BIM/CIM を活用した土工事の自動施工

前田建設工業株式会社　正会員　○吉成　健吾　正会員　工藤　新一
正会員　秋田　　剛
日立建機株式会社　井村　進也　伊東　勝道
株式会社イクシス　山崎　文敬　　覃　黄毅

1．はじめに

建設業界は，技能労働者の高齢化とそれに伴う人材不足が喫緊の課題であり，安全性とともに生産性の向上に向けた取組みが不可欠となっている．これまで，建設機械の遠隔操作システムをはじめとする無人化施工技術が開発され，施工の安全性は向上している．しかし，自動化・自律化による十分な生産性向上には至っておらず，この状況を背景として，i-Construction2.0 などの取り組みが推進されている．

そこで，一人で複数台の建設機械をオペレーションでき，省人化による生産性向上を図ることを目指した．さらに，同一のシステムで他の建設機械および様々な現場シーンでも利活用できる汎用性を持った仕組み（ROS2，BIM/CIM 等に対応したシステム）を構築することを目指し，前田建設工業株式会社，日立建機株式会社，株式会社イクシスの各社で開発中のシステム（図-1）を接続し，自律型油圧ショベルを用いた自動施工技術の実証試験を行った．

2．システム概要

各システムの概要を以下に示す．①自動施工計画システム（前田建設），②自動施工管理システム（前田建設・イクシス），③自律型油圧ショベル（日立建機）を使用した．

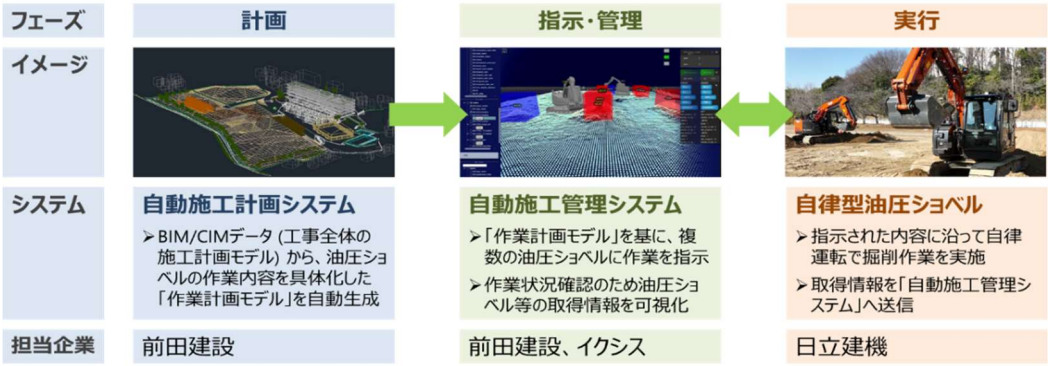


図-1　システム構成（概念図）及び各社の役割分担

(1)自動施工計画・管理システム[1)]

自動施工計画システム（図-2）は，施工計画フェーズで作成される BIM/CIM モデルを基盤として動作する．このシステムは，自動施工に必要なデータのみを自動的に抽出し，出力する機能を備えている．これにより，自律型油圧ショベルの施工指示や管理を担う「自動施工管理システム」への円滑なデータ連携が実現する．

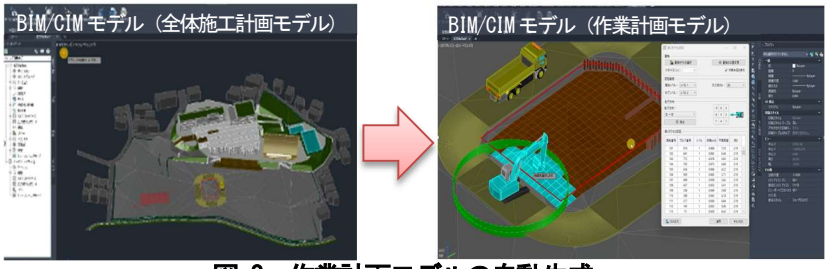


図-2　作業計画モデルの自動生成

このシステム連携の最大の利点は，工事全体の BIM/CIM 情報から，油圧ショベルの具体的な作業内容や手順を定義した「作業計画モデル」が自動生成される点にある．この自動生成プロセスにより，自動施工に必要な指示データおよび管理データの作成効率が飛躍的に向上し，計画段階から実行までのシームレスな移行を可能にする．

キーワード　建機自動化，ICT 土工，油圧ショベル，デジタルツイン，BIMCIM，施工管理
連絡先　〒102-8151　東京都千代田区富士見 2-10-2 前田建設株式会社　土木技術部　ＴＥＬ03-3265-5551

自動施工管理システム（図-3）は，「自動施工計画システム」から出力される「作業計画モデル」に基づき，複数の自律型油圧ショベルへの作業指示および管理を担うシステムである．掘削作業の進捗状況を含む施工管理の円滑化を図るため，計画上の仮想空間（サイバー空間）と実現場の現実空間（フィジカル空間）が連動するデジタルツインを導入した．

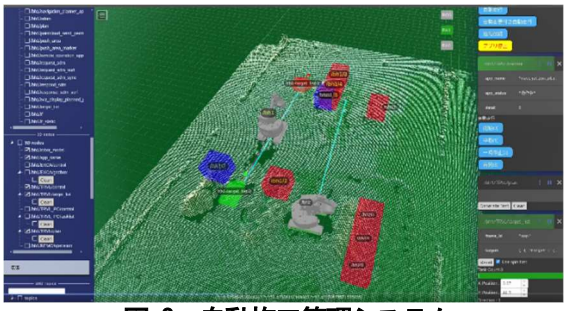


図-3　自動施工管理システム

本システムは，現場の建設機械や資機材のオブジェクトおよび掘削順序等の計画情報を 3 次元（BIM/CIM モデルおよび点群データ）で一元的かつリアルタイムにモニタへ表示し．複数台の自律型油圧ショベルに対する指示と進捗管理を一人で効率的に実施可能としている．以下にシステムの詳細な機能を示す．

さらに，遠隔操作機能を実装し，現場状況に応じた自律運転と遠隔操作間の容易な切り替えインターフェースを構築した．また，機能の拡張性を考慮し，BIM/CIM および ROS2 に対応するシステム基盤とデータフォーマットを採用した．

a）自動掘削・放土指示機能

自動掘削・放土指示機能は，掘削する領域を赤色のボクセル，放土する領域を青色のボクセルで指示する機能である．（写真-1）指示に基づき，自律油圧ショベルがバケットやアームの動きを自動で計算する．

b）自動走行指示機能

自動走行指示機能は，移動先の目標ポイントを指示する機能である．指示された目標ポイントに基づき，自律型油圧ショベルで走行に障害となる箇所を回避するルートが自動生成される．（写真-2）

c）遠隔操作機能

遠隔操作機能は，自動では掘削できないような場面でも，施工を中断することなく，遠隔と自動をシームレスに切り替えられる機能である．（写真-3）

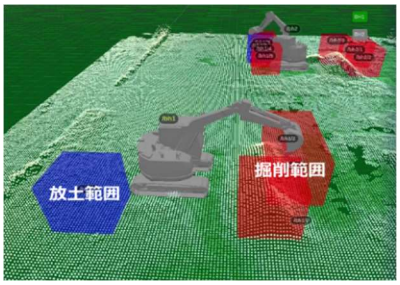


写真-1　自動掘削・放土指示機能

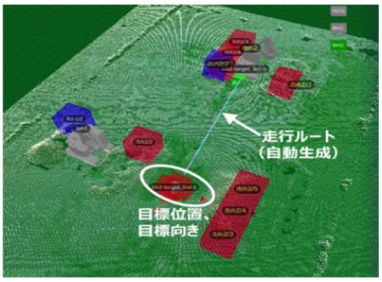


写真-2　自動走行指示機能

写真-3　遠隔操作機能

図-4　自動施工管理システムの機能

d）安全機能

また，「自動施工における安全ルール Ver. 1. 0（令和 6 年 3 月 国土交通省）」[2]（図-5）を考慮して自動施工計画・管理システムに人と建機の接触事故を防止するためのゾーニング機能と車両と建機との接触事故を防止するための「積込み位置調整機能」の 2 つの安全機能を搭載した．以下に詳細を示す．

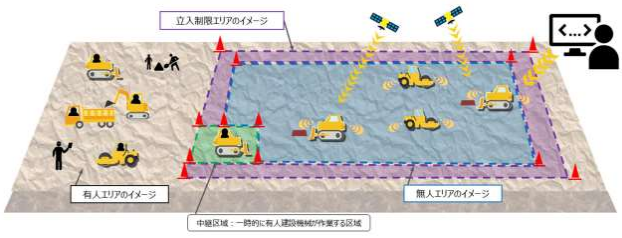


図-5　自動施工における安全ルール Ver.1.0

f）ゾーニング機能

ゾーニング機能（図-6）は，「自動施工における安全ルール Ver. 1. 0（令和 6 年 3 月 国土交通省）」に記載されているエリアの設定に基づき，無人，立入制限，中継の 3 つのエリア区分を設定できるようにシステムを構築した．

無人エリアとは自動施工を行うため，原則として作業員，建設機械オペレータ，有人建設機械など，人が立ち入らない区域のことを示す．立入制限エリアとは無人エリアの周囲に配置し，自動建設機械が予期しない動作を行った場合においても，自動建設機械がその範囲を逸脱しない区域のことを示す．中継エリアとは有人ダンプトラックによる土砂の積み下ろしなど，有人建設機械が一時的に立ち入ることを想定してエリアの境界に設定する区域のことを示す．

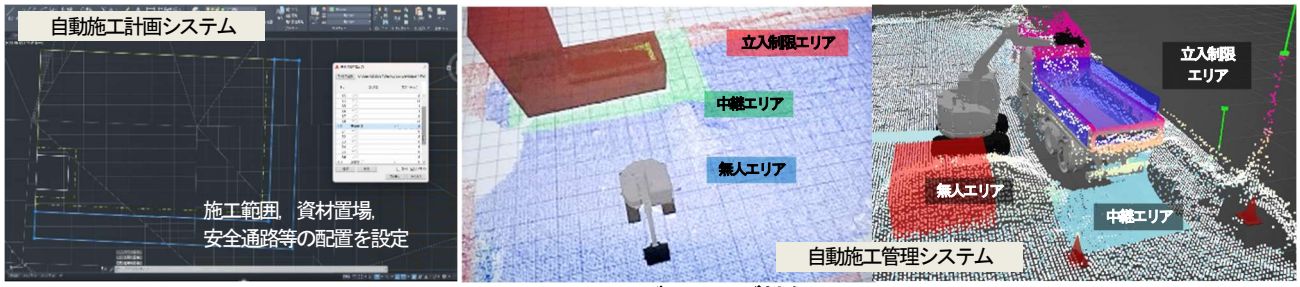


図-6 ゾーニング機能

g）積込み位置調整機能

「自動施工における安全ルール Ver. 1. 0（令和 6 年 3 月 国土交通省）」に記載されている接触防止対策に基づき，自動建設機械と有人建設機械の接触防止対策を講じる必要がある．積込み位置調整機能（図-7）は，自律型油圧ショベルの作業領域とダンプトラックの荷台の位置関係を 3 次元空間上で確認・調整できるようにシステムを構築し，事前に接触の可否を確認できる．

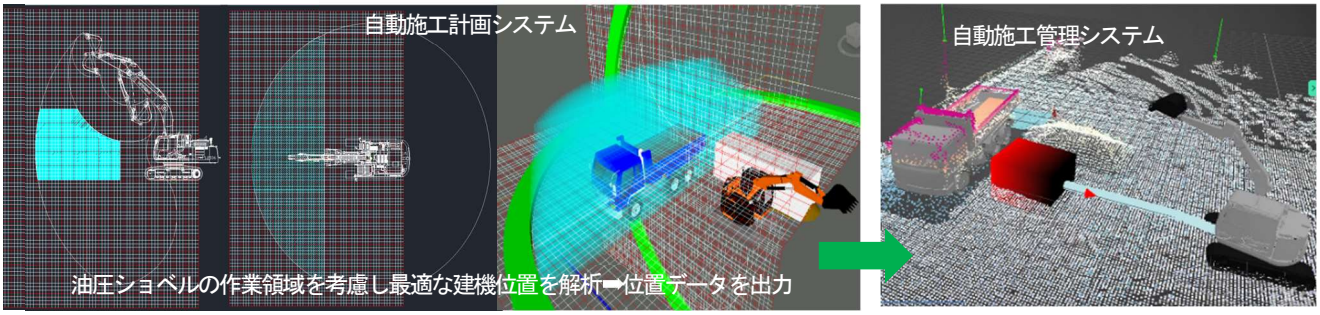


図-7 積込み位置調整機能

(2) 自律型油圧ショベル

自律型油圧ショベル（図-8）は，自動施工管理システムからの指示に従い，自律運転を行う．本機は，市販の油圧ショベルに，自律化システムと車体制御システムを付加したものである．自律化システムは，コントローラに加え，車体周囲の地形や障害物を検出する各種センサ群などによって構成される．

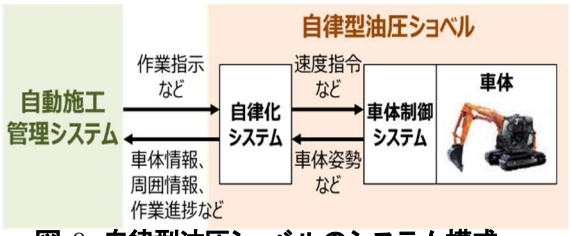


図-8 自律型油圧ショベルのシステム構成

自律化システムは，自動施工管理システムから作業指示を受領し，車体姿勢，内部情報，周囲環境情報などに基づき，最適な車体動作を決定する．決定した車体動作に基づき，油圧ショベルの各アクチュエータへ与える速度指令（目標値）を車体制御システムへ送信する．車体制御システムは，コントローラ，車体姿勢検出用センサ，および車体駆動を司る電磁弁等から構成される．同システムは，自律化システムから各アクチュエータの速度指令を受け，車体姿勢や内部情報に基づき電磁弁を制御して車体を作動させる．また，自動施工管理システムで遠隔操作が行われた際には，その操作量に応じた電磁弁制御を通じて車体を動作させる．なお，自動施工管理システムと自律型油圧ショベル間は，ROS2 プロトコルを用いた通信により，高い汎用性を確保している．

３．実証試験

実証試験では，複数台の連携検証及び各機能の実用性の検証を行った．加えて，本システムを用いてダンプ積込の自動化の検証を行った．

(1) 複数台の連携検証及び各機能の性能評価と実用性の検証[3)]

前田建設工業 ICI 総合センター（茨城県取手市）において，自動施工計画システム（前田建設），自動施工管理システム（前田建設・イクシス），自律型油圧ショベル（日立建機）を接続し，「自動掘削・放土指示機能」，「自動走行指示機能」，「遠隔操作機能」といった基幹的性能を，実証試験で検証した．加えて，「自動施工計画・管理システム」による複数台連携機能の実用性を検証した．

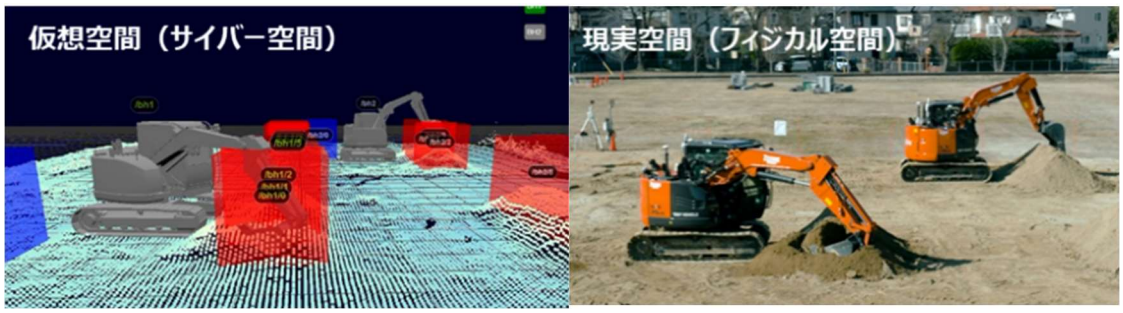


写真-4　自動施工計画・管理システムによる複数台連携

実証試験の結果，各機能が正常に動作・連携したことを確認し，BIM/CIM データから自動生成された作業計画モデルを基に，複数の油圧ショベルが指示された作業内容に沿って自律運転で掘削作業が可能であることを実証した．本実証により，２台の油圧ショベルを一人でオペレーションできることを実証し，その実用性も確認できた．

⑵ダンプ積込の自動化

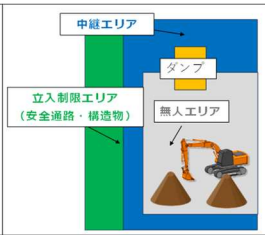
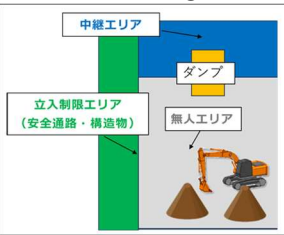
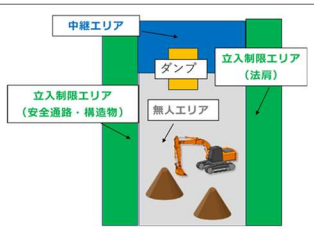
前田建設工業 ICI 総合センターにおいて同システムを使用して，土砂のダンプ積込みの自動化の実証試験を行った．実証試験は，①ダンプトラックが積込み位置に進入・停止，②自律型油圧ショベルが積込み可能な位置に走行・停止，③自動施工管理システムにて自律型油圧ショベルに積込みを指示，④自律型油圧ショベルによる自動積込み開始，⑤自動積込み完了（自動停止）の順序で行い，自動施工計画・管理システムの安全機能について検証した．

写真-6　前田建設工業 ICI 総合センターでの実証試験

なお，実際の現場を想定した実証試験を実施するため，17 件の現場シーンを抽出して，各エリアの位置関係を分類・整理した（表-1）．エリアの配置は，大きく以下の３つのパターンに分類できる．

- パターン①：無人エリアが立入制限エリアと隣接しない
- パターン②：無人エリアが立入制限エリアと隣接する
- パターン③：無人エリアが複数の立入制限エリアと隣接する

表-1 エリア配置・レイアウトの分類

	パターン①	パターン②	パターン③
概要図（例）			
隣接エリア（構造物・安全通路）	なし	あり	あり
重機旋回制限有無	なし（開放地）	あり	あり（法肩側は旋回可能）
現場	ダム（土捨場）、大型造成など	トンネル、営業線近接（鉄道・道路）など	ダム（堤体掘削）、大型造成（法面整形）など
現場数	4	10	3

今回は，現場シーンの中で最も多くみられるパターン②を選定し，実証試験フィールドを整備した．
実証試験においては，ゾーニング機能により，人と自律型油圧ショベルの位置関係とともに無人・立入制限・中継・干渉エリアが3次元空間上に明示され，人や建機がエリアを逸脱していないかどうかを確認しやすいことと，積込み位置調整機能により，自律型油圧ショベルの最大作業領域が3次元空間上で明示され，旋回時の衝突や足回りの接触などを事前に確認・シミュレーションできたことから，本機能は自律型油圧ショベルによるダンプ積込み作業の安全管理に寄与することを確認した．

4．おわりに

今回の実証試験により，自律型油圧ショベルを用いた施工の計画から指示・管理，実行に至る一連のシステム連携が検証され，ROS2，BIM/CIM，3 次元点群データ等の要素がシステム間で円滑に交換可能である汎用機能の実用性を確認した．また，自律型油圧ショベルによるダンプトラックへの土砂の積込み作業において，自動施工計画・管理システムに搭載した安全機能（試用版）が正常に機能し，施工の安全管理に寄与することが確認できた．

今後の展望として，本技術の適用範囲を油圧ショベルに限定せず，運搬，敷き均し，締固めといった他の自動・自律型建設機械へ拡大する計画である．これにより，土木・建築分野における山留め掘削，トンネル・シールド工事でのずり・土砂搬出，ダム・道路造成，さらには災害現場など，多岐にわたる施工現場において一層の生産性向上が期待される．

【参考文献】

1)秋田 剛，井村 進也，山崎 文敬：BIM/CIM を活用した土工事の自動施工『自動施工計画・管理システム』
令和6年度 建設施工と建設機械シンポジウム, pp. 157-158
2)自動施工における安全ルール Ver. 1. 0（令和6年3月 国土交通省）https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/cont
3)水谷 和彦，工藤 新一，吉成 健吾，孟 凡淞： 油圧ショベルの自律運転を可能にする「自動施工計画・管理システム」の開発，第79回土木学会年次学術講演会講演集, VI-109, 2024.