

自動化リジッドダンプおよび施工管理支援基盤システムを用いた 土砂運搬作業のオートメーション化の実証

大成建設株式会社

○ 市川 裕駿
遠藤 亮雄
田村 道生

1. はじめに

建設業界は少子高齢化の影響を強く受けしており、生産年齢人口の減少に加え、「きつい・汚い・危険」という3Kのイメージから若年層の参入が減少し、就業者の高齢化が進んでいる。近い将来には高齢者の大量退職が予想され、担い手不足は一層深刻化する見込みである。このため建設業界では、労働環境の改善と作業員一人当たりの生産性向上が急務となっている。

これに対応するため、国土交通省は2016年に「i-Construction」、さらに2024年にはこれを発展させた「i-Construction 2.0」を発表し、2040年度までに建設現場の省人化を少なくとも3割、すなわち生産性を1.5倍に向上させることを目標に、「施工・データ連携・施工管理」の各段階におけるオートメーション化が掲げられた。¹⁾

このような社会的・政策的背景を踏まえ、当社では自動運転・遠隔操作が可能な建設機械「T-iROBO」シリーズおよび施工中に取得する膨大なデジタルデータを活用して施工管理業務を支援する基盤システム「T-iDigital Field」の開発と実証を進めてきた²⁾³⁾。本論文では、自動運転リジッドダンプ「T-iROBO Rigid Dump」と「T-iDigital Field」を組み合わせ、「i-Construction 2.0」が提唱する3本の柱、「施工のオートメーション化」、「データ連携のオートメーション化」、「施工管理のオートメーション化」を実際の建設現場において適用・実証した事例について、その技術概要、実証内容および結果を報告する。特に、事故防止策や安全運用体制といった安全面での実証結果に焦点を当てる。

2. 技術概要

2.1 T-iROBO Rigid Dump

T-iROBO Rigid Dumpは、小松製作所製HD465をベースに電制化改造を施した自動化リジッドダンプである。その外観を図-1に示す。機体には制御

用PCを中心に、自己位置認識用のRTK-GNSS方位計、周囲を検知するLiDARや車載カメラ、外部通信用の無線装置、非常停止用の受信機などが搭載されている。

図-2に自動運転システムの構成を示す。制御用PCに搭載されたソフトウェアは走行計画に従って各コントローラを制御し、ダンプトラックを動作させる。走行計画は、あらかじめ有人走行で取得した経路・速度データを基に走行する「経路走行」、積込機械や排土位置の座標情報を利用して接近経路を自動生成する「接近走行」、ホーンを鳴らす「合図」やダンプアップ・ダウンを行う「排土動作」を組み合わせて構築される。これにより、多様な作業に柔軟に対応できる。加えて、車速や操舵角をセンサで常時監視し、誤差を逐次補正するフィードバック制御によって安定した自動運転を実現している。制御用PCへは遠隔でのアクセスが可能であり、設定変更や走行開始・停止の指示をすることができる。さらに、遠隔操作モードに切り替えることで、ゲームコントローラを用いて前進・後退や排土操作を行うこともできる。

図-3に安全対策の概要を示す。本システムでは以下の4重の安全対策を講じることで、高い安全



図-1 T-iROBO Rigid Dump の外観

性を実現している。

(1) 障害物検知による停止

機体の前方・後方に緊急停止エリア、減速エリアが設定されており、機体の前後に取り付けた LiDAR センサによって走路上の障害物の場所を検出し、エリアに応じて減速・停止を行う。

(2) 機器・センサ異常による停止

機体に搭載された機器やセンサの故障やケーブルの接続不良、GNSS の測位精度低下や制御室との通信途絶などが発生した場合、これらの異常を即座に検知し、機体の走行を自動的に停止させる。

(3) 逸走による停止

機体が設定された走行経路から逸脱した場合には自動で停止する。

(4) 遠隔非常停止

万が一制御が効かなくなった場合に備えて、遠隔非常停止装置を搭載している。操作者や監視者が保持している携帯型の非常停止ボタンを押下することで、強制的に走行を停止させることができる。このシステムは電波の混信を防ぐ目的で、自動運転の通信システムとは異なる周波数帯を使用している。また、機能安全の考え方に基づいて、非常停止装置の送信機と受信機は常時接続確認を行っており、通信が途絶えた場合にも自動運転を停止することで、ボタンを押下しても停止信号が届かず、停止しない等のリスクを排除している。

2.2 T-iDigital Field

T-iDigital Field は CPS (Cyber Physical Systems) の概念に基づき、建設現場に点在するヒト・モノ・コトのデータをクラウド上に集積・統合する現場

管理システムである。

図-4 に本システムの概要を示す。本システムはデータ層、基盤クラウド層、アプリケーション層の三層から成る。データ層では、IoT 端末やビーコン、

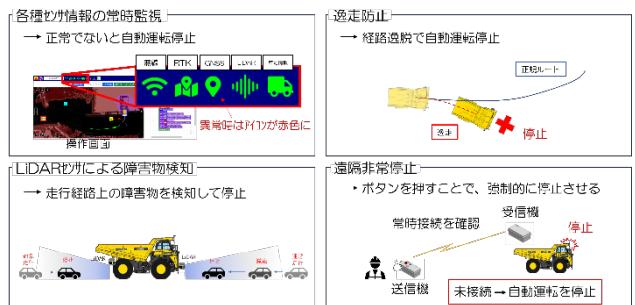


図-3 T-iROBO Rigid Dump の安全対策

センサによって現場のヒト・モノ・コトの情報を取

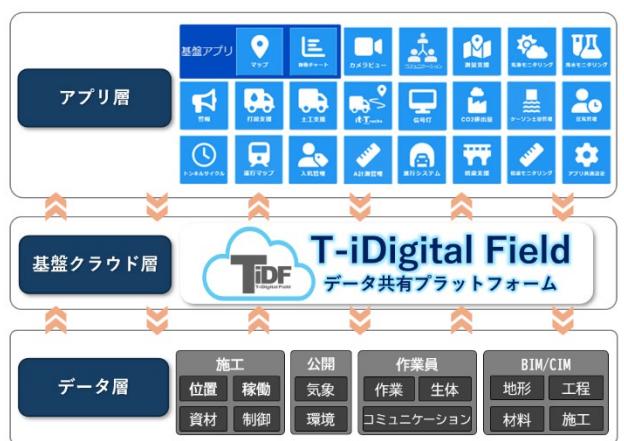


図-4 T-iDigital Field のシステム構成

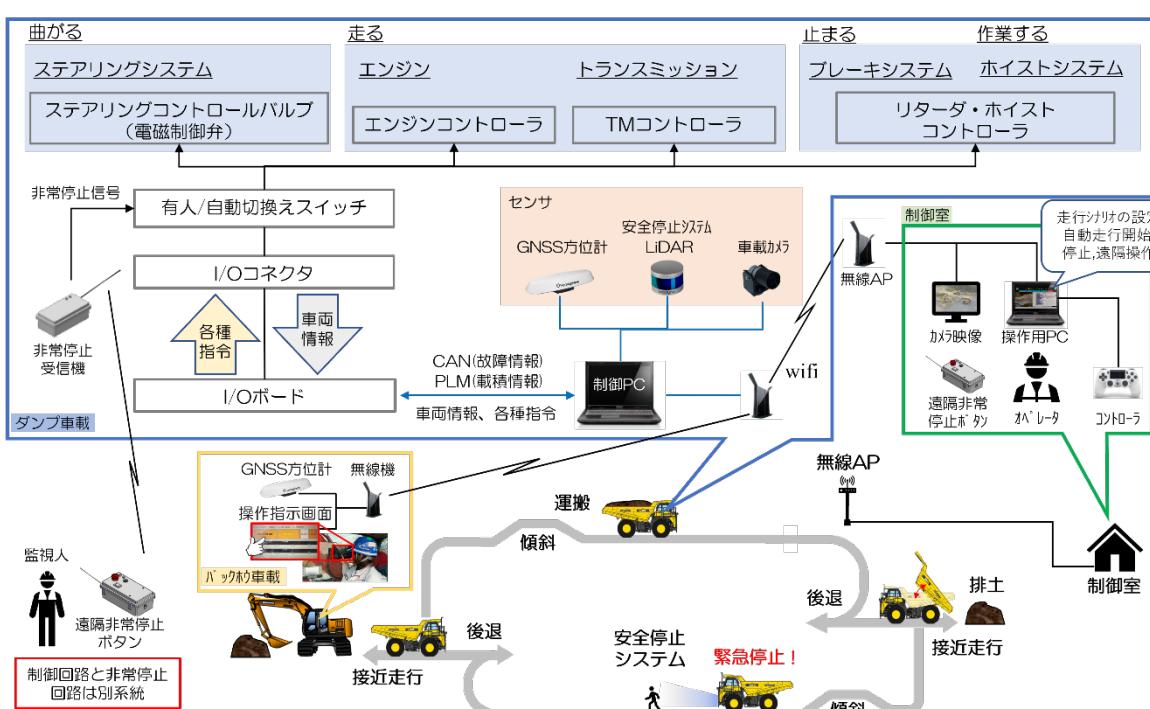


図-2 T-iROBO Rigid Dump のシステム構成

得し、基盤クラウド層ではそれをクラウド上に一元化・整理する。アプリケーション層では、基盤クラウドに集約したデータを抽出・加工し、ユーザが直感的に利用できる形で提供する。2025年6月現在、各工種に対応した37種類のアプリケーションが提供されており、インターネットブラウザ経由で現場の情報をいつでもどこでも閲覧できる。

今回の実証では、T-iDigital Field が提供する以下のアプリケーションを主に活用した。

(1) マップアプリケーション

建設機械と人の位置情報を地図上に表示し、工事現場のどこで、だれが・どの建設機械が稼働しているかを可視化できる。これらの情報は現場全体の稼働状況を一目で把握するための基盤となるものであり、他のアプリケーションでも活用される。

(2) 土工支援アプリケーション

土運搬作業全般のサイクルを自動的に記録し、運搬量や運搬効率、実運搬距離などを逐次データ化して施工の進捗を可視化する。従来手作業で行っていた運行記録や出来高集計をデジタル化することで、日々の作業管理を効率化する。また、計画値と実績値を比較し、作業改善に資する情報を提供する。

(3) 軌跡アプリケーション

建設機械の走行経路や待機位置をリアルタイムに記録・表示し、その軌跡をわかりやすく可視化する。土工支援アプリケーションと併用することで、施工の平滑化や効率的な運行計画の立案に役立てる。

(4) 警報アプリケーション

現場の安全管理を支援する機能を持ち、作業員の立入禁止区域への侵入や重機との接近、重機の速度超過、エリア逸脱を検知すると、マップアプリケーション上に警報を視覚的に表示するとともに、メールで通知することができる。

3. 実証内容

3.1 概要

本実証は、成瀬ダム原石山採取工事（秋田県東成瀬村）において、ダム用骨材を運搬する作業を対象に、無人化施工を実施した。実証期間は2024年5月から6月の約2か月間であり、国土交通省が提唱する「i-Construction 2.0」の3つの柱「施工のオートメーション化」、「データ連携のオートメーション化」、「施工管理のオートメーション化」の実現、および「自動施工における安全ルール Ver.1.0」の実現を目指して実施した。

3.2 作業内容

i-Construction 2.0における3つのオートメーション化の適用状況を図-5に示す。

図-6に作業の概要を示す。作業は遠隔操作バッ

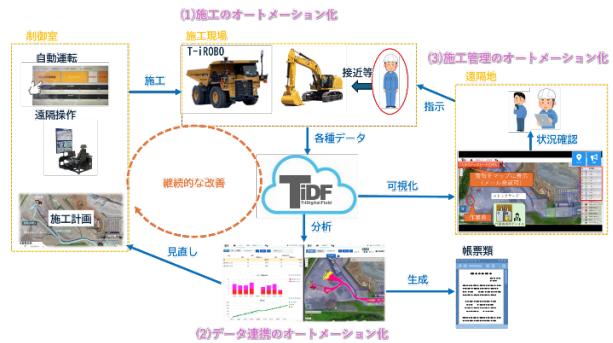


図-5 3つのオートメーション化の適用状況



図-6 骨材運搬作業の全体概要

クホウ1台とT-iROBO Rigid Dump 2台を組み合わせ、遠隔操作バックホウのオペレータ1名と自動運転ダンプトラックのオペレータ1名の計2名体制でストックヤードでの積込から運搬・プラントへの投入ホッパーでの排土までの一連を無人で完結させた。

片道の運搬距離は約250mで、積込場で積み込んだ骨材原石を自動走行で運搬し、ホッパーへ投入した後、積込場付近まで戻り、バックホウの位置情報を基にした接近走行で積込地点に進入するサイクルを繰り返した。

リジッドダンプのすれ違いが困難な狭隘部やホッパー前では自動運転を一時停止し、安全確認後に制御室のオペレータが再開操作を行った。これにより、2台の自動運転ダンプトラックを滞りなく交互に運行させた。すれ違いのための待機時間はT-iDigital Fieldによって可視化を行い、走行経路の最適化に活用した。

上流展望台には機械の制御室や無線基地局、監視カメラを設置し、図-7に示す制御室内からバックホウの遠隔操作や自動運転ダンプトラックの設定・操作・状態監視を行った。

T-iROBO Rigid Dumpによる骨材原石の運搬量、運搬効率、実運搬距離はT-iDigital Fieldによってデジタルデータ化し、リアルタイムにクラウド上に集約、自動解析を実施し、ブラウザ上で容易に確認ができるようにした。蓄積した作業データは客観

的な検証・評価に利用し、作業の見直しに活用した。

3.3 安全対策

「自動施工における安全ルール Ver.1.0」では自動施工を行うため、人が立ち入らない「無人エリア」、無人エリアの周囲に配置し、自動建設機械が予期せぬ動作をした場合に機械がその範囲を逸脱しないための「立ち入り制限エリア」、有人建設機械が施工を行うための「有人エリア」が定義されており、自動・遠隔建設機械と有人建設機械が混在して作業を行わないように定めている⁴⁾。本実証では、「自動施工における安全ルール Ver.1.0」を参考に、夜間作業時間帯に運搬エリアを無人化専用エリアとして設定した。これにより、重機のみが稼働し、人が立ち入らない安全な環境を確保した。また、無人化専用エリアに作業員が立ち入る際には非常停止スイッチを動作させるようにした。

制御室には非常停止スイッチを1台、リジッドダンプ2台にそれぞれ受信機を設置し、万が一の際にはリジッドダンプ2台を即時かつ一斉に緊急停止できる体制を整えた。加えて、図-8のようにT-iDigital Fieldのマップアプリケーションによって、建設機械・作業員の位置・ストックヤードのエリアをマップ上に可視化し、警報アプリケーションによって作業員がストックヤードに立ち入った際、遠隔操作バックホウおよび自動化リジッドダンプに接近した際にはマップ左上にその旨を示す警報を表示し、制御室のオペレータにメールで発報した。この画面は制御室のモニタに表示しリアルタイムに確認できるようにした。

4. 実証結果

試行期間中に988回の運搬を行い、合計47,217.8トンの骨材原石を無事故で運搬した。自動化リジッドダンプのセンサ異常検知は正常に機能し、非常停止装置も確実に作動する状態で待機していたが、トラブル対応のためにエリアに立ち入る際を除いて作動させる場面はなく、重大なトラブルは発生しなかった。また、従来の監視カメラによる目視での施工エリアの確認に加え、T-iDigital Fieldによる施工エリアの常時監視によって、バックホウの遠隔操作と自動化リジッドダンプによる作業中に作業員が現場に侵入していないことが確認できた。加えて始業前点検や、施工中のトラブル対応後に無人化専用エリアから確実に退出したことを制御室から確認する手段として活用できた。

5. まとめ

自動化リジッドダンプ「T-iROBO Rigid Dump」と施工管理支援システム「T-iDigital Field」を組み合わせ、成瀬ダム原石山採取工事において、「i-Construction 2.0」が提唱する3本の柱、「施工の才



図-7 制御室内の状況



図-8 マップアプリケーションによる立ち入りの確認

ートメーション化」、「データ連携のオートメーション化」、「施工管理のオートメーション化」を小規模ながら実証した。結果、T-iROBO Rigid Dumpの非常停止システム、T-iDigital Fieldによるエリア監視によって無人化専用エリアの安全性向上を確認できた。

今回の実証では施工エリアを完全無人としたため、有人機械の競合は生じなかった。一方で将来的には自動化機械と非自動化機械が混在する現場も想定される。その際には有人機械に自動化機械の緊急停止装置を常備することや、「T-iDigital Field」による施工エリアの監視が重要になると考えられる。

今後は本実証で得た知見を踏まえ、「T-iROBO」シリーズと「T-iDigital Field」の連携を進め、生産性・安全性の高い建設現場の構築と共に、「i-Construction 2.0」の実現に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省：i-Construction 2.0～建設現場のオートメーション化～,
<https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001738240.pdf>, 2024
- 2) 遠藤亮雄, 青木浩章：55t級ダンプトラックHD465を用いた自動化リジットダンプの開発, 土木学会第77回年次学術講演会, VI-354, 2022
- 3) 片山 三郎・石井 喬之・三谷 一貴・宮本 真吾・千葉 勇也：現場管理システム「T-iDigital® Field」の開発, 大成建設技術センター報, 第56号, 46, 2023
- 4) 国土交通省：自動施工における安全ルール Ver.1.0,
<https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001730920.pdf>, 2024