる IoT 機器とのデータ入出力に介入し調停する I/O Coordinator FE を実装する。レジストリ機能は、フレームワークの Component FE, Registration FE 及び Discovery FE の各機能要素を、プラットフォーム側の情報資産リポジトリ (GitLab [20]) におけるデジタルツイン情報資産 (各種コンポーネントを構成するファイルやプログラム等) の管理、登録、検索の各機能を用いて実装する。

このデジタルツインオーケストレータ・フレームワークの上に、さらに、4 で述べた smart sustainable mobility のユースケースの実装を行っている [21]。図5で、2つのデジタルツインとアプリケーションにまたがって接続されている線が、デジタルツインオーケストレータの各機能による連携を示している ("《...》" が機能を示す)。例えば、大気汚染予測モデル (AQI prediction model) が Federation 機能を使ってスマート環境デジタルツイン (Aggregator FE) とスマート運転デジタルツイン (Party FE) の間で連合学習されている様子や、アプリケーション (Eco-driving application) とスマート環境デジタルツインの排出シミュレーション (Emission simulation) 及びスマート運転デジタルツインの運転シミュレーション (Driving simulation) の間で、Brokering 機能を使って排出ガス規制の情報が交換され、アプリケーションの Broker FE により配送制御が行われている様子が分かる。こうしたユースケース実証を通じ、オーケストレータの機能検証とアーキテクチャへのフィードバックを行っている。

## 6 セキュリティの課題

デジタルツイン連携における、各デジタルツインの機能やデータの機密性や整合性、可用性、プライバシー保護を保証するために、セキュリティ機能についても考慮する必要がある、以下に主なものを挙げる。

- アカウント管理：全ての関係者が自分のアカウントを持っていることを検証する。
- 認証管理：関係者が認証され、自らの資格で行動することを検証する(例:X509証明書)。
- 認可とセキュリティポリシーの管理：関係者が認可されたコンポーネントに対してのみ操作できることを検証する。
- 整合性管理：整合性テストと様々な仕様要件により、誤操作や悪意によるデータやモデルの整合性の毀損を防止する。
- プライバシー漏えい保護：機密情報の漏えいや不正アクセスから保護し、完全な許可を得た場合のみ情報にアクセスできるようにする。
- ネットワークとトランスポートの管理：全ての通信において物理的にセキュアなネットワークまたはVPNを使用し、トランスポートの暗号化(例:TLS/SSL)、帯域幅制限(bandwidth throttling)などを行う。

## 7 今後の展望

デジタルツイン連携の実現には、国際的な標準化が重要である。ITU-T(国際電気通信連合電気通信標準化部門)で、IoTとスマートシティ(IoT, SC&C)を専門とするSG20(Study Group 20)では、デジタルツイン連携(digital twin federation)の要件(Y.dtf-reqts)や参照アーキテクチャ(Y.dtf-rarch)、情報交換モデル(Y.dtf-infoex)などについて検討が進められている。また、ITUのTSAG(電気通信標準化諮問委員会)の下で2022年12月に設立されたFocused Group on Metaverse(FGMV)[22]では、仮想世界と物理世界の統合を可能にするデジタルツインに基づくメタバースの参照モデル(WG4:Virtual/Real World Integration)や、プラットフォーム間連携のための高レベル相互運用性アーキテクチャ(WG5:Interoperability)など、デジタルツイン連携と関連するトピックの検討が進められている。我々はFGMVに参画し、デジタルツイン連携アーキテクチャの提案を行っている。また、IOWN Global Forum[23]にも参画し、Data Space for Digital Twin Applications Architecture and Workflowにデジタルツインオーケストレータの機能を組込むための検討を行っている。さらに、外部の組織とも連携し、

cyber physical security や cross-domain digital twin analysis などの新たなユースケースの開拓も進めている。今後、こうした活動をさらに広げ、デジタルツイン連携による新たなサービス創造を推進していく。

### 【参考文献】

- 1 山田徹 “スマートシティの国際標準化から見るデジタルツインとその進化,” A1-07, Interop Tokyo 2023, 2023.
- 2 NICT, Beyond 5G / 6G ホワイトペーパー, 日本語 3.0 版, 2023.
- 3 T. Yu, Z. Li, K. Sakaguchi, O. Hashash, W. Saad, and M. Debbah, “Internet of Federated Digital Twins (IoFDT): Connecting Twins Beyond Borders for Society 5.0,” 2023.
- 4 O. San, S. Pawar, and A. Rasheed, “Decentralized digital twins of complex dynamical systems,” Scientific Reports 13, 20087, 2013.
- 5 R. Sahal, S. H. Alsamhi, K. N. Brown, D. O’Shea, C. McCarthy, and M. Guizani, “Blockchain-Empowered Digital Twins Collaboration: Smart Transportation Use Case,” Machines 9,193, 2021.
- 6 J. Conde, A. Munoz-Arcenales, A. Alonso, S. Lopez-Pernas, and J. Salvachua, “Modeling Digital Twin Data and Architecture: A Building Guide With FIWARE as Enabling Technology,” IEEE Internet Computing 26, pp.7–14, 2022.
- 7 The Gemini Principles, “Guiding values for the national digital twin and information management framework,” Centre for Digital Built Britain and Digital Framework Task Group, DOI: 10.17863/CAM.32260, 2018.
- 8 NICT xData プラットフォーム, <https://www.xdata.nict.jp/> (Accessed: Jan, 2024).
- 9 Azevedo, L.; Soares, E.; Souza, R. and Moreno, M. “Modern Federated Database Systems: An Overview,” Proceedings of the 22nd International Conference on Enterprise Information Systems, vol.1, pp.276–283, 2020.
- 10 IEEE “Guide for Architectural Framework and Application of Federated Machine Learning,” IEEE Std 3652.1-2020, pp.1–69, 19 March 2021,
- 11 Huiskamp, W., van den Berg, T., “Federated Simulations,” In: Setola, R., Rosato, V., Kyriakides, E., Rome, E. (eds) “Managing the Complexity of Critical Infrastructures. Studies in Systems,” Decision and Control, vol.90, Springer, Cham, 2016.
- 12 Eclipse Ditto, <https://eclipse.dev/ditto/> (Accessed: May, 2024).
- 13 Web Ontology Language (OWL), <https://www.w3.org/OWL/> (Accessed: May, 2024).
- 14 Greenplum Database, <https://greenplum.org/> (Accessed: May, 2024).
- 15 PostgreSQL, <https://www.postgresql.org/> (Accessed: May, 2024).
- 16 Apache Kafka, <https://kafka.apache.org/> (Accessed: May, 2024).
- 17 FIEARE Orion Context Broker, <https://fiware-orion.readthedocs.io/en/master/index.html> (Accessed: May, 2024).
- 18 MQTT, <https://mqtt.org/> (Accessed: May, 2024).
- 19 W3C Web of Things, <https://www.w3.org/WoT/> (Accessed: May, 2024).
- 20 GitLab, <https://about.gitlab.com/> (Accessed: May, 2024).
- 21 Do-Van Nguyen, Minh-Son Dao, and Koji Zettsu, “Digital Twin Orchestration: Framework and Smart City Applications,” AI4DTCP 2024, 2024.
- 22 ITU Focus Group on metaverse (FG-MV), <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/mv/Pages/default.aspx> (Accessed: May, 2024).
- 23 IOWN Global Forum, <https://iowngf.org/> (Accessed: May, 2024).



是津 耕司 (ぜっつ こうじ)

ユニバーサルコミュニケーション研究所  
統合ビッグデータ研究センター  
研究センター長

博士(情報学)  
データベース、AI

#### 【受賞歴】

- 2015年 日本データベース学会若手功績賞
- 2012年 IMMM2012 最優秀論文賞
- 2010年 NICT 成績優秀表彰(優秀賞・個人)