

AI・XAI・高速計算による実世界 デジタルツインの構築と応用

東京工科大学 デジタルツインセンター

生野 壮一郎 Soichiro Ikuno

1. はじめに

近年、実世界の現象を高精度かつリアルタイムに模擬・予測する手法として、デジタルツイン（Digital Twin）の活用が多様な分野で急速に広がりを見せている。都市計画、製造業、建築環境、エネルギーシステム、医療分野など、物理世界に対応する仮想モデルを構築することで、設計・運用・評価の各フェーズにおいて飛躍的な効率化と最適化が実現可能となってきた。

従来のデジタルツインは、主に物理法則に基づいた数理モデルと実測データの融合によって構築されてきたが、近年の人工知能（AI）の進展は、データ駆動型による予測・制御能力を付加し、より高度な知的システムへと進化させている。特に、物理モデルの構造を保持しながらニューラルネットワークを導入する物理インフォームド AI（Physics-Informed Neural Networks: PINNs）や、ブラックボックス AI の出力に説明性を与える説明可能な AI（Explainable AI: XAI）の応用は、複雑かつ安全性が求められるシステムにおいて不可欠となりつつある。

さらに、こうした AI 統合型デジタルツインの高度化に伴い、学習・推論・可視化を支える高速計算（High Performance Computing: HPC）基盤の整備も重要性を増している。GPU（Graphics Processing Unit）ベースのスーパーコンピュータや分散並列処理の導入

により、従来では現実的でなかった規模・粒度^{※1}でのモデル構築やリアルタイム推論が現実のものとなっている。

本稿では、AI、XAI、高速計算という三つの技術的基盤を軸として、実世界を対象としたデジタルツインの構築と応用事例について解説する。特に、都市風動解析や屋内空調制御といった環境系シミュレーションの実践例を交えつつ、セーフティエンジニアリングにおける応用可能性や、説明可能なモデルによる信頼性向上について論じるとともに、教育や研究基盤としての将来展望にも触れる。

2. AI を取り入れたデジタルツインの設計思想

デジタルツインは、現実世界の対象（設備、建物、都市、人体など）を仮想空間上に再構築し、その挙動をモデリング、可視化、予測、最適化するための技術基盤である。従来のデジタルツインは、主に物理法則に基づくシミュレーションとセンシングデータを組み合わせることで構築されてきたが、近年では AI の導入によってその機能と柔軟性が大きく拡張されつつある。

AI を取り入れたデジタルツインの構成は、大きく以下の3層で構成される。

- ①物理層（対象のセンサ情報や物理的な制御対象）
- ②仮想層（数理モデルおよび AI モデルに

※1
粒度
モデルがどれだけ詳細に
現象や情報を表現するか
を示す尺度

よる解析・予測)

③知能層（意思決定や説明・対話を行う知能的要素）

この三層を連携させることで、現実の変化に即応するインテリジェントなシステムが実現可能となる。

物理現象予測の AI の中でも特に注目されているのが、物理インフォームドニューラルネットワーク（Physics-Informed Neural Networks: PINNs）である。PINNs は、偏微分方程式などの物理法則を損失関数に組み込むことで、観測データに依存しすぎることなく、物理整合性を保ったニューラルネットワーク学習を実現する手法である。これにより、境界条件や一部のパラメータが不明な状況でも、高精度な予測や補完が可能となる。

また、複雑なシステムにおいては、AI によるサロゲートモデル（代理モデル）の構築も有効である。サロゲートモデルは、数値流体力学（Computational Fluid Dynamics: CFD）や有限要素法などの高精度だが計算コストの高い解析の出力を学習し、簡易かつ高速に結果を予測する。特にリアルタイム性が求められる分野（建築環境の制御、都市の風環境予測など）においては、AI サロゲートの導入が有効である。

さらに、複数のモデルを階層的に組み合わせることで、マクロな挙動（都市全体の気流、熱環境）とミクロな挙動（建物内部の換気や人流）の両方を統合的に扱うことも可能となる。このようなマルチスケールモデリングは、都市空間や複雑施設における設計・運用の最適化に資するものである。

AI を取り入れたデジタルツインは、単なるシミュレーションを超えて知的判断を伴うサイバーフィジカルシステムへと進化しつつある。そのためには、物理整合性、リアルタイム性、説明可能性を兼ね備えた設計思想が不可欠であり、次章ではこのうち説明可能性

に焦点をあてて議論を進める。

3. XAI の導入と意義

デジタルツインに AI を導入する際、しばしば課題となるのが説明可能性（Explainability）の欠如である。特にディープラーニングに代表されるブラックボックス型 AI は、高精度な推論能力を持ち合わせる一方で、「なぜそのような推論が得られたのか」、「その判断はどの特徴に基づくのか」、といった説明を与えることが困難である。これは、安全性や信頼性が強く要求される分野（都市設計、医療、インフラ運用など）において大きな障壁となり得る。

このような技術的課題に加え、AI の社会実装に対する倫理的・制度的要請も年々高まっている。2019年に G20の枠組みにおいて合意された人間中心の AI（Human-Centered AI）原則では、以下のような基本理念が提示されている。

- ・ 包摂的成長、持続可能な開発、人間の幸福（Inclusive growth, sustainable development and well-being）
- ・ 人間中心の価値と公平性（Human-centered values and fairness）
- ・ 透明性と説明可能性（Transparency and explainability）
- ・ 頑健性、安全性、セキュリティ（Robustness, security and safety）
- ・ 説明責任（Accountability）

これらの理念は、同年 OECD においても国際原則として承認され、加盟各国の AI 政策に反映されつつある。とりわけ、透明性と説明可能性は、AI システムが信頼され、受容されるための根幹要素として位置付けられており、デジタルツインにおいても無視できない基盤要件である。

このような背景から、近年では説明可能な XAI の導入が急速に進んでいる。XAI とは、

AI モデルの出力や判断根拠を人間に理解可能な形で提示する技術群の総称であり、代表的な手法として、LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations)¹⁾、SHAP (SHapley Additive exPlanations)²⁾、および AIME (Approximate Inverse Model Explanation)³⁾ などが挙げられる。

筆者らは、物理情報を含んだ AI モデルに対して AIME を適用する研究を進めている。AIME は、ある出力結果に至る入力空間上の説明的領域を数学的に導出する手法であり、物理量の分布や影響範囲を可視化する際に有効である。こうした説明可能性の付加は、以下のような効果をもたらす。

- ・モデルの出力に対するユーザーの理解と信頼性の向上
- ・異常時の判断根拠提示（例：なぜ換気不足が検出されたか）
- ・トレーサビリティの向上による監査・認証対応の容易化

さらに、XAI は AI 開発者にとっても有用である。モデル構築時に入力変数の影響度を可視化することで、重要な変数の過小評価や過学習を未然に防ぐ助けとなる。こうした XAI 技術の統合は、デジタルツインを人間中心の、信頼される意思決定支援システムへと昇華させる上で、不可欠な要素といえる。

4. セイフティエンジニアリングにおけるデジタルツインの役割

セイフティエンジニアリングは、人命、資産、環境を守るための工学的アプローチを体系化した分野であり、設計段階から運用・保守・緊急対応に至るまでのすべてのフェーズで、安全性の担保が求められる。近年、複雑なシステムにおける安全性の確保には、物理モデリングや定量評価だけでなく、AI によ

る予測や説明、そしてシナリオ解析の能力が不可欠となっている。このような要請に応える形で、デジタルツイン技術はセイフティエンジニアリングにおいても有力なツールとなりつつある。

AI を組み込んだデジタルツインは、以下の観点から安全性評価に寄与する。

・リスクの事前評価とシナリオ展開

物理モデルと AI 予測を融合することで、異常状態や障害シナリオを仮想的に再現し、その影響範囲や重大度を定量評価することが可能となる。たとえば、室内空間における換気性能の不足が、温度ムラやエアロゾル滞留を引き起こし、感染症拡大リスクにつながるような事象を、CFD と AI の連携により可視化・評価できる。

・説明可能な異常診断とトレーサビリティ

AIME のような XAI 技術を併用することで、なぜそのリスクが高いと判断されたのか、どの入力変数が大きく影響していたのかを明示することができる。これにより、事故発生時の事後分析が容易となり、再発防止策の策定に大きく寄与する。

・リアルタイム監視と動的制御

高性能なデジタルツイン基盤を構築すれば、センサーデータのリアルタイム取得と連動した予兆検知や即時制御も実現可能である。たとえば、気象変動や突風の予兆に応じて都市構造物の換気装置を調整する、といった実装も視野に入る。

・安全証明・認証に向けた基盤技術

XAI を備えたデジタルツインは、安全性の定量的説明を可能とするため、第三者認証やレギュレーション対応においても強力な支援手段となる。とりわけ公共性の高いインフラや建築物においては、こうしたトレーサブルな根拠が求められる場面が多い。

以上のように、セイフティエンジニアリングの観点から見たデジタルツインは、単なる

模倣ではなく、未来予測、説明、対話、証明を内包する安全知能体として機能することが期待される。次章では、こうした概念を都市・建築モデルを活用した実践例に落とし込み、実際の空間環境での応用について述べる。

5. 都市・建築モデルを活用したCFD シミュレーションの応用

都市空間や建築環境における風通し、温熱環境、換気性能などの評価は、人々の安全性・快適性・エネルギー効率に直結する重要な課題である。これらの現象は、流体力学、熱伝導、乱流などの複雑な物理法則に支配されており、精緻な予測・評価には高精度な数値解析が不可欠である。本章では、これらの課題に対して CFD 解析を中核とするデジタルツインの構築・応用について紹介する。

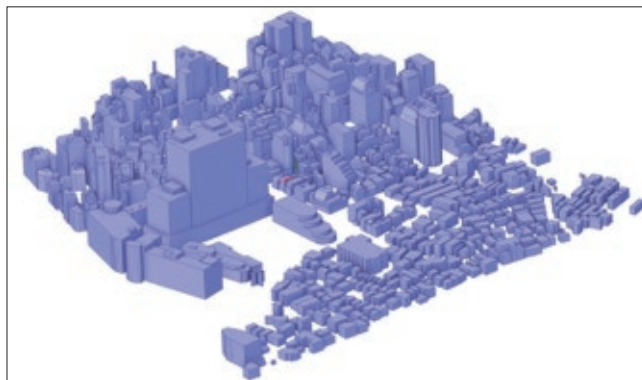
(1) 都市スケールの風環境シミュレーション

都市空間における風の流れは、地形、建築物の配置、道路の形状など複数の要因によって複雑に変化する。これらの要因が局所的な風の滞留や加速を引き起こし、快適性や安全性（歩行者風害、熱中症リスク）に大きな影響を及ぼすため、都市スケールでの詳細な風環境の把握は極めて重要である。

筆者らの研究では、国土交通省の Plateau プロジェクト⁴⁾が提供する3D 都市モデルデータを活用し、東京工科大学 蒲田キャンパス周辺の都市環境を精密に再現したデジタルツインを構築した（図1）。この3次元モデルには、建物形状だけでなく道路や公開空地も含まれており、実都市に即した風環境の解析が可能である。

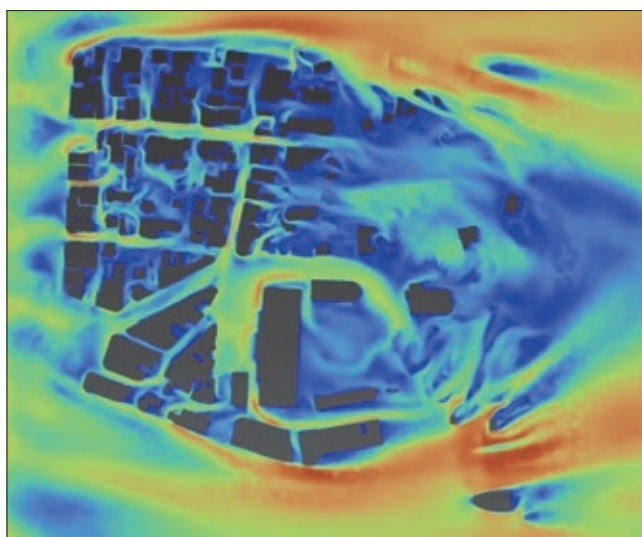
CFD 解析には Ansys Fluent を使用し、約1000万自由度を有する大規模な流体計算を

図1 東京工科大学 蒲田キャンパス周辺デジタルツインモデル



Plateau プロジェクトが提供する3D 都市モデルデータより再現

図2 CFD 解析による風環境の可視化

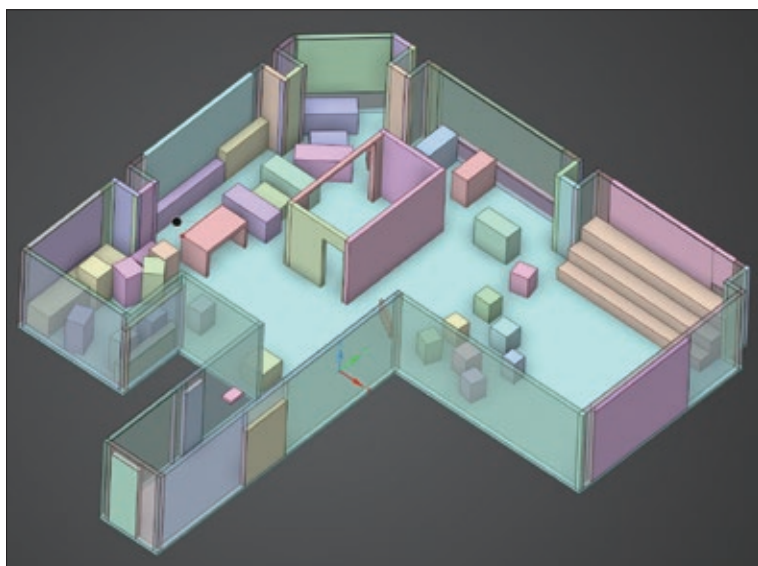


実施した。本 CFD 解析では流入風速などの条件を境界条件として設定し、非定常乱流モデルに基づくシミュレーションを行った（図2）。これにより、以下のような詳細な風環境が可視化された。

- ・建物周囲に発生するビル風（風の加速帯）の形成領域
- ・局所的な風の渦流や剥離現象の発生位置
- ・建物配置による風の通り道（風の抜け）の明確化
- ・歩行者空間における風圧変動の集中域

本シミュレーションでは、精緻なメッシュ生成と非定常解析のために約40時間の計算時間を要した。この結果は、GPU を活用した高速計算基盤の有無が、都市スケールでの実用的なデジタルツイン構築において極めて

図3 大学校内教室のデジタルツインモデル



重要であることを示している。

(2) 屋内空間における空調・換気の再現

建築物内部の空調および換気設計は、室内の温熱快適性だけでなく、エネルギー効率や感染症対策といった点においても重要な設計課題である。特に、パンデミック以降、空気の流れやCO₂・エアロゾルの拡散経路に関する評価の必要性が高まり、高精度かつ可視的な空調解析が求められている。

大学内の講義室および研究室空間を対象と

し、BIM (Building Information Modeling) やCAD データをもとに室内の詳細な3D モデルを作成した(図3)。このモデルには、壁・柱・机・キャビネット・仕切りといった固定物はもちろん、ドアや空調吹き出し口、吸込み口といった設備要素も含まれており、実環境を忠実に模擬することが可能である。

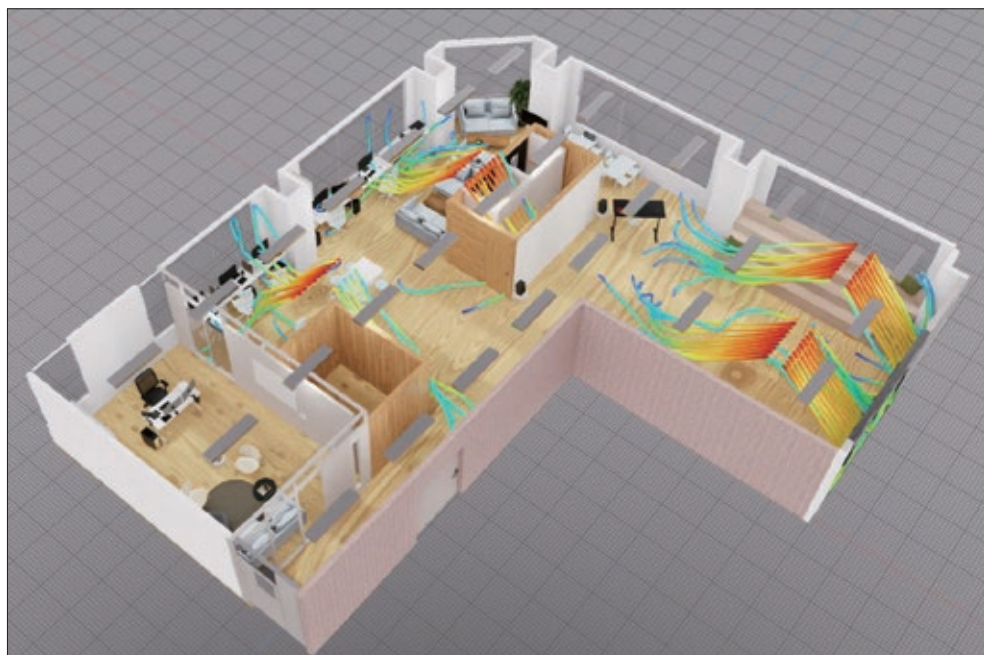
このモデルを用いてCFD 解析を実施し、空調吹き出し口からの気流、熱分布、室内各所での空気齢※2・換気効率をシミュレーションした。図4に示すように、室内を流れる気流は設備配置の影響を受けて複雑な流れを示し、一部のコーナーや机の裏側などでは渦の滞留や通風不良が確認された。

このような解析結果からは、次のような知見が得られる。

- ・換気効率の悪いゾーンの設定(CO₂・エアロゾルの滞留リスク)
- ・天井設置型空調の気流分布と遮蔽物の相互作用の影響
- ・空調設定の違いによる温熱環境の空間的偏差の可視化
- ・作業環境や居住領域への冷氣・暖気の到達性の評価

※2
空気齢
新鮮な空気が室内の特定の場所へ到達するまでの時間

図4 CFD 解析結果



これらの結果は、建物設計時の空調配置の改善や、運用段階における換気方式の最適化に活用できる。さらに、本解析で得られた流体データをもとにAI サロゲートモデルを学習させることで、リアルタイム推論による空調制御の知的自動化も将来的には実現可能である。

屋内環境における風の見える化は、住環境の質的向上だけでなく、災害時・感染症流行時のリスクマネジメントにも直結するものであり、AI・

CFD・BIMの統合による室内デジタルツインの重要性は今後ますます高まっていくと考えられる。

6. 今後の展望と教育・研究基盤としての活用

AI・XAI・高速計算を統合したデジタルツインは、今後、設計・運用・教育・政策立案といった多様な分野で中核的な役割を果たす技術としての発展が期待されている。これまで紹介してきたように、都市風環境や屋内空調といった空間スケールをまたぐ流体现象の解析において、デジタルツインは設計支援ツールとして機能するだけでなく、説明性や安全性といった社会的要求に応えるプラットフォームへと進化しつつある。

特に重要なのは、AIによる予測精度だけでなく、その判断過程を人間にとって理解可能な形で提示する説明可能性(XAI)の導入である。2019年にG20およびOECDで合意された人間中心のAI原則では、AIの透明性・説明可能性・公平性・安全性といった倫理的・制度的要件が明示されており、これらを満たす技術基盤としてXAIは不可欠である。都市設計や公共空間の計画といった分野では、AIの提案内容がどのような因子に基づいてなされているかを社会的に説明可能にする必要があり、XAIの活用は単なる技術的選択肢にとどまらず、社会実装における信頼確保の手段と位置づけられる。

また、本学ではAI技術の教育・普及に向けた取り組みとして、初学者向けに構成したAI基礎教育コンテンツの制作、高校生・大学生・社会人を対象とした分野横断型AI教育、ならびにAI倫理を含む人材育成カリキュラムの展開を進めている。とくに、デジタルツインやXAIといった複合領域は、従来の情報科学・工学教育に加えて、設計・環境・

倫理といった多分野の知識統合を必要とするため、プロジェクト型学習(Project-Based Learning: PBL)や実システムを用いた実践教育との親和性が高い。実際に、GPUスーパーコンピュータ環境を用いたCFD・AIモデル構築の教育プログラムを導入し、学生が都市や建築空間の風環境を可視化・最適化する取り組みを実践している。

今後の研究課題としては、異なる物理現象を同時に扱うマルチフィジックスデジタルツインの開発や、リアルタイム制御を伴うサイバーフィジカルシステムとの連携、さらには自治体・産業界・市民を含めた社会参加型デジタルツイン基盤の構築が挙げられる。これらを実現するためには、計算資源・アルゴリズム・制度設計の三位一体による発展が求められる。

デジタルツインは単なる“模倣”ではなく、“理解・予測・判断・説明”までを包含する新たな知的基盤である。本学では今後も、こうした多様なニーズに応えるデジタルツイン研究と教育に取り組み、持続可能かつ安全・安心な社会の実現に貢献していきたいと考えている。

参考文献

- 1) Ribeiro, M. T., Singh, S., & Guestrin, C.: Why should I trust you? Explaining the predictions of any classifier. Proc. 22nd ACM SIGKDD, 1135-1144, 2016.
- 2) Lundberg, S. M., & Lee, S. I.: A unified approach to interpreting model predictions. Advances in Neural Information Processing Systems, 30, 4765-4774, 2017.
- 3) Nakanishi, T.: Approximate inverse model explanations (AIME): Unveiling local and global insights in machine learning models. IEEE Access, 11, 1-15, 2023.
- 4) 国土交通省: Project PLATEAU ― 都市の3Dオープンデータ整備・活用・オープンプラットフォーム構築プロジェクト, 2020. <https://www.mlit.go.jp/plateau/> (参照日: 2025年8月18日).

いんぎの●そういふらう

東京工科大学コンピュータサイエンス学部教授、AIテクノロジーセンター長。筑波大学大学院博士後期課程電子情報工学専攻を修了し、博士(工学)を取得。専門は数値計算手法の開発、電磁界解析、流体解析、高性能計算(HPC)、人工知能応用および説明可能なAI(XAI)。近年は、デジタルツインにAIやPINNsを統合した都市・建築環境の解析に取り組み、AIスーパーコンピュータを活用した教育・研究基盤の構築と次世代人材育成を推進している。