

DXにより創る次世代建設生産システムとスマートな世界

真下 英邦

建設就業者の高齢化・若手技術者の担い手不足や、生産性向上の必要性などの建設業の課題に対して、デジタル技術を活用した「次世代建設生産システム」の構築を目指し、技術開発を進めている。「デジタルツイン」による「着工前仮想竣工・仮想運用」、「データドリブン」な意思決定、「機械化・自動化・最適化」および「デジタルツール」の活用など、複数のアプローチから開発を進めており、将来的には1つの基板上で稼働する統合的なシステムとすることを目指す。本稿では、「次世代建設生産システム」の実現に向けた取組みを中心に、スマートシティ事業の事例も含めたデジタルトランスフォーメーション(DX)への取組みについて報告する。

キーワード：デジタルツイン、機械化・自動化、光ファイバ、BIM/CIM、ロボット、見える化、スマートシティ

1. はじめに

建設業は多くの課題に直面している。特に、就業者の高齢化と若手入職者の減少、及び2024年から適用される労働時間の上限規制により、将来の深刻な技術者不足が予測されている。また、建設業の労働生産性は長期に渡り大きな向上が見られない。これは建設業が現地・一品生産の労働集約型産業であり、製造業における工場のライン生産と異なり、自動化・規格化などが適用し難いことに起因すると考えられる。

しかし、見方を変えれば、データやデジタル技術を活用した生産性・品質の向上や就労環境の改善の余地が大きいと言える。そして、昨今のIoT・AI・高速通信・XRなどのデジタル技術の進展は、これまで難しかった建設業の仕事にも変化の兆しをもたらしている。このような環境を踏まえて、当社では2つの側面からDX—デジタルトランスフォーメーションの取組みを進めている。

- ① デジタルを活用した建設事業の変革
- ② スマート社会の実現など、より主体的に価値を創出する事業への挑戦

①は、生産性の向上や苦渋作業の軽減を通じて、建設業を持続的で魅力ある産業に発展させていくことに主眼を置いている。その一方で②は、社会や顧客のニーズに対して弊社が対応できる範囲を拡大し、より一層満足いただくことを考えている。社会インフラやビル・生産施設などの建設で培ってきたノウハウと経験を強

みに、他産業・他業界とのコラボレーションを含めて新たな価値を創出して新たな価値提供に挑戦するのであり、顧客と共に課題を発見して解決策を協創する建設業への発展を目指すものである。

本稿では、各々の取組みについて、概要を報告する。

2. DXが目指す次世代建設生産システム

建設業は、現実空間に構造物を建設することが主目的であるため、デジタル技術は現実空間での建設や、その上下流工程の作業を効率化・合理化するために活用される。DXの推進により目指す「次世代建設生産システム」の概念図を図1に示す。

サイバー空間における取組としては、「デジタルツイン」と呼ばれる、現実の構造物を模した仮想モデルをデジタル空間に構築し、着工前に施工プロセスや建物の運用などをシミュレーションする「着工前仮想竣工・仮想運用」の推進、「データドリブン」な意思決定を行うための基盤構築、データを取得するセンサー技術の開発などに取り組んでいる。

フィジカル空間では、「機械化・自動化・最適化」による施工生産性の向上、苦渋作業・危険作業の軽減への取組みや、WebカメラやVR・AR、ドローンや3Dスキャナなどを活用した管理の生産性向上にも取り組んでいる。

現状は、個々の要素技術として開発されているものを、1つの基盤上で稼働する統合的なシステム「次世



図一 1 DXが目指す「次世代建設生産システム」

代建設生産システム」に昇華させることを目指して開発に取り組んでいる。

3. 土木分野における取組み

(1) 「建設現場の工場化」に向けて

建設業を持続的で魅力ある産業とするために、3Kを解消し、スマートな働き方が可能な建設現場を創ることが肝要である。そのためには、機械化・自動化などの推進による抜本的な施工生産性の向上、現場の「見える化」による管理の生産性向上、人の経験知に依存している技術をデジタルの力で体系化し、伝承していくことなどが必要と考える。

この難題を解決していくために、データに基づく知識・情報集約型産業への変革が最適解と考え、“建設現場の工場化”をスローガンに生産工学的アプローチを進めている。建設現場の様々なデータを収集して「見える化」「デジタル化」を進めることでデータドリブンによる意思決定をスピーディに行える仕組みを作るとともに、蓄積したデータをインプットとして、施工の最適化を実現することを目指す。

(2) 「A⁴CSEL[®] (クワッド・アクセル)」

「A⁴CSEL^{※1}」は、シミュレーション技術・自動運転を核とし、従来の建設機械の遠隔操作とは異なる新しい建設生産システムである。AIによって、多数の機械を連携させ、最も生産性の高い施工計画を導き出し、その計画を自動運転で確実に再現する施工マネジメント技術から構成されている。

これらの技術により、安定した品質で、高い安全を確保した上で、最速で、低コストで、しかも建機は稼働を必要最小限に抑えられるためエネルギー消費量も

最小化できる土木施工システムを実現する。人は作業データを送り、監視するだけという、建設現場の最先端工場への変革の実現を目指す。

A⁴CSELは、重機作業が主となるロックフィルダム、重力式ダムなどへの適用を先行しており(A⁴CSEL for Dam)、現在は山岳トンネルへの展開を推進している(A⁴CSEL for Tunnel)。将来的には、造成工事、シールドトンネル、躯体工事(A⁴CSEL for RC)など、幅広い工種へと展開することを目指す。

(a) A⁴CSEL for Dam

現在施工中の秋田県雄勝郡東成瀬村の成瀬ダム(国土交通省東北地方整備局)では、最盛期には5機種23台もの自動化建機の組み合わせにより、昼夜を通じ最大連続72時間稼働で堤体打設を行う計画である(写真一1)。同工事では、現場を一望できる管制室を設け、ITパイロットがここから現場を管理する体制を取っている(写真二)。

また、同現場では「置き型枠自動スライドシステム」を開発・実用化している。重機作業の自動化により高速化する打設作業に合せ、保護コンクリートの型枠設置作業を合理化し、施工速度向上や安全面の改善を実現した(写真三)。

今後は、重機の自動化技術の高度化を核に、品質検



写真一 1 A⁴CSELによる堤体自動打設
(成瀬ダム工事/東北地方整備局)

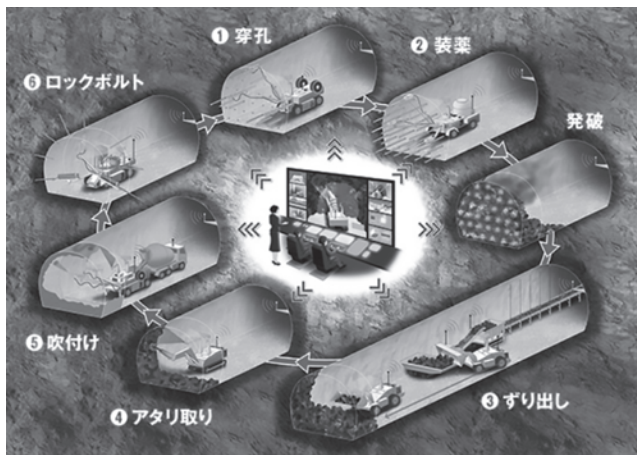


写真二 2 A⁴CSEL 管制室

※1 A⁴CSEL (Automated/Autonomous/Advanced/Accelerated Construction system for Safety, Efficiency, and Liability)



写真一3 置き型枠自動スライドシステム



図一2 山岳トンネル工事の将来像

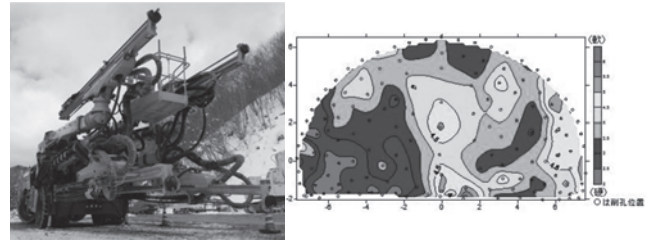
査の高度化，施工進捗の可視化，重機作業周辺の付帯工事の自動化・効率化などの開発により，工事全体を最適化する建設生産システムの構築を推進する。

(b) A⁴CSEL for Tunnel

山岳トンネル分野では，熟練作業員の減少への対応や，切羽付近における危険作業による労働災害の撲滅を目的に，施工の自動化を推進し，最適な自動化施工のための管制技術を開発している。

山岳トンネルの施工サイクルのうち，①穿孔，②装薬，③ずり出し，④アタリとり，⑤吹付け，⑥ロックボルトの6ステップについて，自動化を推進するとともに，作業ごとにデータを取得・蓄積し，継続的に生産性が向上する仕組みの構築を目指す（図一2）。

これまでにロックボルト工における穿孔からモルタル注入，ロックボルト挿入までの各作業の自動化や，4ブームフルオートコンピュータジャンボによる発破孔の穿孔作業の自動化（図一3左），コンクリート吹付けの自動化（写真一4）などを進めてきた。これらの技術は，施工の生産性向上だけでなく，穿孔データを収集・蓄積し，CIMモデルに反映することにより，前方地山の予測評価や将来工事に向けたデータ基盤の



図一3 (左) 4ブームフルオートジャンボ (右) 切羽前方地山の硬硬度分布の可視化事例



写真一4 模擬トンネルでの自動吹付け実験

整備に活用することができる（図一3右）。今後，装薬作業を含めた一連の作業を一人のオペレーターでコントロールできるような自動化技術の開発を進める。

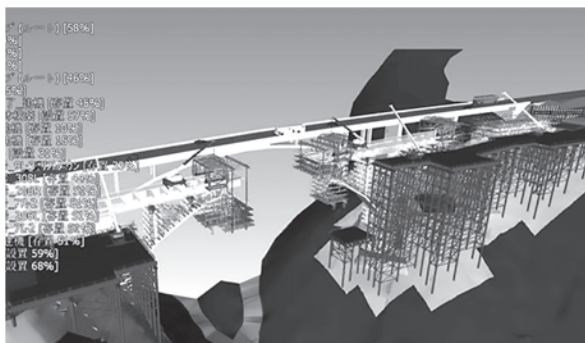
(3) デジタルツインによる施工管理の生産性向上に向けた取組み

施工管理の生産性向上に向けては，①計画段階でBIM/CIMを活用して施工過程を「見える化」し，予見できる設計・施工の不整合をゼロにした上で顧客との早期合意形成を得ること，②施工段階ではIoTを活用して現場状況を「見える化」し，予定との乖離や現場での問題・課題をリアルタイムに把握して迅速に対応すること，以上2点をデジタルツインの主軸として取り組んでいる。これらにより，施工のPDCAを高速で回し，計画外の事象が発生した際にも速やかに最適化された修正計画を作成し，円滑に施工を進められる体制を構築している。

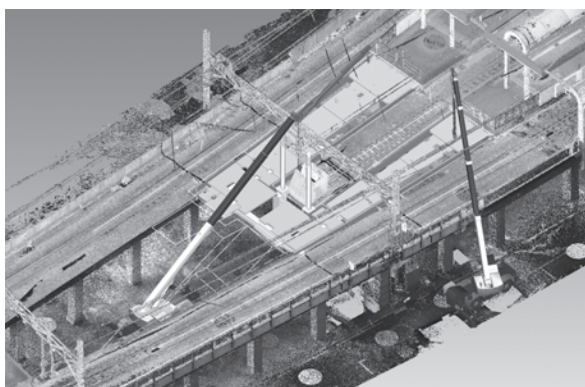
これらの取組みに際して，AR/MR技術による現地での管理・検査・立会の効率化や，センサーや3Dスキャナ・カメラ等による現場データの取得を推進することで，より高度に，高速にPDCAを回す体制の構築を目指す。

(a) 計画段階の「見える化」

施工上の課題を早期に抽出し，これを事前に解決しておくために，CIMと施工工程を連動させてあらゆる



図一4 CIM を活用した着工前仮想竣工
(松山自動車道 双海橋工事 / NEXCO 西日本)



図一5 点群データとCIMモデルの統合
(桜木町駅改良工事 / JR 東日本横浜支社)

る施工ステップのシミュレーションをデジタル空間上で完了させる施工過程の「見える化」に取り組んでいる。施工計画を事前に「見える化」することにより、円滑な意思決定を助けるとともに、施工段階での不測のトラブルを軽減することに資するものである(図一4)。

3D スキャナにより取得した点群データにより現況を CIM モデルに反映させる取り組みや、AR/MR 技術により、CIM モデルを現地にオーバーラップする技術の活用にも取り組んでいる(図一5)。

(b) 施工段階の「見える化」

施工段階においては、気象条件、地盤条件などの外部条件により計画の修正を余儀なくされることは少なくなく、施工段階での諸々のデータをリアルタイムに「見える化」し、計画外の事象が発生した際には速やかに対応することが重要である。

そこで、人やモノ、建設機械の位置や稼働状況、気象や交通情報などの情報を組み合わせて表示する統合管理システム「Field Browser」(フィールドブラウザ)を開発し、現場に適用している(図一6)。

現場事務所に設置した大型モニターには、人と建設機械・車両等の位置情報が、所属や職種・機械種別ごとに表示され、現地に行かずとも計画どおりの場所、人員、機械配置で作業が行われているか把握すること



図一6 Field Browser 画面イメージ



写真一5 配筋検査システム

ができる。さらに定点カメラ映像を組み合わせることにより正確な状況把握を可能としている。

人についてはリアルタイムなバイタル情報が表示され、体調不良者がいないか容易に確認できる。建設機械や車両については、現在の稼働状態の把握はもちろん、蓄積された過去の稼働時間から稼働率を集計することが可能であり、最適な配置や手配の検討に大いに寄与している。

さらには、降雨や落雷を含むリアルタイムの気象データに加え、72時間先までの予報データを取り入れ、適時適切な作業計画の見直し指示を可能としている。

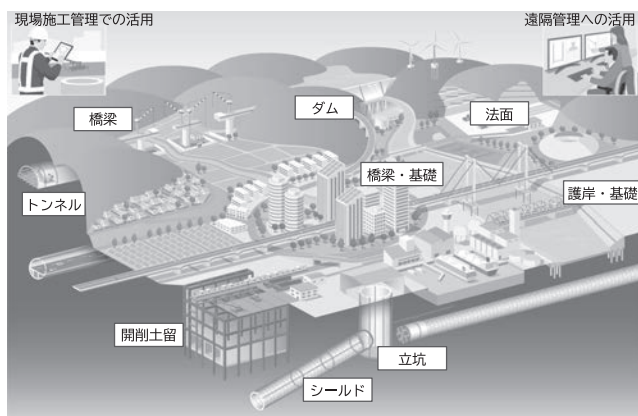
(c) デジタルツールの活用

施工管理を行う職員の生産性向上を目的に、スマートフォンやタブレットなどのデバイスを活用したペーパーレス化や見える化、現場の書類・帳票作成、検査などを合理化するツールの開発・適用を推進している。

一例として、ステレオカメラを用いて立体的に写真を撮影することで、鉄筋の径、間隔、本数を自動で計測できる配筋検査システムを開発し、現場に適用している(写真一5)。

(4) 光ファイバ計測技術による構造物性状の「見える化」

インフラ構造物において、予防保全型維持管理の重要性が高まる中、構造物の性状を広範囲で、施工段階から長期間にわたる維持管理にかけて一貫して把握し続けることは、合理的な維持管理を実施する上で有効である。一方で、広範囲、高精度に、長期間にわたり計測を合理的なコストで行う技術が確立されていな



図一七 光ファイバを用いた品質管理イメージ

いのが従来の課題であった。

そこで、光ファイバ計測機専門メーカーと連携し、高精度・高速度の計測処理が可能な革新的光ファイバ計測技術を開発し、施工管理に導入している。本技術により、構造物のひずみや温度変化を長期間・広範囲にわたり正確に測定できるため、合理的な施工管理が可能となる。また、光ファイバをそのまま残置しておくことで、構造物性状の経年変化の把握が可能となる。計測・取得したデータから構造物の耐久性・安全性を評価でき、補修やリニューアルを行うべき時期について、的確な推定が可能となる（図一七）。

現在、多くの構造物への適用を進めており、施工段階で確実に品質を確保するだけでなく、維持管理段階での効率化にも寄与することで、国土交通省の提唱する予防保全の取組みに貢献していきたいと考える。

4. 建築分野における取組み

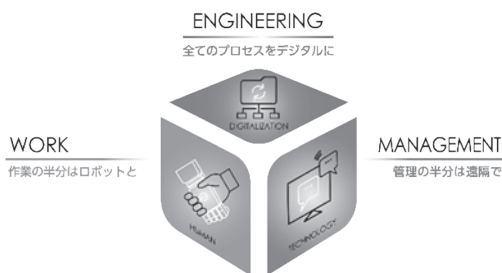
(1) スマート生産

建設業の就業者不足への対応や働き方改革といった業界が抱える課題に対し、ICT やロボットなどのデジタル技術を用いて解決を目指すものとして、「鹿島スマート生産ビジョン」を掲げ、開発を推進している（図一八）。各コンセプトの概要と開発状況について、以下に記す。

(a) 「作業の半分はロボットと」

人と機械の協働による生産性向上を図る。危険・連続・補助作業などをロボットが支援することで、人の生産性を高めていく。

一例として、工場等で利用されている汎用可搬型の溶接ロボットを建設現場向けに改良し、適用を進めている。柱・梁の接合部の溶接に対応しており、特に、上部からの溶接工による下向き溶接が主流となる梁の下フランジ部の溶接は、ロボット溶接により下部から



図一八 鹿島スマート生産ビジョンコンセプト



写真一六 (左) 溶接ロボット作業状況 (右) コンクリート床仕上げロボット

の上向き溶接を実現している。これにより、構造上弱点となるウェブのスカラー削減、下階フロアからの安定した施工による安全性向上などの付加価値も生んでいる。

また、生コン打設時の床仕上げを行うロボットの開発・現場適用を進めている。自律移動機能に加え、リモコン操作によるコテ角度調整機能により、高度な仕上げにも対応可能である。

その他、耐火被覆吹付ロボットや外装取付アシストマシンなど、苦渋作業や危険作業を中心に現場作業省力化に資する技術の開発を進めている（写真一六）。

(b) 「管理の半分は遠隔で」

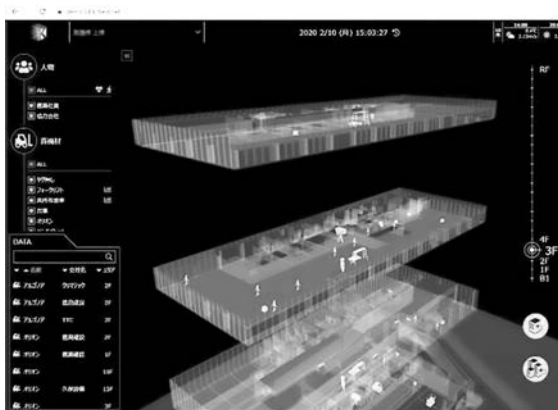
現物確認と遠隔管理の組み合わせで、現場管理者の働き方改革を図る。監視・目視・数量把握などはセンサー技術等を利用し、3 現主義の質を高めていく。

一例として、小型センサーの組み合わせにより、資機材の位置、稼働状況をリアルタイムに3D 図面上に表示する資機材位置モニタリングシステム「3DK-field」を開発、現場適用を進めている。竣工後の運用にも適用を進めている（図一九）。

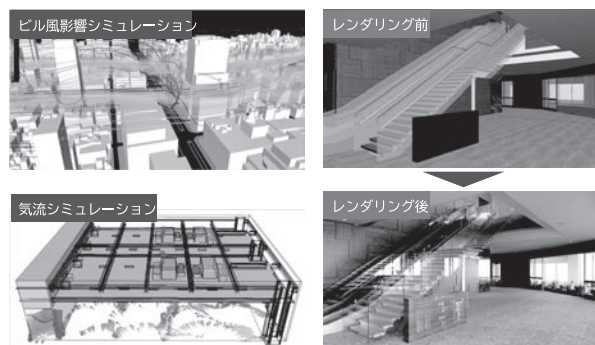
その他、ドローンによる現場自動巡回システムや、クレーンの遠隔操縦技術などの開発、遠隔での現場確認やコミュニケーションを可能とする体制の構築を進めている（写真一七）。

(c) 「全てのプロセスをデジタルに」

BIM を基軸としてプロセスをデジタル化し生産性向上を図る。設計検討・調整・合意・進捗管理・保守運用まで、デジタル情報を蓄積し最適化へ活かす。開発・適用状況については次項にて述べる。



図一〇 資機材位置モニタリングシステム (3DK-Field)



図一〇 (左) 各種シミュレーション活用例
(右) 合意形成におけるVR活用例



写真一七 施工管理情報を一元表示するスマート工事事務所

(2) デジタルツイン

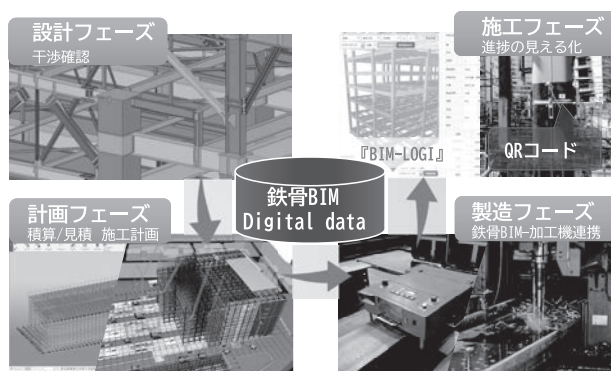
大阪府中央区のオービック御堂筋ビル(2020年1月竣工)では、解体着工の2016年7月より、「全てのプロセスをデジタルに」の基本方針のもと企画・設計から製造・施工、竣工後の維持管理・運営までの全ての情報を、BIMを核としてデジタル化し、それらを仮想空間上にリアルタイムに再現する「デジタルツイン」を実現した。以下、各フェーズにおけるデジタルツインの活用事例について述べる。

(a) 企画・設計フェーズでの活用

企画・設計フェーズでは、建物のBIMモデルを用いて、日射や日影、設備の気流や照度、発災時の避難、建物の使い勝手など、各種シミュレーションに活用している。また、VR技術を用いて、実際にサイバー空間内の建物を歩き回り完成状況を事前に確認することも可能である。これらにより、顧客が設計段階で建設後の建物をイメージしやすくなるため、早期の合意形成に有効である(図一〇)。

(b) 製造・施工フェーズでの活用

製造・施工フェーズでは、提供建物の品質や工程、施工安全性などを向上させるために活用している。一つの事例としては、鉄骨製造のデジタルツイン化が挙げられる。建物の構造体である鉄骨において、設計図



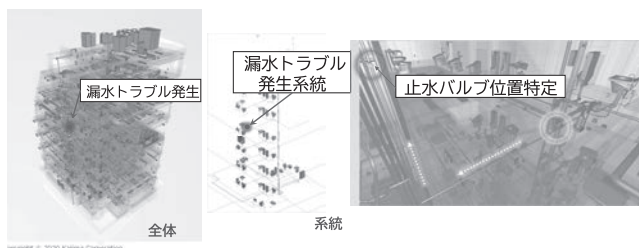
図一〇 鉄骨製造・施工における活用例

をそのまま鉄骨製作図として活用し、鉄骨製作工場の鉄骨加工機との連携、一体化が図られている。これにより、情報伝達の正確性やスピードが大幅に向上した。また、鉄骨部材にQRコードを貼り付け、自社開発のシステムを活用することで、製造から施工に至る進捗の見える化も実現している(図一〇)。

(c) 維持管理・運営フェーズでの活用

維持管理・運営フェーズでは、FM(ファシリティマネジメント)への適用が有効である。建物BIMに情報を集約することで、①メンテナンス情報の一元管理、②モバイル機器による現地作業の効率化、③付加価値機能の向上、などの効果がある。これにより、これまでの維持管理業務を劇的に効率化・高度化・高品質化し、ライフサイクルコストを最適化している。また、リアルとバーチャルが完全に融合・同期している状態を作り出し、リアル建物のトラブルがあった場合に、その発生場所、影響範囲、必要な対処などを、デジタルツイン上に瞬時に表示することができる。これにより問題発生時の迅速な対応や、関係者間での早期の情報共有が可能となった(図一〇)。

以上のように、デジタルツインを基盤として、ビッグデータを蓄積・解析・フィードバックし、フェーズ毎に最適化をはかることで、顧客へ新たな付加価値を提供することを目指す。



図一12 FM (ファシリティマネジメント) の活用例

5. スマートシティに関する取組み

(1) HANEDA INNOVATION CITY

(a) 施設概要

HANEDA INNOVATION CITY (ハネダイノベーションシティ) は、「天空橋駅」に直結する延床面積約13万m²超の大規模複合施設で、羽田みらい開発㈱と大田区が官民連携で開発する、「先端」と「文化」の2つをコア産業とするまちである。羽田空港に隣接し、国内外への情報発信に優れた立地を最大限に活かし、新たな価値を創造・発信する未来志向のまちづくりを推進しており、2020年7月にまち開き、9月に本格稼働を迎えた。今年度国土交通省スマートシティモデル事業「先行モデルプロジェクト」及び総務省「データ利活用型スマートシティ推進事業」に採択されている。

(b) 3つの取組方針

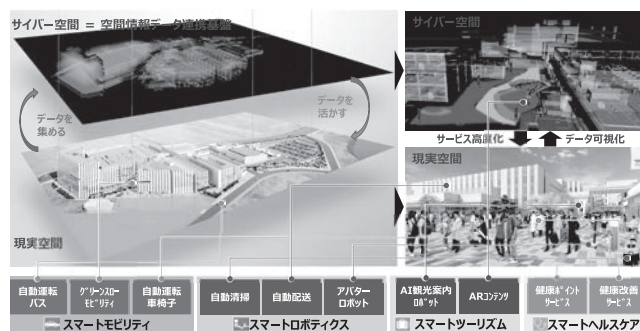
「羽田第1ゾーンスマートシティ推進協議会」は、官民連携の下、大田区が抱える多様な地域課題を解決し、持続可能な都市とするための実証的取組を行うテストベッドとしてのスマートシティを形成することを目的に、3つの方針を定めている。

①空間情報データ連携基盤の構築

BIM等の空間情報を基盤とした「3D K-Field」を活用し、データの統合・可視化・分析が可能な「空間情報データ連携基盤」を構築するとともに、先端技術の協調領域としての活用を進めている。本基盤を施設のデジタルツインとして活用し、各施設や自律走行バスの混雑状況ならびに施設管理スタッフやサービスロボットの稼働状況をリアルタイムに把握することで、来場者の満足度の向上や合理的な施設管理・運営を目指す(図一13)。

②多様な交流を生み出す仕組みづくり

協議会には現在、大田区を含む26団体が参画しており、先進的技術の実証・実装を行うと共に、本施設を先端技術の実証フィールドとして広く提供することで、多種多様な先端技術の実証・実装を本区域で行い、産業交流機会を創出していく。



図一13 空間情報データ連携基盤の活用イメージ



写真一8 実証実験の様子

③大田区が直面する課題に応える4つの取組展開

大田区が直面する課題である「交通(交通弱者への移動支援)」、「生産性向上(担い手不足)」、「観光(観光資源化)」、「健康(未病取り組み)」の解決に資する取り組みを展開し、早期のサービス実装を目指す。

(c) 取組み実績

2020年9月には38種類、計60機以上のモビリティ・ロボットの実証実験を実施し、早期実装に向けたハードやソフト面での課題を抽出した(写真一8)。

6. おわりに

本稿で報告した取組みは、いずれもまだまだ途上のものであり、進展の余地は大きい。建設業におけるDXを今後さらに深化・発展させ、我が国の建設業がより魅力ある産業へとトランスフォームすることを目指して、引き続き取り組みを強化していく所存である。

JCMA

【筆者紹介】

真下 英邦 (ましも ひでくに)
鹿島建設㈱ デジタル推進室 室長

